

LICHTGEDANKEN

Das Forschungsmagazin

09

INTERVIEW NICHTLINEARE OPTIK AUF ATOMAREN SKALEN

INNOVATION SPASER – DIE KLEINSTE LASER DER WELT

DURCHBRUCH DIE WICHTIGSTE PUBLIKATION DES JAHRES



FRIEDRICH-SCHILLER-
UNIVERSITÄT
JENA

DAS LEUCHTEN DER ATOME



ONLINE- HOCHSCHULINFOTAGE

17. bis 31. Mai 2021



Wie bewerbe ich mich? Wie finanziere ich mein Studium?
Kann ich während des Studiums auch ins Ausland gehen?
Was kann ich überhaupt alles in Jena studieren?
Und wie finde ich das passende Fach für mich?

Ein vielseitiges Online-Programm gibt an den Hochschulinformationstagen einen Einblick ins Studium an der Friedrich-Schiller-Universität Jena. Mit abwechslungsreichen Live-Events und digitalen Angeboten können sich Studieninteressierte über das Studienangebot, alle Serviceangebote und den Campus informieren.

DIE UNI JENA VIRTUELL ERLEBEN

- digitaler Ausstellungsraum mit zahlreichen Ständen
- Beratung zu Studiengängen und Auslandsstudium
- Chats und Videochats mit Lehrenden und Studierenden
- Live Online-Vorträge
- Kurze Erklärvideos
- 360-Grad-Campus Touren (mit Botanischem Garten) und Fotogalerien
- umfangreicher Download-Bereich mit Info-Materialien und weiterführenden Links



www.uni-jena.de/infotage



Dr. Ute Schönfelder, Redakteurin
 Abteilung Hochschulkommunikation
 der Friedrich-Schiller-Universität Jena
 Foto: Anne Günther

Lichtblicke in Krisenzeiten

Das Jahr 2021 hat begonnen, wie 2020 aufgehört hat: mit Corona. Und auch wir kommen in der nun vorliegenden neunten Ausgabe der LICHTGEDANKEN an Corona nicht vorbei. Seit gut einem Jahr hat die Pandemie die Welt im Griff, nahezu alle Lebensbereiche sind von Einschränkungen betroffen, auch an den Universitäten ist die Krise tagtäglich zu spüren. Doch trotz oder gerade wegen der Ausnahmesituation gibt es nach dem zweiten »Corona-Semester« auch Lichtblicke in Forschung und Lehre: In der LICHTGEDANKEN-Umfrage berichten Forschende unserer Universität, wie sie die Krise als durchaus produktiv erleben, wie sie zu neuen Ideen und neuen Formen des Austauschs und der Zusammenarbeit finden und welche Erfahrungen sie für die Zeit nach der Krise mitnehmen (Seiten 38 bis 41).

»Lichtblicken« ganz im Wortsinne widmet sich auch unser Schwerpunkt »Das Leuchten der Atome«: Optik-Forschung und -Entwicklung haben Tradition in der Lichtstadt Jena, wo Carl Zeiß einst die Mikroskopie revolutionierte und Ernst Abbe die Grenze des mikroskopisch Sichtbaren berechnete. Heute sind diese Auflösungsgrenzen längst überschritten und auch in einer ihrer neuesten Teildisziplinen – der nichtlinearen Optik –, um die es in diesen LICHTGEDANKEN geht, spielen Jena und seine Universität eine wichtige Rolle: Hier ging 1962 der erste Laser in Deutschland in Betrieb (Seite 12), hier wurde der erste Professor für nichtlineare Optik berufen und 2020 gelang einem Team mit Jenaer Beteiligung der international gefeierte »Physik-Durchbruch des Jahres« (Seite 36), mit möglichen Anwendungen in der nichtlinearen Optik.

Mit unserem Schwerpunkt »Das Leuchten der Atome« schauen wir in eine faszinierende Welt der Extreme:

Laserlicht gigantischer Intensität – etwa vom Milliardenfachen der Sonnenintensität – wird auf winzigste Materialstrukturen konzentriert, was die Materieteilchen selbst zum Leuchten bringt. Unter diesen Extrembedingungen gelten nicht mehr nur die Regeln der klassischen Optik. Es treten neue Phänomene auf und Licht mit neuen Eigenschaften entsteht. Was sich im Detail bei diesen Vorgängen abspielt, das untersuchen Forschungsteams der Universität im Sonderforschungsbereich (SFB) »Nichtlineare Optik auf atomaren Skalen« (NOA), den wir in dieser Ausgabe der LICHTGEDANKEN vorstellen. Wir schauen in Labore, in denen – mit Abstand und Maske – Laser bedient, Lichteffekte an Nanomaterialien und -strukturen gemessen, berechnet und modelliert werden. Vieles braucht noch ein theoretisches Fundament, um überhaupt verstanden und eingeordnet werden zu können, wie die beiden Sprecher des SFB, Prof. Dr. Ulf Peschel und Prof. Dr. Stefanie Gräfe, im Interview berichten (Seiten 14 bis 16); anderes gehört bereits zum Alltag und wird uns in die Zukunft begleiten.

Ich wünsche Ihnen jede Menge erhellende Momente bei der Lektüre unseres Forschungsmagazins und freue mich über Ihr Feedback, Anregungen oder Kritik. Sie erreichen das Redaktionsteam und mich unter: presse@uni-jena.de.

Bleiben Sie gesund und wissensdurstig!

Jena, im März 2021

HERAUSGEBER:

Abteilung Hochschulkommunikation/Bereich Presse und Information im Auftrag des Präsidenten der Friedrich-Schiller-Universität Jena

REDAKTION UND GESTALTUNG:

Dr. Ute Schönfelder, Vivien Busse, Stephan Laudien, Axel Burchardt (v.i.S.d.P.), Liana Franke, Kai Friedrich, Monika Paschwitz (Redaktionsassistentin) und Kerstin Apel (Sekretariat)

GRAFISCHES KONZEPT: Timespin – Digital Communication GmbH, Sophienstraße 1, 07743 Jena

ANSCHRIFT:

Friedrich-Schiller-Universität Jena
 Fürstengraben 1, 07743 Jena
 Telefon: 03641 9 - 401400

E-Mail: presse@uni-jena.de

GESAMTHERSTELLUNG:

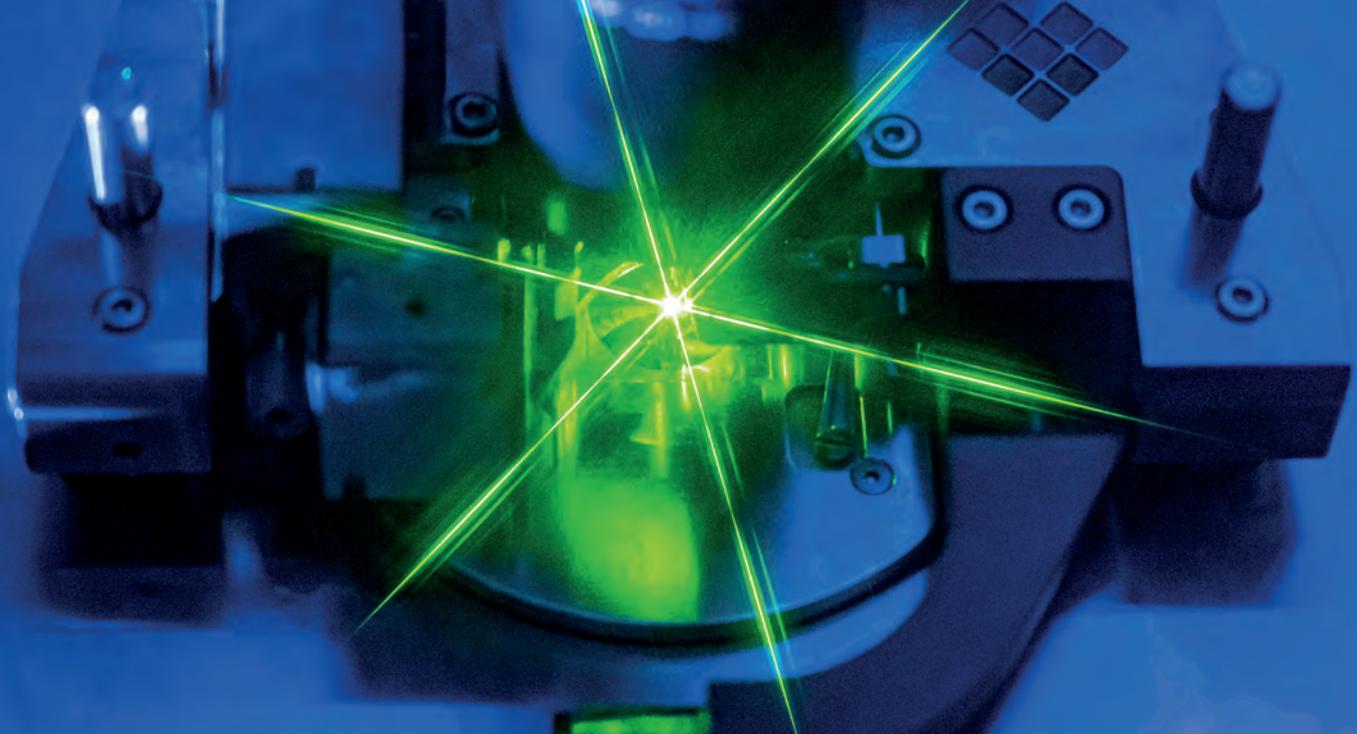
Druckhaus Gera GmbH, Jacob-A.-Morand-Straße 16, 07552 Gera

INTERNET: www.uni-jena.de/lichtgedanken

ISSN: 2510-3849

ERSCHEINUNGSDATUM: März 2021

Nachdruck nur mit Genehmigung gestattet. Für unverlangt eingesandte Manuskripte, Fotos u. Ä. wird keine Haftung übernommen. Namentlich gekennzeichnete Artikel müssen nicht mit den Auffassungen des Herausgebers und der Redaktion übereinstimmen. Für den Inhalt sind die Unterzeichner verantwortlich. Zur besseren Lesbarkeit haben wir in den Texten teilweise nur die männliche Sprachform verwendet. Mit den gewählten Formulierungen sind jedoch alle Geschlechter gleichermaßen angesprochen.



SCHWERPUNKT

Das Leuchten der Atome

- 10 OHNE MATERIE KEIN LICHT**
Was ist eigentlich nichtlineare Optik?
- 12 DIE ÄLTESTE DISZIPLIN DER PHYSIK**
Meilensteine der Optik.
- 14 PHYSIKALISCHE GRENZEN SIND NICHT DAS LIMIT**
Warum wissenschaftliche Erkenntnis ein theoretisches Fundament braucht.
- 17 ULTIMATIV DÜNN: HALBLEITER AUS EINER ATOMLAGE**
2D-Materialien mit optischen Nanoantennen werden maßgeschneidert.
- 20 WENN LICHT UND ELEKTRONEN GEMEINSAM LEUCHTEN**
»Spaser« sind die kleinsten Laser der Welt.
- 22 SERIENBILDFOTOGRAPHIE IN NANOMATERIALIEN**
Wie sich in winzig kleinen Halbleitern extrem schnelle Vorgänge beobachten lassen.
- 24 CHEMISCHE REAKTIONEN IN GROSSAUFNAHME**
Wenn spektroskopische Signale zu schwach sind, können nichtlineare Effekte diese verstärken.
- 27 SPITZENFORSCHUNG MIT NANOLEUCHTEN**
Extrem dünne Metallspitzen und optische Fasern analysieren feinste Strukturen.
- 30 JENA AUF DEM WEG ZUM QUANTUM VALLEY**
Wie sich die Stadt und die Region in der Quantentechnologie positionieren.
- 32 OPTISCHE HARMONIELEHRE**
Dank hoher harmonischer Schwingungen lässt sich das Innere von Plasmen erforschen.
- 34 GESCHÄRFTER BLICK INS INNERE VON HALBLEITERN**
Mit kohärentem kurzweiligen UV-Licht lassen sich zerstörungsfrei Materialien durchleuchten.
- 36 PHYSIK-DURCHBRUCH DES JAHRES**
Jenaer Forschungsteam ebnet den Weg zum Siliziumlaser.

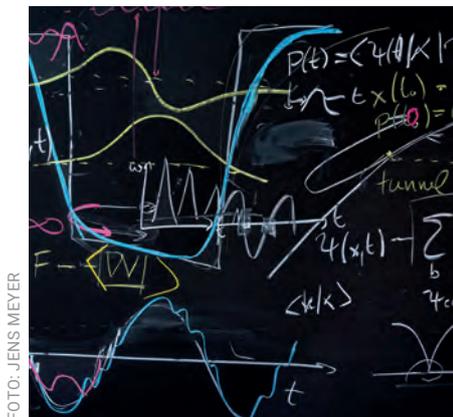


FOTO: JENS MEYER

14 | INTERVIEW
NICHTLINEARE OPTIK AUF ATOMAREN SKALEN

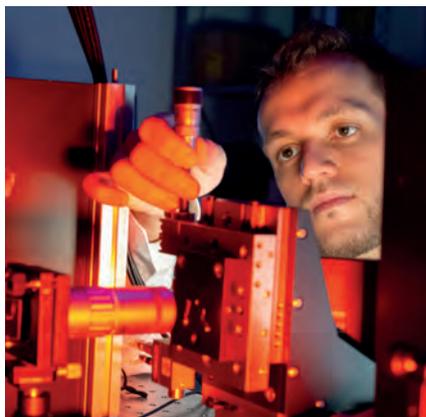


FOTO: JENS MEYER

20 | INNOVATION
SPASER – DIE KLEINSTEN LASER DER WELT

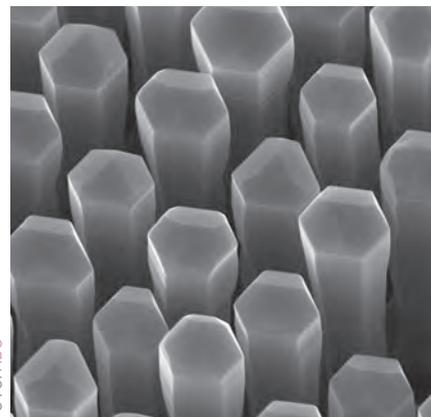


FOTO: ABC

36 | DURCHBRUCH
DIE WICHTIGSTE PUBLIKATION DES JAHRES



FOTO: JENS MEYER

38 | UMFRAGE
WIE HAT CORONA DIE WISSENSCHAFT VERÄNDERT?



FOTO: OLIVER KRÜGER

46 | METASTUDIE
HUNGER MACHT DRAUFGÄNGERISCH



FOTO: JENS MEYER

58 | PORTRÄT
HOCH HINAUS, ABER NICHT ABGEBOBEN

NACHRICHTEN

06 | Aktuelles aus dem Uni-Alltag

SCHWERPUNKT

08 | Das Leuchten der Atome

GEDANKENAUSTAUSCH

38 | Wie hat das Krisenjahr 2020 die Wissenschaft verändert?

WISSENSCHAFTSFOTO

42 | Fischlarve hilft bei der Altersforschung

TICKER

44 | Forschung kurz und knapp

THEMEN

46 | Hunger macht draufgängerisch

48 | Suchmaschine für Stoffwechsell-moleküle

50 | Das Beste aus zwei Materialwelten

52 | Nanostrukturen gegen Blutgerinnsel

NACHGEDACHT

54 | Konjunkturpakete für Arten- und Klimaschutz

NEUE PROJEKTE

56 | Kooperationen und Förderungen

PORTRÄT

58 | Hoch hinaus, aber nicht abgehoben

HINTER DEN KULISSEN

60 | Einmal Strahlzeit, bitte!

DAS KALENDERBLATT

62 | Die »Weltseelex« in Jena



FOTO: ANNE GÜNTHER

Mit Diskretisierung zu neuen Algorithmen

»Starting Grant« des ERC für Jenaer Mathematiker

Pionierarbeit in der Wissenschaft leisten und Antworten auf Zukunftsfragen finden – bei dieser Aufgabe unterstützt der European Research Council (ERC) jährlich junge Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler mit dem ERC Starting Grant. Dieser stellt bis zu 1,5 Millionen Euro für die Arbeit einer eigenen Forschungsgruppe zur Verfügung. Fünf Jahre lang können die Ausgezeichneten so einer innovativen Projektidee folgen. Eine solche Förderung hat 2020 Prof. Dr. Dietmar Gallistl (Foto oben) von der Universität Jena erhalten. Der Mathematiker möchte im Rahmen seines Projektes »Discretization and adaptive approximation of fully nonlinear equations« (DAFNE) neue numerische Verfahren für eine Klasse von Differentialgleichungen ergründen, um so ihr Potenzial für mögliche Anwendungen zu erweitern.

Dietmar Gallistl ergründet in den kommenden Jahren, wie sich die sogenannte Finite-Elemente-Methode auf die Klasse der voll nichtlinearen Gleichungen anwenden lässt. Die finite-Elemente-Methode ist ein Verfahren der Diskretisierung, einem mathematischen Prozess, bei dem man sich der Lösung einer Gleichung schrittweise nähert. Dafür wird beispielsweise ein zu berechnender Körper in viele kleine Elemente aufgeteilt. »Die Methode kommt häufig in den Ingenieurwissenschaften zum Einsatz, etwa zur Berechnung der Verformung elastischer Festkörper«, erläutert Gallistl. sh

Die »Darm-Hirn-Achse« erforschen

Verdauungs- und Denkorgan des Menschen sind eng verbunden: So spielt das Mikrobiom bei psychischen und neurodegenerativen Erkrankungen sowie für die Lernfähigkeit des Gehirns eine wichtige Rolle. Das neue Forschungsnetzwerk »SmartAge« unter Leitung von Prof. Dr. Otto W. Witte vom Universitätsklinikum Jena will diesen Zusammenhang genauer untersuchen. Das interdisziplinäre Team vereint Expertinnen und Experten aus zehn europäischen Ländern, die gemeinsam 15 Nachwuchsforschende betreuen. Das Netzwerk wird mit knapp vier Millionen Euro aus dem EU-Förderprogramm Horizon 2020 unterstützt. vdG

Graduiertenkolleg zum Altern geht weiter

Das Graduiertenkolleg »ProMoAge« wird um weitere vier Jahre verlängert. Die Deutsche Forschungsgemeinschaft finanziert das Kolleg mit weiteren rund 5,5 Millionen Euro. Beteiligt sind die Universität Halle-Wittenberg, die Universität Jena, die Universitätskliniken Halle und Jena und das Leibniz-Institut für Alternsforschung Jena (Fritz-Lipmann-Institut).

Es werden 14 naturwissenschaftliche Projekte und sechs medizinische Pro-

motionen gefördert. Hauptziel von »ProMoAge« ist die Erforschung von sogenannten posttranslationalen Proteinmodifikationen zellulärer Proteine als ein Schlüsselmechanismus des Alterns und deren Einfluss auf alternsrelevante Signalproteine und epigenetische und transkriptionelle Regulationsprozesse. Kenntnisse darüber können dazu beitragen, den Gesundheitszustand älterer Menschen zu verbessern. vdG

Expertenkommission legt Jahresgutachten vor

Die seit gut einem Jahr andauernde Corona-Krise hat Wissenschaft und Innovationskraft Deutschlands erheblich beeinträchtigt. Zu diesem Schluss kommt die Expertenkommission Forschung und Innovation (EFI), die am 24. Februar 2021 ihr Jahresgutachten an Bundeskanzlerin Angela Merkel überreicht hat. Das Gremium unter seinem Vorsitzenden, dem Wirtschaftswissenschaftler Prof. Dr. Uwe Cantner von der Universität Jena, traf mit der Kanzlerin in einem Videochat zusammen.

In ihrem Gutachten stellt die Kommission fest: Unternehmen jeder Größe sind von deutlichen Umsatzeinbußen betroffen und können weniger in Vorhaben im Bereich Forschung und Innovation investieren. Auch das Wissenschaftssystem leide unter Einschränkungen, deren Auswirkungen sich in den Forschungsleistungen niederschlagen. PM

Virtuelle Übergabe: EFI-Vorsitzender Prof. Dr. Uwe Cantner und stellvertretende Vorsitzende Prof. Dr. Katharina Hölzle präsentieren Bundeskanzlerin Dr. Angela Merkel und Forschungsministerin Anja Karliczek das Jahresgutachten 2020. · Foto: David Ausserhofer





Nachhaltig, doch mit offener Eigentumsfrage:
Windenergie. · Foto: Jan-Peter Kasper

Wem gehört der Wind?

Neuer Sonderforschungsbereich/Transregio der Universitäten Jena und Erfurt untersucht den Strukturwandel des Eigentums.

Die Deutsche Forschungsgemeinschaft fördert ein neues Thüringer Großprojekt: Der Sonderforschungsbereich (SFB)/Transregio »Strukturwandel des Eigentums« wird in den kommenden vier Jahren mit rund zehn Millionen Euro unterstützt. Der SFB vereint Forschende der Sozial-, Rechts-, Wirtschafts- und Geschichtswissenschaften.

Worum geht es?

Während das Vermögen einiger Menschen immer schneller wächst, muss die

große Mehrheit der Weltbevölkerung mit weniger auskommen. Aktuell verfügen 26 Milliardäre über so viel Eigentum wie die ärmere Hälfte der gesamten Menschheit zusammen. »Die Konzentration von Vermögen und die daraus erwachsende Eigentumsordnung erweisen sich angesichts der ökonomischen, ökologischen und technologischen Herausforderungen unserer Zeit jedoch als krisenanfällig und sind hochgradig umstritten«, so die Einschätzung von Prof. Dr. Hartmut Rosa. Der Soziologe, der in Jena und Erfurt forscht und lehrt, ist Sprecher des neuen SFB.

Neben dieser Umverteilung von Vermögen stellen sich heute zudem ganz neue Eigentumsfragen, führt Rosa weiter aus: Wem gehören eigentlich das Sonnenlicht oder der Wind, aus denen Energie gewonnen und diese verkauft wird? Diese Fragen einer systematischen Analyse zu unterziehen und den Wandel von Eigentumsstrukturen zu erforschen, das ist der Ansatz des neuen Forschungsverbunds. Mehr als 30 Expertinnen und Experten und ihre Teams von beiden Universitäten sowie assoziierte Partner gehen dem Strukturwandel von Eigentum nach. US

Wie spät ist es auf der biologischen Uhr?

Interdisziplinäres Forschungsprojekt »IMPULS« der Friedrich-Schiller-Universität, des Leibniz-Instituts für Alternsforschung – Fritz-Lipmann-Institut – und des Universitätsklinikums wird von der Carl-Zeiss-Stiftung gefördert.

»Man ist so alt, wie man sich fühlt.« Wie diese häufig gebrauchte Redensart deutlich macht, bestimmt nicht allein die Spanne der verstrichenen Lebenszeit das Alter eines Menschen.

Wie sich das biologische Alter definiert und bestimmen lässt, das herauszufinden ist das Ziel des neuen Forschungsprojekts IMPULS der Universität Jena. Das Projektteam wird in den kommenden fünf Jahren von der Carl-Zeiss-Stiftung im Rahmen des Förderprogramms

»Durchbrüche« mit rund 4,5 Mio. Euro unterstützt.

IMPULS steht für »Identifizierung und Manipulation der physiologischen und psychologischen Uhren der Lebensspanne«. In ihrem Projekt wollen die Forschenden also nicht nur herausfinden, wie »spät« es auf der biologischen Uhr eines Menschen ist. »Wir wollen auch wissen, ob und wie sich durch Manipulation der biologischen Uhr das Altern insgesamt verzögern lässt«, er-

läutert Prof. Dr. Christoph Englert, Sprecher des Verbundprojekts. Der Professor für Molekulare Genetik der Universität Jena und Forschungsgruppenleiter am Leibniz-Institut für Alternsforschung sagt, dass Alternsprozesse durch individuelle Faktoren moduliert werden, wie Ernährung, Lebensstil und persönliche Altersbilder. »Wir wollen durch die Verknüpfung von Physiologie und Psychologie einen neuen Blickwinkel auf das Altern entwickeln.« US

Thüringen
liegt in Pisa
ganz weit vorne.



Dr. Maria Wächtler (r.) und Dr. Daniil Kartashov erzeugen an Nanopartikeln und Nanodrähten hohe harmonische optische Schwingungen. Deren Analyse liefert den Forschenden Informationen über die dynamischen Prozesse in den Nanomaterialien und das mit höchster zeitlicher und räumlicher Auflösung im Femtosekunden- und Nanometerbereich. Foto: Jens Meyer



SCHWERPUNKT

Das Leuchten der Atome

Über nichtlineare Optik in der Nanowelt

Die nichtlineare Optik ist eine menschengemachte Physik: Ohne die Entwicklung leistungsstarker Laser ließen sich Photonen unmöglich in ausreichender Zahl versammeln, um sich mit Elektronen zu kollektiven Schwingungen zu vereinen. Ohne die Intensität von Femtosekundenlaserpulsen ließen sich Lichtwellen kaum in einer Feldstärke erzeugen, die nötig ist, um die Materie selbst zum Leuchten zu bringen, um Licht seine Farbe ändern zu lassen oder durch die Wechselwirkung mit Ladungsträgern zu hohen harmonischen Schwingungen anzuregen. Forschungsteams der Universität Jena untersuchen diese Interaktionen zwischen Licht und Materie. Im Sonderforschungsbereich »Nichtlineare Optik auf atomaren Skalen« nehmen sie insbesondere in den Blick, was passiert, wenn intensives Laserlicht auf einzelne Atome und winzige Nanostrukturen trifft. Damit öffnen sie ein neues Fenster in die Nanowelt.

Ohne Materie kein Licht

Die Optik ist die älteste Disziplin der Physik. Während die Menschen in der Antike annahmen, dass das Licht in Form von »Sehstrahlen« ihren Augen entspringt, wissen wir es heute besser: Das Licht entspringt der Materie und wird im Auge registriert. Es ist Welle und Teilchen zugleich. Nichts bewegt sich schneller und das, was wir als sichtbares Licht wahrnehmen, ist lediglich ein kleiner Teil eines breiten Spektrums. Dennoch ist die »Lehre des Lichts« noch nicht in allen Aspekten verstanden. Zwar ist der Mensch nicht der Ursprung des Lichts, doch hat er mit der nichtlinearen Optik ein eigenes Kapitel der Physik aufgeschlagen.

TEXT: UTE SCHÖNFELDER

Was ist überhaupt nichtlineare Optik?

Zur Beantwortung dieser Frage ist zunächst ein Blick auf die althergebrachte – lineare – Optik nützlich. Diese heißt so, weil es einen linearen Zusammenhang zwischen ein- und abgestrahltem Licht gibt, das durch einen Körper oder ein Medium hindurch geht. Fällt etwa ein Sonnenstrahl durch Fensterglas, so kommt auf der anderen Seite eine bestimmte Menge Licht wieder heraus. Strahlt die doppelte Menge Licht durch das Glas, so verdoppelt sich auch das Licht auf der anderen Seite. »Auch die Wellenlänge – also die Farbe – des Lichts ändert sich bei linear optischen Vorgängen nicht«, erklärt Prof. Dr. Gerhard Paulus, Professor für Nichtlineare Optik der Universität Jena. »Rotes Licht wird als roter Strahl gebeugt oder gebrochen; wenn ich mit grünem Licht einen Gegenstand beleuchte, reflektiert er grünes Licht.«

Bei der nichtlinearen Optik ist das anders. Da wird aus einem infraroten Lichtstrahl, der auf einen Kristall trifft, plötzlich grünes Licht. Und anders als in der linearen Optik führt eine Verdopplung des eingestrahlten Lichts zu einer Vervierfachung des abgestrahlten Lichts mit doppelter Frequenz.

Wie kommt das?

Eine entscheidende Voraussetzung für solche Effekte ist die Intensität des verwendeten Lichtstrahls. »Nichtlineare Optik ist erst bei sehr hoher Intensität der Lichtwellen möglich«, macht Paulus deutlich. Erst bei einer Intensität von etwa dem Milliardenfachen der Sonnenintensität treten nichtlineare Effekte

auf, »also bei elektrischen Feldstärken von Lichtwellen, wie sie in unserem Alltag nicht vorkommen«. Um so viele Photonen – die Lichtteilchen – in einem Strahl zu bündeln, braucht es Laser. Ungezügelt bewegen sich Photonen mit Lichtgeschwindigkeit in alle Richtungen des Raumes. Sie zu einem Kollektiv zu vereinen, dass sich kohärent verhält, also mit einheitlicher Wellenlänge und identischer Schwingungsphase, ist ohne Lasertechnik nicht möglich. Kurz gesagt: Bis zur Erfindung des Lasers in den 1960er Jahren existierte nichtlineare Optik nur als Theorie. Was genau bei extrem intensiven Lichtfeldern in Materie passiert, erklärt Paulus so: Die Photonen regen Ladungsträger im Material, zumeist Elektronen, zu Schwingungen an. Bei geringen Strahlungsintensitäten gilt dabei das Hooksche Gesetz: Die Auslenkung der Ladungsträger verhält sich proportional zur aufgewendeten Kraft – also der Feldstärke der einstrahlenden Lichtwellen. Die Elektronen schwingen umso stärker, je intensiver die Strahlung ist und geben dabei elektromagnetische Strahlung ab. Bei niedrigen Intensitäten schwingen die Lichtwellen und angeregten Elektronen sinusförmig. Bei hohen Intensitäten aber, also bei extremer Auslenkung der Elektronen aus ihrer Bahn, sind ihre Bewegungen verzerrt. Als Folge strahlen die Elektronen nicht nur Licht in der sie anregenden Wellenlänge ab, sondern auch in anderen Wellenlängen.

Besonders geeignet, um nichtlineare optische Effekte hervorzurufen, sind Kristalle mit einer bestimmten Gitterstruktur. »Prinzipiell sind aber alle Materialien geeignet«, so Paulus. Selbst in der Luft lassen sich nichtlineare optische Effekte erzeugen.

Welche nichtlinearen optischen Phänomene gibt es?

Zu den wichtigsten Effekten gehören die Frequenzverdopplung (siehe S. 18) und die Erzeugung hoher Harmonischer (siehe S. 35). Daneben gibt es zahlreiche weitere Phänomene der Frequenzvervielfachung und -mischung. Besonders eindrucksvoll ist der Effekt der Selbstphasenmodulation, den Prof. Paulus in einem Video erklärt. Wesentlich für alle nichtlinear-optischen Prozesse ist, dass Licht mit einem geeigneten Medium wechselwirkt.

Warum werden nichtlineare Effekte an Nanostrukturen untersucht?

Was sich bei diesen Vorgängen im Detail abspielt, wie Licht- und Materieteilchen interagieren, das untersuchen Forschungsteams des Sonderforschungsbereichs »Nichtlineare Optik auf atomaren Skalen«. Insbesondere nehmen die Forschenden in den Blick, was passiert, wenn intensives Laserlicht auf Nanostrukturen trifft. Ihr Ziel: umfassendes Verständnis für diese Prozesse zu gewinnen, um Nanomaterialien mit maßgeschneiderten Eigenschaften herstellen zu können, die als Sensoren, Halbleiter oder optoelektronische Bauelemente zum Einsatz kommen.



Hier geht's zum Video:

www.lichtgedanken.uni-jena.de/Ausgabe_09_Audio_und_Video

Was heißt eigentlich Nano?



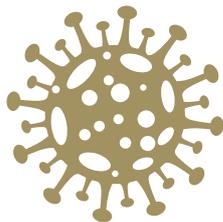
0,1 nm

Atom



2 nm

DNA



80 – 140 nm

Corona-Virus



200 nm

plasmonische Nanostruktur

380 – 780 nm

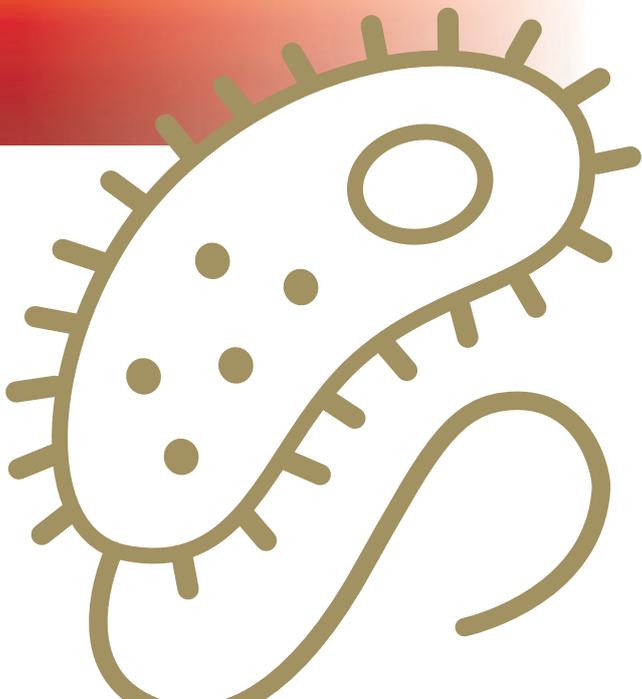
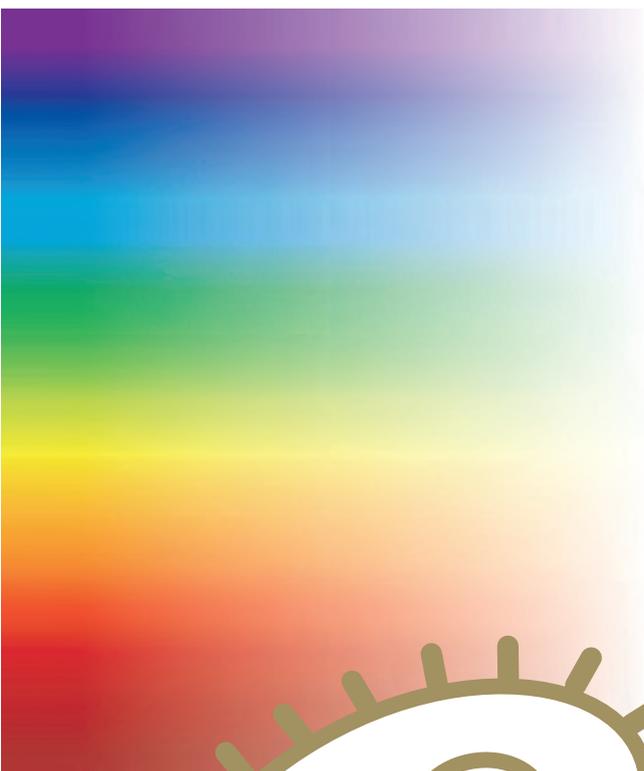
sichtbares Licht

100 – 1000 nm

Bakterium

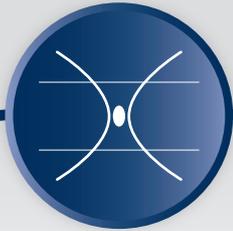
*) Zum Vergleich:

Ein menschliches Haar ist durchschnittlich 100.000 nm (oder 100 µm bzw. 0,1 mm) dick.



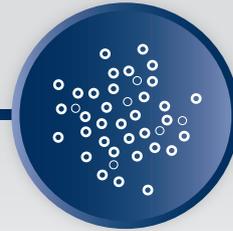
Meilensteine der nichtlinearen Optik

TEXT: UTE SCHÖNFELDER



1930

Die deutsch-amerikanische Physikerin und spätere Nobelpreisträgerin Maria **Goeppert-Mayer** (1906 – 1972) entwickelte in den 1930er Jahren die Theorie der sogenannten Zwei-Photonen-Absorption. Bei diesem Vorgang absorbieren Moleküle oder Atome zeitgleich zwei Photonen und gehen dabei in einen angeregten Zustand über.

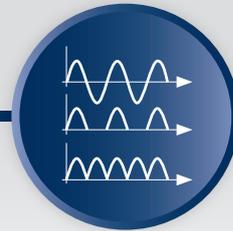


Albert Einstein (1879 – 1955) postulierte, dass Licht aus kleinsten Energie-Quanten – den Photonen – besteht und wurde für seine Entdeckung des Gesetzes des photoelektrischen Effekts 1922 mit dem Physik-Nobelpreis ausgezeichnet. Licht besitzt also sowohl Wellen- als auch Teilchencharakter.



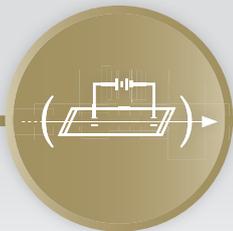
1960

Der US-Amerikaner **Theodore Maiman** (1927 – 2007) entwickelte 1960 den ersten funktionierenden Rubinlaser und legte damit den Grundstein für die nichtlineare Optik. Erst intensives Laserlicht bringt die benötigte Feldstärke hervor, die nichtlineare Effekt ermöglicht.



Der deutsche Physiker **Wolfgang Kaiser** (*1925) konnte 1961 erstmals die von Maria Goeppert-Mayer vorhergesagte Zwei-Photonen-Absorption messen. Im selben Jahr wies **Peter Alden Franken** (1928 – 1999) erstmals die Frequenzverdopplung nach, den heute wichtigsten Prozess der nichtlinearen Optik.

JENA



1963

Den ersten Gaslaser in Deutschland baute **Reinhart Neubert** (*1935) 1962 in Jena. Genau 50 Jahre später verlieh die Universität Jena dem Laserpionier die Ehrendoktorwürde.

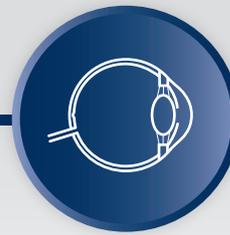


Den ersten Lehrstuhl für Nichtlineare Optik in Deutschland hatte **Max Schubert** (1926 – 1998) inne, der 1964 an die Uni Jena berufen wurde. Gemeinsam mit seinem Schüler, dem Physiker **Bernd Wilhelmi** (1938 – 2018), verfasste Schubert die »Einführung in die nichtlineare Optik«, ein Lehrbuch, das auch international zum Standardwerk wurde.

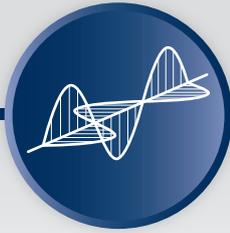


Die Wurzeln der Optik, als der ältesten Disziplin der Physik, reichen bis weit in die Antike. Philosophen wie Pythagoras, Ptolemäus und Platon glaubten an eine Sehstrahltheorie, nach der das Licht dem Auge entspringt und wie der Strahl eines Leuchtturmes die Außenwelt ertastet. Der Mathematiker **Euklid** (3. Jahrhundert v. Chr.) beschrieb die »Sehstrahlen« als sich geradlinig ausbreitend und von der Außenwelt reflektiert werdend.

0

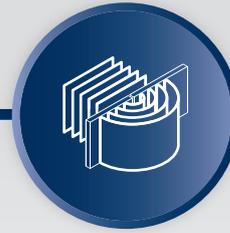


Der arabische Gelehrte **Alhazen** (965 – 1040) untersuchte den Aufbau des Auges genauer. Er erkannte die Bedeutung der Linse für das Sehen und widerlegte in wissenschaftlichen Experimenten die Sehstrahltheorie. Er analysierte u. a. die Reflexion an gekrümmten Spiegeln, die Brechung des Lichts in der Atmosphäre und die Vergrößerung von Linsen.



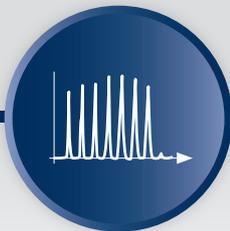
19. Jh.

Im 19. Jahrhundert stellte **James Clerk Maxwell** (1831 – 1879) seine Theorie des Elektromagnetismus auf. Demnach ist Licht eine elektromagnetische Welle, die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitet. **Heinrich Hertz** (1857 – 1894) konnte die von Maxwell postulierten elektromagnetischen Wellen als Erster im Labor erzeugen und zeigen, dass diese sich wie Licht verhalten, sich also spiegeln, brechen oder beugen lassen.



Der niederländische Astronom, Mathematiker und Physiker **Christiaan Huygens** (1629 – 1695) begründete die Wellentheorie des Lichts, die dessen Eigenschaften wie Reflexion, Brechung und Beugung erklärte. Huygens nahm an, dass das Licht ein Ausbreitungsmedium benötigt – ähnlich wie der Schall die Luft – und postulierte dafür den sogenannten Äther. Er stellte sich damit gegen **Isaac Newton** (1643 – 1727), der sich Licht als einen Strom von Teilchen vorstellte. Erst **Thomas Young** (1773 – 1829) und **Augustin Fresnel** (1788 – 1827) gelang es, die Wellenhypothese des Lichtes zu beweisen.

1980

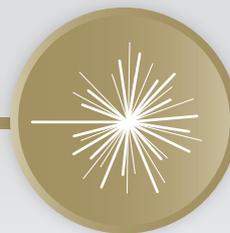


1988 begründete die französische Physikerin **Anne L'Huillier** (*1958) mit der Entdeckung hoher Harmonischer die extrem nichtlineare Optik, deren Effekte und Theorie sich grundsätzlich von den bis dahin bekannten unterscheiden.

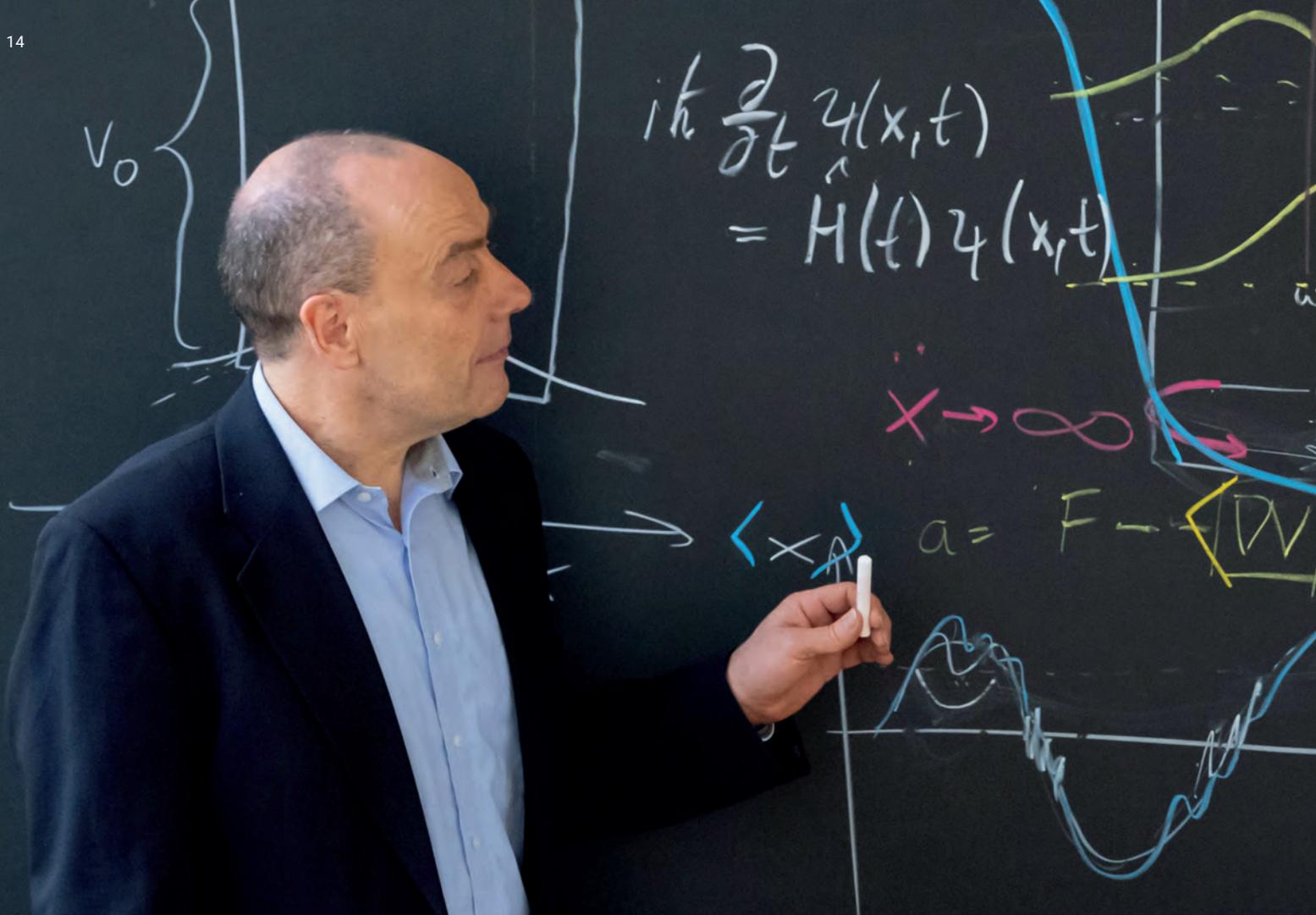
2015



Sechs Jahre nach Anne L'Huilliers Entdeckung hoher Harmonischer, deckte der 2007 nach Jena berufene Physiker **Gerhard Paulus** (*1966) den entsprechenden Effekt in der Photoionisation auf. Anne L'Huillier wurde 2015 die erste Ehrendoktorin der Physikalisch-Astronomischen Fakultät der Universität Jena.



Der vorläufige Schlusspunkt der nichtlinearen Optik ist die relativistische Laserphysik. Wenn die Laserfelder so stark sind, dass die Elektronen auf fast Lichtgeschwindigkeit beschleunigt werden, entsteht eine ganz neue Klasse charakteristischer Effekte. Den ersten Lehrstuhl mit dieser Denomination hat **Malte Kaluza** (*1974) an der Universität Jena inne.



Prof. Dr. Ulf Peschel ist seit 2014 Professor für Theoretische Physik und Festkörperoptik der Universität Jena. In seiner Forschungsarbeit verbindet er theoretische und experimentelle Ansätze und untersucht zum Beispiel, wie sich durch gezielte Strukturierung Lichtteilchen völlig neuartige Eigenschaften verleihen lassen. Im Rahmen des SFB NOA, dessen Sprecher er ist, entwickelt er mit dem Team um Prof. Dr. Stefanie Gräfe unter anderem theoretische Modelle, die die Entstehung hoher Harmonischer (siehe Kasten S. 35) in unterschiedlichen Materialien beschreiben.
· Foto: Jens Meyer

Physikalische Grenzen sind nicht das Limit

Der Physiker Prof. Dr. Ulf Peschel und die Chemikerin Prof. Dr. Stefanie Gräfe leiten den Sonderforschungsbereich (SFB) »NOA«, der seit 2019 an der Universität Jena angesiedelt ist. NOA steht für »Nichtlineare Optik auf atomaren Skalen«. Im Interview erläutern sie, welchen Fragen sie in dem Forschungsverbund nachgehen und warum wissenschaftliche Erkenntnis ein theoretisches Fundament braucht.

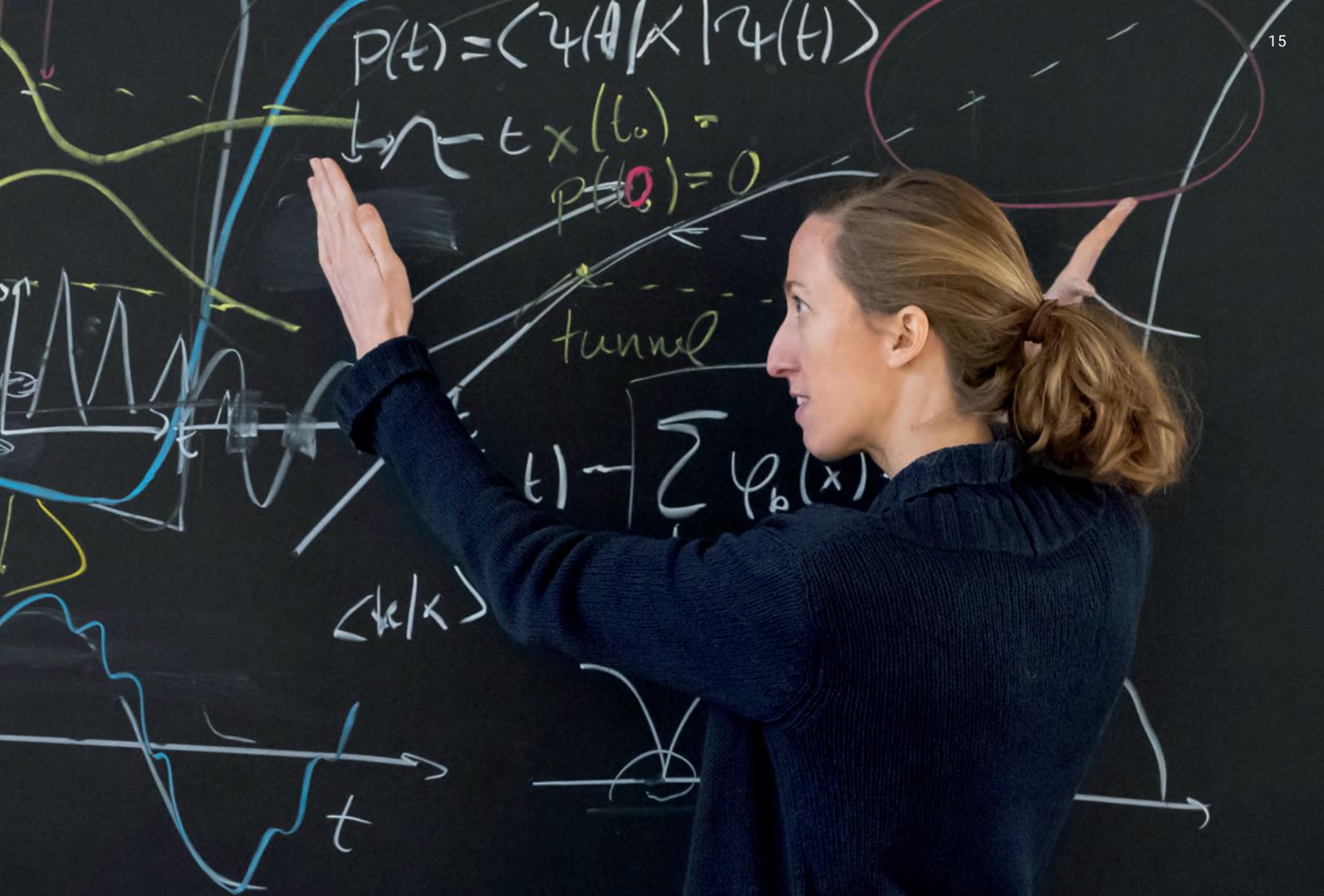
INTERVIEW: UTE SCHÖNFELDER

Worum geht es bei NOA?

Peschel: Wir untersuchen fundamentale Prozesse der Licht-Materie-Wechselwirkung. Und zwar wirklich bis auf die atomare Ebene. Also wir schauen, was passiert mit den Lichtteilchen, den Photonen, und den Materieteilchen, den Elektronen, bei ihrem Aufeinandertreffen. Die Lichtfelder, die wir einsetzen sind so stark, dass sich die Materie durch das Licht verändert. Die

Vorgänge, die dabei ablaufen, sind von der Intensität des Lichts abhängig und zwar nichtlinear (siehe S. 10).

Interessant daran ist, dass durch die Wechselwirkung mit Licht nicht nur die Materie, sondern durch die angeregte Materie auch das Licht selbst beeinflusst wird. Wir können also praktisch Licht durch Licht kontrollieren. Im SFB bearbeiten wir beide Aspekte: Wir untersuchen und bearbeiten Ma-



terie mit intensivem Licht und wir erzeugen und steuern Licht durch die Wechselwirkung mit Materie. Und das alles schauen wir uns auf sehr kleinen Skalen an.

Welche konkreten Fragen wollen Sie beantworten?

Gräfe: Es gibt eine Reihe grundlegender Fragestellungen, die uns interessieren. Zum Beispiel wissen wir schon länger, wie nichtlineare Wechselwirkungen von Licht und Materie funktionieren, etwa in nichtlinearen Kristallen. Für diese Effekte scheint es wichtig zu sein, dass die Materialien sehr homogen aufgebaut sind, also eine sehr regelmäßige, gleichverteilte atomare Struktur besitzen. Uns interessiert nun herauszufinden, wie klein diese homogenen Strukturen sein können, um die nichtlineare Wechselwirkung zu ermöglichen und wie Unebenheiten, Rauigkeit und einzelne Defekte die Wechselwirkung beeinflussen. Wenn ich ein Material habe, das zum Beispiel nur aus einer einzigen Atomlage besteht, dann hat jedes zusätzliche Atom einen enorm großen Einfluss. Außerdem interessieren uns Effek-

te, die erst auf diesen extrem kleinen Skalen möglich werden. Zum Beispiel können von atomar kleinen Metallspitzen Elektronen zu benachbarten Spitzen tunneln. Das bedeutet, dass sie Energiebarrieren überwinden, was nach den Vorstellungen der klassischen Physik nicht möglich wäre. Und wir wollen untersuchen, wie sich dieses Phänomen durch Licht steuern oder sogar gezielt schalten lässt. Wenn wir solche Prozesse verstehen und beherrschen, können wir sie vielleicht irgendwann auch sinnvoll anwenden.

Warum sind Nanomaterialien für die Forschung so interessant und wichtig?

Peschel: Es gibt ja bereits seit Langem den Trend, technische Bauteile immer kleiner zu machen. Das spart Material und erhöht die Effizienz. Aber unser Bestreben geht über diesen Aspekt weit hinaus. Nanostrukturierte Materialien besitzen einfach ganz neue Eigenschaften. Mit Nanostrukturen können wir Materialien zum Beispiel »unsichtbar« machen oder ihnen neue Farben verleihen und so weiter. Solche Metamaterialien werden seit rund 20

Prof. Dr. Stefanie Gräfe ist seit 2013 Professorin für Theoretische Chemie der Universität Jena. Zu ihren Forschungsschwerpunkten gehören die theoretische Beschreibung und Simulation der Wechselwirkung intensiver Lichtfelder mit Atomen und Molekülen. Im SFB NOA, deren stellvertretende Sprecherin sie ist, nimmt sie unter anderem die nichtlineare Wechselwirkung in Plasmonen und Molekülen an winzigen Metallspitzen in den Blick. Gemeinsam mit dem experimentell arbeitenden Team um Prof. Dr. Volker Deckert (siehe S. 27) versucht Gräfe so, das Auflösungsvermögen spektroskopischer Verfahren zu beschreiben.

Die Abbesche Auflösungsgrenze

Ernst Abbe entwickelte 1873 in Jena seine berühmte Formel, die das Auflösungsvermögen eines Mikroskops wie folgt beschreibt: $d = \lambda / 2n \cdot \sin \alpha$.

Darin steht d für die erzielbare Auflösung als dem kleinsten Abstand, den zwei Linien mindestens haben müssen, damit sie im Mikroskop noch als getrennte Linien erkannt werden können; λ bezeichnet die Wellenlänge des Lichtes, n die Brechzahl des Stoffes zwischen Objekt und Objektiv und α den halben Öffnungswinkel des Lichtkegels der Strahlen, die von einem Punkt des Objektes in das Objektiv gelangen.

Für den Term $n \cdot \sin \alpha$ führte Abbe den Begriff der numerischen Apertur ein (NA), der das Vermögen eines Systems beschreibt, Licht zu fokussieren. Abbes Formel ist daher oft auch in der Form $d = \lambda / 2 \text{ NA}$ zu finden. Die höchstmögliche numerische Apertur, die für Luft zwischen Objekt und Objektiv erzielt werden kann, ist 1. Für sichtbares Licht mit einer Wellenlänge von $\lambda \approx 400 \text{ nm}$ ergibt sich folglich eine erzielbare Auflösung von $d \approx 200 \text{ nm}$. Inzwischen erlauben zahlreiche neuere methodische Ansätze jedoch eine Auflösung deutlich unterhalb der von Ernst Abbe begründeten Grenze.

Jahren erforscht und entwickelt. Unsere Materialien sind jetzt aber noch einmal deutlich kleiner, weit unterhalb der Wellenlänge von sichtbarem Licht. In diesen Dimensionen, auf der atomaren Ebene, spielen zunehmend quantenmechanische Effekte eine Rolle. Wir wollen verstehen, wie diese Effekte die Eigenschaften der Materialien bestimmen.

Gräfe: Ein ganz konkretes Anwendungsfeld von Nanomaterialien ist die Chip-Technologie. Dort haben wir heute Standard-Strukturgrößen von 13 Nanometern. Das sind umgerechnet etwa 130 Atome. Die neuesten Chips haben nur noch sieben Nanometer Strukturbreite, also nur noch 70 Atome. Ab 2022 wird die 3-Nanometer-Technologie erwartet, also nur noch 30 Atome breit. Je kleiner diese Strukturen werden, umso relevanter und einflussreicher wird jedes einzelne Atom. Für solche Anwendungen müssen wir wissen, wie sich die atomaren Geometrien auf die Materialeigenschaften auswirken und wie wir diese steuern können.

Wie groß bzw. klein sind die Strukturen, die Sie in den Projekten des SFB untersuchen?

Peschel: Die metallischen, sogenannten plasmonischen Nanostrukturen, die wir in verschiedenen Projekten unseres SFBs verwenden (siehe S. 17, 20, 24), weisen Strukturgrößen von etwa 200 Nanometern auf. Wichtig für die nichtlinear-optischen Effekte sind zu-

meist die Abstände zwischen diesen Nanoantennen. Da bewegen wir uns in einem Bereich von bis zu fünf Nanometern. Fünf Nanometer, das ist die Dicke einer Lipiddoppelschicht, der Grundstruktur von Biomembranen. Würde man diesen Abstand – um ihn sich besser vorstellen zu können – auf einen Zentimeter vergrößern, so würde sich im gleichen Verhältnis ein Zentimeter auf die Strecke Jena-Weimar ausdehnen.

Warum braucht es nichtlineare optische Methoden, um so kleine Strukturen zu untersuchen?

Peschel: Atomare und andere sehr kleine Strukturen werden heute mit einer Vielzahl von Methoden untersucht. Der Vorteil nichtlinear-optischer Methoden ist, dass sie die Auflösungsgrenzen gängiger optischer Methoden, die von der Wellenlänge der verwendeten Strahlung abhängen, deutlich unterschreiten. Sprich, wir können viel kleinere Strukturen »sehen«.

Außerdem erhält man durch die nichtlineare Wechselwirkung des Lichtfeldes mit dem Material viel mehr Informationen über die untersuchten Strukturen, als durch einfache lineare Wechselwirkung. Wir erweitern damit praktisch das Spektrum der Informationskanäle.

Gräfe: Hinzu kommt, dass es bei nichtlinearen Methoden in der Regel weniger störende Hintergrundeffekte gibt.

Gibt es auch für nichtlineare optische Methoden Auflösungsgrenzen?

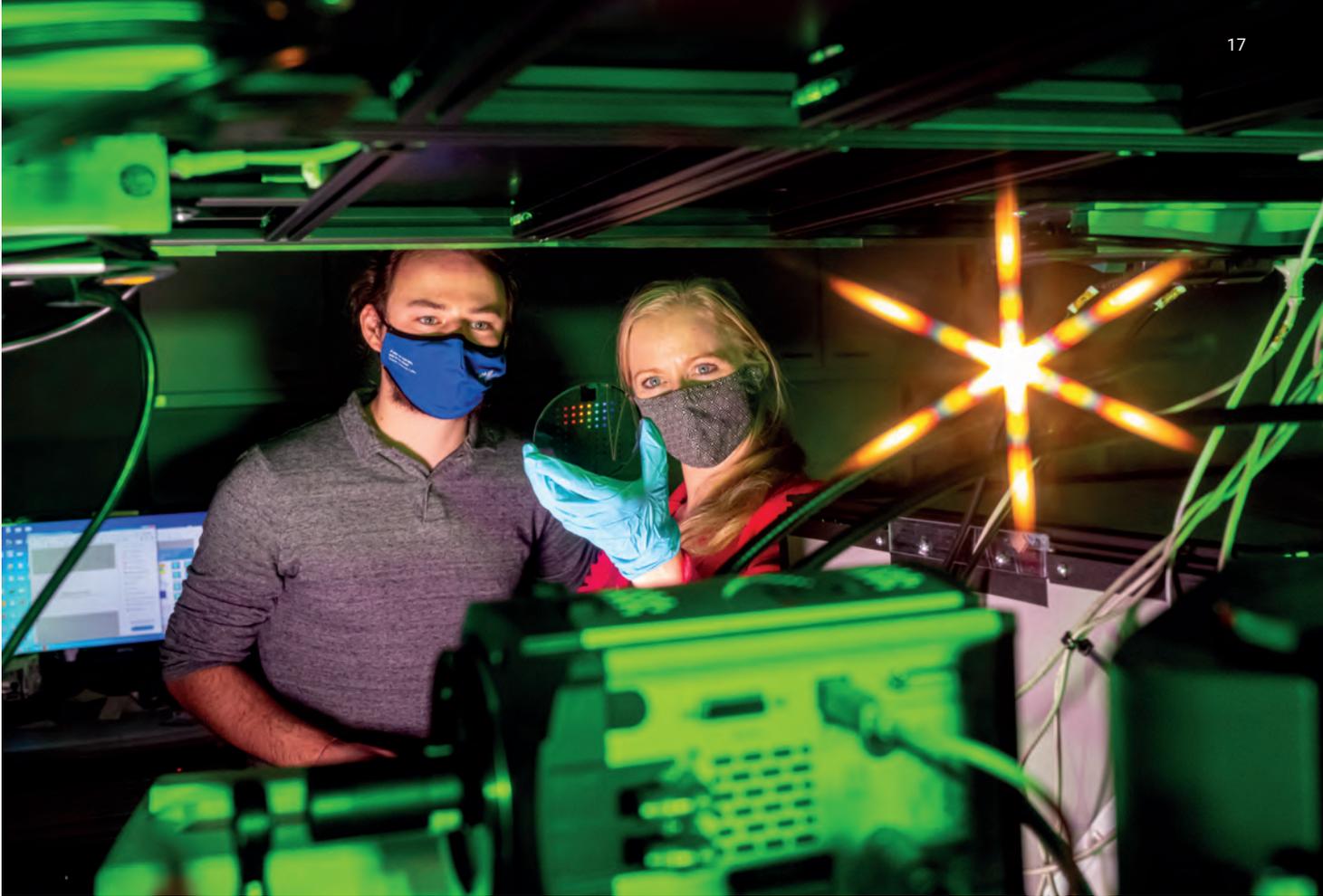
Gräfe: Ja, die gibt es. Aber sie sind nicht so absolut, wie beispielweise die Abbesche Auflösungsgrenze (siehe Kasten links). Auf der atomaren Skala, auf der wir uns bewegen, spielen Quanteneffekte eine Rolle, die die Wechselwirkung mit Licht beeinflussen. Im Detail wissen wir das aber auch noch gar nicht. Dies ist unter anderem eine Frage, die wir in unserem SFB beantworten wollen.

Peschel: Es geht bei der Beantwortung dieser Frage eigentlich gar nicht so sehr um die physikalischen Grenzen der Auflösung. Viel entscheidender für das, was wir sehen und erkennen können, sind die Grenzen unserer theoretischen Modelle und unseres Verständnisses für die Phänomene auf diesen Skalen. Wir können hier ja nicht mehr direkt »beobachten«, sondern wir erhalten Informationen aus Lichtspektren und müssen diese interpretieren.

Nichtlinear optische Phänomene lassen sich erst experimentell bearbeiten, seit es Laser gibt, die Licht in der notwendigen Intensität bündeln. Welche Rolle spielt – neben der Lasertechnik – die theoretische Forschung dabei?

Peschel: Wie schon angesprochen, eine ganz grundlegende. Die Herausforderung im Moment besteht darin, die Licht-Materie-Wechselwirkung im atomaren Bereich konsistent zu beschreiben und dabei sowohl die optischen als auch die quantenmechanischen Effekte zu berücksichtigen. Wir Theoretiker entwickeln dafür Modelle und experimentell arbeitende Kolleginnen und Kollegen liefern Daten. Gemeinsam schauen wir dann, ob wir diese Daten mit den Modellen plausibel erklären können.

Der Erkenntnisgewinn erfolgt dabei immer in kleinen Schritten und die Aufgabe der Theorie ist es, ein grundlegendes Verständnis zu generieren. Dafür brauchen wir einfache Modelle, die uns eine Vorstellung vermitteln, daraus entwickeln wir Simulationen und können diese dann experimentell überprüfen. Für dieses physikalische Grundverständnis ist die Theorie unerlässlich. ■



Prof. Dr. Isabelle Staude (r.) und Physik-Doktorand Tobias Bucher entwickeln winzige optische Antennen. Nur damit lässt sich Licht effektiv auf die ultradünnen 2D-Materialien fokussieren. · Foto: Jens Meyer

Ultimativ dünn: Halbleiter aus einer Atomlage

Maximale Oberfläche bei minimaler Schichtdicke: Forschungsteams aus Materialwissenschaft und Physik lassen ultradünne anorganische Materialien wachsen, die nur aus einer einzigen Atomlage bestehen. Im Verbund mit nanoskaligen optischen Antennen werden 2D-Materialien zu photonischen Nanomaterialien maßgeschneidert.

TEXT: UTE SCHÖNFELDER

Nicht einmal einen Nanometer messen die Kristalle im Querschnitt und sind dabei doch erstaunlich stabil. Da sie praktisch kein Volumen aufweisen, spricht man meist einfach von 2D-Materialien. Ähnlich wie Graphen – das erste 2D-Material, das technisch hergestellt werden konnte – weisen die ultradünnen Membranen aus Molybdän- oder Wolframdisulfid eine Reihe außergewöhnlicher Eigenschaften auf. »Sie sind ultimativ dünne Halbleitermaterialien und dadurch unter anderem für neuartige elektronische und optoelektronische Bauelemente, als Bestandteile chemischer Sensoren oder als Katalysatoren geeignet«, zählt Andrey Turchanin einige Anwendungsmöglichkeiten auf.



Perfekte gleichseitige Dreiecke: Die 2D-Kristalle aus Wolframdisulfid sind weniger als ein Nanometer dünn. Jede Dreiecksseite ist rund 30 Mikrometer lang.

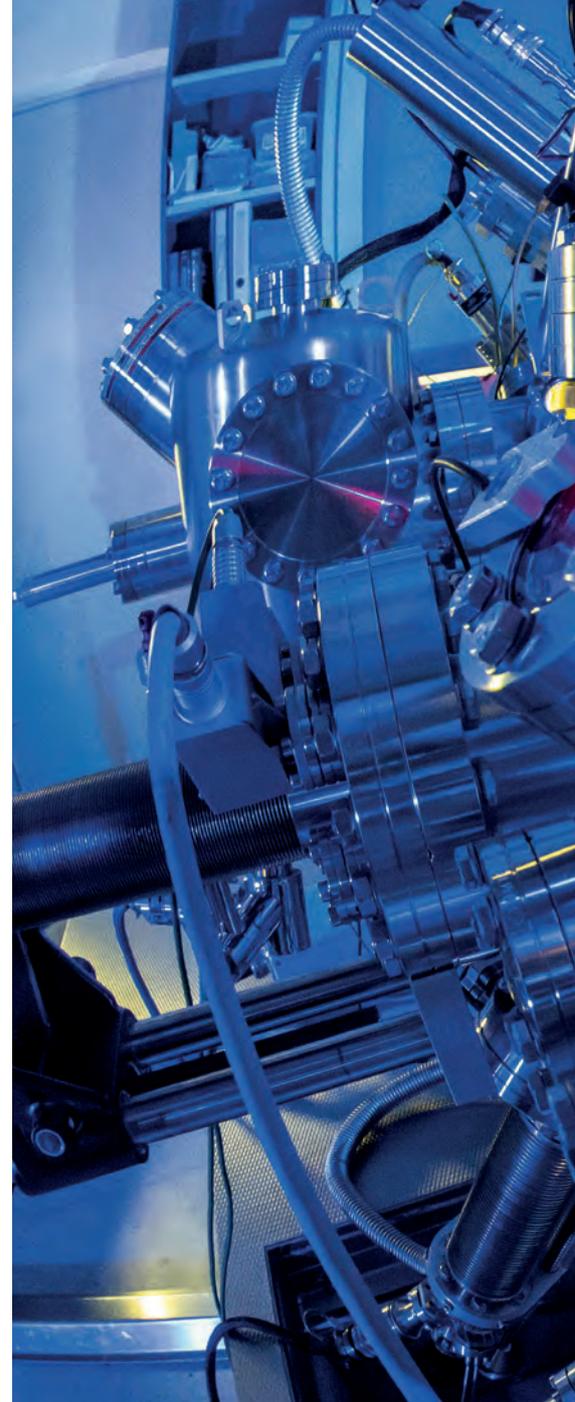
Die 2D-Materialien werden in Turchanins Labor synthetisiert, indem die chemischen Ausgangsstoffe auf über 700 °C aufgeheizt werden und dabei verdampfen. In einem Gasstrom aus Argon und Wasserstoff werden die Ausgangsstoffe bei definiertem Druck und bestimmter Temperatur durch eine Glasröhre transportiert und reagieren dabei. Das Material kristallisiert auf einem in der Glasröhre befindlichen Trägermaterial aus, ähnlich wie Wasser an einer kalten Fensterscheibe Eisblumen bildet. Die »Eiskristalle« aus Wolframdisulfid haben die Form gleichseitiger Dreiecke (siehe Bild links), andere 2D-Materialien kristallisieren in Sternformen oder als »Schneeflocken« aus.

Nichtlineare Frequenzverdopplung

Durch die Wechselwirkung mit einem nichtlinearen Material, zum Beispiel einem Kristall mit einer bestimmten – sogenannten nicht inversionssymmetrischen – Gitterstruktur, entsteht aus Laserlicht Strahlung mit der doppelten Frequenz des eingestrahnten Lichts. Die Frequenzverdopplung hat eine Halbierung der Wellenlänge des Lichts zur Folge. Auf diese Weise kann beispielsweise aus infraroter Strahlung eines Nd:YAG-Lasers, mit der Wellenlänge von 1 064 nm, grünes Licht der Wellenlänge 532 nm erzeugt werden. Dieses Phänomen wird u. a. in Laserpointern genutzt. Ursache sind Schwingungen von Ladungsträgern im Kristall, die durch Wechselwirkung mit intensivem Laserlicht erzeugt werden.

Die nichtlineare Frequenzverdopplung wird im Englischen als »second harmonic generation« bezeichnet und daher häufig SHG abgekürzt.

Prof. Dr. Andrey Turchanin (l.) und Dr. Antony George arbeiten am »Ultra High Vacuum (UHV) Multiprobe System« im Institut für Physikalische Chemie. Die Anlage ermöglicht mehr als zehn verschiedene hochsensitive mikroskopische und spektroskopische Analysen an ultradünnen Materialproben. Die Messgenauigkeit der eigens für das Team um Prof. Turchanin angefertigten Anlage wird u. a. dadurch erreicht, dass während der Messungen in der Anlage ein starkes Vakuum herrscht: Bei laufendem Betrieb finden sich in dem System weniger Teilchen, als im Vakuum zwischen Erde und Mond vorkommen. · Foto: Jens Meyer



Andrey Turchanin und seine Kolleginnen und Kollegen im Institut für Physikalische Chemie stellen 2D-Materialien her, um daraus ultradünne photonische Strukturen zu entwickeln, mit denen sich nichtlineare optische Phänomene untersuchen lassen. Dafür sind die zweidimensionalen Kristalle sehr gut geeignet: Ihre Struktur ermöglicht es den Elektronen, untereinander und mit Lichtteilchen ausreichender Intensität in Wechselwirkung zu treten – was Voraussetzung für das Auftreten nichtlinearer Effekte ist.

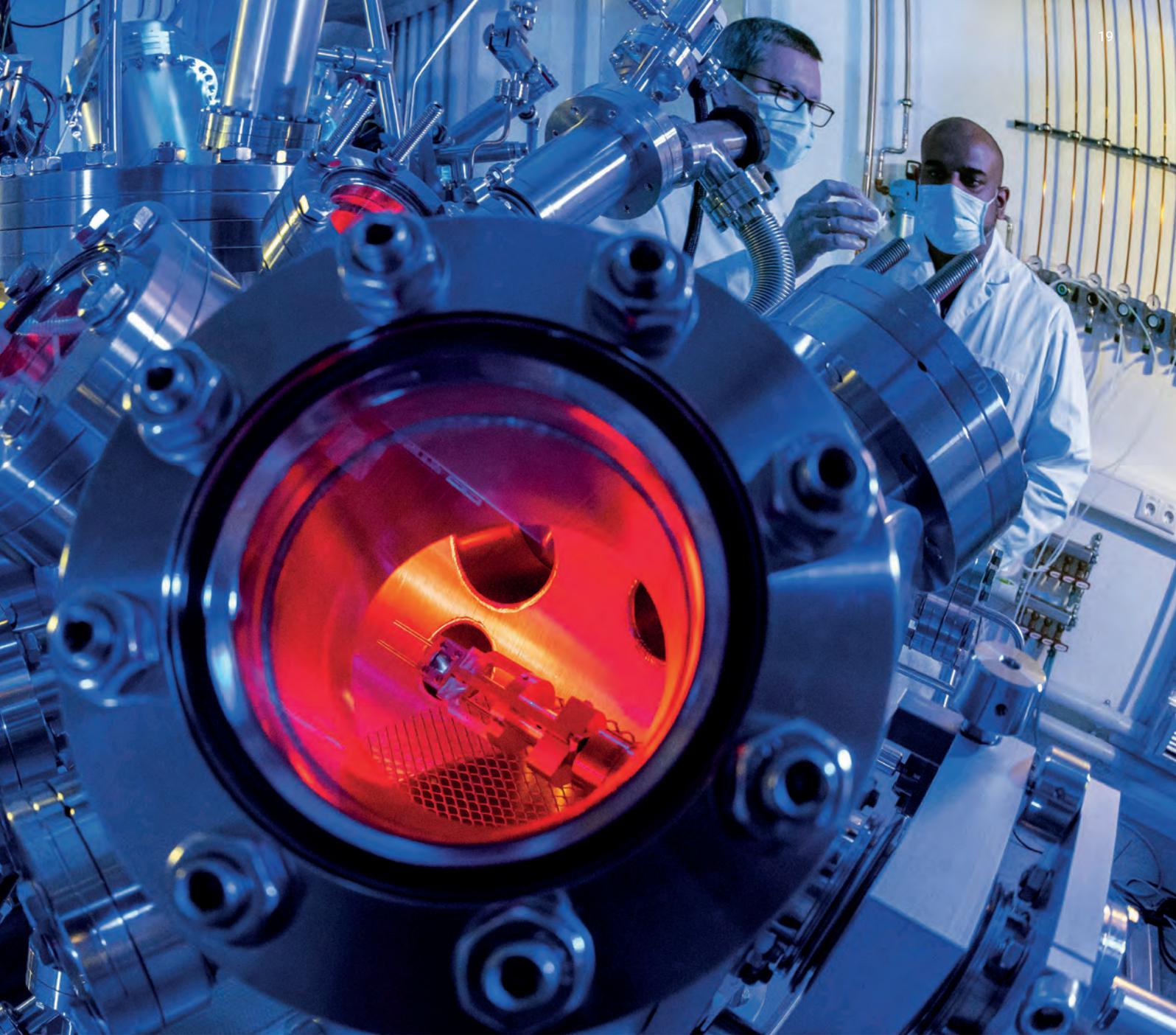
Doch die 2D-Schichten sind so dünn, dass sie für eingestrahlt Laserlicht nahezu unsichtbar wären, da ihre Dicke wesentlich geringer ist als die Wellenlänge des verwendeten Lichts. Um

eine effiziente Interaktion von Licht und 2D-Material dennoch zu ermöglichen, versehen die Forschenden die Membranen zusätzlich mit winzigen Antennen, die das Licht im Nahfeld konzentrieren und so die Auflösungsgrenze unterlaufen (siehe Kasten S. 16).

Siliziumschicht mit Nanoantennen und 2D-Material werden kombiniert

Dieser Schritt erfolgt im Labor von Prof. Dr. Isabelle Staude. Die Nanoantennen werden als dünne Schicht mittels Elektronenstrahlolithographie hergestellt. Bei diesem Verfahren wird zunächst durch Belichtung eines Lackes mit einem Elektronenstrahl eine Maske

der gewünschten Geometrie erzeugt und die Nanostruktur in einem zweiten Schritt durch einen Ätzprozess in das Material, beispielsweise Silizium, überführt. Die so erzeugten Nanoantennen haben eine Größe von einigen zehn bis wenigen 100 Nanometern. Unter einem Elektronenmikroskop sieht die lithografierte Antennenschicht aus wie ein Stück Noppenfolie. »Werden beide Schichten zusammengebracht, erhält man ein hybrides System, das optische Eigenschaften aufweist, die es in natürlichen Materialien so nicht gibt«, sagt Physikerin Staude vom Institut für Festkörperphysik. Die hybriden Systeme können zukünftig beispielsweise als miniaturisierte Quellen einzelner oder miteinander verschränkter Lichtteilchen Einsatz fin-



den. Damit sind sie für Anwendungen in der Quantentechnologie interessant, etwa zur Verschlüsselung von optisch übertragenen Informationen.

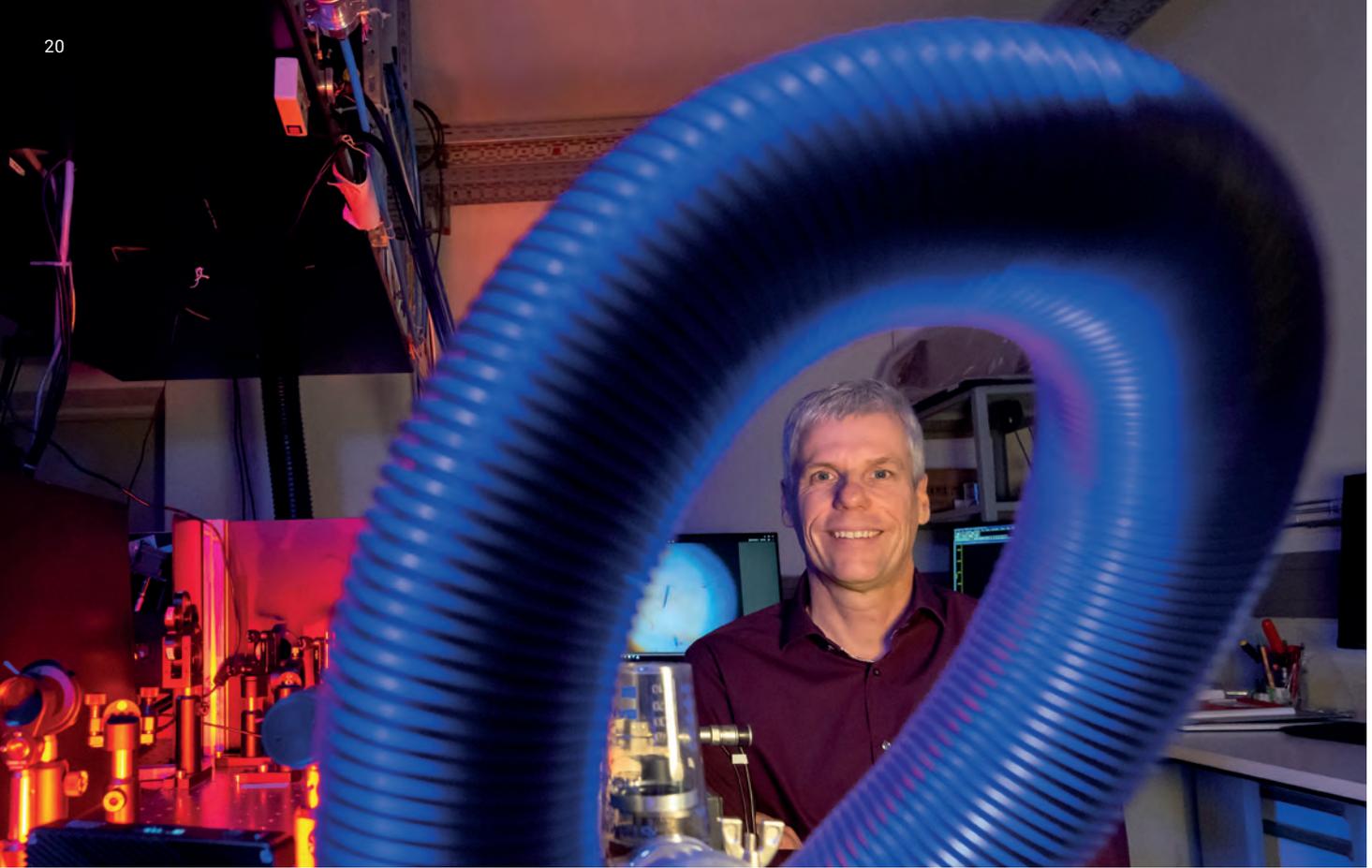
Nichtlineare Frequenzverdopplung in Nanoantennen

Zu den nichtlinearen optischen Effekten, die sich mit den 2D-Membranen mit Nanoantennen erzeugen und analysieren lassen, gehört die nichtlineare Frequenzverdopplung (siehe Infokasten S. 18). Bei diesem Prozess werden Photonen erzeugt, die mit der im Vergleich zum eingestrahlt Licht doppelten Frequenz schwingen. »Wir beleuchten die Probe mit Laserpulsen mit einer

Wellenlänge von 850 nm und erhalten neben der eingestrahlt Frequenz auch Laserlicht mit 425 nm«, erläutert Isabelle Stauden den Effekt. Das erzeugte Licht wird detektiert und analysiert. Dabei interessiert die Forschenden nicht nur die Intensität der so erzeugten Strahlung, sondern vor allem die Polarisations-eigenschaften dieses Lichts. Die Polarisation ist eine der zentralen Eigenschaften von Licht und kann zum Beispiel zur Kodierung von Information verwendet werden. Während in natürlich vorkommenden nichtlinearen Materialien, wie Phosphat- oder Boratkristallen, die Polarisation des einfallenden Laserlichts und des erzeugten nichtlinearen Lichts nach festen Regeln zusammenhängen, bieten die Hybridsysteme ganz neue

Möglichkeiten, die Polarisations-eigenschaften des nichtlinearen Lichts maßzuschneidern. Das wollen sich die Forscherinnen und Forscher zunutze machen.

Mit ihren Experimenten untersuchen die Teams um Stauden und Turchanin nun, wie unterschiedliche geometrische Nanostrukturen die nichtlinear-optischen Effekte beeinflussen und die Nanoantennen so designen, dass damit gezielt bestimmte Effekte kontrolliert werden können. Langfristiges Ziel sind außerdem optisch schaltbare Bauelemente. Dafür sollen die 2D-Materialien funktionalisiert werden, um selbstständig auf sich verändernde Umgebungsbedingungen wie etwa Licht reagieren zu können. ■



Wenn Licht und Elektronen gemeinsam leuchten

Halbleiter-Nanodrähte haben sich in den vergangenen 20 Jahren zu flexiblen Bauteilen in der Optoelektronik entwickelt. Sie finden heute beispielsweise Verwendung als Leuchtdioden oder in Solarzellen. Zudem lassen sie sich als winzige Laser einsetzen. Denn zugeführtes Licht wird an Grenzflächen an den Enden des etwa 200 Nanometer dicken Drahtes reflektiert und verstärkt sich so während des Durchlaufs – ein Laser entsteht. Aktuell sind Laser aus Halbleiter-Nanodrähten die kleinsten der Welt. Doch es geht noch kleiner.

TEXT: SEBASTIAN HOLLSTEIN

Physiker um Prof. Dr. Carsten Ronning vom Institut für Festkörperphysik und Prof. Dr. Thomas Pertsch vom Institut für Angewandte Physik erforschen eine Methode, durch die sich möglicherweise Laser mit noch geringeren Durchmessern produzieren lassen. Die Halbleiter-Nanodrähte dienen hierbei nur noch als Lichtquelle und Werkzeug. Das Projekt »Nonlinear dynamics in plasmonic hybridized semiconductor nanowires« ist in den Sonderforschungsbereich »Nichtlineare Optik auf atomaren Skalen« (NOA) eingebettet.

Für die Vorgehensweise haben die Wissenschaftler einen Halbleiter-Nanodraht auf eine Oberfläche

aus Metall aufgelegt, eine weniger als zehn Nanometer dünne dielektrische Zwischenschicht trennt beide Bereiche voneinander. »Regt man Draht und Metall nun mit Licht an, dann entsteht in der Zwischenschicht ein sogenannter Spaser«, erklärt Carsten Ronning. »Der Grund für dieses Phänomen liegt in der Schwingung verschiedener Wellen. Während der Halbleiter-Nanodraht eine sogenannte optische Mode, also eine Welle von Lichtteilchen, hervorruft, schwingen auch die Elektronen im Metall und bilden eine sogenannte plasmonische Mode.« Beide Wellen reagieren miteinander in der Zwischenschicht und erzeugen eine hybride Mode.

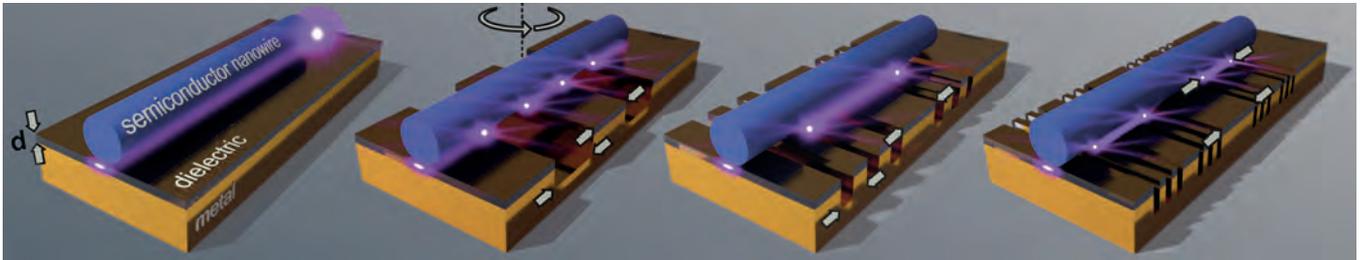
Das eingestrahelte Licht kann in diesem Feld verstärkt werden und hat dann Eigenschaften wie ein Laser – ein plasmonischer Laser oder »Spaser«. Mit gerade einmal fünf bis zehn Nanometer Durchmesser ist der Spaser aber deutlich kleiner als der Lichtstrahl des Halbleiters – und darüber hinaus schneller und intensiver.

Eigenschaften des »Spasers« gezielt manipulieren

Diese Eigenschaften des Spasers sollen im Rahmen des Projektes durch verschiedene Parameter gezielt manipuliert werden – vor allem durch

Bild links: Prof. Dr. Carsten Ronning an einem Versuchsaufbau eines Photolumineszenzexperimentes zur Erforschung der optischen Eigenschaften von Halbleiternanodrähten. · Foto: Jens Meyer

Bild unten: Grafische Entwürfe verschiedener »Spaser« mit unterschiedlich strukturierten plasmonischen Trägeroberflächen.



die Beschaffenheit der plasmonischen Nanostrukturen an der Trägeroberfläche. Verändert man diese Strukturen, so lässt sich das Licht noch stärker innerhalb einzelner Punkte einfangen. Darüber hinaus können die Forscher durch das Substrat die Frequenz und Wellenlänge manipulieren, was Auswirkungen auf die Geschwindigkeit und die Intensität des Lasers haben sollte.

Effekte plasmonischer Nanostrukturen vergleichen

Deshalb konzentrieren sich Ronning und sein Team zunächst besonders auf die Strukturierung dieses Unterbaus. »Nachwuchswissenschaftler haben im Rahmen von Bachelorarbeiten zusam-

men mit Francesco Vitale, Doktorand in diesem Projekt, verschiedene Schemata entworfen und eine Methode entwickelt, mit der wir entsprechende Strukturen auf den Träger schreiben können. Weitere Forschungen fokussierten sich darauf, den Halbleiter-Nanodraht in bestimmten Positionen auf das Substrat zu legen«, erklärt Ronning. »Da wir hier im Nanobereich arbeiten, sind solche Vorgänge äußerst kompliziert. Um beispielsweise die Drähte gerichtet auf die Oberfläche aufbringen und gezielt hin und her schieben zu können, haben wir extra ein spezielles Werkzeug – einen Nanomanipulator – angeschafft.« Weitere Stellschrauben ergeben sich beispielsweise durch die höhere Intensität des Spasers. Durch sie stellen sich nicht-lineare Effekte ein, die unter anderem

Farbveränderungen des Lichts ermöglichen.

In weiteren Schritten will das Team zunächst Informationen darüber sammeln, was im Inneren des Feldes zwischen Halbleiter und Metall passiert. Dank der von Thomas Pertsch durchgeführten spektroskopischen Messmethoden können die Physiker beobachten, wie schnell und wie weit sich die Welle ausbreitet, die zum Spaser wird. Solch wertvolle Informationen helfen, um den Mini-Laser zu funktionalisieren und somit sein Potenzial für Anwendungen auszuloten.

Schnellere Chips, die Daten per Licht übertragen

»Generell ist das Feld dafür sehr groß, schließlich werden auch die mikroelektronischen Bauteile immer kleiner, etwa Mikrochips in Smartphones«, erklärt Carsten Ronning. »Diese Art Laser bietet einen vielversprechenden Ansatz für die Entwicklung von Chips auf optischer Basis, die noch schneller Daten übertragen könnten, da sich Licht schneller bewegt als Elektronen.« Außerdem könnte der Spaser als Spektroskopie-Einheit auf einem »Lab on a chip« dienen – also auf winzigen Analysewerkzeugen für chemische und biologische Untersuchungen. Kooperationen mit Kolleginnen und Kollegen aus anderen Fachgebieten im Rahmen des Sonderforschungsbereiches sollen den Laserspezialisten dabei helfen, das Anwendungspotenzial weiter auszuloten, um beispielsweise die Spektroskopie eines einzelnen Proteins zu ermöglichen. ■

Plasmonische Nanostrukturen

Bei den nanometerkleinen Zapfen, Pyramiden oder Ringen aus Metall handelt es sich um winzige optische Antennen. Wie mit Radio- oder Fernsehantennen lassen sich auch mit optischen Antennen elektromagnetische Wellen einfangen, an einem Ort konzentrieren oder abstrahlen. Die Länge der Antenne ist an die Wellenlänge der elektromagnetischen Strahlung angepasst. Anders als Radiowellen mit einer Wellenlänge von mehreren Metern weist sichtbares Licht Wellenlängen von nur ca. 380 bis 780 Nanometer auf. Optische Antennen müssen also extrem klein sein.

Werden plasmonische Nanostrukturen beleuchtet, interagieren die elektromagnetische Lichtwelle und die beweglichen Leitungselektronen im Metall. Die Elektronen werden in kollektive Schwingungen versetzt, die als Oberflächenplasmonpolaritonen, kurz Plasmonen, bezeichnet werden und beginnen selbst zu strahlen. Damit lassen sich sehr viel kleinere Strukturen ausleuchten und detektieren als mit dem ursprünglich eingestrahلتen Licht und z. B. die Abbesche Auflösungsgrenze umgehen.

Serienbild-Fotografie in Nanomaterialien

Beim Zieleinlauf eines 100-Meter-Rennens ist der Sieger nicht immer sofort klar: Oft passieren die Läufer Kopf an Kopf die Ziellinie, so dass es dem Beobachter unmöglich ist, ihre Reihenfolge zu erkennen – die Bewegung der Läufer ist einfach zu schnell. Mit einer Serienbild-Aufnahme lässt sich die Bewegung jedoch einfangen und zeitlich auflösen. Dieses Prinzip machen sich Physikerinnen und Physiker mit der Pump-Probe-Spektroskopie zunutze, um extrem schnelle Vorgänge in Nanomaterialien abzubilden.

TEXT: UTE SCHÖNFELDER

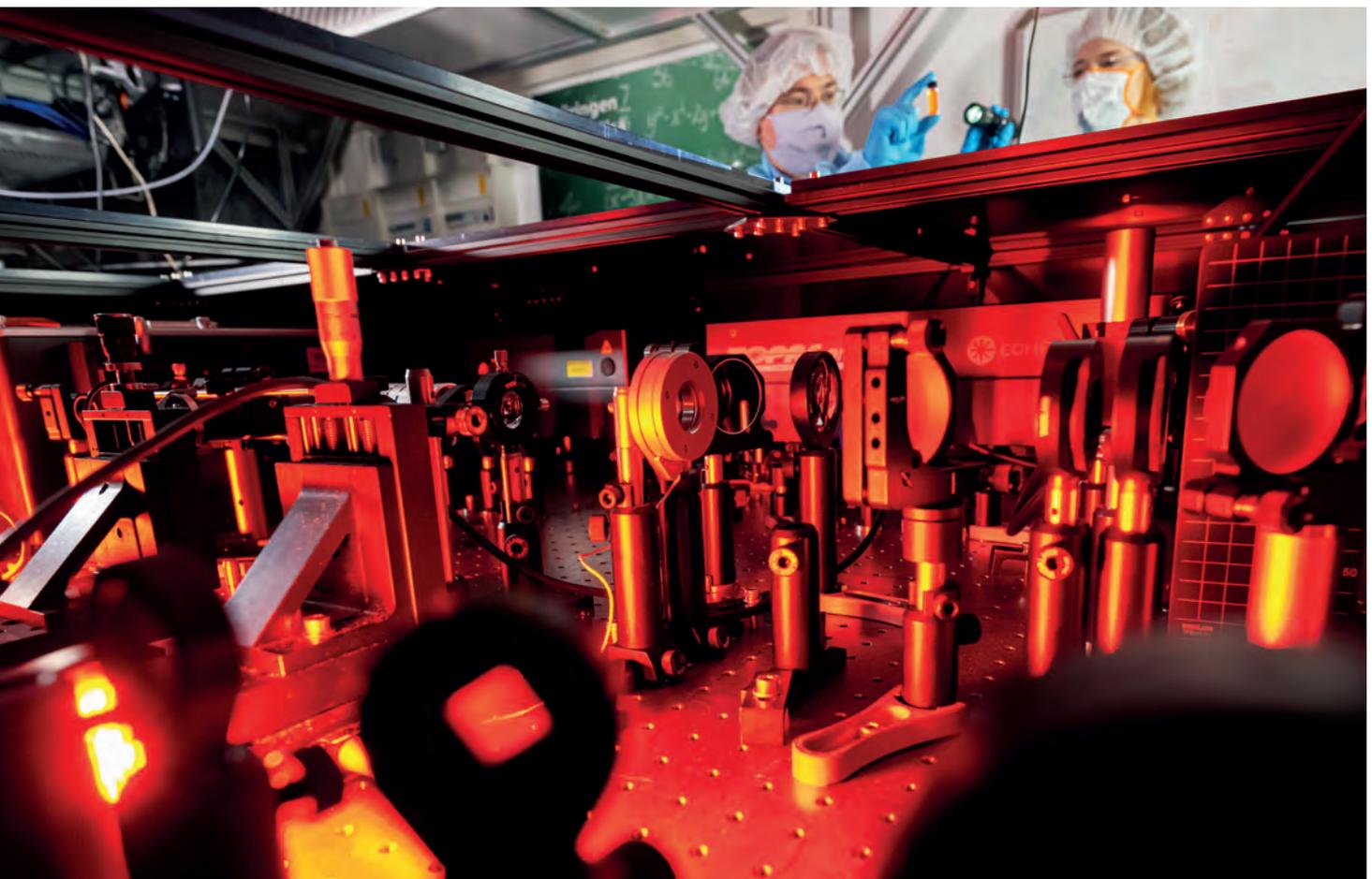
Einblicke in die winzigen Strukturen zu gewinnen, aus denen Materie besteht, ist das Ziel eines Forschungsprojekts von Dr. Maria Wächtler und Dr. Daniil Kartashov im Rahmen des Sonderforschungsbereichs »Nichtlineare Optik auf atomaren Skalen« (NOA). Sie untersuchen mit nichtlinear optischen Methoden elementare Grundbausteine von Halbleitern. Dabei richtet sich die Aufmerksamkeit der Forschenden nicht nur auf die räumliche Auflösung atomarer Strukturen, sondern auch auf

die Abbildung der dynamischen Prozesse, die in ihnen ablaufen – etwa die Schwingungen von Ladungsträgern in Atomgittern, die nur wenige hundert Femtosekunden dauern.

Um extrem schnelle Vorgänge in extrem kleinen Dimensionen untersuchen zu können, müssen gleich zwei Herausforderungen gelöst werden. »Erstens benötigen wir dafür das passende Untersuchungsmaterial«, sagt Maria Wächtler. Die Chemikerin und ihr Team produzieren in ihren Labors

am Leibniz-Institut für Photonische Technologien dafür geeignete Nano-halbleiter. »Die zweite Voraussetzung ist, dass wir Methoden entwickeln, die einerseits empfindlich genug sind, Wechselwirkungen mit solch kleinen Strukturen zu detektieren und andererseits ultraschnelle Vorgänge abbilden können«, ergänzt Daniil Kartashov. Er ist Experte am Institut für Optik und Quantenelektronik der Universität Jena für zeitaufgelöste spektroskopische Methoden.

Dr. Daniil Kartashov (l.) und Dr. Maria Wächtler untersuchen den nichtlinear-optischen Effekt der Erzeugung hoher Harmonischer in nanoskaligen Halbleitern. · Foto: Jens Meyer



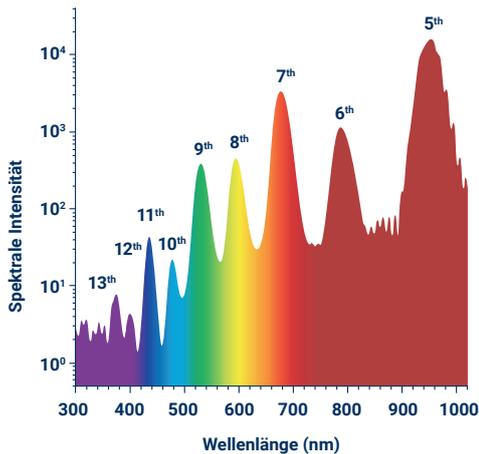


Diagramm links: Intensitäten der 5. bis 13. Harmonischen, die durch nichtlineare Wechselwirkung eines Infrarotlaserpulses mit Nanohalbleitern erzeugt wurden. Bild oben: Lösung von Quantenpunkten aus Cadmiumselenid. · Foto: Jens Meyer

Für ihr Projekt untersuchen die Forschenden Halbleitermaterialien, die sie in Größe, Form und Komplexität variieren. Einfachste Objekte sind Quantenpunkte: nur wenige Nanometer kleine kugelförmige Gitter, die aus wenigen Hundert bis Tausend Atomen bestehen. »Diese werden auch künstliche Atome genannt, weil sie sich in ihren elektronischen Eigenschaften wie Einzelatome verhalten«, erklärt Wächtler. Die Ladungsträger – die Elektronen – können sich aufgrund der geringen räumlichen Ausdehnung in den Kügelchen nicht frei bewegen und sind auf ganz bestimmte Energiewerte festgelegt, wodurch ihre Eigenschaften von Quanteneffekten bestimmt werden. Die Quantenpunkte bestehen aus Cadmiumselenid und messen zwischen zwei und acht Nanometern im Durchmesser. Um sich ungefähr vorstellen zu können, wie klein ein Nanometer ist, hilft ein Vergleich: Ein Nanometer (ein Millionstel Millimeter) verhält sich zu einem Meter wie der Durchmesser einer 1-Cent-Münze zu dem des Planeten Erde. Solche Strukturen sind für linear optische Methoden praktisch »unsichtbar«.

Aus Infrarotstrahlung wird sichtbares Licht

Um herauszufinden, wie solch nanoskalige Halbleiter funktionieren, etwa wie Ladungen in ihnen transportiert werden oder sich Schwingungen im Atomgitter fortpflanzen, braucht es eine neue hochempfindliche Diagnostik-Methode. Die Forschenden um Daniil Kartashov setzen dabei auf die

Erzeugung hoher harmonischer optischer Schwingungen (siehe Kasten S. 35). »Dabei handelt es sich um Schwingungen, die durch Wechselwirkung von Laserlicht mit dem zu untersuchenden Material entstehen und ein Vielfaches der Frequenz des eingestrahlichten Lichtes aufweisen«, sagt Kartashov. Allerdings: Hohe Harmonische entstehen erst bei sehr hohen Feldstärken des eingestrahlichten Lichts. Der Laser, der die Quantenpunkte anregt, sendet eine Leistung von 300 Milliarden Watt pro Quadratzentimeter aus. Damit das Material dabei nicht sofort verdampft, wird der Laser gepulst – nur etwa 100 Femtosekunden (Millionstel einer Milliardstel Sekunde) wirkt das Licht auf das Material ein.

»Diese kurze Zeitspanne reicht aus, um mit den Elektronen in den Atomgittern zu wechselwirken und diese zu hohen Harmonischen anzuregen«, sagt Kartashov. Der Anregungslaser sendet Pulse im mittleren Infrarotspektrum mit einer Wellenlänge von ca. 4 800 nm aus, die für das menschliche Auge unsichtbar sind. Die entstehenden Harmonischen schwingen mit jeweils geteilter Wellenlänge: die 3. Harmonische mit 1 600 nm, die 5. mit 960 nm und so weiter. »Wir nehmen die Spektren der erzeugten Strahlen für den Bereich der 5. bis 13. Harmonischen auf«, sagt Kartashov. Da die Signale jedoch extrem schwach sind, werden etwa 1 000 Pulse pro Sekunde auf die Probe geschossen und die Einzelaufnahmen summiert (siehe Abbildung oben links).

Auf diese Weise erhalten die Forschenden zunächst Momentaufnahmen aus dem Material. Um seine innere Dyna-

mik beobachten zu können, kommt ein weiterer Laser ins Spiel. Dieser Anregungslaser versetzt die Elektronen im Atomgitter zunächst in Bewegung. Anschließend kommt der zweite Laserpuls mit einer variablen Verzögerung, um Schnappschüsse dieser Dynamik zu machen. Werden dabei Spektren der erzeugten Harmonischen aufgezeichnet, entsteht eine Serienbildaufnahme der Gitterdynamik, ähnlich wie in der Sportfotografie, wenn sehr schnelle Bewegungen – etwa der Zieleinlauf der Sprinter – in Einzelbildern aufgelöst werden.

Diese Pump-Probe-Spektroskopie genannte Methode wenden die Forschenden auf unterschiedliche Nanomaterialien an. Neben den Quantenpunkten untersuchen sie auch Nanodrähte und einlagige Membranen, die von Kollegen um Prof. Turchanin hergestellt werden (siehe S. 17). »So erhalten wir Informationen darüber, wie sich unterschiedliche Strukturen und Geometrien auf die optischen Eigenschaften der Halbleitermaterialien auswirken«, erläutert Maria Wächtler. Das sei aktuell noch weitgehend Grundlagenforschung, die jedoch erhebliches praktisches Anwendungspotenzial habe. »Mit diesen Erkenntnissen könnten sich photonische Halbleiter entwickeln lassen, die in photonischen Computerchips Anwendung finden«, so Kartashov. Diese hätten gegenüber elektronischen Chips den großen Vorteil, dass mit erheblich größerer Geschwindigkeit Informationen verarbeitet werden könnten: Die Lichtgeschwindigkeit ist mindestens 1 000 mal höher als die Geschwindigkeit von Elektronentransportprozessen. ■



Chemische Reaktionen in Großaufnahme

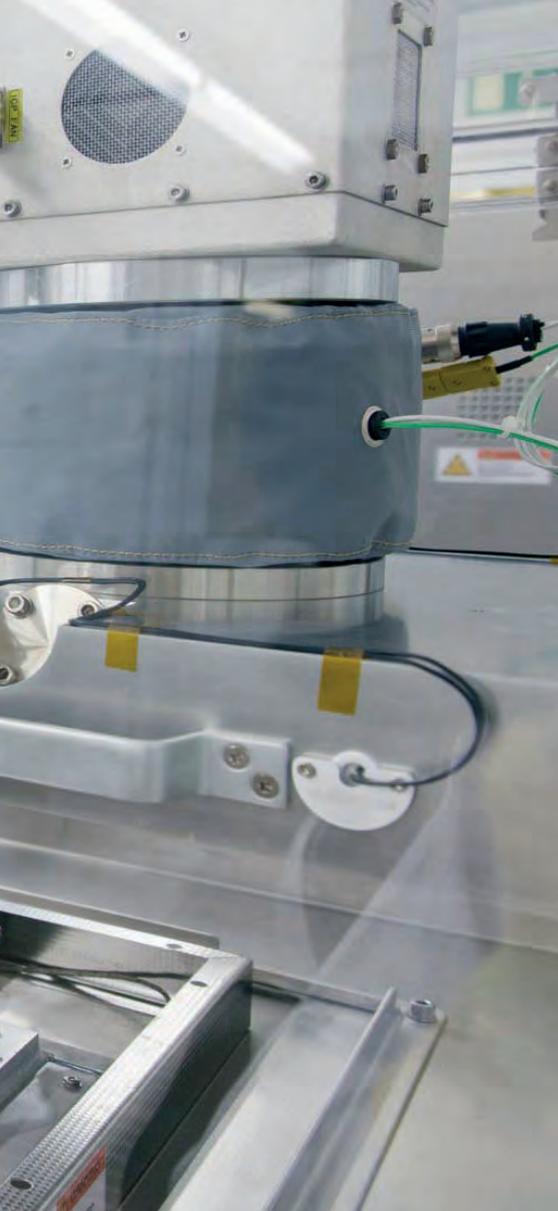
Was sich zwischen einzelnen Atomen und Molekülen abspielt, wenn sie miteinander reagieren, lässt sich bisher nicht direkt beobachten. Die Signale, die durch eine Wechselwirkung von Licht mit Atomen und Molekülen erzeugt werden, sind zu schwach, um sie mit gängigen Bildgebungsverfahren zu erfassen. Ein Jener Forschungsteam hat eine Strategie entwickelt, um die schwachen Signale durch plasmonische und nichtlinear optische Effekte zu verstärken – ein erster Schritt zur direkten Beobachtung chemischer Reaktionen an Einzelmolekülen.

TEXT: UTE SCHÖNFELDER

Wir fördern Wissen »zutage«. Wir wollen die Natur um uns herum »näher beleuchten«. Wenn wir eine Erkenntnis gewinnen, »geht uns ein Licht« auf. Metaphern über die erhellende Wirkung von Licht gibt es viele. Und das nicht ohne Grund: »Wenn wir etwas über unsere Umwelt lernen wol-

len, über Materie und Moleküle, die uns umgeben und die grundlegenden Prozesse, die darin ablaufen, brauchen wir Licht«, sagt Chemiker Prof. Dr. Jürgen Popp. »Anfangen von einfachsten Mikroskopen, die jeder noch aus dem Schulunterricht kennt, bis zu modernsten Bildgebungsverfahren,

die auf der Wechselwirkung von Laserlicht mit Materie beruhen, ist Licht der Schlüssel zu dem, was wir sehen.« Popp und seine Teams am Institut für Physikalische Chemie der Universität Jena und am Leibniz-Institut für Photonische Technologien (Leibniz-IPHT) forschen an spektroskopischen Metho-



Raman-Spektroskopie

Der indische Physiker und spätere Nobelpreisträger Chandrasekhara Venkata Raman entdeckte 1928 die nach ihm benannte Raman-Streuung: Treffen einfarbige Lichtteilchen auf Moleküle, wird das Licht gestreut. Der überwiegende Teil des Lichts behält dabei seine Wellenlänge und Frequenz, die Streuung erfolgt elastisch. Etwa jedes Millionste Photon jedoch wird inelastisch gestreut. Das bedeutet, es wird entweder Energie vom Lichtfeld auf das Molekül oder vom Molekül auf das Lichtfeld übertragen. Beide Fälle führen dazu, dass die gestreuten Photonen eine vom eingestrahlten Licht abweichende Wellenlänge (Frequenz, Energie) aufweisen.

Die Raman-Spektroskopie macht sich die inelastische Streustrahlung zunutze, indem Schwingungsenergie, die für jedes Atom bzw. Molekül spezifisch ist, übertragen wird. Raman-Spektren sind daher so etwas wie chemische Fingerabdrücke: Sie geben eindeutig Auskunft über die Zusammensetzung der untersuchten Probe.

Für seine Experimente nutzt das Forschungsteam Nanostrukturen, die in nanometerdünne, spiegelglatte Goldoberflächen geätzt werden. Hier wird das Metall unter Vakuum mit einem Dünnschichtabscheidungsverfahren auf Siliziumscheiben (Wafer) aufgebracht. · Foto: Sven Doering, Agentur Focus

den, die es ermöglichen, mitten in eine chemische Reaktion hineinzusehen. Dafür optimieren sie die Raman-Spektroskopie (siehe Kasten oben) – ein spektroskopisch-analytisches Verfahren, das heute bereits vielfältig Anwendung findet, etwa in der Analytik von Trinkwasser, Nahrungsmitteln oder der klinischen Diagnostik für den Nachweis von Krankheitserregern. Mittels Raman-Spektroskopie lässt sich berührungslos jedes Material und jedes Molekül eindeutig identifizieren. »Das Spektrum einer Probe gleicht einem chemischen Fingerabdruck«, veranschaulicht apl. Prof. Dr. Michael Schmitt aus Popp's Team.

Allerdings: Der dem Raman-Signal zugrundeliegende Effekt der inelastischen Lichtstreuung ist ein schwacher Prozess; wollen die Forschenden Einzelmoleküle betrachten, müssen sie die Signale verstärken, um sie überhaupt messen zu können.

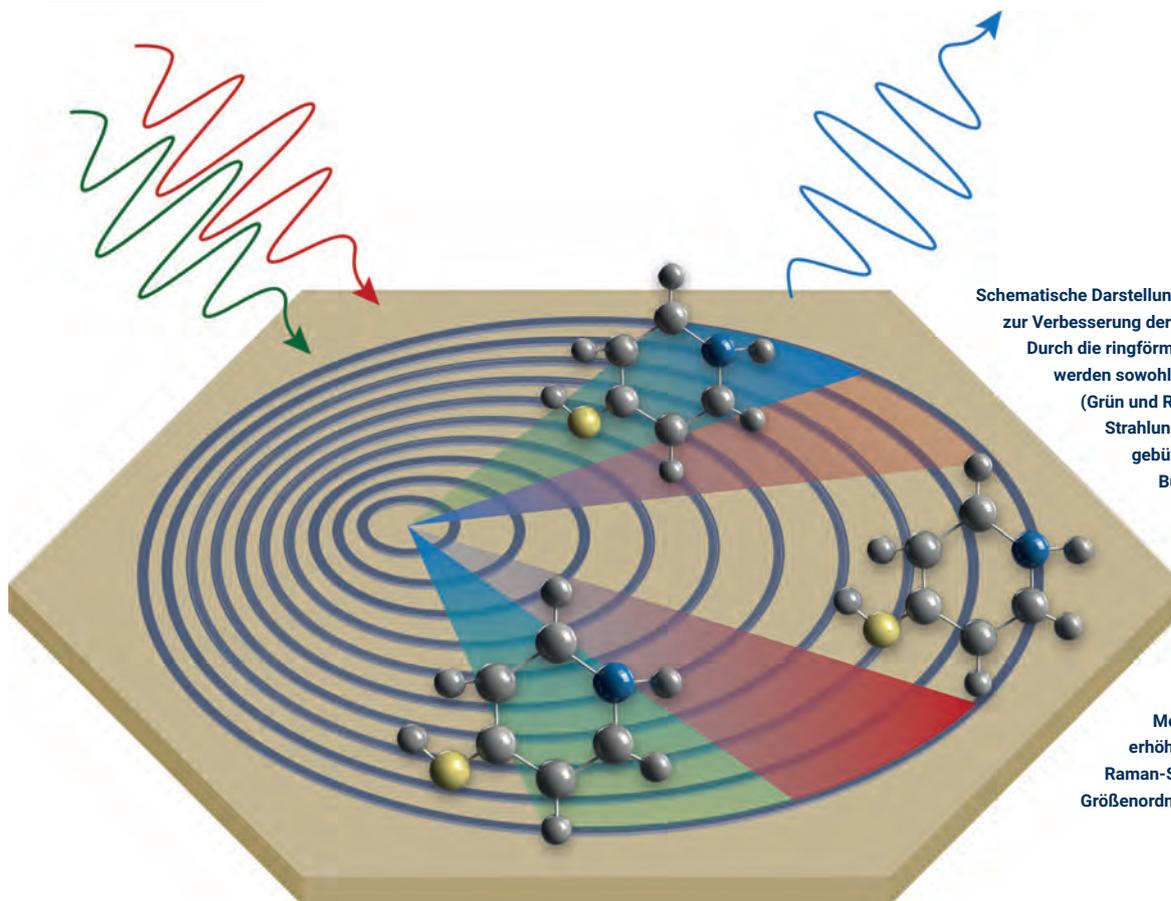
Und genau daran arbeiten Jürgen Popp und Michael Schmitt gemeinsam mit PD Dr. Jer-Shing Huang vom Leibniz-IPHT im Rahmen des Sonderforschungsbereichs »NOA«. Gerade haben die Forschenden einen ersten entscheidenden Schritt gemacht: In einer im Fachmagazin »ACS Nano« veröffentlichten Arbeit kombinieren sie mit Partnern aus Taiwan zwei Methoden, um das Raman-Signal effektiv zu verstärken.

Schwaches Raman-Signal wird plasmonisch verstärkt

Zum einen nutzen sie dafür plasmonische Nanostrukturen (siehe Kasten S. 21). Mit solchen optischen Antennen lassen sich selbst nanometerkleine Bereiche ausleuchten und so die Auflösung bildgebender Verfahren erhöhen. Im vorliegenden Fall nutzen

die Forschenden plasmonische Strukturen jedoch, um das schwache Raman-Signal selbst zu verstärken: In den Nanostrukturen werden die Elektronen mit einem Laser zu sogenannten Oberflächenplasmonen angeregt, wodurch ein starkes elektrisches Feld entsteht, mit welchem Moleküle absorbiert und an den Nanostrukturoberflächen wechselwirken können. Dadurch wird die Wechselwirkung zwischen Raman-Anregungslicht und den zu untersuchenden Molekülen verstärkt und damit auch die Intensität der Raman-Streuung. Eine Verstärkung des Raman-Signals um bis zu zehn Größenordnungen lässt sich mittels dieses »Surface-enhanced Raman scattering« (SERS) genannten Verfahrens im Vergleich zur unverstärkten Raman-Spektroskopie erreichen.

Für seine Experimente nutzt das Forschungsteam Nanostrukturen aus Gold. Diese werden in spiegelglatte



Schematische Darstellung der Nanoplatte zur Verbesserung der Raman-Spektroskopie. Durch die ringförmigen Nanostrukturen werden sowohl die Anregungsstrahlen (Grün und Rot) als auch die Raman-Strahlung (Blau) kohärent gebündelt. Diese kohärente Bündelung wird durch die Oberflächenplasmonen in den farbigen Bereichen weiter begünstigt. Deren Wechselwirkung mit den zu untersuchenden Molekülen (Kugelmoleküle) erhöht die Intensität des Raman-Signals um zwölf Größenordnungen.

etwa 300 Nanometer dünne Einzelkristalle, sogenannte Goldflakes, gefräst. »Wir verwenden unterschiedliche Größen und Formen der Nanostrukturen und wollen herausfinden, wie sich das Design auf den plasmonischen Effekt auswirkt«, erläutert Jer-Shing Huang.

Nanostrukturen aus Gold wirken als Antennen für Laserlicht

Der Nanotechnologie-Experte und seine Kollegen gehen dabei zielgerichtet vor: Von theoretisch arbeitenden Gruppen um Prof. Dr. Stefanie Gräfe und Prof. Dr. Ulf Peschel aus dem Sonderforschungsbereich (siehe Interview S. 14) lassen sie zunächst die Wechselwirkung der Strukturen mit Licht am Computer modellieren, um daraus für den jeweils gewünschten Effekt die

optimalen Designparameter abzuleiten. Neben dem SERS-Verfahren wenden die Jenaer Forscher in ihrer vorgelegten Arbeit eine weitere Möglichkeit an, das Raman-Signal zu verstärken: Durch nichtlineare Wechselwirkungen zwischen Licht und Material wird das über intensive Kurzpulslaser angeregte Raman-Streulicht kohärent gebündelt. Das »Coherent anti-Stokes Raman Scattering« (CARS) führt dadurch ebenfalls zu verstärkten Raman-Signalen.

In ihrer aktuellen Publikation haben die Forschenden eine mit nanoskalierten Ringen strukturierte Goldfläche (siehe Abbildung oben) hergestellt und diese sowohl zur plasmonischen Verstärkung des einstrahlenden Laserlichts (CARS) als auch des kohärenten Raman-Signals verwendet (SERS). Mit dem resultierenden »Nonlinear surfa-

ce-enhanced coherent anti-Stokes Raman scattering« (SECARS) Verfahren lässt sich durch die Kombination der beiden Verstärkungsmechanismen CARS und SERS das Raman-Signal um bis zu zwölf Größenordnungen verstärken.

Mit diesem Know-how, so das Fazit der Forscher, lasse sich die Nachweisgrenze der Raman-Spektroskopie wesentlich verschieben. »Zu den bestehenden Vorteilen des Verfahrens – zum Beispiel dass man dafür die Probenmoleküle direkt ohne Farbstoffe verwenden kann – kommt nun eine hohe Sensitivität hinzu«, macht Jürgen Popp deutlich. Michael Schmitt ergänzt, dass es das Ziel sei, die Methodik soweit zu verfeinern, dass sich damit chemische Reaktionen an Einzelmolekülen direkt beobachten lassen: »Der Traum eines jeden Chemikers«. ■



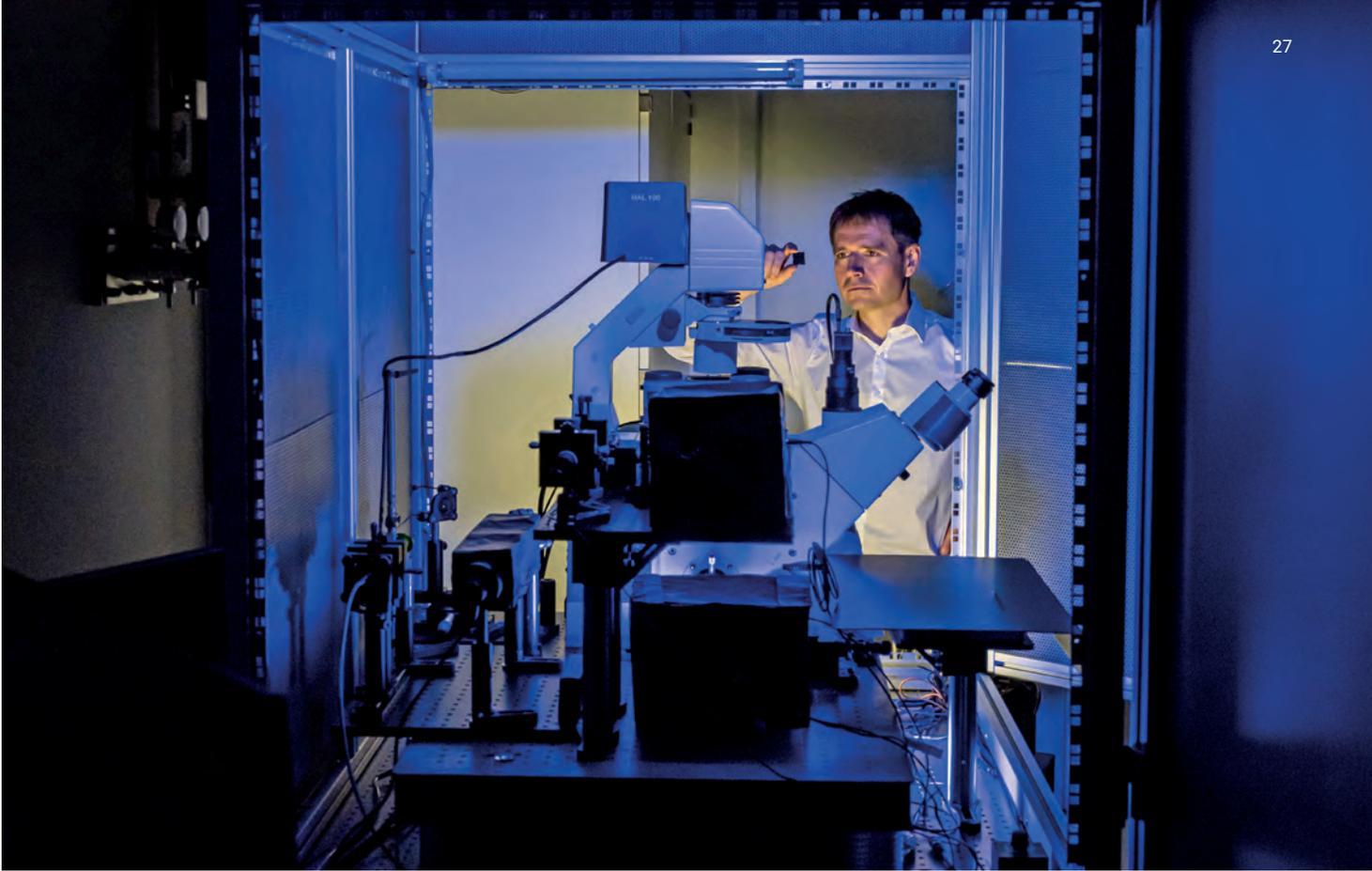
Original-Publikation:

Spatially Resolving the Enhancement Effect in Surface-Enhanced Coherent Anti-Stokes Raman Scattering [...], ACS Nano 2021, DOI: 10.1021/acsnano.0c07198

Kontakt

Prof. Dr. Jürgen Popp, PD Dr. Jer-Shing Huang
Institut für Physikalische Chemie,
Leibniz-Institut für Photonische Technologien
Albert-Einstein-Straße 9, 07745 Jena

Telefon: +49 36 41 206-300
E-Mail: juergen.popp@ipht-jena.de,
jer-shing.huang@leibniz-ipht.de
www.ipc.uni-jena.de, www.leibniz-ipht.de



Prof. Dr. Thomas Pertsch untersucht nanostrukturierte Oberflächen mit einem Nahfeldmikroskop. · Foto: Jens Meyer

Spitzenforschung mit Nanoleuchten

Ein »Plattenspieler« für Nanomaterialien: Forschungsteams aus Chemie und Physik entwickeln extrem dünne Metallspitzen und optische Fasern, mit denen sich feinste Oberflächenstrukturen abrastern und analysieren lassen. In Kombination mit intensivem Laserlicht werden die Metallspitzen zu superfokussierenden Nano-leuchten, die neben der räumlichen Auflösung von Oberflächenstrukturen zum Beispiel auch deren chemische Zusammensetzung oder optische Eigenschaften detektieren.

TEXT: UTE SCHÖNFELDER

Die Wechselwirkung von Licht und Materie untersuchen die Forschungsteams um Prof. Dr. Volker Deckert und Prof. Dr. Thomas Pertsch. Dafür nutzen sie ein hochauflösendes optisches Verfahren, das auf dem Prinzip der bereits etablierten Rastersondenmikroskopie basiert und nichtlineare optische Effekte einbezieht. »Ein Rastersondenmikroskop funktioniert, vereinfacht gesagt, wie ein Plattenspieler«, erläutert Thomas Pertsch. Eine winzige Metallspitze rastert die Oberfläche der zu untersuchenden Materialprobe ab und überträgt Informationen über deren Topografie über einen bewegli-

chen Arm auf einen Detektor. »Diese Methode ist so empfindlich, dass sich Metalloberflächen bis auf einzelne Atome im Metallgitter auflösen lassen«, so Pertsch.

Doch das ist den Physikern noch nicht empfindlich genug. In einem gemeinsamen Projekt kombinieren die Forscher die Rastersondenmikroskopie mit optischen Verfahren, um neben der Oberflächenstruktur auch Informationen über die optischen und chemischen Eigenschaften der zu untersuchenden Proben zu erhalten. Bisher verfolgen Volker Deckert und Thomas Pertsch dabei jeweils unterschiedliche

Ansätze, die sie im Sonderforschungsbereich »NOA« zu einem gemeinsamen Messverfahren kombinieren wollen.

Silbertröpfchen machen Siliziumnadel empfindlicher

So nutzen Deckert und seine Kolleginnen und Kollegen vom Institut für Physikalische Chemie winzige Siliziumnadeln, um die Proben abzurastern. Die Nadeln selbst sind etwa 50 Mikrometer lang – weniger als ein Blatt Papier dick ist. Die Nadelspitze, die mit der Probe interagiert, ist aber noch mehr

als 1 000 Mal kleiner, lediglich fünf bis zehn Nanometer misst sie im Durchmesser. Doch das ist immer noch nicht klein – und damit empfindlich – genug. »Zusätzlich wird die Siliziumnadel mit Silber bedampft, das sich in winzigen Tröpfchen an der Siliziumoberfläche niederschlägt«, erläutert Deckert. Die einzelnen Silbertröpfchen vergrößern die effektive Nadelspitze nur unwesentlich um etwa 10 nm, was etwa der Dicke einer Zellmembran entspricht.

Die so präparierte Nadel rastert nicht nur aufgrund ihrer winzigen Größe jedes noch so kleine Detail der Probe ab und deckt dabei Strukturen und Defekte in allen Einzelheiten auf. Zusätzlich wird sie während des Messvorgangs mit Laserlicht bestrahlt und an ein Raman-Spektrometer gekoppelt. Das reflektierte Licht der Nadel kann damit ebenfalls zur Detektion der Oberflächenstruktur und ihrer Eigenschaften herangezogen werden.

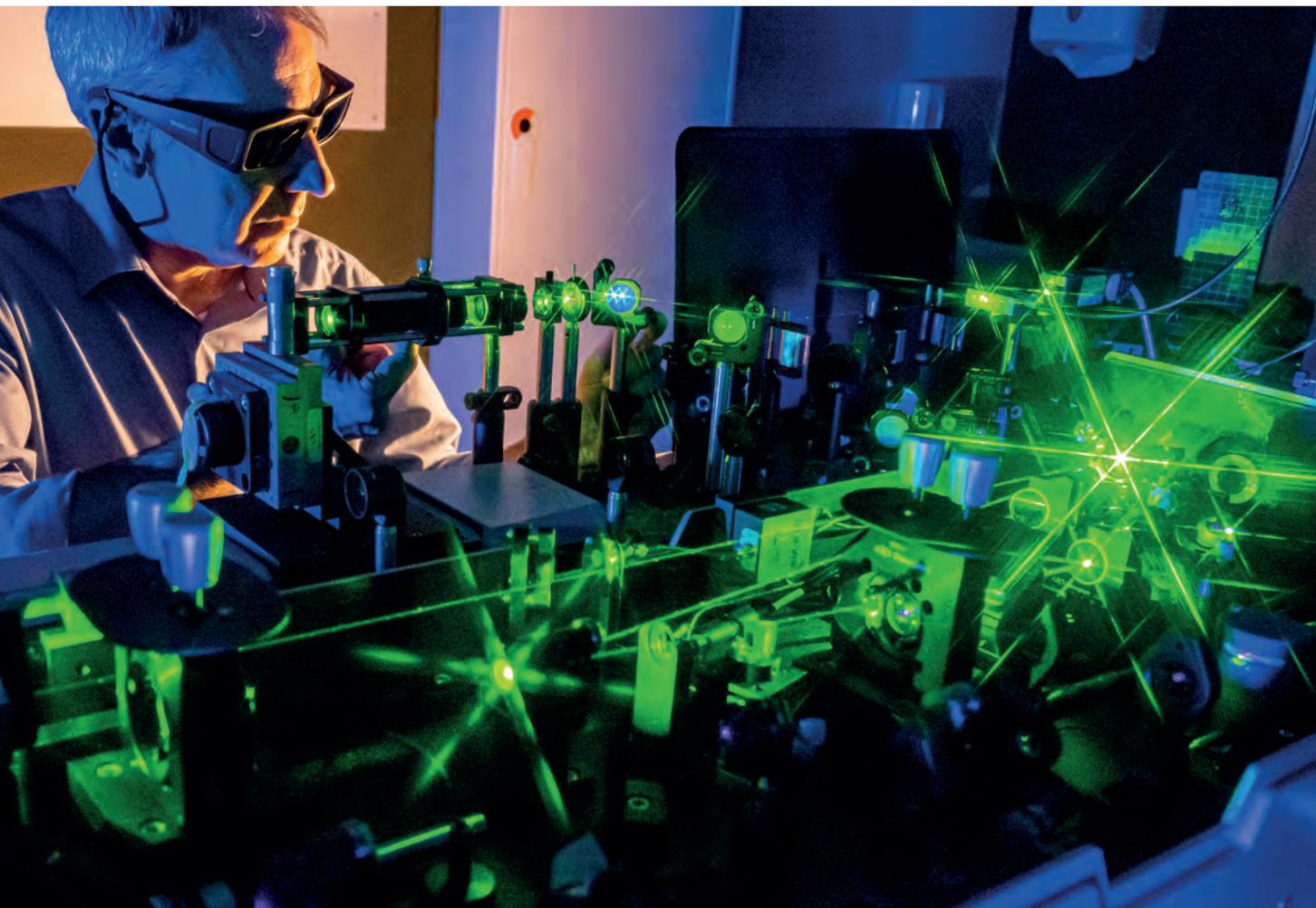
Hauptsächlich bezwecken die Forschenden damit aber etwas anderes: »Die Konzentration von Lichtteilchen mit hoher Intensität in dem sehr kleinen Volumen der Metallnadel führt zu nichtlinearen Effekten zwischen Licht und Material«, sagt Deckert. Die Nadelspitze selbst wird dabei quasi zur Lichtquelle, die die Lichtteilchen lokal so stark konzentriert, dass sie dabei die Empfindlichkeit der Raman-Spektroskopie deutlich erhöht. Wie das Team um Jürgen Popp und Jer-Shing Huang (siehe S. 24) nutzt Deckert dabei sowohl lineare, als auch nichtlineare Wechselwirkungen zwischen Licht und Material aus, um das über intensive Kurzpuls-laser angeregte Raman-Streulicht kohärent zu bündeln (»Coherent anti-Stokes Raman Scattering«; CARS), was die Raman-Signale verstärkt. Dass sich diese Methoden ganz praktisch nutzen lassen, das konnten die Jenaer Forschenden gemeinsam mit US-amerikanischen Kollegen in einer

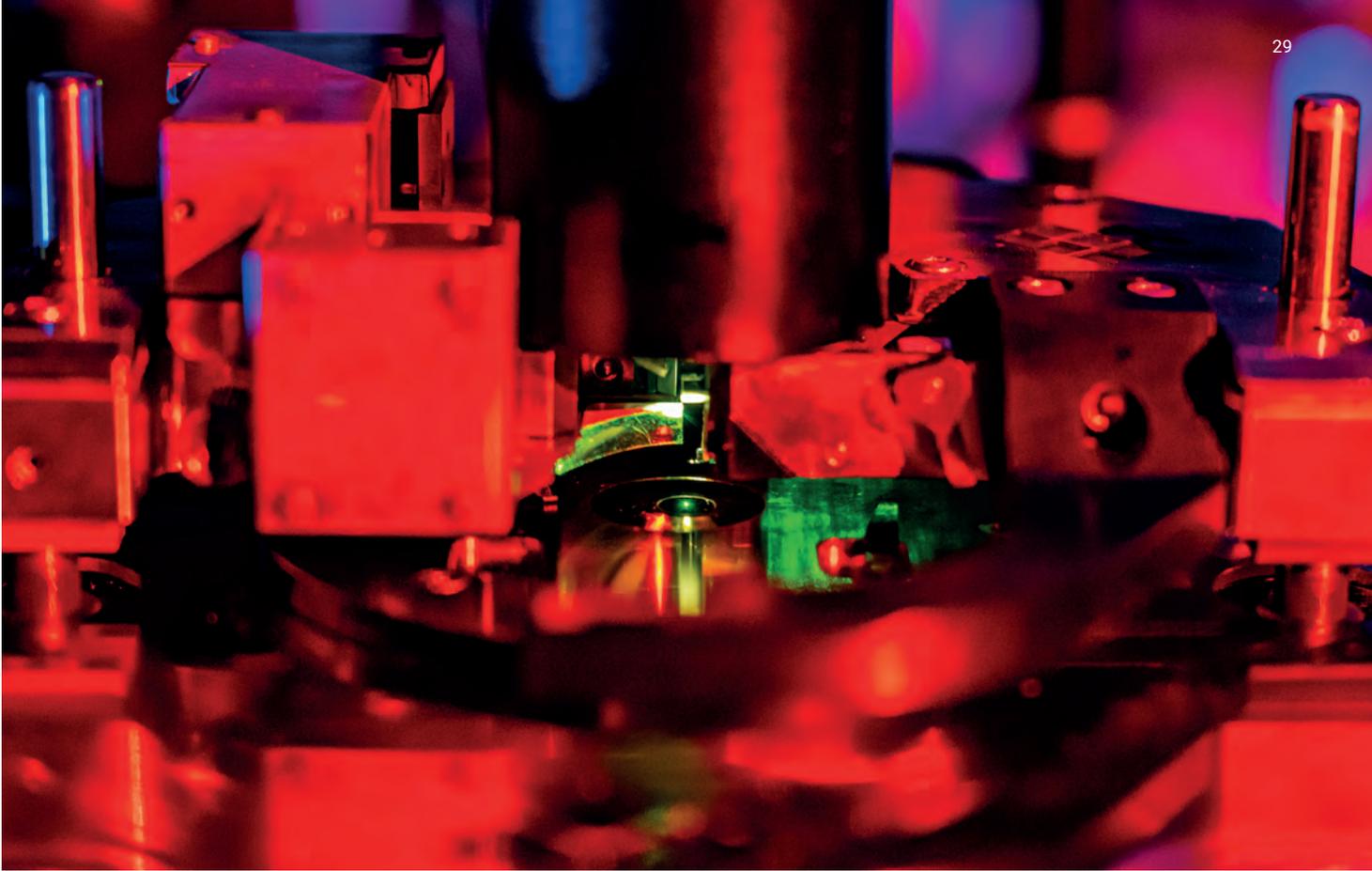
kürzlich publizierten Studie zeigen. Im Fachmagazin »Proceedings of the National Academy of Sciences« präsentierten sie Messergebnisse, wonach sich in klinischen Proben mittels spitzenverstärkter Raman-Spektroskopie nicht nur einzelne Viruspartikel nachweisen, sondern zugleich auch die jeweilige Virusart identifizieren lassen – und das innerhalb weniger Minuten. Während in der vorgestellten Studie Influenza- und Coxsackie-Viren untersucht wurden, ist das Verfahren prinzipiell natürlich auch geeignet, um beispielsweise SARS-CoV-2 nachzuweisen, betont Volker Deckert.

Vergoldete Fasern konzentrieren Lichtteilchen

Das Team um Thomas Pertsch im Institut für Angewandte Physik verfolgt einen anderen Ansatz, um lichtfokussierende Nadeln für nichtlinear-optische

Prof. Dr. Volker Deckert justiert einen Laser zur Untersuchung nanoskaliger Oberflächen und ihrer nichtlinearen optischen Eigenschaften. - Foto: Jens Meyer





Blick auf eine versilberte Siliziumspitze zum Abtasten von Oberflächen und Material. Durch die Metallspitze wird die Empfindlichkeit der Raman-Spektroskopie deutlich erhöht. · Foto: Jens Meyer

Untersuchungen herzustellen. »Wir verwenden optische Fasern, die an der Spitze mit einer dünnen Schicht Gold umhüllt sind«, erklärt Pertsch. Die Faser selbst hat etwa »Haaresbreite« – sie misst 125 Mikrometer im Durchmesser und damit etwas mehr als ein menschliches Haar. Ihre Spitze besitzt etwa 50 Mikrometer Länge und läuft auf wenige Nanometer spitz zu. Wird durch die Faser Laserlicht entsprechender Wellenlänge geführt, kommt es an der vergoldeten Spitze zur resonanten Wechselwirkung der Lichtteilchen und der Elektronen des Goldüberzugs. Es entsteht ein sogenanntes Oberflächenplasmon – die kollektive Anregung von Elektronen entlang der Metalloberfläche – das mit den Lichtteilchen interagiert. »Auf diese Weise können wir Licht an der Nadelspitze fokussie-

ren, das durch die Interaktion mit den Elektronen dort praktisch gefangen ist und sich nicht entfernen kann«, so Pertsch. Mit der leuchtenden Nadel lassen sich Proben abrastern, während das Licht mit der Probe wechselwirkt. Zugleich führt die Faser das von der Probe reflektierte Licht zurück und leitet es an einen Detektor weiter.

Nanostrukturen bestimmen die optischen Eigenschaften

Auf diese Weise erhalten die Forscher umfangreiche und vielfältige Informationen über die untersuchten Proben. »Aus den detektierten Daten lassen sich Schlüsse ziehen, welche Strukturen der Probe welche optischen Eigenschaften erzeugen«, so Deckert. Ziel sei es, ir-

gendwann Nanostrukturen gezielt herstellen zu können, dass die Materialien genau die optischen Eigenschaften aufweisen, die man für eine konkrete Anwendung braucht.

Im aktuellen Forschungsprojekt im Sonderforschungsbereich »NOA« geht es zunächst um Grundlagenforschung, die an gut charakterisierten Referenzmaterialien die Untersuchungsmethodik etablieren soll. »Entscheidend für den Erfolg dabei ist auch die enge Kooperation mit Forschungspartnern, die theoretische Modellierungen von Licht-Materie-Wechselwirkungen vornehmen«, betont Thomas Pertsch. Dies sei sowohl für die Entwicklung der Nanospitzen als auch für die Auswertung der nichtlinearen optischen Effekte unerlässlich. ■

Original-Publikation:

Laser spectroscopic technique for direct identification of a single virus I: FASTER
CARS, Proc Natl Acad Sci U S A. 2020,
DOI: 10.1073/pnas.2013169117

Kontakt

Prof. Dr. Volker Deckert
Institut für Physikalische Chemie
Prof. Dr. Thomas Pertsch
Institut für Angewandte Physik

Telefon: +49 36 41 9-48 347,
+49 36 41 9-47 560
E-Mail: volker.deckert@uni-jena.de,
thomas.pertsch@uni-jena.de
www.ters.uni-jena.de, www.iap.uni-jena.de



Jena auf dem Weg zum Quantum Valley

Auch wenn es vielen nicht bewusst sein dürfte, Quanten und ihre Eigenschaften prägen unser Alltagsleben schon seit einiger Zeit. Bereits in den 1950er Jahren lieferte uns die sogenannte »erste Quantenrevolution« die physikalischen Grundlagen für die Entwicklung von Computerchips oder Lasern. Heute erleben wir nun schon die »zweite Quantenrevolution«: Neue Anwendungen, die zu den Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts zählen, stehen kurz vor dem Durchbruch. Was die Zukunft bringt und welche Rolle der Standort Jena einnimmt, darüber spricht der Physiker Prof. Dr. Andreas Tünnermann im Interview.

INTERVIEW: TILL BAYER

Herr Tünnermann, im Sonderforschungsbereich »NOA« leiten Sie ein Projekt, in dem nichtlineare Eigenschaften von Nanomaterialien untersucht werden. Worum geht es dabei und was hat das mit Quantentechnologie zu tun?

Einerseits erforschen wir grundlegende Phänomene der Quantenphysik, andererseits wenden wir unsere Forschungsergebnisse bereits an. Seit ihren Anfängen vor fast 100 Jahren hat die Quantenphysik Technologien wie Computerchips, mikroelektronische Bauelemente oder Laser als neuartige Lichtquellen hervorgebracht. Im Sonderforschungsbereich greifen wir auf Kenntnisse aus diesen drei Bereichen zurück.

Im Projekt meines Teams geht es darum, Licht-Materie-Wechselwirkung in Systemen zu untersuchen, die nur aus wenigen Atomlagen bestehen. Interessant sind dabei zum Beispiel sogenannte Tunnelphänomene: Ein Teilchen kann dabei durch Licht über eine Potenzialbarriere bewegt werden, die den Transport elektrischer Ladungen eigentlich verhindert. Das ist nur möglich, indem wir uns quantenphysikalischer Phänomene auf atomarer Skala bedienen.

Mit welchen anderen Projekten treiben Sie die Erforschung von Quantentechnologien in Jena voran?

Der modernen Quantenforschung ist es gelungen, selbst einzelne Quantenteilchen mit hoher Präzision zu kontrollieren. Sowohl am Institut für Angewandte Physik der Universität als auch am Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF verfolgen wir eine Reihe von Projekten, die auf dieser Errungen-

schaft aufbauen. Ein prominentes Beispiel ist »QuNET«, eine Initiative des Bundesministeriums für Bildung und Forschung. Darin erforschen wir im Rahmen einer großen Kooperation, wie wir mittels Quantenphänomenen unsere Kommunikation hochsicher gestalten können. Das betrifft sowohl die Verschlüsselung als auch die Übertragung von Informationen.

Das zweite große Thema liegt im Bereich der Bildgebung. Hier forschen wir zum Beispiel an Analyseverfahren, die auf den Quanteneffekten der verschränkten Photonenzustände basieren. Derlei Verfahren erlauben die Analyse von Proben, die auf bestimmte Arten von Strahlung sensibel reagieren und mit herkömmlichen Systemen nicht möglich sind. Insbesondere in der Medizin kann dieses Verfahren hilfreich sein, indem es zum Beispiel die Strahlenbelastung bei Gewebeaufnahmen reduziert.

Warum beschäftigen Sie sich überhaupt mit der Quantenwelt?

Was fasziniert Sie daran?

Aus meiner Perspektive ist vor allem interessant, dass die präzise Kontrolle von Quantensystemen neue Anwendungsbereiche in der Sensorik, der Kommunikation und im Computing ermöglicht. Mich treibt die Herausforderung an, diese Technologien weiterzuentwickeln, damit am Ende volkswirtschaftliche Mehrwerte entstehen. Ich hatte die Chance, bereits die Ergebnisse der sogenannten ersten Quantenrevolution nutzen und daran anknüpfend in den 1980er und 90er Jahren beim Aufbau der Lasertechnik mitwirken zu können. Damals haben wir es geschafft, in Deutschland eine Community aufzubauen und Unter-

nehmen zu Weltmarktführern zu machen. Heute kommen fast 50 Prozent aller Hochleistungslaser für industrielle Produktion und Medizintechnik aus Deutschland.

Ich hoffe, dass wir mit dem gesammelten Wissen der Hochschulen und außeruniversitären Forschungseinrichtungen sowie der Innovationskraft der Unternehmen die zweite Quantenrevolution, wie wir sie jetzt gerade erleben, in ähnlicher Weise gestalten können, um einen Mehrwert für Gesellschaft und Wirtschaft zu schaffen.

Vor allem Quantencomputer lassen aufhorchen, weil sie konventionellen Rechnern in Sachen Rechenleistung weit überlegen sein können.

Wie ist der Entwicklungsstand bei dieser Technologie?

Um Quantencomputer ist ein Hype entstanden und wir müssen unsere Erwartungen zügeln. Theoretisch sind sie klassischen Computern an verschiedenen Stellen überlegen, weil sie ein anderes Skalierungsverhalten besitzen. Es fällt ihnen etwa leichter, eine sehr große Zahl in Primzahlfaktoren zu zerlegen, womit sich Verschlüsselungssysteme brechen lassen. Quantencomputer werden aber auch den Weg bereiten für völlig neue Entwicklungen, etwa im Bereich der Materialforschung.

Praktisch gesehen, ist der Weg zum universellen Quantencomputer aber noch sehr weit. Ich denke, dass es zunächst einen konventionellen Computer mit Quanteneinschub geben wird, der spezielle Rechenoperationen ermöglicht. Wir müssen jedenfalls davon ausgehen, dass noch viele Jahre Entwicklungszeit nötig sind. Trotzdem handelt es sich um eine Technologie, die langfristig das größte Potenzial besitzt.

Wie lange wird es dauern, bis Quantentechnologien spürbar in unser Leben Einzug halten?

Wir alle werden bereits in wenigen Jahren mit neuen Quantentechnologien im Alltag in Berührung kommen, zum Teil mittelbar und zum Teil ganz direkt. Am offensichtlichsten wird das im Bereich der Datenverschlüsselung passieren, die ein gesellschaftliches Grundrecht berührt. Moderne Systeme verwenden schon heute sogenannte »Quantum Number Generators«. Es darf aber nicht übersehen werden, dass wir bereits in einer Gesellschaft leben, die quantenmechanische Phänomene für sich nutzt. Ein klassisches Beispiel ist die CD, für deren Abspielen ein Laser benötigt wird.

Allein mit dem aktuellen Konjunkturpaket investiert die Bundesregierung zwei Milliarden Euro in die Entwicklung von Quantentechnologien.

Ist Deutschland bei der Förderung der Quantenforschung gut aufgestellt?

In Deutschland besitzen wir eine hervorragende Grundlagenforschung, die den internationalen Vergleich nicht scheuen muss. Das liegt vor allem an der langfristigen Förderung, die bereits seit Jahrzehnten läuft, etwa durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft oder das Bundesministerium für Bildung und Forschung.

Momentan zielen alle Fördermaßnahmen darauf ab, das Wissen in die Entwicklung neuer Anwendungen zu transferieren. Insbesondere die Förderung qualifizierten Nachwuchses ist hier ein relevanter Faktor. Die Bundesregierung will dafür Extra-Programme ins Leben rufen. Diese sollen Wissenschaft und Wirtschaft vernetzen, die Ausbildung verbessern oder konkrete Bereiche wie das Quantenengineering fördern.

Wichtig ist, dass alle diese Maßnahmen schnell umgesetzt werden, um international konkurrenzfähig zu bleiben. Ich bin aber guten Mutes, weil wir in Deutschland einen entscheidenden Vorteil haben: Den innovativen Mittelstand, der neue Anwendungen zügig auf den Markt bringen kann.



Prof. Dr. Andreas Tünnermann ist seit 1998 Professor für Angewandte Physik der Friedrich-Schiller-Universität Jena und Direktor des Instituts für Angewandte Physik. Er forscht auf den Gebieten der Photonik und Quantentechnologien. Weiterhin leitet er das Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF in Jena. Seit 2009 gehört Andreas Tünnermann dem Direktorium des Helmholtz-Instituts Jena und des Abbe Centers of Photonics an. · Foto: Fraunhofer IOF

Gibt es dennoch etwas, das getan werden kann, um die Rahmenbedingungen weiter zu verbessern?

Wissenschaft basiert nicht nur auf Wettbewerb, sondern auch auf Kooperation. Momentan können wir jedoch beobachten, dass Kooperationen weltweit eingeschränkt werden. Das gilt nicht nur für die Quantenforschung, sondern auch für andere Forschungsfelder. Diese Tendenz finde ich bedenklich. Kooperationen müssen über Ländergrenzen hinweg möglich sein. Jegliche nationalistische Bestrebungen werden langfristig nur dazu führen, sowohl den wissenschaftlichen Fortschritt als auch die gesamtgesellschaftliche Entwicklung auszubremsen.

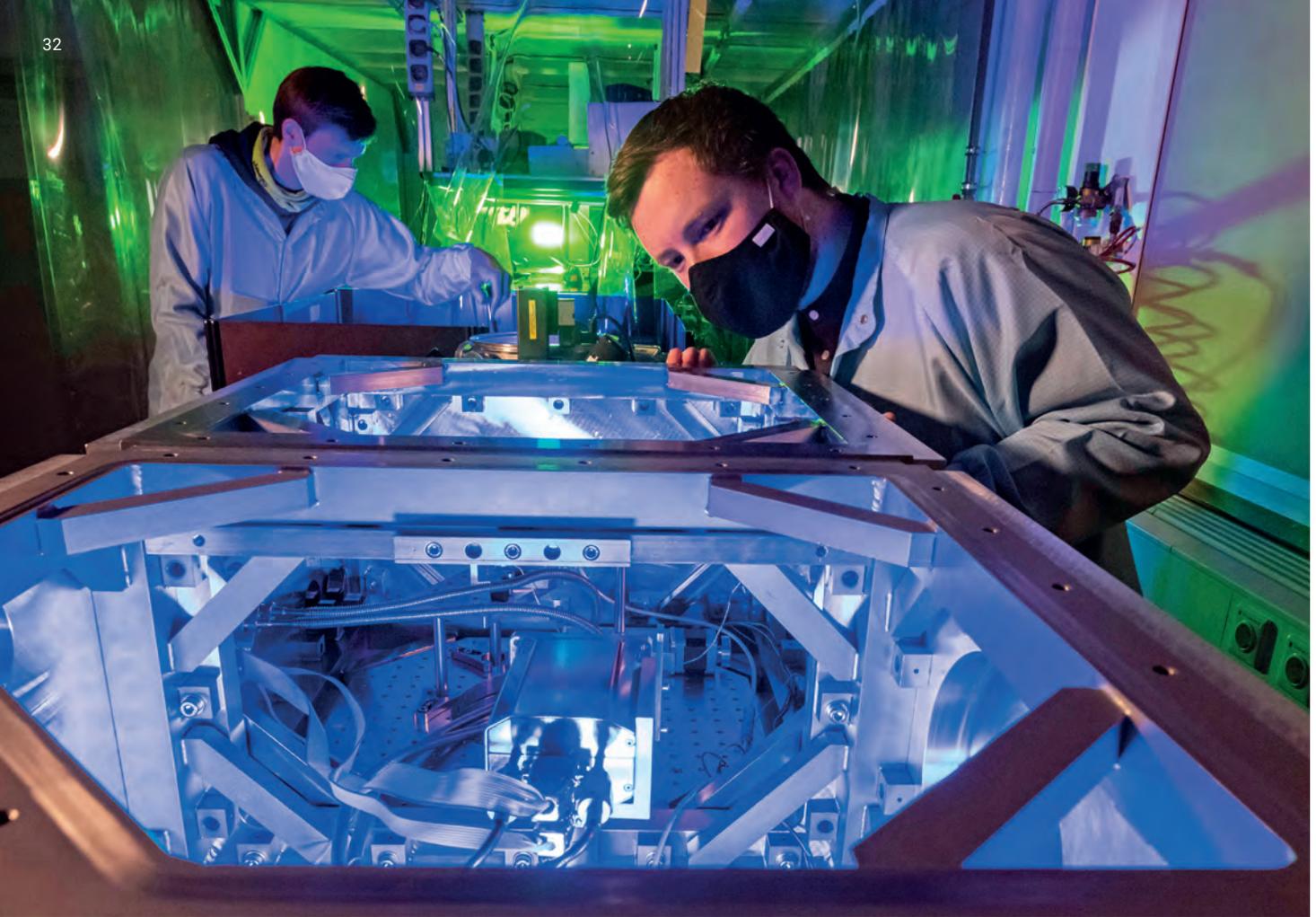
Über meine Netzwerke versuche ich, genauso wie viele Kolleginnen und Kollegen in der ganzen Welt, dem entgegenzusteuern. In Jena forsche ich mit jungen Teams, in denen Menschen aus Europa, Asien, Afrika und Amerika zusammenkommen. Auch innerhalb Europas kooperieren wir eng mit verschiedenen Forschungsgruppen. Außerdem unterhalten wir eine Graduiertenschule mit Kanada und haben eine weitere zusammen mit Australien beantragt.

In Jena beschäftigen sich zahlreiche Akteure mit Quantentechnologien, nicht zuletzt Sie und Ihre Teams an Universität und Fraunhofer-Institut.

Wie werden sich die Region und Thüringen in Sachen Quantenforschung weiterentwickeln?

In Thüringen existiert eine große Anzahl an wettbewerbsfähigen Gruppen. Jena ist schon heute ein Hotspot der Photonik und Quantentechnologien. An der Universität planen wir als nächstes eine neue Physikprofessur, die ihren Forschungs- und Lehrschwerpunkt in der angewandten Quantenphysik haben wird.

Auch wenn wir damit sehr gut aufgestellt sind, halte ich es für notwendig, die beteiligten Akteurinnen und Akteure noch stärker miteinander zu vernetzen. Ich würde mich freuen, wenn der Freistaat Thüringen standortübergreifende Aktivitäten unterstützt und so die Sichtbarkeit der Thüringer Quantenforschung verbessert. Es wird wichtig sein, unsere Kompetenzen in Thüringen synergetisch zusammenzuführen und auch die Wirtschaft mit einzubinden. ■



Optische Harmonielehre

Die optische Mikroskopie hat ihre Grenzen – das hat Ernst Abbe in Jena mit seinen Berechnungen zur Auflösungs-grenze gezeigt. Um diese Grenze zu überschreiten, suchen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler nach Alternativen ohne optische Linsen. Um beim Mikroskopieren Nanometerauflösung zu erreichen, kommen inzwischen häufig hochintensive Laser zum Einsatz, deren Strahlen ein Objekt durchleuchten und dadurch Information über es preisgeben. Eine Quelle für solches Licht sind in Gas erzeugte hohe Harmonische, die Physikerinnen und Physiker auf vielfältige Weise erzeugen und einsetzen.

TEXT: SEBASTIAN HOLLSTEIN

Hohe Harmonische sind eine Lichtquelle, die sich durch besonders kohärentes und kurzwelliges Licht auszeichnen – Eigenschaften, die sowohl zur Auflösung von wenigen Nanometer kleinen Objekten als auch zur Beobachtung dynamischer Prozesse notwendig sind. Um sie zu erzeugen, strahlt man sehr intensive Laserpulse in ein Edelgas. Licht und Gasatome wechselwirken nichtlinear miteinander: Elektronen werden im Lichtfeld in Schwingungen versetzt und geben dabei kurzwellige Strahlung ab – die hohen Harmonischen (siehe Kasten S. 35). Strahlt dieses extrem ultraviolette

(XUV) Licht durch eine unbekannte Probe hindurch, so verändert es seine Eigenschaften. Diese Veränderungen enthalten Informationen über das untersuchte Objekt. Da es sich um sehr kurzwelliges Licht handelt, lassen sich auch Proben durchleuchten, die für normales Licht nicht transparent sind – beispielsweise Plasma.

Was Sterne zum Leuchten bringt

Plasma ist ein Gemisch aus Ionen und freien Elektronen, das entsteht, wenn man Materie sehr stark anregt. Nahe-

zu die gesamte sichtbare Materie im Weltall – Sterne, Galaxien und interstellare Materie – nimmt diesen Aggregatzustand ein. Will man also mehr über unser Universum erfahren, so ist die Erforschung von Plasmen unumgänglich. Zwar lässt sich Plasma im Labor problemlos erzeugen, aber was im »turbulenten« Inneren dieser hochdichten Wolke aus Ionen und freien Elektronen passiert, bleibt bisher verborgen. Prof. Dr. Christian Spielmann und sein Team vom Institut für Optik und Quantenelektronik arbeiten gemeinsam mit internationalen Kolleginnen und Kollegen daran, diese

Bild links: Dr. Frederik Tuitje (r.) und Tobias Helk (l.) aus dem Team von Prof. Dr. Christian Spielmann vom Institut für Optik und Quantenelektronik bereiten die Laser-Plasma-Quelle für Experimente vor. · Foto: Jens Meyer

besondere Form von Materie genau zu untersuchen und buchstäblich zu durchleuchten. Ihr wichtigstes Werkzeug: hohe Harmonische.

Dabei konnten sie bereits erste Erfolge erzielen. In einer im Magazin »Light: Science & Application« veröffentlichten Arbeit, stellt das Forschungsteam eine Methodik vor, die es erlaubt, die Entstehung und Wechselwirkung von hoch ionisiertem Kryptonplasma mit kohärentem ultravioletten Licht im Femtosekundenbereich direkt zu beobachten. »Wir haben zunächst mit einem Laser Kryptongas so angeregt, dass es zu Plasma wurde, und dann einen kohärenten XUV-Sondenpuls – einen hohen Harmonischen – hindurchgesandt, der eine so kurze Wellenlänge aufwies, dass er das Plasma durchdringen konnte«, erklärt Spielmann. »Dieser zweite Strahl nahm, während er sich durch das Plasma ausbreitete, die Eigenschaften des Plasma auf.« Mit einem neuartigen Röntgenlicht-Streuerverfahren konnten die Forschenden die Informationen schließlich auslesen und so ein Abbild der räumlichen Verteilung von Elektronen und Ionen im Plasma erzeugen.

Wie Solarzellen effizienter werden

Auf einem anderen, praxisnäheren Feld liefern hohe Harmonische ebenfalls wichtige Einblicke und helfen sogar beim Kampf gegen den Klimawandel. So erforscht Spielmann im Rahmen des Projektes »QUESTfor ENERGY« gemeinsam mit Prof. Dr. Michael Zürch von der University of Ca-

lifornia in Berkeley sowie Kolleginnen und Kollegen aus anderen Disziplinen neue Nanomaterialien für die Verwendung in Solarzellen. »Die derzeit verbreiteten, einschichtigen Solarzellen auf Siliziumbasis lassen sich in ihrer Effizienz kaum noch steigern und eignen sich deshalb kaum, um den steigenden Energieverbrauch aufzufangen«, sagt Spielmann. »Alternativen müssen her.« So ließen sich möglicherweise verschiedene zweidimensionale Materialien mit unterschiedlichen Absorptionsspektren kombinieren, die mehr Spektralbereiche der Sonne abdecken würden und mehr Licht in elektrische Energie umwandeln könnten.

Um herauszufinden, welche Materialien sich dafür eignen, müssen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler zunächst untersuchen, wie sich ihre optischen und elektronischen Eigenschaften verändern, wenn sie optisch angeregt werden, und wie sich diese optoelektronischen Eigenschaften kontrollieren lassen. Wie breiten sich Ladungsträger im Material aus und was passiert dabei mit der Struktur der Materialien?

Um diese Prozesse zeitaufgelöst – auf einer Femtosekundenskala – beobachten zu können, kommen hohe Harmonische zum Einsatz. Mit ihnen bestrahlen die Forscherinnen und Forscher die angeregte Probe und können am austretenden Strahl atomare Veränderungen im zweidimensionalen Material auslesen. So erfahren sie, wie sich das Elektron einen Weg durch die Probe hindurch gebahnt hat und wie viel Zeit es dafür benötigte.

Phantombilder biologischer Proben

Auch für biologische Analysen könnte die Mikroskopie mit hohen Harmonischen Anwendung finden, denn durch die kurze Wellenlänge lassen sich feinere Details auflösen als mit sichtbarem Licht. Allerdings besteht die Gefahr, dass organische Proben durch die intensive Strahlung geschädigt oder sogar zerstört werden. Messmethoden mit leistungsstarken Röntgenlasern gelingt es zwar, Informationen zu sammeln, bevor Objekte Schaden nehmen, doch diese sind sehr aufwendig. Spielmann und sein Team loten deshalb im Rahmen des Exzellenzclusters »Balance of the Microverse« Möglichkeiten für ein XUV-Ghost-Imaging-Verfahren aus.

Dabei werden Objekte untersucht, die nicht direkt zwischen der XUV-Lichtquelle und einer Kamera stehen. Dafür wird der XUV-Strahl geteilt: in einen intensiven Strahl, der das Bild in einer Kamera ohne Objekt erzeugt, und einen schwachen Strahl, der zeitgleich das zu untersuchende Objekt durchleuchtet und danach auf eine Fotodiode fällt. Da beide Strahlen miteinander korreliert sind, kann durch Kombination der Informationen aus beiden Strahlen, das Objekt vollständig rekonstruiert werden.

Für optimale Ergebnisse müssen die XUV-Strahlen sehr gut kontrolliert werden. Doch wie schaut der optimale Strahl für diese Anwendung aus und wie lässt er sich erzeugen? Diesen Fragen gehen Spielmann und sein Team derzeit nach und wollen in Kürze erste biologische Proben untersuchen. ■

Original-Publikation:

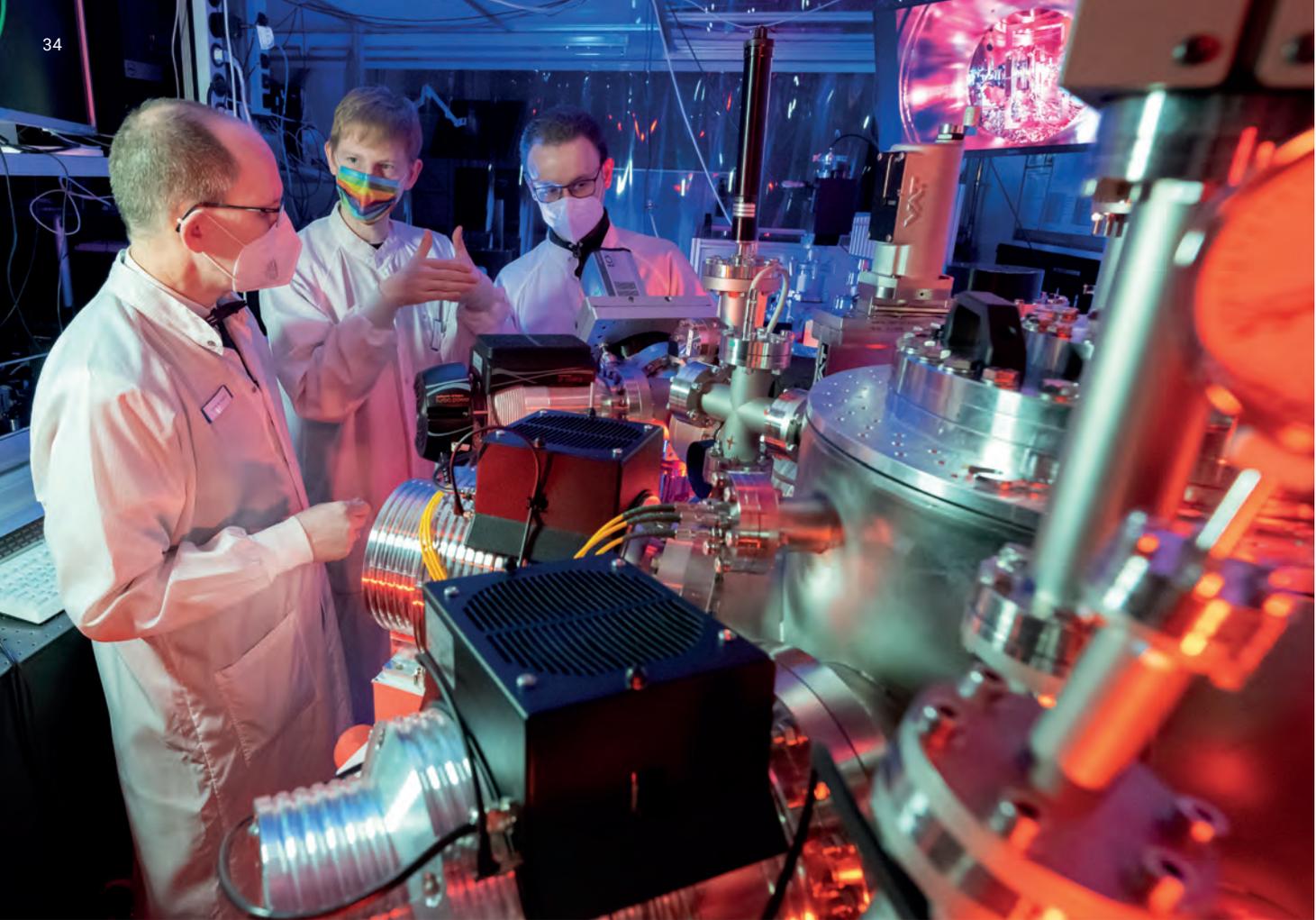
Nonlinear Ionization Dynamics of Hot Dense Plasma Observed in a Laser-Plasma Amplifier, Light: Science & Applications (2020), DOI: 10.1038/s41377-020-00424-2

Kontakt

Prof. Dr. Christian Spielmann
Institut für Optik und Quantenelektronik
Max-Wien-Platz 1, 07743 Jena

Telefon: +49 36 41 9-47 230
E-Mail: christian.spielmann@uni-jena.de
www.physik.uni-jena.de/ioq





Geschärfter Blick ins Innere von Halbleitern

Mit extrem kurzwelligem UV-Licht lassen sich nanometerkleine Strukturen abbilden. Doch kohärentes Licht mit einer Wellenlänge von wenigen zehn Nanometern zu erzeugen, war bislang fast nur in Großforschungsanlagen möglich. Ein Jenaer Forschungsteam nutzt nichtlinear optische Effekte, um solche Strahlung zu erzeugen – und das in einem gewöhnlichen Laserlabor. Damit lassen sich zerstörungsfrei und nanometergenau innere Strukturen in Materialien sowie ihre chemische Zusammensetzung bestimmen.

TEXT: UTE SCHÖNFELDER

Bilder liefern Erkenntnisse. Was wir mit unseren eigenen Augen beobachten können, lässt uns verstehen. Das Blickfeld stetig zu erweitern, auch in Dimensionen, die dem bloßen Auge zunächst verborgen sind, treibt die Wissenschaft voran: Immer leistungsfähigere Mikroskope ermöglichen heute Einblicke in Zellen und Gewebe von Lebewesen, in die Welt der Mikroorganismen ebenso wie in die unbelebte Natur. Doch auch die besten Mikroskope haben ihre Grenzen. »Um Strukturen und Prozesse bis auf nanoskalige Ebenen und darunter beobachten zu können, brauchen wir neue Methoden und Technologien«,

sagt Dr. Silvio Fuchs vom Institut für Optik und Quantenelektronik. Das gelte insbesondere für technologische Bereiche wie die Materialforschung oder die Datenverarbeitung. »Elektronische Bauteile, Computerchips oder Schaltkreise werden heute immer kleiner«, so Fuchs weiter. Gemeinsam mit Kolleginnen und Kollegen hat er jetzt eine Methode weiterentwickelt, die es ermöglicht, solche winzigen, komplexen Strukturen abzubilden und zu untersuchen und dabei sogar zerstörungsfrei in diese »hineinsehen« zu können.

Im Fachmagazin »Optica« haben die Forschenden ihre Methode – die Kohä-

renztomographie mit extrem-ultraviolettem Licht (kurz XCT) – jüngst vorgestellt und ihr Potenzial für Forschung und Anwendung aufgezeigt.

Licht dringt in die Probe ein und wird an inneren Strukturen reflektiert

Ausgangspunkt für das Bildgebungsverfahren ist die sogenannte Optische Kohärenztomographie (OCT), wie sie seit einigen Jahren in der Augenmedizin etabliert ist, erläutert Doktorand Felix Wiesner, der Erstautor der Studie. »Diese Geräte sind entwickelt worden,

Bild links: Prof. Dr. Gerhard Paulus, Doktorand
Felix Wiesner und Dr. Silvio Fuchs (v. l.) in einem
Laserlabor. · Foto: Jens Meyer

Hohe Harmonische

Die Bezeichnung Harmonische steht in der Physik für eine Schwingung, deren Frequenz ein ganzzahliges Vielfaches einer Grundfrequenz ist. Harmonische kommen in der Musik als Obertöne vor. Aber auch Licht und andere elektromagnetische Wellen können Harmonische ausbilden. Von hohen Harmonischen spricht man in der nichtlinearen Optik bei Lichtwellen ab der ca. 10-fachen Frequenz der ursprünglichen Laserfrequenz.

Um hohe Harmonische zu erzeugen, bedarf es extrem intensiven Laserlichts: Laserpulse mit Intensitäten von 10^{14} W/cm² (Hundert Billionen Watt pro Quadratcentimeter) werden auf Materie (verdünntes Gas) fokussiert. Die elektrische Feldstärke dieser Pulse ist dabei so groß, dass sie die Elektronen aus der Atomhülle herausreißen. Da sich in einer Lichtwelle die Richtung des elektrischen Feldes jedoch eine Billion Mal pro Sekunde umkehrt, werden die Elektronen genau so oft auch wieder zum Ursprungsatom zurückbeschleunigt. Dort geben sie ihre Bewegungsenergie in Form von harmonischen Lichtwellen ab.

um die Netzhaut im Auge nichtinvasiv Schicht für Schicht untersuchen zu können und so 3-dimensionale Abbildungen zu erstellen.« Bei einem OCT beim Augenarzt wird die Netzhaut mit infrarotem Licht beleuchtet. Die Strahlung ist dabei so gewählt, dass sie vom zu untersuchenden Gewebe nicht zu stark absorbiert und an den inneren Strukturen reflektiert werden kann. Die Jenaer Physiker nutzen für ihr OCT statt langwelligem Infrarot- aber extrem kurzwelliges UV-Licht. »Das liegt an der Größe der Strukturen, die wir abbilden wollen«, sagt Felix Wiesner. Um in Halbleitermaterialien mit Strukturgrößen von wenigen Nanometern hineinschauen

zu können, braucht es Licht mit einer Wellenlänge von ebenfalls nur wenigen Nanometern.

Nichtlinear optischer Effekt erzeugt kohärentes XUV-Licht

Solch extrem kurzwelliges UV-Licht (XUV) zu erzeugen, war bislang eine Herausforderung und fast ausschließlich in Großforschungsanlagen möglich. Die Jenaer Physiker erzeugen breitbandiges XUV aber in einem gewöhnlichen Labor und nutzen dafür hohe Harmonische (siehe Kasten oben). Dabei handelt es sich um Strahlung, die durch Wech-

selwirkung von Laserlicht mit einem Medium entsteht und ein Vielfaches der Frequenz des ursprünglichen Lichtes aufweist. Je höher die Harmonischenordnung – umso kürzer die resultierende Wellenlänge. »Wir erzeugen so mit infraroten Lasern, Licht mit einer Wellenlänge zwischen 10 und 80 Nanometern«, erklärt Prof. Dr. Gerhard Paulus. »Wie das eingestrahlte Laserlicht ist auch das resultierende breitbandige XUV-Licht kohärent, hat also laserartige Eigenschaften«, macht der Professor für Nichtlineare Optik der Universität Jena deutlich.

In der veröffentlichten Arbeit haben die Physiker nanoskopische Schichtstrukturen in Silizium mit der kohärenten XUV-Strahlung beleuchtet und das reflektierte Licht analysiert. Die Siliziumproben enthielten in unterschiedlicher Tiefe dünne Schichten anderer Metalle wie Titan oder Silber. Da diese Materialien andere Reflexionseigenschaften aufweisen als das Silizium, lassen sich diese in der reflektierten Strahlung nachweisen. Die Methode ist dabei so empfindlich, dass damit nicht nur nanometergenau die Tiefenstruktur der winzigen Proben abgebildet werden kann, sondern – über das unterschiedliche Reflexionsverhalten – auch die chemische Zusammensetzung der Proben exakt und vor allem zerstörungsfrei bestimmt werden kann. »Das macht eine Anwendung der Kohärenz-Tomographie zur Inspektion von Halbleitern, Solarzellen oder mehrschichtigen optischen Bauelementen interessant«, unterstreicht Paulus. Sie ließe sich zur Qualitätskontrolle im Herstellungsprozess solcher Nanomaterialien einsetzen, um interne Defekte oder chemische Verunreinigungen aufzuspüren. ■



Original-Publikation:

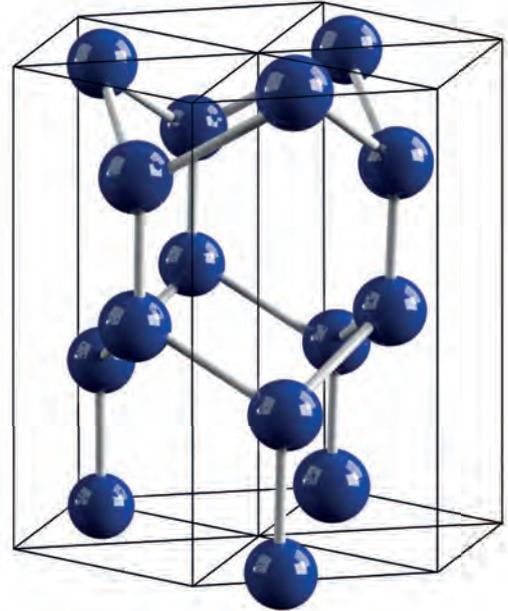
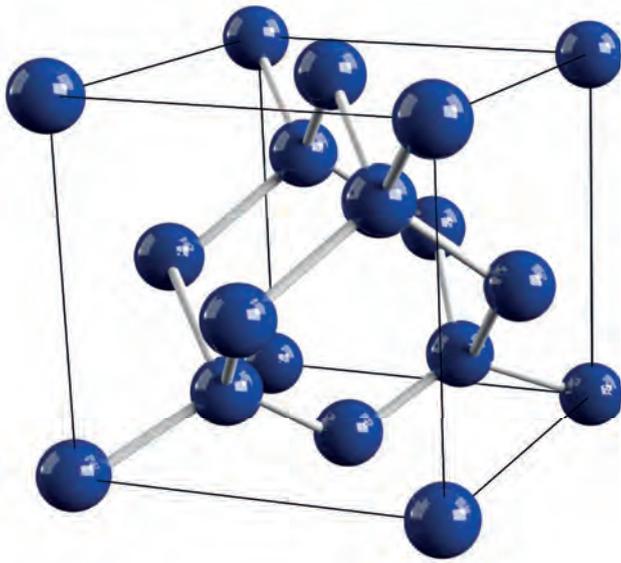
Material-specific imaging of nanolayers using extreme ultraviolet coherence tomography, *Optica* (2021),
DOI: 10.1364/OPTICA.412036

Kontakt

Dr. Silvio Fuchs, Prof. Dr. Gerhard G. Paulus
Institut für Optik und Quantenelektronik
Max-Wien-Platz 1, 07743 Jena

Telefon: +49 36 41 9-47 201
E-Mail: silvio.fuchs@uni-jena.de,
gerhard.paulus@uni-jena.de
www.physik.uni-jena.de/ioq

Modellhafte Darstellung der Kristallstruktur von Silizium: kubisch (links) und hexagonal (rechts).



Physik-Durchbruch des Jahres

Für die Entwicklung einer licht-abstrahlenden Siliziumlegierung sind Forschende der TU Eindhoven und der Universität Jena zusammen mit Partnern der Universität Linz und der TU München vom Fachmagazin Physics World als »Breakthrough of the Year 2020« ausgezeichnet worden. Die prämierte Arbeit könnte die optische Datenverarbeitung in den kommenden Jahren revolutionieren, ermöglicht sie doch erstmals den Bau photonischer Computerchips.

TEXT: UTE SCHÖNFELDER

Das Team, dem Jens Renè Suckert und Prof. Dr. Silvana Botti von der Universität Jena angehören, hat in seiner im April 2020 vorgelegten Arbeit erstmals gezeigt, dass sich Siliziumlegierungen eignen, Photonen in nennenswerter Größenordnung auszusenden. Damit ebnet die Forschenden den Weg zu Siliziumlasern, die die optische Datenverarbeitung revolutionieren könnten. Das Magazin Physics World ehrt seit 2009 jährlich mit dem »Breakthrough of the Year« internationale Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler.

»Unsere Arbeit macht erstmals siliziumbasierte photonische Computerchips möglich, die wesentlich schneller und energiesparender arbeiten können als die bisherigen elektronischen Chips«, ordnet Prof. Silvana

Botti die Bedeutung der Entwicklung ein. Solche Mikrochips, die mit Lichtteilchen (Photonen) anstatt Elektronen kommunizieren, brauchen einen integrierten Laser, der die Datensignale direkt auf dem Chip produziert. Das Halbleitermaterial Silizium galt bislang jedoch als äußerst schwacher Lichtsender. Ursache dafür sind die Symmetrieeigenschaften seiner elektronischen Energiezustände. Um Photonen auszusenden, müssen Elektronen im Halbleiter aus einem angeregten Zustand – dem sogenannten Leitungsband – in einen energieärmeren Zustand – das Valenzband – »springen«. »Im Siliziumkristall sind diese beiden Bänder jedoch so gegeneinander versetzt, dass der Elektronenübergang nur schwer möglich ist«, erläutert Jens

Renè Suckert, der einer der Erstautoren der ausgezeichneten Arbeit ist. Diese sogenannte indirekte Bandlücke verhindert daher bislang eine effiziente Photonenfreisetzung aus Silizium.

In einer Nanodraht-Geometrie ändert Silizium seine Kristallstruktur

Um dieses Problem zu umgehen, hat das Team eine 50 Jahre alte Theorie aufgegriffen und die Kristallstruktur des Siliziums so modifiziert, dass die indirekte Bandlücke aufgehoben wird. Den Forschenden ist es gelungen, Silizium mit dem Halbleiter Germanium in einer Legierung statt in seiner kubischen (im Bild oben links) in einer hexagonalen Kristallstruktur (oben



Prof. Dr. Silvana Botti und Doktorand Jens René Suckert gehören zu dem ausgezeichneten internationalen Forschungsteam, das mit seinem Durchbruch den Weg zur Herstellung von Siliziumlasern ebnet. · Foto: Jürgen Scheere

rechts) wachsen zu lassen, wodurch der Übergang zwischen Leitungs- und Valenzband erleichtert wird. In dieser Kristallstruktur, so konnten die Forschenden in ihrer im Fachmagazin »Nature« publizierten Arbeit nachweisen, setzt Silizium effektiv Licht frei.

Für die Arbeit haben die Jenaer Physiker die Berechnungen der elektronischen Eigenschaften der untersuchten Silizium-Germanium-Nanodrähte geliefert. »Fundierte Berechnungen sind entscheidend, um zu belegen, dass die Lichtemission tatsächlich aus dem direkten Bandübergang der Legierung stammt und um etwaige andere Quellen auszuschließen«, macht Silvana Botti deutlich.

Die Berechnungen waren dabei so präzise, dass sie auch Vorhersagen darüber erlaubten, bei welchem Germanium-

mantel die Lichtemission wie effizient ist und in welcher Farbe das Licht abgestrahlt wird.

Theorie ermöglicht präzise Vorhersagen für Experimente

»Die Auszeichnung als wichtigster Durchbruch in der Physik-Forschung ist eine tolle Bestätigung dafür, wie aus der Kombination von theoretischer und experimenteller Forschung wichtige Innovationen entstehen können«, freut sich Silvana Botti. Wie die vorliegende Arbeit zeige, profitiere die Experimentalphysik von den Berechnungen, die die theoretische Physik liefert. »Zusammen können Theorie und Experiment zu echten Durchbrüchen führen«, so Botti. ■

Original-Publikation:

Direct-bandgap emission from hexagonal Ge and SiGe alloys, Nature (2020), DOI: 10.1038/s41586-020-2150-y

Kontakt

Prof. Dr. Silvana Botti
Institut für Festkörperteorie und -optik
Max-Wien-Platz 1, 07743 Jena

Telefon: +49 36 41 9-47 150
E-Mail: silvana.botti@uni-jena.de
www.ifto.uni-jena.de



Wie hat 2020 die Wissenschaft verändert?

Das Krisenjahr 2020 liegt bereits einige Monate zurück, doch die Corona-Pandemie hält weiter an. Wirtschaft, Kultur, Gesellschaft – nahezu alle Lebensbereiche sind von der Pandemie betroffen. Auch an den Universitäten laufen Forschung und Lehre noch immer im »Corona-Modus«. Was bedeutet das für die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der Universität Jena? Wie blicken sie auf das Jahr 2020 zurück und welche Erfahrungen nehmen sie daraus mit? Wir haben in allen zehn Fakultäten nachgefragt.

UMFRAGE: VIVIEN BUSSE



**Anna
Leisner-Egensperger**

PROFESSORIN
FÜR ÖFFENTLICHES RECHT
UND STEUERRECHT

Das Jahr 2020 hat die Wissenschaft des Öffentlichen Rechts vor erhebliche Herausforderungen gestellt. Schlug im Frühjahr noch die Stunde der Exekutive, so galt es ab Sommer, die Bedeutung der parlamentarischen Demokratie in Erinnerung zu rufen. Derzeit bin ich als auswärtige Sachverständige in die Impfstrategie der Bundesregierung einbezogen, eine unerwartet spannende Aufgabe. Im Übrigen war das letzte Jahr für mich wissenschaftlich so produktiv und erfüllend, wie mir das sonst durch Pendeln in überfüllten Zügen und gleichstellungsorientierte Gremienarbeit verwehrt wird: von Grundgesetzkommentierungen über diverse Handbuchartikel bis zur digitalen Abnahme vieler Dissertationsverfahren.

Eine persönliche Herausforderung war es, dass unsere vier Kinder im Alter von 11 bis 15 Jahren phasenweise ganztägig zuhause waren. Weil ich mich intensiv auch um sie gekümmert habe, bekam ich manchmal kaum Schlaf. Die vollen Hörsäle fehlen mir, mitunter auch der persönliche Austausch mit Studierenden. Doch sind Zoom und Cisco keine schlechten Erfindungen.

Seit ihren Anfängen in der platonischen Akademie lebt die Ethik vom persönlichen Austausch. COVID-19 hat darum Lehrende wie Studierende unseres Masterstudiengangs »Angewandte Ethik und Konfliktmanagement« und des Querschnittfachs »Ethik (mit Geschichte und Theorie) der Medizin« vor eine große Herausforderung gestellt.

Ethik bedeutet in der Universität eben nicht, eigene moralische Meinungen zu positionieren. Vielmehr bedeutet sie zu lernen, im Austausch mit dem jeweiligen Gegenüber dessen Perspektive und dessen Argumente nachzuvollziehen, aber auch die eigene Position infrage stellen zu lassen. Letztendlich soll das bestmögliche Argument überzeugen und eine angemessene wertebasierte Lösung für moralisch relevante Konflikte in einer bestimmten geschichtlichen Situation gefunden werden. Darum ist die persönliche Präsenz im Bereich Ethik so wichtig. Die digitale »Präsenz« erfahre ich deshalb als eine Verarmung, die aber in der Güterabwägung, Gesundheitsschutz versus echtem Präsenzunterricht, im Jahr 2020 wohl unvermeidbar war.



Nikolaus Knoepffler

PROFESSOR FÜR
ANGEWANDTE ETHIK



Anke Lindmeier

PROFESSORIN FÜR
MATHEMATIKDIDAKTIK

Seit März 2020 haben wir mit der Corona-Pandemie ein Beispiel mehr, warum das Verständnis von mathematischen Konzepten für die Gesellschaft wichtig ist. Als Mathematikdidaktikerin weiß ich, dass einst genossener Mathe-Unterricht zur Exponentialfunktion nicht garantiert, dass man das Wachstum auch tatsächlich richtig einschätzen kann. Selbst in renommierten Medien dauerte es, bis geeignete Darstellungen der Pandemie-Entwicklung gefunden wurden. Manche haben kurzzeitig sogar mit logarithmischen Skalen experimentiert, das war vermutlich für viele Lesende mathematisch leider zu anspruchsvoll.

Welche Folgen die Corona-Pandemie langfristig für die mathematikbezogene Bildungsforschung hat, ist schwer abzuschätzen. Untersuchungen mit und an Schulen sind praktisch vollständig zum Erliegen gekommen. Mit Blick auf die Herausforderung des digitalen Unterrichts befürchte ich, dass die Forschungsbedingungen noch lange schwierig bleiben werden, etwa weil computerbasierte Erhebungen in Schulen schwer umzusetzen sind. Ich hoffe aber, dass wir in der Gesellschaft erkennen, dass Forschung zum Mathematiklernen wichtig ist.

FOTO: ANNE GÜNTHER

Das Jahr 2020 war ein Wissenschaftsjahr wie kein anderes. Wie in vielen anderen Bereichen hat uns die Pandemie in Wissenschaft und Lehre vor bisher unbekannte Herausforderungen gestellt, die uns auch noch heute begleiten.

Im Gegensatz dazu hat die öffentliche Auseinandersetzung mit dem COVID-19-Erreger zu einem verstärkten Interesse an wissenschaftlichen Prozessen geführt und die Bedeutung der Infektionsforschung in einer globalisierten Lebenswelt unterstrichen. Dass wissenschaftliche Erkenntnisse auch eine übergeordnete Rolle in der politischen Entscheidungsfindung haben sollten, ist eine der zentralen Lehren der Pandemie und es bleibt zu hoffen, dass sich dieses Prinzip auch in »post-COVID-19«-Zeiten durchsetzen wird.



Kai Papenfort

PROFESSOR FÜR
ALLGEMEINE MIKROBIOLOGIE

FOTO: ANNE GÜNTHER



Corinna Dahlgrün

PROFESSORIN FÜR
PRAKTISCHE THEOLOGIE

Die wissenschaftliche Welt zeigt sich seit März 2020 meist nur in den kleinen Zoomausschnitten Bücher-bewehrter Arbeitszimmer. Die kirchliche Welt, mein Wissenschaftsfeld, versucht, bestmöglich auf die vielen akuten Nöte zu reagieren und entwickelt dabei einige Kreativität. Als Praktische Theologin habe ich solche aktuellen Entwicklungen zu reflektieren und Handlungsoptionen vorzuschlagen. Ein Versuch ist das Homiletik-Seminar »Predigen für das Internet«. In der ersten Hälfte sahen wir uns Gottesdienstformate aus verschiedenen deutschen und englischen Kirchen an, um Kriterien für eine gute Praxis zu finden. In der zweiten Hälfte folgten die Filme der Studierenden – für sie eine nicht immer schmerzfreie, doch höchst lehrreiche Erfahrung.

Solcherart gute Erfahrungen mit der Online-Lehre führen zu weitergehenden Ideen. So soll im nächsten Winter ein Seminar zu Jesus-Filmen stattfinden, in Kooperation mit dem Bonner Neutestamentler Hermut Löhr – interdisziplinär, überregional und digital.

FOTO: ANNE GÜNTHER



Martin Walter

PROFESSOR FÜR
PSYCHIATRIE

Ein halbes Jahr nach Dienstantritt als Direktor der Universitätsklinik für Psychiatrie und Psychotherapie lernte ich meine neue Einrichtung mit all ihren Stärken und Schwächen dank Corona wie durch ein Brennglas kennen und machte auf der Suche nach praktischen Lösungen viele tolle menschliche Bekanntschaften. Statt Aufbau einer neuen wissenschaftlichen Abteilung hieß es Krisenmanagement und Verantwortung für besondere Beanspruchungen unserer Mitarbeiter und Patienten. Ich erlebte beeindruckt, wie Kollegen über sich hinaus- und wie Teams zusammenwuchsen. Neue technische Lösungen z. B. in der digitalen Psychotherapie wurden auf einmal möglich. Unsere MRT-Forschung am Menschen ist aktuell nicht möglich.

Ohne Ergebnisse eigener Experimente arbeiten wir daher international bei der Auswertung bestehender Datensätze zusammen und profitieren von unserer Erfahrung der Zusammenarbeit auf Distanz. Neue Probleme wie die »post-Covid fatigue« stimulierten konkrete Projekte und bahnten eine neue übergeordnete Zusammenarbeit zu Entzündung und psychischer Gesundheit in Jena an.

FOTO: MICHAEL SZABO

Die Corona-Pandemie bringt vielfältige Herausforderungen für uns alle, im Privaten wie im Beruflichen. Für mich als Wirtschaftswissenschaftlerin sind zudem viele wissenschaftliche Themen eng mit der Pandemie verbunden. Dazu gehören die Auswirkungen auf die Wirtschaft und insbesondere die Folgen für die öffentlichen Finanzen.

Die Corona-Pandemie lässt sich jedoch aus der Perspektive einer Disziplin nur sehr unzureichend erfassen. Vielmehr ist eine interdisziplinäre Perspektive hilfreich. Als Mitglied des Wissenschaftlichen Beirats der Thüringer Landesregierung zum Pandemiemanagement habe ich die Gelegenheit, im interdisziplinären Austausch mit den anderen Mitgliedern die Komplexität des Pandemiemanagements zu diskutieren und Empfehlungen für die politische Entscheidungsfindung abzuleiten. Hoffen wir, dass wir es gemeinsam schaffen, im Jahr 2021 die Pandemie schrittweise zu überwinden und wieder zu etwas mehr Normalität zurückkehren zu können.



Silke Übelmesser

PROFESSORIN FÜR
ALLGEMEINE VOLKSWIRT-
SCHAFTSLEHRE/
FINANZWISSENSCHAFT

FOTO: ANNE GÜNTHER



Andreas Tünnermann

PROFESSOR FÜR
ANGEWANDTE PHYSIK

2020 war auch eine Möglichkeit, neue Wege für Forschung und Lehre der Zukunft zu finden: In Jena hat die Universität gemeinsam mit der Max Planck School of Photonics und dem Fraunhofer IOF ein »Digital Teaching Lab« eingeweiht. Hier können mittels Augmented Reality virtuelle Experimente, z. B. ein Fourier-Optik-Versuch für Studierende, durchgeführt werden. Damit schaffen wir auch über Corona hinaus neue Rahmenbedingungen, unter denen Lehre forschungsnah gestaltet werden kann.

Wir sind 2020 insgesamt digital näher zusammengerückt: Im Rahmen von »Lecture Series« gab z. B. Nobelpreisträger Stefan Hell eine virtuelle Vorlesung für unsere Promovierenden. In öffentlichen »Coffeebreaks« konnten sich darüber hinaus Interessierte aus aller Welt über ihre Forschung austauschen. Für die Wissenschaft ist das eine große Chance! Den persönlichen Umgang ersetzen virtuelle Meetings auf Dauer aber nicht. Ich freue mich darauf, demnächst wieder Präsenzveranstaltungen durchführen zu können.

FOTO: ANNE GÜNTHER

Eine zentrale Fragestellung interkultureller Forschung fokussiert den konstruktiven Umgang mit unvertrauten und in diesem Sinn unsicheren und disruptiven Situationen. Aus diesem Blickwinkel sind Analysen des öffentlichen Kommunikationsverhaltens in der Corona-Pandemie äußerst erkenntnisreich. Beispielsweise um die Entstehung gesellschaftlicher bzw. »kultureller« Polarisierungen besser zu verstehen und Handlungsvorschläge zu erarbeiten, die auf »Weltoffenheit« und »Miteinander« zielen.

Die besonderen Umstände der Pandemie gaben Impulse in Bezug auf die Lehre: Gerade im interkulturellen Kontext ist weltweite virtuelle Zusammenarbeit herausfordernd. Die forcierte Entwicklung digitaler Handlungsszenarien im Rahmen von Videokonferenzsystemen hat technologisch deutliche Qualitätssprünge hervorgebracht: beispielsweise bei der Durchführung interkultureller Planspiele im Projekt IVAC oder bei der Umsetzung grenzüberschreitender virtueller Zusammenarbeit in der Lehre auf glocal-campus.org. Erfreulich ist vor allem die deutlich zunehmende Akzeptanz virtueller Zusammenarbeit.



Jürgen Bolten

PROFESSOR FÜR
INTERKULTURELLE
WIRTSCHAFTSKOMMUNIKATION

FOTO: ANNE GÜNTHER



Mirka Dickel

PROFESSORIN FÜR
DIDAKTIK DER GEOGRAPHIE

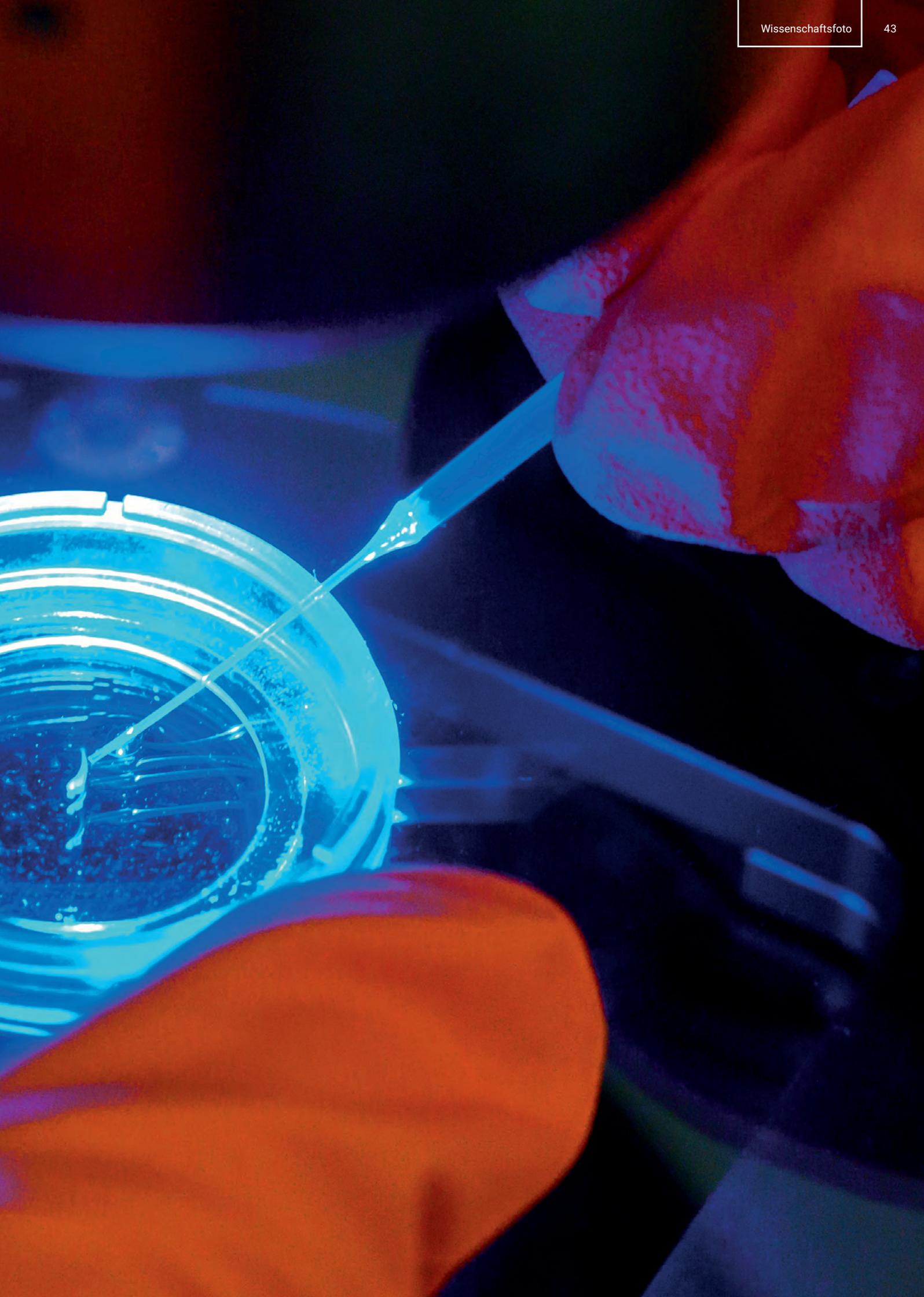
Angesichts des staatlich verordneten Lockdowns, der Kontaktbeschränkungen, der Ungewissheiten und Unvorhersehbarkeiten, die mit der gesellschaftspolitischen weltweiten Corona-Krise verbunden sind, wurden Fragen nach der menschlichen Selbstvergewisserung in der Moderne drängend. Wir leben in einer Zeit, in der menschliches Leben durch »transzendente Obdachlosigkeit« (Georg Lukács) gekennzeichnet ist.

Meine Fragen rückten mir buchstäblich auf den Leib, ließen mir keine Ruhe, trieben mich zur Forschung. Konkret ging es mir um die Frage, was es 2020 heißt, von wissenschaftlicher Verantwortung zu sprechen. Was bedeutet es für mich und für uns Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, Verantwortung für das Leben und Überleben auf unserer Erde zu tragen? Welches Mensch-Natur-Verhältnis ist es wert, dass wir es im wissenschaftlichen und gesellschaftlichen Diskurs stark machen? Für welches Mensch-Natur-Verhältnis können wir wahrhaft eintreten? Kurz: Welche guten Gründe gibt es für unsere Forschung und wie lassen sie sich argumentieren? Gute Gründe sind philosophisch gesehen Gründe, die einer argumentativen Prüfung standhalten und somit auf Reflexion verweisen. In 2020 befragte ich die Voraussetzungen der Forschung in der Moderne und befasste mich mit der Verhältnisbestimmung von Epistemologie (Erkenntnistheorie) und Ontologie (Logos) im Hinblick auf wissenschaftliche Verantwortung.

FOTO: ANNE GÜNTHER

Fischlarve hilft bei der Altersforschung

An einem Fluoreszenzmikroskop werden Gehirnstrukturen einer Zebrafischlarve untersucht: Ein Forschungsteam der Universität Jena, des Universitätsklinikums und des Leibniz-Instituts für Altersforschung – Fritz-Lipmann-Institut (FLI) untersucht im Projekt IMPULS, welche Faktoren die komplexen Altersprozesse des Menschen beeinflussen (S. 7).



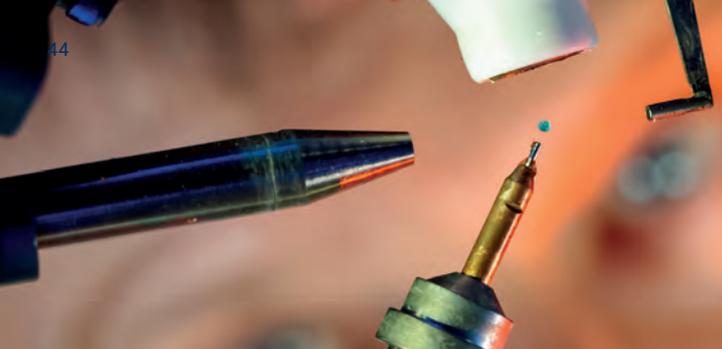
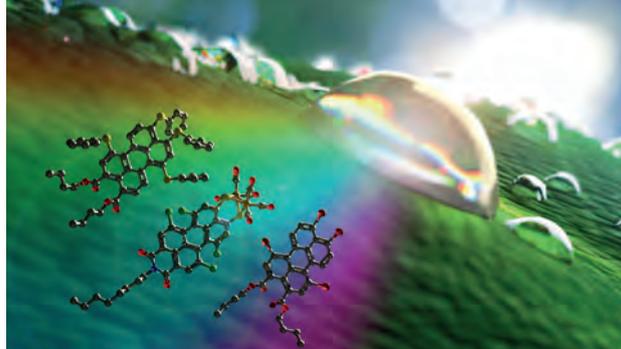


FOTO: JENS MEYER

Teamwork im Molekül

Gemeinsam lässt sich mehr erreichen als alleine. Diese alltägliche Erkenntnis haben Chemiker der Universität Jena auf eine Verbindung angewandt, die zwei Gallium-Atome enthält. Diese arbeiten so zusammen, dass sie die besonders starke Bindung zwischen Fluor und Kohlenstoff in anderen Substanzen spalten können (DOI: 10.1021/jacs.0c12166). Mithilfe von Röntgenstruktur-Analysen konnten die Forschenden um Juniorprofessor Dr. Robert Kretschmer belegen, dass während der Spaltungsreaktion ein Galliumatom das Fluor bindet und das andere den Rest der Kohlenwasserstoff-Verbindung. »Jetzt, wo dieser Schritt geschafft ist, können wir dieses Konzept weiterentwickeln«, sagt Kretschmer. »Wünschenswert wäre es, wenn die Reaktion zu einem vollständigen Katalysezyklus weitergeführt werden kann.«

MK



GRAFIK: AG PENEVA

Von Sonnenlicht zu Wasserstoff

Ein Team des Sonderforschungsbereichs »CataLight«, an dem die Universität Jena beteiligt ist, hat neuartige organische Farbstoffe mit edelmetallfreien Katalysatormolekülen kombiniert, die unter Lichtbestrahlung in Wasser gasförmigen Wasserstoff freisetzen (DOI: 10.1002/chem.202004326). Dabei nutzten die Forschenden Rylene-Farbstoffe, die besonders stabil gegenüber Licht und chemischen Prozessen sind. »Die in der Forschung eingesetzten, lichtabsorbierenden Metallkomplexe enthalten oftmals Ruthenium oder Iridium. Diese Metalle machen am Massenanteil der Erdkruste allerdings weniger als 0,1 Millionstel Prozent aus und sind daher perspektivisch limitiert«, erklärt Prof. Dr. Kalina Peneva. Der Einsatz von photoaktiven Verbindungen auf organisch-chemischer Basis sei deutlich nachhaltiger als die Verwendung von Schwermetallen.

sl



FOTO: HELGE BRUELHEIDE

Pflanzenvielfalt auf dem Rückzug

Für eine Studie des Deutschen Zentrums für integrative Biodiversitätsforschung Halle-Jena-Leipzig (iDiv) wurden 29 Millionen Daten zur Verbreitung von Gefäßpflanzen ausgewertet – die bisher umfassendste Analyse von Pflanzendaten aus Deutschland (DOI: 10.1111/gcb.15447). »Die Ergebnisse zeichnen ein sehr düsteres Bild des Zustandes der Pflanzenvielfalt in Deutschland«, sagt Erstautor Dr. David Eichenberg. In der Fläche ist über ganz Deutschland hinweg in jedem Rasterfeld (ca. 5 mal 5 Kilometer) ein mittlerer Rückgang der Artenvielfalt um rund zwei Prozent pro Jahrzehnt zu verzeichnen. Zu den Verlierern zählen insbesondere Archäophyten – das sind Arten, die durch den Menschen, aber bereits vor der Entdeckung Amerikas nach Deutschland gelangten. Dagegen konnten sich viele Neophyten (Arten, die nach 1492 Deutschland erreicht haben) ausbreiten.

iDiv/ST

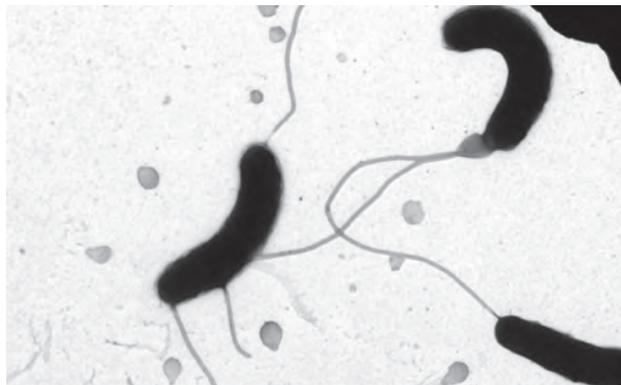


FOTO: KAI PAPENFORT

Resistenz gegen Antibiotika

Antibiotika, wie Penicillin, entfalten ihre Wirkung dadurch, dass sie die Zellwand der Bakterien angreifen, indem sie deren Synthese behindern. Doch sind die Bakterien diesem Angriff nicht hilflos ausgeliefert. Ein Forschungsteam der Universität Jena hat jetzt ein Molekül – eine Ribonukleinsäure namens VadR – entdeckt, das die Antibiotika-Resistenz des Cholera-auslösenden Bakteriums *Vibrio cholerae* entscheidend beeinflusst (DOI: 10.1038/s41467-020-19890-8). So hemmt VadR die Synthese eines Bakterien-Proteins, das u. a. die Krümmung des stäbchenförmigen Bakteriums *V. cholerae* (Bild oben) steuert. »VadR ist jedoch nur eines von vielen Molekülen, die in die Genexpression bei *V. cholerae* eingreifen können. Wenn wir all diese Moleküle, deren Funktionen und ihr Zusammenspiel verstehen, können wir daraus neue Therapieansätze ableiten«, sagt Studienleiter Prof. Dr. Kai Papenfort.

AG

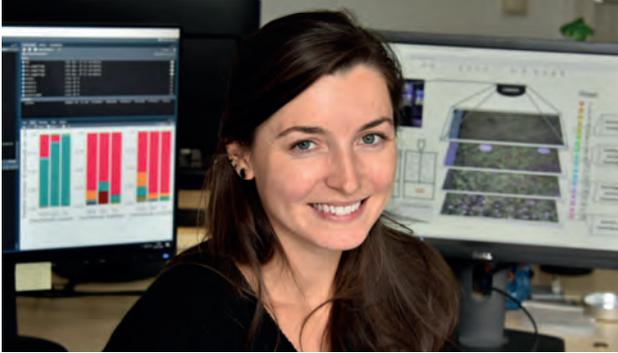


FOTO: ANNE GÜNTHER

Veränderte Blühphasen bei Pflanzen

Insekten haben einen entscheidenden Einfluss auf die Biodiversität und Blühphasen von Pflanzen. Das haben Forschende der Universität Jena und des Deutschen Zentrums für integrative Biodiversitätsforschung Halle-Jena-Leipzig (iDiv) herausgefunden (DOI: 10.3389/fpls.2020.542125). Fehlen Insekten im Umfeld der Pflanzen, verändert sich deren Blühverhalten. »Durch diese Veränderungen kann es zu einer zeitlichen Diskrepanz zwischen Pflanzen- und Tierarten kommen. Daraus resultieren negative Folgen für das Ökosystem«, sagt Josephine Ulrich, die Erstautorin der Studie (Foto). Beispiele dafür sind die Nahrungsmittelversorgung der Insekten und der Bestäubungserfolg. Diese Verschlechterung der Ökosystemfunktion könnte einen weiteren Artenverlust nach sich ziehen, etwa durch zunehmenden Schädlingsbefall bei Pflanzen. viv

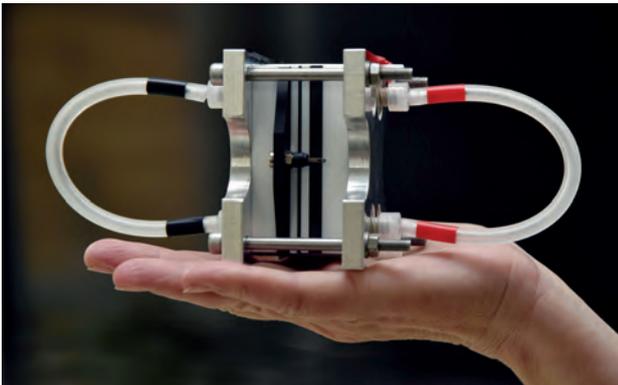


FOTO: ANNE GÜNTHER

Neuer Stromspeicher ist effizienter

Um erneuerbare Energien dauerhaft nutzbar zu machen, werden geeignete Stromspeicher gebraucht. Als solche bieten sich sogenannte Redox-Flow-Batterien an, bei denen die stromspeichernden Komponenten in einem Lösungsmittel gelöst und dezentral gelagert werden. Bisher allerdings wiesen diese Stromspeicher zwei Schwächen auf, die eine breite Anwendung verhinderten: Zum einen kamen als Elektrolyt häufig umweltgefährdende und giftige Schwermetallsalze wie Vanadium zum Einsatz, zum anderen benötigten sie ein aufwendiges Kühlsystem. Forschende der Universität Jena haben nun neue Polymerelektrolyte für Redox-Flow-Batterien entwickelt, die leistungsfähig und umweltfreundlich zugleich sind (DOI: 10.1002/aenm.202001825). »Die Redox-Flow-Batterie kann einen wichtigen Beitrag als Stromspeicher der Zukunft leisten«, sagt Projektleiter Prof. Dr. Ulrich S. Schubert. sh

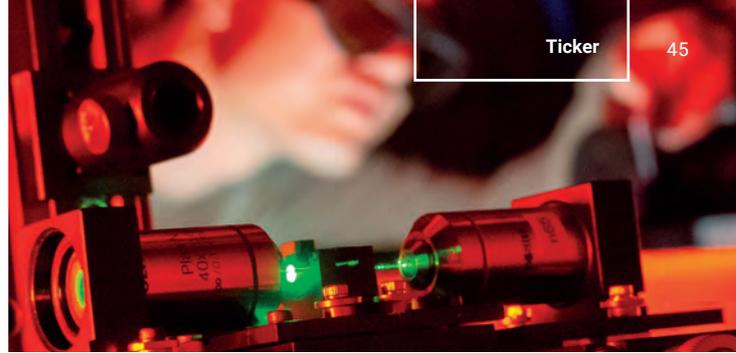


FOTO: JENS MEYER

Intelligente Nanomaterialien

2D-Materialien bestehen aus nur einer Lage von Atomen und sind sehr vielseitig einsetzbar. In Kombination mit Lichtwellenleitern ermöglichen die ultimativ dünnen Materialien neue Anwendungen im Bereich der Sensorik, der nichtlinearen Optik und der Quantenelektronik. Allerdings war es bisher sehr aufwendig, die beiden Komponenten zusammenzubringen, da die hauchdünnen Schichten per Hand auf den Wellenleiter transferiert werden mussten. Jenaer Forschenden ist es gemeinsam mit australischen Kollegen gelungen, erstmals 2D-Materialien direkt auf optischen Fasern wachsen zu lassen (DOI: 10.1002/adma.202003826). Verantwortlich für den Erfolg ist ein von Prof. Dr. Andrey Turchanin und seinem Team vom Institut für Physikalische Chemie entwickeltes neuartiges Wachstumsverfahren. sh

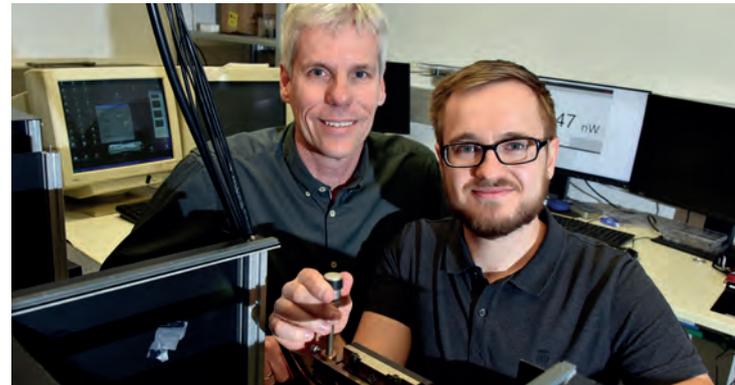


FOTO: ANNE GÜNTHER

Durchleuchten im Nanobereich

Physikern der Universität Jena ist es gemeinsam mit Kolleginnen und Kollegen aus Duisburg, Grenoble und Madrid gelungen, einen der kleinsten Röntgendetektoren weltweit mit einer Auflösung von gerade einmal 200 Nanometern zu entwickeln (DOI: 10.1038/s41467-020-18384-x). Für die hohe Auflösung des Detektors sorgt die geringe Größe des verwendeten Halbleiter-Nanodrahts. Der Detektor der Jenaer Forscher zielt nicht darauf ab, in der Medizin zum Einsatz zu kommen. Vielmehr kann die Methode wertvolle Informationen bei der Untersuchung von Materialien liefern. »Viele Bauteile – etwa in Chip-basierten Sensoren oder physikalischen Lichtquellen – werden immer kleiner«, sagt Maximilian Zapf (im Bild rechts). »Unser Detektor könnte verwendet werden, um solche nanoskaligen Elemente zu prüfen und ihr Material zu charakterisieren«, ergänzt Prof. Dr. Carsten Ronning (Bild, links). sh



Hunger macht draufgängerisch

Tiere, die in frühen Jahren Hunger leiden, gehen im späteren Leben höhere Risiken ein. Zu diesem Ergebnis kommt ein Forschungsteam der Universitäten Bielefeld und Jena in einer Meta-Studie. Die Forschenden haben darin das Risikoverhalten von über 100 Tierarten verglichen und große individuelle Unterschiede festgestellt: Wie risikobereit sich ein Tier verhält, ist zum Teil angeboren, wird aber in erheblichem Maße auch davon geprägt, unter welchen Bedingungen es heranwächst.

TEXT: UTE SCHÖNFELDER

Neue Lebensräume in unbekanntem Gelände erkunden, auf die Suche nach neuen Nahrungsquellen gehen und dabei Gefahr laufen, von einem Fressfeind erwischt zu werden: Für Tiere in der freien Wildbahn steckt das Leben voller riskanter Situationen mit ungewissem Ausgang. Nicht selten hängt von einer Entscheidung sogar das eigene Überleben ab. Wie sich das Tier entscheidet, ob es ein Risiko eingeht oder der Gefahr eher ausweicht, ist individuell ganz unterschiedlich.

»So wie es unter uns Menschen eher vorsichtige und eher draufgängerische Zeitgenossen gibt, so finden sich auch unter Tieren einer Art Individuen mit geringerer oder höherer Risi-

kobereitschaft«, sagt Prof. Dr. Holger Schielzeth. Diese Unterschiede seien zu einem gewissen Grad angeboren, zu einem nicht unerheblichen Teil aber auch der individuellen Entwicklung geschuldet, so der Populationsökologe von der Universität Jena.

Studienergebnisse von über 100 Tierarten verglichen

Wie Holger Schielzeth und sein Bielefelder Kollege Prof. Dr. Klaus Reinhold mit ihren Forschungsteams in einer umfangreichen Meta-Studie zeigen, wird die Risikobereitschaft eines Tieres in entscheidendem Maße von den

Ernährungsbedingungen während des Aufwachsens geprägt. Das berichten die Forscher im Fachmagazin »Biological Reviews«.

Für ihre Untersuchung haben die Forscher um Erstautor Nicholas Moran über 120 experimentelle Studien mit mehr als 100 Tierarten ausgewertet und deren Ergebnisse analysiert, darunter beispielsweise Untersuchungen an Spinnen, Insekten, Krebsen, Fischen, Amphibien und Vögeln. Allen Einzelstudien gemein war, dass die Tiere Phasen guter oder schlechter Nahrungsversorgung durchlebt hatten und später im Leben ihre Risikobereitschaft gemessen wurde. Dass die Lebensbedingungen und Erfahrun-



Das Leben in freier Wildbahn steckt voller Gefahren und riskanter Entscheidungen, von denen nicht selten das eigene Überleben abhängt. Links: Ein Adeliepinguin springt von einer Eisscholle. Seine Artgenossen schauen hinterher. Oben: Schwarzspitzenriffhai inmitten eines Fischeschwarms. · Fotos: Oliver Krüger

gen einzelner Tiere einen Einfluss auf ihr Verhalten haben, und also auch das Risikoverhalten prägen, haben die Wissenschaftler im Vorfeld bereits vermutet. Wie der Einfluss genau aussieht, dazu gab es jedoch gegensätzliche Hypothesen: »Zum einen konnte man annehmen, dass Tiere, denen es immer gut ging und die daher in besserem Zustand sind, mehr zu verlieren haben und sie deshalb weniger risikobereit sind«, erklärt Klaus Reinhold. Zum anderen, so der Evolutionsbiologe von der Universität Bielefeld weiter, könne aber umgekehrt ein besserer Ernährungsstatus dazu führen, dass sie

einer riskanten Situation leichter entkommen und sie ein Risiko deswegen eher eingehen können.

Deutlicher Effekt in allen untersuchten Arten

Die Auswertung der Ergebnisse aller untersuchten Studien brachte nun Klarheit. Ein schlechter Versorgungszustand bringt die Tiere dazu, höhere Risiken einzugehen: Um durchschnittlich 26 Prozent steigt die Risikobereitschaft an, wenn die Tiere zu einem früheren Zeitpunkt hungern mussten.

»Dieses Ergebnis hat uns in seiner Deutlichkeit überrascht«, sagt Holger Schielzeth. Der Zusammenhang gelte praktisch für alle untersuchten Verhaltenskontexte, wie Explorationsverhalten, Abwanderung, Nahrungssuche mit Risiko quer durch alle untersuchten Arten. Natürlich gäbe es auch Variationen in der Stärke des Effektes. Ob ein ähnlicher Zusammenhang zwischen Furchtlosigkeit und individueller Entwicklung auch beim Menschen bestehe, können die Ökologen derzeit nur vermuten. Holger Schielzeth zumindest geht davon aus, immerhin sei der Mensch ja auch eine Tierspezies. ■

Original-Publikation:

Poor nutritional condition promotes high-risk behaviours: a systematic review and meta-analysis, *Biol. Rev.* (2020), DOI: 10.1111/brv.12655

Kontakt

Prof. Dr. Holger Schielzeth
Institut für Ökologie und Evolution
Dornburger Straße 159, 07743 Jena

Telefon: +49 36 41 9-49 410
E-Mail: holger.schielzeth@uni-jena.de
www.iee.uni-jena.de





Suchmaschine für Stoffwechsellmoleküle

Der Stoffwechsel eines jeden Organismus – von der einzelligen Mikrobe bis zum komplexen System Mensch – bringt tausende chemische Verbindungen hervor. Diese Moleküle sind Ausgangs-, Zwischen- und Endprodukte chemischer Prozesse und können so Auskunft geben über den physiologischen Zustand von Lebewesen, ihren Organen, Geweben und Zellen. Vorausgesetzt, diese Moleküle – die Metabolite – lassen sich auch nachweisen. Bislang sind solche Analysen extrem aufwendig, denn nur die Metabolite, deren Strukturen bereits bekannt sind, lassen sich auch eindeutig identifizieren. Bioinformatiker der Universität Jena nutzen jetzt Methoden der künstlichen Intelligenz, um sämtliche – auch bislang unbekannte – Metabolite in einer Probe zu erfassen.

TEXT: SEBASTIAN HOLLSTEIN

Alles, was lebt, produziert Metabolite. Metabolite können als »chemische Marker« genutzt werden, um beispielsweise Krankheiten zu erkennen oder in der Umwelttechnologie Trinkwasserproben zu untersuchen. Doch die Diversität dieser chemischen Verbindungen macht ihre Analyse schwierig. Bisher sind nur vergleichsweise wenige Moleküle in ihrer Struktur bekannt und definiert. Wird eine Probe im Labor analysiert, kann deshalb bislang nur ein relativ kleiner Teil davon identifiziert werden – der Großteil an Molekülen bleibt unbekannt.

Bioinformatiker der Universität Jena haben nun gemeinsam mit Kollegen aus Finnland und den USA eine weltweit einmalige Methode entwickelt, bei der alle Metabolite in einer Probe gleichzeitig berücksichtigt werden können und sich somit der Erkenntnisgewinn bei der Untersuchung solcher Moleküle erheblich vergrößert. Über seinen Erfolg berichtet das Team im renommierten Fachjournal »Nature Biotechnology«.

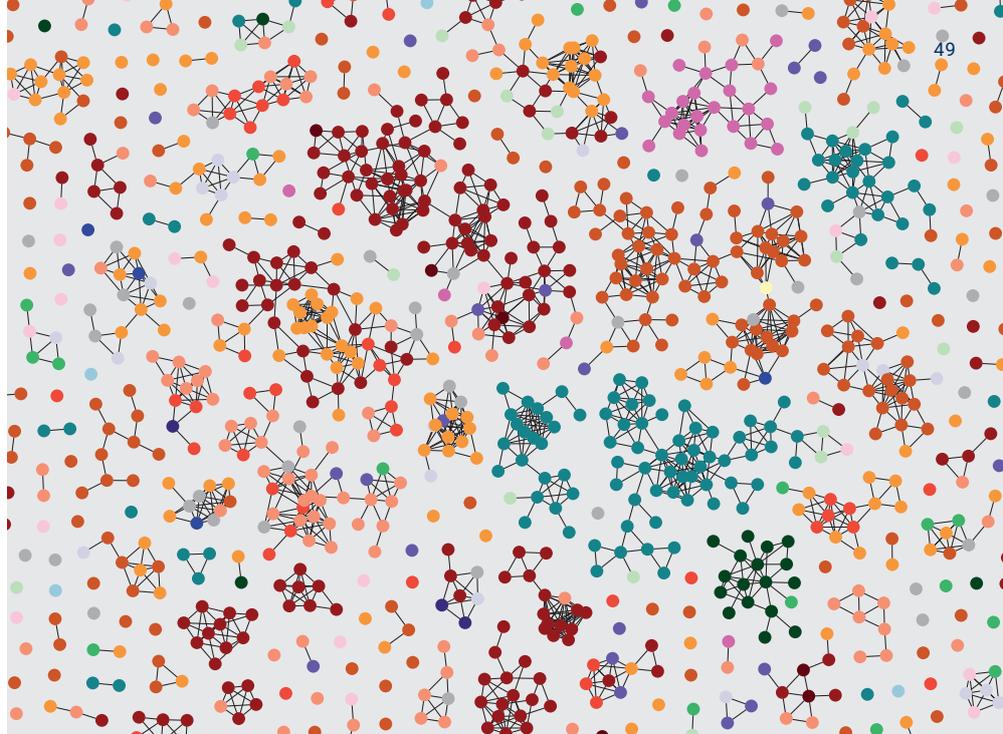
»Bei der Massenspektrometrie, eine der meistgenutzten experimentellen Methoden zur Analyse von Metaboliten, werden nur die Moleküle identifiziert,

die durch den Abgleich mit einer Datenbank eindeutig zugeordnet werden können. Alle anderen, bisher unbekannt Moleküle, die in der Probe enthalten sind, liefern keine Informationen«, erklärt Prof. Dr. Sebastian Böcker von der Universität Jena. »Mit unserem neu entwickelten Verfahren namens CANOPUS entlocken wir allerdings auch den unidentifizierten Metaboliten in einer Probe wertvolle Informationen, da wir sie bereits bekannten Stoffklassen zuordnen können.«

CANOPUS funktioniert in zwei Phasen: Zunächst erzeugt das Verfahren, aus

Bild links: Dr. Kai Dührkop präsentiert die Visualisierung eines gemessenen Datensatzes mit der Software CANOPUS. · Foto: Jens Meyer

Bild rechts: Ausschnitt aus dem molekularen Netzwerk, das die Metabolite im Verdauungssystem der Maus zeigt. Jeder farbige Knoten steht für ein gemessenes Molekül. Knoten sind miteinander verbunden, wenn ihre Massenspektren sehr ähnlich sind. Der überwiegende Anteil dieser Moleküle ist völlig unbekannt. CANOPUS sagt jedoch für jedes unbekannte Molekül die Stoffklasse voraus (Aminosäuren in Orange, Glycerophospholipide in Braun, Triterpenoide in Dunkelgrün oder Gallensäuren in Türkis).



dem mittels Massenspektrometrie gemessenen Fragmentierungsspektrum, einen sogenannten molekularen Fingerabdruck. Dieser beinhaltet Informationen über die Struktureigenschaften des gemessenen Moleküls. In einem zweiten Schritt ordnet das System den Metaboliten mithilfe des Fingerabdrucks einer bestimmten Stoffklasse zu, ohne diesen dafür identifizieren zu müssen.

Zweistufiges Lernverfahren vereinfacht den Analyseprozess

»Maschinelle Lernverfahren benötigen in der Regel große Datenmengen, um trainiert zu werden. Unser zweistufiges Verfahren hingegen ermöglicht es, im ersten Schritt auf einer vergleichsweise kleinen Datenmenge von zehntausenden Fragmentierungsspektren zu trainieren, um dann im zweiten Schritt aus Millionen von Strukturen die charakteristischen Struktureigenschaften zu bestimmen, die für eine Stoffklasse signifikant sind«, erklärt Dr. Kai Dührkop von der Universität Jena.

Das System detektiert also diese Struktureigenschaften bei einem unbekanntem Molekül innerhalb einer Probe und ordnet es dann einer bestimmten Stoffklasse zu. »Allein diese Information reicht bereits aus, um viele wichtige Fragestellungen zu beantworten«, betont Böcker. »Die eindeutige Identifikation eines Metaboliten wäre weitaus aufwendiger und ist häufig überhaupt nicht notwendig.« Insgesamt liege dem CANOPUS-Verfahren ein tiefes neuronales Netz für die rund 2 500 Stoffklassen zugrunde.

Mit ihrer Methode haben die Jenaer Bioinformatiker beispielsweise die Darmflora von Mäusen verglichen, bei denen eine Versuchsgruppe mit Antibiotika behandelt worden war. Die Untersuchungen geben Hinweise darauf, welche Stoffklassen von der Maus selbst und welche von ihrer Darmflora produziert werden. Solche Forschungsergebnisse können wichtige Erkenntnisse über das menschliche Verdauungs- und Stoffwechselsystem ermöglichen. Durch zwei weitere Anwendungsbeispiele, die sie in ihrer Studie ausführen, zeigen die

Wissenschaftler die Funktionalität und Aussagekraft des Verfahrens.

Jenaer Molekül-Suchmaschine millionenfach genutzt

Mit der neuen Methode erweitern die Bioinformatiker die Möglichkeiten der Suchmaschine für molekulare Strukturen »CSI:FingerID«, die sie der internationalen Forschungsgemeinschaft seit rund fünf Jahren zur Verfügung stellen. Weltweit nutzen Forscher dieses Angebot inzwischen tausende Male täglich, um ein Massenspektrum aus einer Probe mit verschiedenen Online-Datenbanken abzugleichen und so einen Metaboliten genauer bestimmen zu können. Mittlerweile sind mehr als hundert Millionen Anfragen eingegangen. Das neue Verfahren stärkt die Metabolomik, also die Erforschung dieser omnipräsenten Moleküle, und fördert ihr Potenzial in vielen Bereichen, etwa in der Pharmazie. Viele Arzneiwirkstoffe sind Metabolite – weitere könnten mit ihrer Hilfe entwickelt werden. ■

Original-Publikation:
Systematic classification of unknown metabolites using high-resolution fragmentation mass spectra, Nature Biotechnology (2020), DOI: 10.1038/s41587-020-0740-8

Kontakt
Prof. Dr. Sebastian Böcker
Institut für Informatik
Ernst-Abbe-Platz 2, 07743 Jena

Telefon: +49 36 41 9-46 450
E-Mail: sebastian.boecker@uni-jena.de
www.fmi.uni-jena.de



Das Beste aus zwei Materialwelten

Materialwissenschaftlerinnen und -wissenschaftler aus Jena und Cambridge entwickeln hybride Glaswerkstoffe mit neuartigen Eigenschaften. Dafür kombinieren sie metallorganische und anorganische Gläser und stellen Kompositgläser her, die schlag- und bruchfest wie Kunststoff und gleichzeitig hart wie Glas sind.

TEXT: UTE SCHÖNFELDER

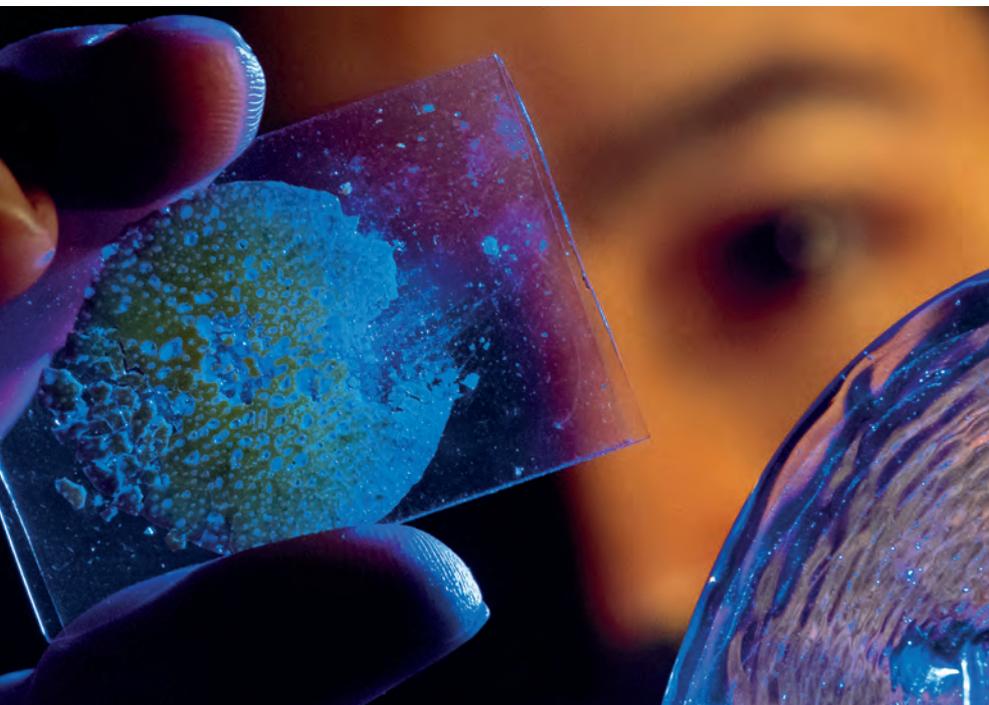


Bild links: Die zwei Ausgangsmaterialien für das neue Kompositmaterial: organisches Glas (links) und anorganisches Glas (rechts). · Foto: Jens Meyer

Bild rechts: Mit Hilfe eines Kernspinresonanz-Spektrometers ermitteln die Materialwissenschaftler – hier im Bild Dr. Courtney Calahoo von der Universität Jena – die Bindungsstrukturen des neues Kompositglases. · Foto: Jens Meyer

Verbundstoffe aus organischen und anorganischen Materialien sind in der Natur häufig zu finden. Beispielsweise bestehen Knochen aus dem organischen Strukturprotein Kollagen und dem anorganischen Mineral Apatit. Diese Kombination macht Knochen biegsam und fest zugleich, was durch nur einen Materialtyp allein nicht möglich wäre. Bei der Herstellung von Hybridmaterialien mit solchen Eigenschaften ist die Natur der technologischen Materialentwicklung allerdings noch weit überlegen; ähnlich funktionale Hybridmaterialien künstlich herzustellen, ist noch immer eine große Herausforderung. Forschenden der Universitäten Jena und Cambridge ist es nun jedoch gelungen, eine neue Klasse hybrider

Glaswerkstoffe herzustellen, die ebenfalls organische und anorganische Komponenten vereint und den Werkstoffen ganz besondere mechanische Eigenschaften verleiht. Sie nutzen dafür Materialkombinationen, in denen metallorganische und anorganische Gläser chemisch verbunden sind. Seine Arbeit hat das Forschungsteam im renommierten Fachmagazin »Nature Communications« vorgestellt.

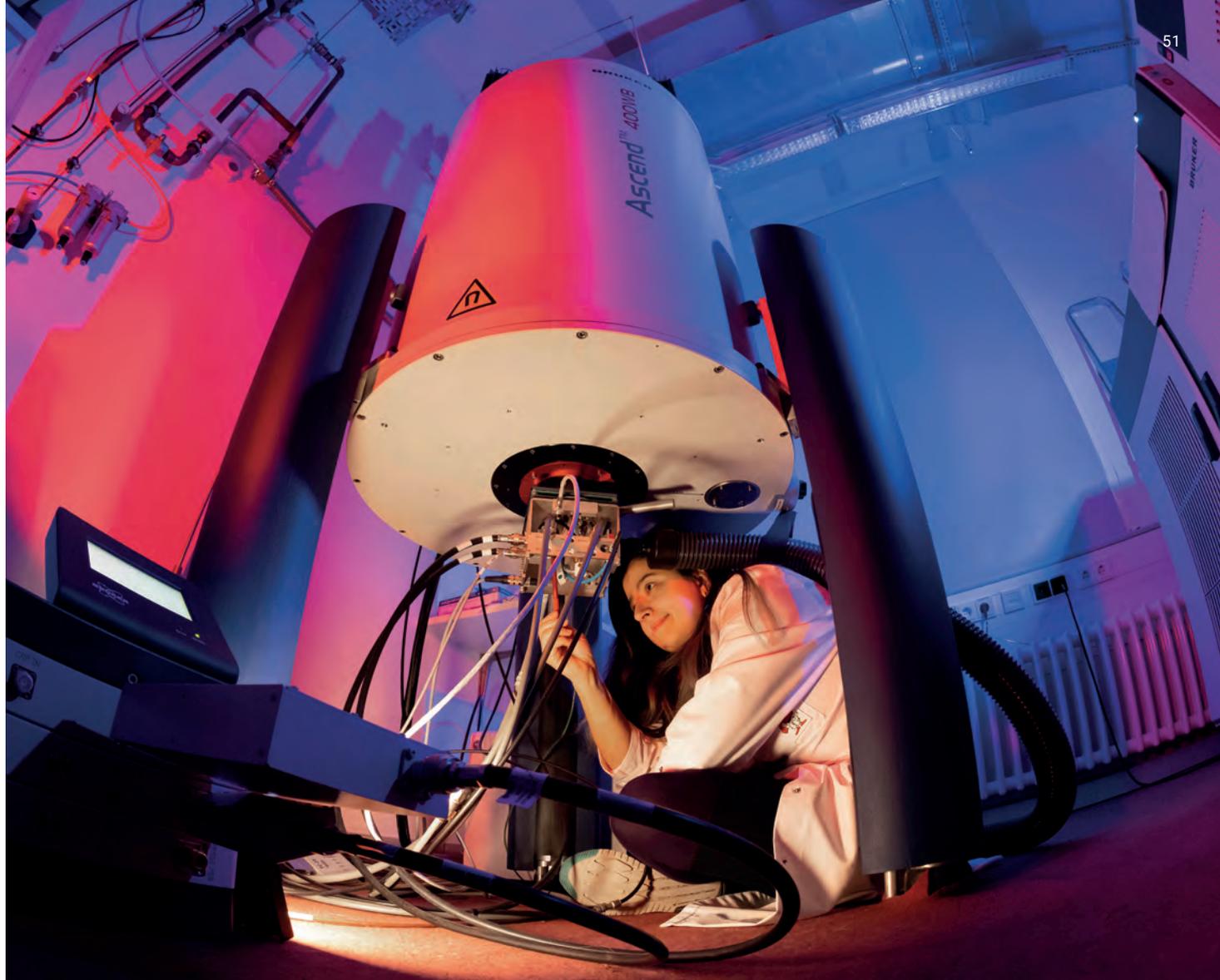
Metallorganisches Netz als Grundgerüst des neuen Materials

Werkstoffe aus metallorganischen Netzwerken, sogenannte MOF-Materialien (engl.: metal-organic frameworks), er-

fahren seit einigen Jahren ein stark steigendes Forschungsinteresse. Sie können beispielsweise als Trennmembranen oder Speicher für Gase und Flüssigkeiten, als Träger für Katalysatoren oder für elektrische Energiespeicher eingesetzt werden.

Der Vorteil der MOF-Materialien liegt darin, dass ihre Gitterstruktur bis in den Größenbereich einiger Nanometer hinein genau eingestellt werden kann. Dadurch kann zum Beispiel eine Porosität erreicht werden, die sowohl bezüglich der Größe der Poren und ihrer Durchströmbarkeit als auch hinsichtlich der an den Porenoberflächen vorherrschenden chemischen Eigenschaften an eine Vielzahl von Anwendungen angepasst werden kann.

»Das chemische Design von MOF-Materialien folgt einem Baukastenprinzip, nach dem anorganische Teilchen über organische Moleküle miteinander zu einem dreidimensionalen Netzwerk verbunden werden«, erläutert Louis Longley von der Universität Cambrid-



ge. Daraus ergibt sich eine große Vielfalt möglicher Strukturen, so der britische Forscher. Einige dieser Strukturen könnten durch Temperaturbehandlung in einen glasigen Zustand überführt werden. »Während klassische MOF-Materialien typischerweise in Pulverform vorliegen, ermöglicht der Glaszustand vielfältige Verarbeitungsformen des Materials.«

»Indem wir MOF-abgeleitete Gläser mit klassischen, anorganischen Glaswerkstoffen kombinieren, können wir das Beste beider Welten miteinander

verbinden«, sagt Courtney Calahoo von der Universität Jena.

Chemische Verbindung mit anorganischem Glas bringt neue Eigenschaften

Solche Kompositgläser weisen deutlich verbesserte mechanische Eigenschaften auf als bisherige Gläser, da sie die Schlagfestigkeit und Bruchzähigkeit von Kunststoffen mit der hohen Härte und Steifigkeit anorganischer Gläser verbinden.

Entscheidend dafür ist, dass die beteiligten Materialien nicht einfach nur miteinander gemischt werden, sondern dass im Kontaktbereich zwischen dem metallorganischen Netzwerk und dem herkömmlichen Glas echte chemische Bindungen ausbilden. »Nur auf diese Weise können wirklich neue Eigenschaften entstehen, zum Beispiel in der elektrischen Leitfähigkeit oder der mechanischen Widerstandsfähigkeit«, ergänzt der Jenaer Glaschemiker Prof. Dr.-Ing. Lothar Wondraczek, der die Studie geleitet hat. ■



Original-Publikation:

Metal-organic framework and inorganic glass composites. Nature Communications (2020), DOI: 10.1038/s41467-020-19598-9

Kontakt

Prof. Dr.-Ing. Lothar Wondraczek
Otto-Schott-Institut für Materialforschung
Fraunhoferstraße 9, 07743 Jena

Telefon: +49 36 41 9-48 500

E-Mail: lothar.wondraczek@uni-jena.de

www.osim.uni-jena.de

Nanostrukturen gegen Blutgerinnsel

Künstliche Herzklappen und Gefäßprothesen können Leben retten. Doch stellen die Implantate auch ein Risiko für die Patienten dar: An ihren Oberflächen können sich Blutgerinnsel bilden, die zu Thrombosen führen können. Jenaer Materialforscherinnen und -forscher entwickeln deshalb jetzt thromboseresistente Oberflächen mit Nanostrukturen aus Polymerkristallen, mit denen sich die Blutgerinnung kontrollieren lässt.

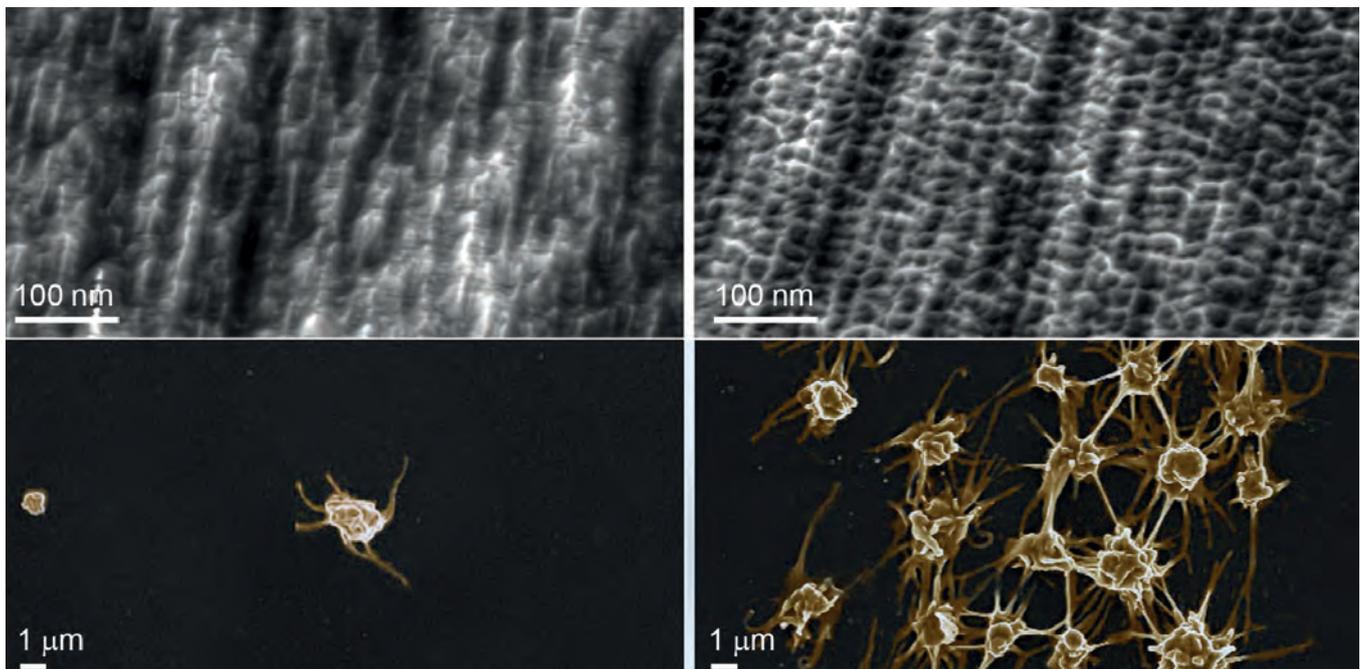
TEXT: AXEL BURCHARDT

Wenn Blutgefäße stark geschädigt sind oder die Herzklappen nicht mehr richtig arbeiten, muss Ersatz her. Allein in Deutschland werden daher pro Jahr ca. 190 000 Gefäßprothesen und 30 000 Herzklappenersatz implantiert. Diese Lebensretter bestehen in der Regel aus Kunststoffen. Neben vielen Vorteilen haben diese Materialien einen wesentlichen Nachteil beim Kontakt mit Blut: Sie aktivieren häufig die Gerinnung, was dazu führen kann, dass sich auf ihrer Oberfläche Blutgerinnsel bilden. Lösen sich diese von den Materialoberflächen, kann es zu lebensbedrohlichen Komplikationen, wie Thrombosen oder Embolien, kommen. Daher müssen Patienten mit solchen Implantaten oft ein Leben lang Gerinnungshemmer einnehmen und leiden unter deren Nebenwirkungen.

Hochgeordnete Muster aus Polymerkristallen

Einen neuen Ansatz zur Lösung dieser Probleme haben Forschende von der Universität Jena entwickelt. Dazu schuf das Team um die Physikerin und Materialwissenschaftlerin Dr. Izabela Firkowska-Boden besondere nanostrukturierte Polymeroberflächen. »Beim Abkühlen aus der Schmelze bilden sich unter den richtigen Bedingungen feinste hochgeordnete Oberflächenmuster aus Polymerkristallen auf diesen Materialien. Diese kristallinen Strukturen sind nur wenige zehn Nanometer, also Milliardstel Meter, klein«, sagt Firkowska-Boden. Die Forschungsergebnisse sind in der amerikanischen Fachzeitschrift »Langmuir« veröffentlicht worden.

Rasterkraftmikroskopische Aufnahmen von nanostrukturierten Polymeroberflächen (oben). Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen von Thrombozyten auf nanostrukturierten Oberflächen (unten). Unterschiedliche Oberflächenstrukturen (links und rechts) führen zu einem unterschiedlichen Ausmaß anhaftender Thrombozyten, das aus der oberflächeninduzierten Bioaktivität des Fibrinogens resultiert.





Fibrinogen richtet sich entlang der Muster aus

Der Clou dabei: Diese geordneten Muster sind etwa genau so klein wie das Eiweißmolekül Fibrinogen, das ein wichtiger Faktor bei der Blutgerinnung ist. Durch diese Größenübereinstimmung und physikalische Kräfte richtet sich das Fibrinogen entlang der Muster aus. Werden Blutplättchen, sogenannte Thrombozyten, die ebenfalls wichtig bei der Blutgerinnung sind, mit den mit Fibrinogen behandelten Polymermustern in Kontakt gebracht, verändern sich diese. »Die Änderungen der Blutplättchen sind stark von der Struktur der Polymermuster abhängig und lassen sich durch diese beeinflussen«, erklärt die Jenaer Wissenschaftlerin. Während die Blutplättchen sich auf einem Polymermuster stark verändern und ihr Potenzial für die Blutgerin-

nung steigern, reagieren diese Blutplättchen auf anderen Polymermustern kaum, wie das Team herausfand.

Neues Design thromboresistenter Oberflächen von Biomaterialien

»Aus biomedizinischer Sicht zeigt unsere Arbeit, dass die Material-Oberflächenstrukturierung in einem nanoskaligen Größenbereich einen Feinabstimmungsmechanismus zur Manipulation der Fibrinogen-Bioaktivität und Blutplättchenaktivierung bieten kann, der vielversprechend für das Design neuer thromboresistenter Oberflächen von Biomaterialien ist«, so Dr. Firkowska-Boden. Damit wäre ein wichtiger Schritt getan, Implantatmaterialien aus Polymeren in Zukunft weniger anfällig für die Bildung von Blutgerinnseln zu machen. ■

Die Jenaer
Materialwissenschaftlerin
Dr. Izabela Firkowska-Boden
mit einem Fibrinogen-
Protein-Modell.
Foto: Anne Günther

Original-Publikation:

How Nanotopography-Induced Conformational Changes of Fibrinogen Affect Platelet Adhesion and Activation, *Langmuir* (2020), DOI: 10.1021/acs.langmuir.0c02094

Kontakt

Dr. Izabela Firkowska-Boden
Otto-Schott-Institut für Materialforschung
Löbdergraben 32, 07743 Jena

Telefon: +49 36 41 9-47 735
E-Mail: izabela.firkowska-boden@uni-jena.de
www.osim.uni-jena.de





Prof. Dr. Aletta Bonn ist Professorin für Ökosystemleistungen der Friedrich-Schiller-Universität Jena und leitet am Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ) das Department Ökosystemleistungen im Rahmen des Deutschen Zentrums für integrative Biodiversitätsforschung (iDiv). · Foto: Bernhardt, iDiv

Bild rechts: Bäume sind nicht nur wichtig für das Klima. Sie tragen auch wesentlich zur menschlichen Gesundheit bei. · Foto: Anne Günther

Konjunkturpakete für Arten- und Klimaschutz

Was wurde während der Corona-Krise eigentlich aus der Biodiversitäts- und Klimadebatte? Das fragt Prof. Dr. Aletta Bonn in ihrem Kommentar. Die Biologin mahnt, Politik und Gesellschaft müssen – trotz anhaltender Pandemie – mehr für Schutz und Erhalt der biologischen Vielfalt tun, um menschliche Gesundheit langfristig zu sichern.

Das vergangene Jahr war aufregend und herausfordernd! Wir alle mussten uns mit der neuen Situation einer Pandemie auseinandersetzen, unseren Arbeitsstil anpassen und neue Wege finden, um zusammenzuarbeiten, zu lehren und unsere Arbeit zu organisieren. Gleichzeitig standen einige von uns vor herausfordernden persönlichen Situationen, sowohl in der Unterstützung von Studierenden, im eigenen Team als auch mit dem familiären Homeschooling-Balanceakt. Dabei haben wir viele kreative Lösungen gefunden und auch eine erneuerte Aufmerksamkeit für das, was bei der Arbeit in Teams wirklich zählt.

Mehr Aufmerksamkeit hat die Corona-Pandemie auch der biologischen Vielfalt verschafft und ihrer Bedeutung für die menschliche Gesundheit. Zoonotische Erkrankungen wie COVID-19 hängen unter anderem mit der Zerstörung von Lebensräumen zusammen. Die schwerwiegenden Folgen einer nicht nachhaltigen Bewirtschaftung unserer natürlichen Ressourcen verdeutlichen unsere Verantwortung für den Erhalt der biologischen Vielfalt, sowohl in Europa als auch in anderen Erdteilen – in Schutzgebieten aber auch Agrarlandschaften. Hier steuern wir mit der jetzigen Agrarpolitik und dem verwässerten Insektenschutzgesetz in die falsche Richtung.

Auch wenn nachvollziehbar ist, dass die konkrete und dringliche Corona-Situation unseren Fokus stark auf das Hier und Jetzt richtet, dürfen wir den drastischen, scheinbar schleichenden Klima- und Biodiversitätswandel nicht aus den Augen verlieren! Dieser hat wesentlich gravierendere Auswirkungen als die jetzige Pandemie. So haben wir in den zurückliegenden 60 Jahren in Deutschland einen dramatischen Rückgang von Pflanzenarten zu verzeichnen. Mehr als zwei Drittel von über 2 000 untersuchten Arten sind betroffen.

Aktion statt bloß guter Absicht

Das heißt für uns, wir müssen dringend weg von guten Absichten, hin zu konkreter Aktion und Umsetzung kommen: In diesem Jahr stehen wichtige Entscheidungen beim UN-Naturschutzgipfel an und der Europäische »Green Deal« muss umgesetzt werden. Die Biodiversitäts- und Klimakrise sind Zwillingsskrisen und sollten im Verbund mit Gesundheitsschutz angegangen werden. Die Corona-Konjunkturpakete müssen nun sinnvoll mit nachhaltigem Biodiversitäts- und Klimaschutz verbunden werden, um menschliche Gesundheit und Wohlergehen langfristig zu sichern.

Bei alledem hat uns die Corona-Pan-

demie auch Gelegenheit geboten, über unseren eigenen Arbeitsstil nachzudenken. 2020 haben wir als Forschende in jedem Fall unseren CO₂-Fußabdruck reduziert. Wir haben interaktive Kommunikationswege gefunden, Workshops und Konferenzen aus der Ferne organisiert und besucht. Auch unsere iDiv-Konferenz »Biodiversity Post 2020« fand online statt. Einen klimafreundlichen Forschungsstil sollten wir unbedingt auch nach der Pandemie beibehalten.

Und nicht zuletzt hat die Lockdown-Situation die Wertschätzung der lokalen Artenvielfalt für unser Wohlbefinden bei vielen Menschen deutlich erhöht. Jedenfalls sind die städtischen Parks und Grünflächen gut besucht. Dass städtisches Grün ein wichtiger Faktor für die Gesundheit ist, konnten wir kürzlich in einer Studie belegen: Je mehr Straßenbäume im direkten Wohnumfeld, desto weniger Antidepressiva wurden verschrieben, vor allem für Menschen aus schwächeren sozio-ökonomischen Verhältnissen. Gleichzeitig können Bäume wichtige Klimaleistungen durch CO₂-Bindung und Kühlung erbringen. Unsere Politik und Planung sollte daher Investitionen in Biodiversität in urbanen Räumen als auch ferneren Gebieten als naturbasierte Lösungen zu Gesundheits- und Klimaschutz aktiv ausbauen.



The winner takes it all?

Neue Forschungsgruppe untersucht Wettbewerb im Hochschulsystem

Hochschulen und Universitäten stehen in zunehmendem Wettbewerb: um Studierende, Personal und Forschungsgelder. Wie dieser Wettbewerb zwischen öffentlichen Hochschulen funktioniert und welche Rolle die verschiedenen Akteure dabei spielen, untersucht Innovationsforscher Prof. Dr. Uwe Cantner (Foto). Er ist Mitglied der neuen Forschungsgruppe »Multipler Wettbewerb im Hochschulsystem:



FOTO: ANNE GÜNTHER

Akteurskonstitution, Handlungskoordination und Folgewirkungen«, die am International Centre for Higher Education Research Kassel angesiedelt ist. Zusammen mit Prof. Dr. Thomas Grebel von der TU Ilmenau untersucht Cantner »(Autonome) Hochschulen im dynamischen Wettbewerb«. Die Deutsche Forschungsgemeinschaft fördert das Projekt für drei Jahre mit 520 000 Euro. viv/AB



FOTO: ANNE GÜNTHER

Virtuelle Spiele

Projekt zur Förderung interkultureller Kommunikation

Um digitale und interkulturelle Erfahrungen und Kompetenzen zu vermitteln, lässt der Jenaer Kommunikationsexperte Prof. Dr. Jürgen Bolten (Foto) regelmäßig Studierende und Lehrende aus aller Welt in virtuellen Klassenräumen

bei Planspielen miteinander verhandeln. Im Rahmen eines neuen Projekts wollen Bolten und sein Team das Konzept der digitalen Kooperation jetzt ausbauen. Das Projekt läuft im Förderprogramm »International Virtual Academic Collaboration« des Deutschen Akademischen Austauschdienstes und wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung mit rund 130 000 Euro gefördert. Ziel ist es, den während der Corona-Pandemie in den Hochschulen eingeleiteten Digitalisierungsschub in der internationalen Hochschulkooperation zu verankern. Das Jenaer Team arbeitet im Projekt mit Hochschulen in Polen, China, Finnland, Rumänien, Frankreich und Kanada zusammen. US

Zwischen Freiheit und Sicherheit

Europäische Forschungsgruppe untersucht, wie Terrorgefahr die Stadt-Atmosphäre prägt

Wie erleben die Menschen in Europa die Bedrohung durch Terrorismus? Wie verändern Anti-Terrormaßnahmen ihre Stimmungen und welche Auswirkungen hat das auf das gesellschaftliche Zusammenleben? Mit diesen Fragen beschäftigt sich das Forschungsprojekt »Atmospheres of (Counter)Terror in European Cities«. Neben dem Team um den Jenaer Sozialgeographen Prof. Dr. Simon Runkel sind



FOTO: ANNE GÜNTHER

die Universitäten Birmingham, Plymouth und Cergy-Pontoise sowie das L'Institut Paris Region beteiligt. Die Deutsche Forschungsgemeinschaft sowie britische und französische Organisationen fördern das Vorhaben in den kommenden drei Jahren mit rund 1,2 Millionen Euro, wovon 290 000 Euro nach Jena fließen. Runkel (Foto) wird untersuchen, wie Politik und Stadtplanung mit Menschenmengen (Crowds) umgehen. ch



FOTO: ANNE GÜNTHER

Kunst um 1800

Kunsthistoriker untersucht Darstellungen des Erhabenen

Vergleiche gehören zum alltäglichen Handwerkszeug des Menschen, um sich in der Welt zu orientieren. Zuweilen stoßen wir jedoch an die Grenze des Vergleichbaren. Eine solche Grenze möchte Prof. Dr. Johannes Grave (Foto) ausloten. Im

Rahmen des Forschungsprojektes »Bild-Vergleiche. Praktiken der Unvergleichbarkeit und die Theorie des Erhabenen« will der Jenaer Kunsthistoriker Bilder analysieren, um herauszufinden, wie das Erhabene in der Kunst um 1800 dargestellt wurde. Ausgangspunkt ist Kants Verständnis des Erhabenen als etwas, das sich aufgrund seiner unermesslichen Größe dem Vergleich entzieht. Das Projekt gehört zum Sonderforschungsbereich 1288 »Praktiken des Vergleichens. Die Welt ordnen und verändern« der Universität Bielefeld. Die Deutsche Forschungsgemeinschaft fördert das auf vier Jahre angelegte Vorhaben mit einer Gesamtsumme von gut 300 000 Euro. sl

Philosophie des 20. Jahrhunderts

DFG-Projekt untersucht Schnittmengen philosophischer Strömungen

In welchem Verhältnis stehen Kritische Theorie, Philosophische Anthropologie und Logischer Empirismus zueinander? Diesen drei maßgeblichen philosophischen Strömungen des 20. Jahrhunderts widmen sich die Jenaer Philosophen Prof. Dr. Christoph Demmerling (Foto), Max Beck und Nicholas Coomann in den nächsten drei Jahren. Die Deutsche Forschungsgemeinschaft fördert ihr gemeinsames Projekt



FOTO: ANNE GÜNTHER

»Nachmetaphysisches Philosophieren« mit rund 350 000 Euro. Im Fokus stehen die Hauptakteure der jeweiligen Denkrichtung: Max Horkheimer und Theodor W. Adorno für die Kritische Theorie, Max Scheler, Arnold Gehlen und Helmuth Plessner als Vertreter der Philosophischen Anthropologie sowie Rudolf Carnap und Hans Reichenbach als Protagonisten des Logischen Empirismus. sl



FOTO: JAN-PETER KASPER

Paläoerdbeben

Projekt zu tektonischen Aktivitäten der Erdgeschichte

Das Grenzgebiet zwischen Südtirol, Osttirol, Kärnten und Slowenien ist für Geologinnen und Geologen besonders spannend: Dort befindet sich das sogenannte östliche Periadriatische Verwerfungssystem, das zu den tektonisch

wichtigsten Regionen der Alpen zählt. Ein Team des Leibniz-Instituts für Angewandte Geophysik in Hannover und des Instituts für Geowissenschaften der Universität Jena untersucht historische Erdbeben in diesem Gebiet. Das Projekt, an dem der Jenaer Geowissenschaftler Prof. Dr. Kamil Ustaszewski (Foto) beteiligt ist, wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft mit insgesamt 187 000 Euro gefördert. Das Team setzt neue Datierungsmethoden ein, mit denen erstmals auch Erdbeben des Quartärs, des jüngsten geologischen Zeitraums der Erdgeschichte von vor 2,4 Millionen Jahren bis heute, erfasst werden können. LIAG/GC/AB

Interkulturalität bei Twitter

Bereich Interkulturelle Wirtschaftskommunikation startet neues Projekt

Ist die virtuelle Realität von der realen Welt noch trennbar? Und wenn nicht, wie kann es gelingen, diese Komplexität zu erforschen? Das untersucht der von der Universität Jena koordinierte Forschungsverbund »Researching Digital Interculturality Co-operatively«. Dr. Luisa Conti (Foto) und PD Dr. Fergal Lenehan bearbeiten das Jenaer Teilprojekt »Cosmopolitanism, Nationalism and Intercultural Competence in Online Contexts«, das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung mit 1,1 Mio. Euro gefördert wird und die interkulturelle Kommunikation auf der Plattform Twitter auf europäischer Ebene untersucht. Weitere Partner sind an den Unis Mainz und Potsdam sowie Hochschulen in Irland, Brasilien und Israel angesiedelt und hinterfragen die Interkulturalität in einer digital geprägten Gesellschaft. viv/AB



FOTO: ANNE GÜNTHER

«Researching Digital Interculturality Co-operatively«. Dr. Luisa Conti (Foto) und PD Dr. Fergal Lenehan bearbeiten das Jenaer Teilprojekt »Cosmopolitanism, Nationalism and Intercultural Competence in Online Contexts«, das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung mit 1,1 Mio. Euro gefördert wird und die interkulturelle Kommunikation auf der Plattform Twitter auf europäischer Ebene untersucht. Weitere Partner sind an den Unis Mainz und Potsdam sowie Hochschulen in Irland, Brasilien und Israel angesiedelt und hinterfragen die Interkulturalität in einer digital geprägten Gesellschaft. viv/AB



FOTO: JAN-PETER KASPER

COVID-19-Therapie

Forschungsnetzwerk InfectControl bündelt Expertisen gegen Corona

Forschende des Leibniz-Instituts für Naturstoff-Forschung und Infektionsbiologie – Hans-Knöll-Institut – (Leibniz-HKI), der Universität Jena, der Universität Würzburg sowie des Leibniz-Instituts für Experimentelle Virologie in

Hamburg vereinen ihre Expertisen, um gemeinsam etwas gegen die COVID-19-Pandemie zu bewirken. Das Projekt wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen des Konsortiums InfectControl, unter Leitung von Prof. Dr. Axel Brakhage (Foto), mit rund 2,3 Millionen Euro gefördert. Die Forschenden wollen einen neuartigen Therapieansatz entwickeln, bei dem das SARS-CoV-2-Virus zielgerichtet vom Immunsystem des Patienten eliminiert wird. Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse können außerdem dazu beitragen, bei möglichen zukünftigen Infektionsausbrüchen mit anderen Erregern rasch neue Therapeutika entwickeln zu können. InfectControl/MK

Hoch hinaus, aber nicht abgehoben

Klettern, Laufen, Forschen: Pharmazieprofessor Dr. Oliver Werz hat viele Interessen. Jedes einzelne verfolgt er mit Leidenschaft, allerdings ohne dabei die Bodenhaftung zu verlieren. Unser Autor porträtiert einen Wissenschaftler, der einfach nicht Nichtstun kann und der verrät, was Bouldern und wissenschaftliche Experimente gemeinsam haben.

TEXT: TILL BAYER

»Der Junge ist hyperaktiv!« Oliver Werz muss lachen, wenn er sich heute an die Worte seiner Mutter erinnert. Seit seiner Kindheit, die er im schwäbischen Reutlingen verbrachte, widmete er sich leidenschaftlich so ziemlich allem, was mit Sport und Naturwissenschaften zusammenhing. Früh begeisterte er sich etwa für Reptilien und Amphibien; gleichzeitig ging er den Sportarten Handball, Schwimmen und Geräteturnen nach. Werz war immer in Bewegung. Nebenher fing er an, sich für Gartenbau zu interessieren und züchtete Kakteen. Während seine Freunde für Rockmusik und Motorräder schwärmten, wurde Oliver Werz mit 17 Jahren Mitglied im Kakteenzuchtverein.

Nach dem Abi wollte Werz zunächst eine Karriere als Gartenbauingenieur einschlagen. Doch es kam anders: Kurzentschlossen nahm er 1988 im nahegelegenen Tübingen ein Pharmaziestudium auf, um Apotheker zu werden und so die naturwissenschaftliche Neigung mit einer sicheren Berufsperspektive zu verbinden. Heute ist er Professor für Pharmazeutische Chemie an der Friedrich-Schiller-Universität Jena. Seit gut einem Jahrzehnt lehrt und forscht er bereits hier. Die »Hyperaktivität« hat sich der heute 55-Jährige bewahrt – und nutzt sie im positiven Sinn.

Mit Naturstoffen den Entzündungsprozess steuern

Das gilt zunächst für seine Arbeit als Wissenschaftler: Werz ist an gleich drei Sonderforschungsbereichen der Jenaer Universität beteiligt und treibt ein Forschungsthema voran, das er über Jahre hinweg mühevoll etabliert hat: die Bildung und Funktionsweise sogenannter Lipidmediatoren. Dabei handelt es sich um Gewebshormone, die Entzündungsprozesse im menschlichen Körper steuern. Lassen sich diese Substanzen durch Wirkstoffe regulieren, könnte man so Entzündungen besser behandeln. Doch die Sache ist komplex: »Entzündungen sind natürliche Abwehrreaktionen des Körpers auf Viren, Pilze oder Bakterien«, erklärt Werz. Lipidmediatoren sorgen so einerseits dafür, dass die Erreger vertrieben werden und Körperschädigungen heilen können; andererseits verursachen sie damit Schmerzen, Schwellungen oder sogar Organschädigungen.

Wertz sucht deshalb nach Wirkstoffen, welche die positiven Hormoneffekte verstärken und die negativen eindämmen und nimmt dabei vor allem Naturstoffe in den Blick, die oft breiter wirken können als synthetische Substanzen und außerdem weniger Nebenwirkungen besitzen. »In diesem Feld gibt es noch vieles zu erforschen«, sagt der Pharmazeut. »Mich

motiviert, dass Entzündungen bei so vielen weit verbreiteten Erkrankungen wie Herzinfarkt, Krebs, Arthritis oder auch Rückenschmerzen die treibende Kraft sind.«

Ein schwedisches Wissenschaftsidol

Dass sich Werz ausgerechnet mit Lipidmediatoren befasst und dass er überhaupt eine wissenschaftliche Laufbahn einschlug, verdankt er einem Nobelpreisträger. Nach dem Studienabschluss im Jahr 1992 promovierte er über die 5-Lipoxygenase, ein Enzym, das ungesättigte Fettsäuren in Entzündungsbotenstoffe umwandelt. Damit war der erste Schritt in Richtung Entzündungsforschung getan. Der zweite Schritt führte ihn nach Schweden an das angesehene Karolinska-Institut in Stockholm. Dort bot sich ihm die Möglichkeit, in der Gruppe von Bengt Samuelsson zu arbeiten. Samuelsson hatte die 5-Lipoxygenase entdeckt und dafür 1982 den Medizinnobelpreis erhalten. Eine riesige Chance für Werz, die er einfach nutzen musste, auch wenn sie rückblickend das Ende seiner geliebten Kakteensammlung besiegelte. Inzwischen war sie auf mehrere hundert Exemplare angewachsen und Werz konnte sie nicht einfach mit nach Stockholm nehmen. Die meisten der Pflanzen hätten das kalte Klima und die unterschiedlichen Lichtverhältnisse in Schweden nicht überlebt.

»Es war definitiv eine der wichtigsten Entscheidungen meines Lebens«, blickt Werz zurück. »Bis zu diesem Zeitpunkt konnte ich mir noch gut vorstellen, im weißen Kittel in der Apotheke zu stehen. In Schweden habe ich dann erkannt, dass meine wahre Leidenschaft der Wissenschaft gilt.« Das lag auch an Samuelsson. Er ermutigte Werz dazu, das Forschungsthema zu vertiefen, neuartige Experimente auszuprobieren und schließlich mit der Habilitation zu beginnen. Noch immer sieht Werz in ihm sein wissenschaftliches Vorbild: »Mir imponierte vor allem seine scharfe Denkweise, aber auch seine bodenständige Art«, erinnert er sich. »Von Anfang an nahm er sich viel Zeit und bot an, ihn mit Vornamen anzusprechen. Einen Nobelpreisträger hatte ich mir distanzierter vorgestellt.«

Zwischen Schreibtisch und Laufstrecke

Wertz blieb zwei Jahre in Schweden, bevor es ihn zunächst zurück nach Frankfurt und dann nach Tübingen zog, wo er 2005 als Professor an die Universität gerufen wurde. Im Jahr 2010 wechselte er, inzwischen Familienvater geworden, an die Universität Jena. Das familienfreundliche Umfeld, aber auch die



Akrobatik am Überhang: In der Kletterhalle, die Prof. Dr. Oliver Werz regelmäßig besucht, führen Kraft, Klettertechnik und gute Planung zum Erfolg. · Foto: Jens Meyer

vielen Kooperationsmöglichkeiten mit anderen naturwissenschaftlichen Bereichen, überzeugten ihn zu diesem Schritt und aus genau diesen Gründen blieb er Jena bis heute treu – mit einer kleinen Ausnahme: 2015 zog er mit der ganzen Familie für ein Semester in die USA nach Boston, um an der Harvard Medical School zu forschen.

An Jena gefällt Oliver Werz zudem, dass er nur wenige Schritte gehen muss, um mitten in der Natur zu sein. Dreimal wöchentlich geht er in den umliegenden Bergen laufen – um einen Ausgleich von den vielen Stunden am Schreibtisch zu haben. An den Wochenenden läuft er sogar regelmäßig gemeinsam mit einem Freund einen Halbmarathon: von den Fuchslöchern in Jena-Ost über das Paradies bis nach Lobeda und zurück. Für die Strecke von rund 21 Kilometern benötigt er nur etwas mehr als 90 Minuten.

Die Wissenschaft des Boulderns

Ehrgeizig ist Werz auch bei einer anderen Freizeitbeschäftigung, die er erst in Jena für sich entdeckt hat: dem Bouldern. Dabei handelt es sich um eine Variante des Kletterns ohne Seil und Gurt in Bodennähe. Als »Boulder-Opa«, wie Werz sich scherzhaft bezeichnet, macht er an der Wand vielen Jüngeren etwas vor und schafft selbst die höheren Schwierigkeitsgrade. Wenn er sich geschmeidig von Griff zu Griff nach oben hangelt, kommt ihm sein geringes Körpergewicht zugute, aber

auch seine Klettererfahrung. Das Seilklettern betreibt er nämlich schon seit über 20 Jahren; über das Hobby lernte er seine Frau kennen. Am Bouldern reizt ihn vor allem die Komplexität der Trendsportart: »Es verhält sich damit wie bei einem wissenschaftlichen Experiment«, erklärt Werz. »Eine schwierige Boulder-Route muss man immer wieder versuchen und jedes Mal die Parameter ändern, bis sie gelingt.« Details wie eine veränderte Fußdrehung oder eine Gewichtsverlagerung würden darüber entscheiden, ob man den nächsthöheren Griff erreicht.

Laufen, Bouldern, die vielen Pflichten des Professorenberufs – es stellt sich die Frage, wie Werz das alles schafft. Auch dafür hat er eine Erklärung parat: »Ich versuche mein Leben so zu strukturieren, dass Job, Familie und Hobbys möglichst gut miteinander verknüpft sind.« Zum Beispiel nimmt er seine Laufsachen oft mit ins Büro, um auf dem Nachhauseweg zu trainieren. Und Bouldern bedeutet zugleich Familienzeit: Sein 13-jähriger Sohn, selbst ein talentierter Kletterer, begleitet ihn an Wochenenden in die Boulderhalle.

Immer in Bewegung bleiben, hin und wieder Dinge abseits des Mainstreams ausprobieren – an dieses Motto, dem Oliver Werz seit seiner Kindheit folgt, will er sich auch in Zukunft halten. Außerdem möchte er noch einmal für einen Forschungsaufenthalt ins Ausland gehen – vorausgesetzt, dass er danach nach Jena zurückkehren kann. Denn zumindest was seinen Wohn- und Arbeitsort betrifft, findet der Professor etwas Ruhe inzwischen ganz angenehm. ■



Bild links: Dr. Oliver Forstner vor dem »Globe of Science and Innovation« am CERN. · Foto: Silvia Scharbert

Bild rechts: Versuchsaufbau in der ISOLDE-Halle. Hinter dem Forscher befindet sich der Versuchsaufbau, in dem die Astat-Ionen mit den Laserstrahlen überlagert werden. Die Laser befinden sich in dem grauen Raum auf der ersten Etage des Treppenaufgangs. Der Forscher überwacht gerade mit einem Oszilloskop die vom Detektor kommenden Signale der auftreffenden neutralen Astat-Atome und macht dazu Notizen in das analoge Logbuch. · Foto: Oliver Forstner

Einmal Strahlzeit, bitte!

Das Halogen Astat zählt zu den seltensten Elementen der Welt. Weniger als 50 Gramm gibt es davon auf der Erde. Es entsteht, wenn radioaktive Schwermetalle wie Uran zerfallen, und existiert nur wenige Minuten, bevor es selbst zerfällt. Aufgrund dieser Flüchtigkeit können Physiker wie Oliver Forstner das »Unbeständige« – so die Übersetzung des griechischen Namens – nur mit beträchtlichem technischen Aufwand künstlich herstellen und erforschen. Entsprechende Großgeräte hält beispielsweise die Forschungseinrichtung CERN dafür bereit. Doch wie funktioniert eigentlich die Arbeit mit einer solchen Wissenschaftsmaschine?

TEXT: SEBASTIAN HOLLSTEIN

»Zunächst ist eines ganz wichtig: Wenn man Antworten auf seine Forschungsfragen bekommen will, dann sollte man nicht zu viel Respekt vor der Arbeit in großen Einrichtungen haben«, sagt Dr. Oliver Forstner. Und der Jenaer Physiker muss es wissen, schließlich hat er bereits während seiner Dissertation drei Jahre am CERN geforscht. 2019 kehrte er für einige Experimente zurück, um als Teil eines internationalen Forscherteams mehr über das Element Astat herauszufinden. Denn die Europäische Organisation für Kernforschung bietet am Standort in der Nähe von Genf die

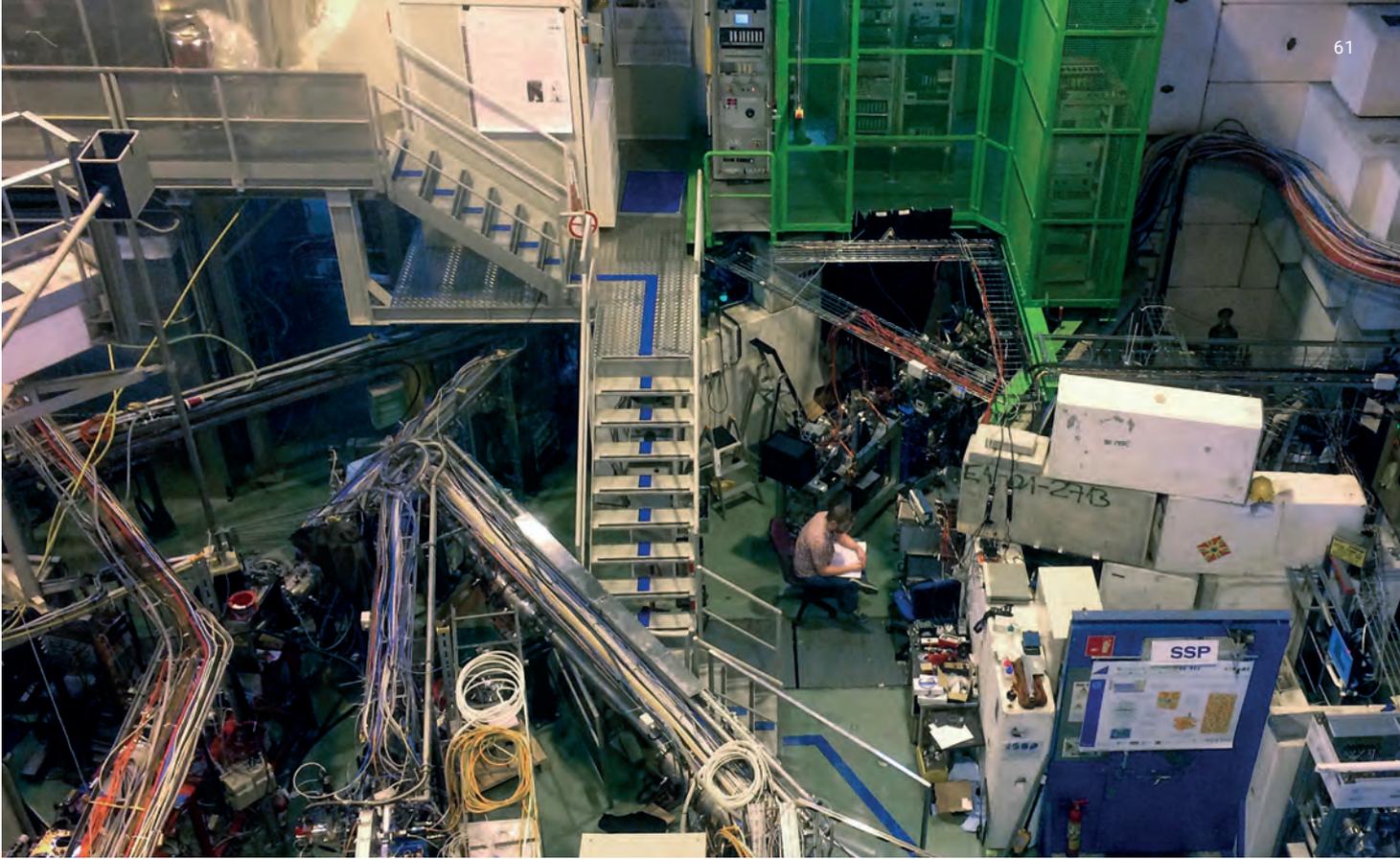
Ionenanlage ISOLDE (Isotope Separator On Line Device), mit der sich verschiedene Isotope herstellen lassen. Leitet man etwa einen durch einen Teilchenbeschleuniger produzierten Protonenstrahl auf das Element Bismut, so werden dessen Atomkerne aufgespalten. Dabei entstehen Astat-Isotope, die für weitere Experimente weitergeleitet werden können.

Ein solches Vorhaben verlangt allerdings einige Vorbereitungszeit. Zunächst müssen die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler Strahlzeit bei dem Großgerät beantragen. »Dafür

erklärt man zum einen die bereits geleisteten Vorarbeiten und den aktuellen Stand der Forschung«, sagt Forstner. »Zum anderen sollten schon detaillierte Planungen zum Experiment, das man in der Einrichtung durchführen will, vorliegen, da man eine konkrete Anzahl an Acht-Stunden-Schichten am Gerät angeben muss.« Es gilt, möglichst genau abzuschätzen, wie lang der Aufbau und die Durchführung der Versuche dauern und wie viele Durchläufe vermutlich benötigt werden, um ein aussagekräftiges Ergebnis zu erhalten. Zum Auswahlprozess gehört auch eine mündliche Präsentation vor dem Gremium, das schließlich nach wissenschaftlicher Relevanz entscheidet und Termine zuweist. Beim Astat-Projekt hat diese Bewerbungsphase etwa ein halbes Jahr gedauert.

Orte des Experiments und der Begegnung

Ist der Forschungszeitraum bewilligt, schließen sich weitere praktische organisatorische Vorarbeiten an. So müssen die Nutzerinnen und Nutzer für die umfangreichen Registrierungen etwa medizinische Unterlagen vorweisen,



die belegen, dass man fit genug ist, um unter Belastung zu arbeiten. Außerdem sind sie dazu verpflichtet, im Vorfeld Strahlenschutzkurse zu absolvieren. »Dank dieses Aufwandes kann man sich dann während der Zeit vor Ort weitestgehend auf seine wissenschaftlichen Versuche fokussieren«, sagt Forstner. »In den Anlagen herrscht in der Regel eine sehr konzentrierte Atmosphäre, denn natürlich will jeder neue Daten mit nach Hause nehmen, die ihn in seiner Forschung voranbringen, und nicht wertvolle Strahlzeit verschwenden.« Zentren wie das CERN sind zudem nicht nur Orte der Experimente, sondern auch Orte der Begegnung. »Gerade eine so große internationale Gruppe wie unsere kommt selten komplett zusammen – die Zeit der Versuche bietet dafür eine gute Gelegenheit, da sie den Grundstein für das weitere Vorgehen legt, das es zu besprechen gilt«, sagt Forstner. »Die Einrichtungen rund um solche Großgeräte halten meist eine ideale Infrastruktur für solche Treffen bereit. Gerade am CERN ist die Internationalität deutlich spürbar.« Das Schweizer Forschungszentrum bietet zudem ein sehr gutes Umfeld zur Vernetzung – allerdings weniger während der Arbeitszeit als vielmehr in den Men-

sen und Restaurants auf dem Campus. Hier entstehen neue Kontakte und mitunter wertvolle Impulse für laufende oder zukünftige Projekte. Da könne es schon mal passieren, dass man bis in die Nacht zusammensitzt und über Experimente diskutiert oder auch über Fußball beispielsweise.

Das Team, dem Forstner angehört, benötigte etwa anderthalb Wochen Strahlzeit. Rund um die Uhr arbeiteten seine Mitglieder in verschiedenen Schichten an der Anlage. Alle Rädchen griffen ineinander. »Zunächst bauten wir unser Experiment direkt am Teilchenbeschleuniger an«, erklärt der Physiker. »Diese Installation wird noch einmal von einem Sicherheitsingenieur überprüft. Wenn das Gerät in Betrieb geht, hält man sich dann überwiegend im Überwachungsraum auf, um bestimmte Werte zu kontrollieren, die aussagen, ob das Experiment geklappt hat.« Aus den dabei entstandenen Daten, die einige Festplatten füllen, destillieren die Forschenden dann am heimischen Schreibtisch wissenschaftliche Erkenntnisse. Auch Oliver Forstner profitiert noch während seiner aktuellen Arbeit von den zurückliegenden Versuchen. Und die nächste Verabredung mit ISOLDE ist bereits geplant. ■

Elektronenaffinität von Astat

Forstner und sein Team beobachteten, wie negativ geladene Astat-Ionen in der eigens entwickelten Vorrichtung mit Laserlicht unterschiedlicher Wellenlänge bestrahlt wurden. Dabei konnten die Forscherinnen und Forscher messen, wie viel Energie nötig ist, um das zusätzliche Elektron des Ions abzutrennen und das Ion somit in ein neutrales Atom zu verwandeln. Dank dieses Experiments konnten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler die Elektronenaffinität von Astat und seine Elektronegativität genau bestimmen. Mit diesen Informationen und dem Ionisationspotenzial lassen sich schließlich die chemischen Eigenschaften des Halogens bestimmen. Solche Informationen helfen nicht nur dabei, Grundlagenforschung voranzutreiben, möglicherweise bereiten sie auch den Weg dafür, Astat im Kampf gegen Krebs einzusetzen. Medizinerinnen und Mediziner könnten es in Verbindung mit organischen Proteinen direkt an bestimmte Tumore leiten, die dann durch den Alpha-Zerfall des Elements zerstört würden. So könnte »das Unbeständige« sogar Leben retten (DOI: 10.1038/s41467-020-17599-2).

Die »Weltseele« in Jena

Vor 200 Jahren ist Napoleon Bonaparte gestorben. Der General und Kaiser der Franzosen hat seine Spuren quer durch Europa hinterlassen – so auch in Jena. Vom Philosophen Georg Wilhelm Friedrich Hegel im Herbst 1806 noch ehrfürchtig bewundert, formierte sich an der Universität während der französischen Herrschaft bald Widerstand. An diese Zeit erinnert das Kalenderblatt.

TEXT: STEPHAN LAUDIEN

Hoch zu Pferde reitet der Kaiser der Franzosen, Napoleon Bonaparte, am 13. Oktober 1806 durch Jena. Am nächsten Tag sollen die Waffen sprechen, die Schlacht von Jena und Auerstedt steht unmittelbar bevor. Doch die Studiosi der Salana nehmen kaum Notiz von dem berühmten Mann. Der schlichte Grund: Noch ist Semesterpause, es sind kaum Studenten in der Stadt.

Einer ihrer Professoren jedoch begegnet dem Kaiser und ist schwer beeindruckt. Der Philosoph Georg Wilhelm Friedrich Hegel sieht Napoleon in der Johannisstraße: »den Kaiser – diese Weltseele – sah ich durch die Stadt zum Rekognoszieren hinausreiten; – es ist in der Tat eine wunderbare Empfindung, ein solches Individuum zu sehen, das hier auf einen Punkt konzentriert, auf einem Pferde sitzend, über die Welt übergreift und sie beherrscht.« Während der Kaiser am nächsten Morgen dem zahlenmäßig überlegenen Heer der Preußen und Sachsen eine empfindliche Niederlage beibringt und das Ende des alten Preußens einläutet, gilt Hegels Sorge seinem Manuskript. Gerade hat er die letzten Seiten seiner »Phänomenologie des Geistes« überarbeitet und das Buch gen Bamberg geschickt. Wehe, wenn die Seiten dort nicht ankommen; eine Zweitschrift existiert nicht.

Die Jenaer Universität bleibt von den kriegesischen Auseinandersetzungen im Herbst 1806 weitgehend verschont. Durch Plünderung und Brand geht Vermögen in Höhe von 4 005 Talern



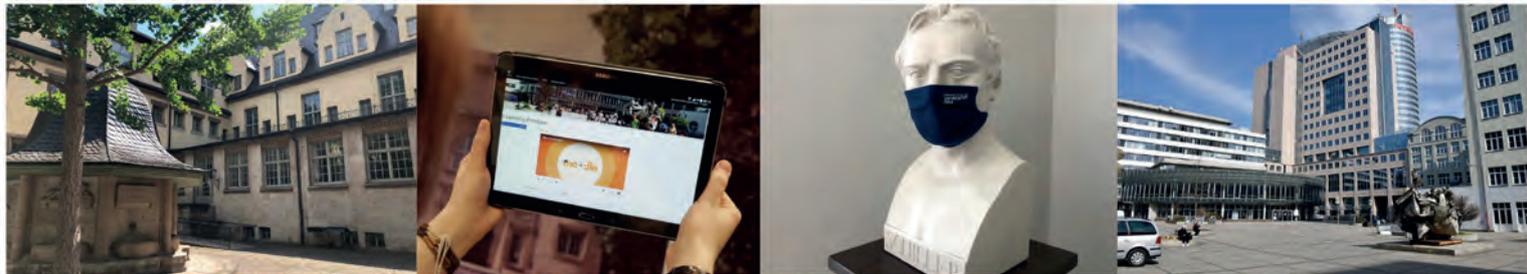
Im Universitätsarchiv befindet sich dieses Dekret des kaiserlichen Domaineninspektors Louis Alexandre Gentil vom 12. Februar 1809, das der Universität die Schenkung des »Lindenstücks« durch Napoleon mitteilt und die näheren Modalitäten bestimmt.

verlustig, hinzu kommen noch 8 722 Taler an Privatvermögen. Dank eines kaiserlichen Schutzbriefes kann der Lehrbetrieb bereits am 3. November wieder aufgenommen werden. Als Entschädigung für die Verluste bekommt die Universität das »Lindenstück« in der Blankenhainer Flur geschenkt. Fünf Franzosen erhalten zudem die Ehrendoktorwürde. Es handelt sich um Mediziner, die im Kriegseinsatz waren. Die Herrschaft der Franzosen wirkt sich auf den Lehrbetrieb der

Universität aus. So werden vom Wintersemester 1808 an Vorlesungen über den »Code Napoléon« gehalten. Zwei Ziele werden damit verfolgt: Zum einen bleibt die Universität für jene Studenten attraktiv, deren Heimat nun zu Frankreich gehört, zum anderen werden auch in Sachsen-Weimar-Eisenach Juristen benötigt, die sich mit dem Gesetzeswerk auskennen, falls es im hiesigen Territorium Gültigkeit erlangt. Das bürgerliche Rechtsverständnis nach der Französischen Revolution fällt auch bei Jenaer Rechtsgelehrten auf fruchtbaren Boden.

Doch in Jena formiert sich auch Widerstand gegen die Fremdherrschaft: Vornehmlich der Historiker Heinrich Luden exponiert sich. Seine Vorlesung »Zur vaterländischen Geschichte« rückt die Nation in den Blickpunkt, seine anonym erschienenen »Ansichten des Rheinbundes« sind eine antinapoleonische Kampfschrift. Der Weg zur deutschen Nation soll aber keineswegs zurück zum alten Feudalstaat führen.

Napoleon selbst eilt von Jena aus von Sieg zu Sieg, ehe seine Grande Armée im Jahr 1812 in Russland erstmals eine bittere Niederlage erleidet. Einen weiteren Rückschlag fügen Deutsche, Schweden, Österreicher und Russen dem Kaiser 1813 in der »Völkerschlacht« bei Leipzig zu. Der Korse wird verbannt, kehrt zurück und wird 1815 bei Waterloo endgültig geschlagen. Auf St. Helena stirbt Napoleon Bonaparte am 5. Mai 1821, vor 200 Jahren. ■



BLOG

.UNI-JENA.DE



LICHTGEDANKEN

ONLINE

Das Forschungsmagazin der
Friedrich-Schiller-Universität Jena

www.uni-jena.de/lichtgedanken



FRIEDRICH-SCHILLER-
UNIVERSITÄT
JENA