

Regenbogen in der Glasfaser

In ihrer herkömmlichen Form sind sie die Garanten des schnellen Internets. Doch aus Glas gezogene Fasern können mehr, als Licht fast verlustfrei leiten. Mit photonischen Kristallfasern manipulieren **Philip Russell**, Direktor am **Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts** in Erlangen, und seine Mitarbeiter die Eigenschaften von Laserlicht, und sie entwickeln aus den Fasern Sensoren für Medizin und Technik.

TEXT **ROLAND WENGENMAYR**

Können Sie die Faser sehen?“, fragt Johannes Köhler. Da ist sie: Eine hauchzarte Linie überspannt eine Handbreit Raum. Die Glasfaser hat einen Durchmesser von nur gut hundert Mikrometern, ungefähr wie ein kräftiges Haar. Trotzdem hat sie es in sich. Wie solche Fasern Laserlicht verändern können, hätte noch vor 25 Jahren als unmöglich gegolten. In ihnen treten Effekte der nichtlinearen Optik auf, die nicht nur Grundlagenforschern reichlich Stoff bietet, sondern auch praktische Anwendungen verheißt. Die herkömmliche Glasfaser hat ihre Verheißung erfüllt – das globale Glasfasernetz ist heute das Rückgrat unserer Informationsgesellschaft. Doch die etablierten Glasfasern nehmen sich im Vergleich zu den Erlanger Filigranfasern so primi-

tiv aus wie ein Abakus neben einem modernen Tablet.

Um mikro- und nanotechnologisch hochgezüchtete Glasfasern dreht sich die Forschung der Abteilung am Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts, die Philip Russell als Direktor leitet. Johannes Köhler ist ein Doktorand, und wir stehen in seinem Labor vor einem optischen Tisch, auf dem mit einem kraftvollen Laser, Linsen, Spiegeln und anderen optischen Elementen eine Rennstrecke für Licht installiert ist. Das unsichtbare Infrarotlicht des Lasers muss dabei die zwölf Zentimeter lange Glasfaser passieren, auf die Köhler deutet. Sie ist innen hohl, und quer durch den Hohlraum spannen sich über ihre gesamte Länge zwei dicht beieinanderstehende parallele Membranen.

Die Membranen sind so hauchzart, dass das Laserlicht, dessen Photonen eine schwache mechanische Kraft ausüben, sie zum Schwingen bringen kann. Die optoakustische Schwingung verändert wiederum das Licht. Was dabei geschieht, untersucht Köhlers Team. In den benachbarten Labors laufen Experimente mit anderen Fasern, die verschiedene Strukturen aus Nano- und Mikrohohlräumen enthalten. Jede verändert das Laserlicht auf andere Weise. So verdankt Theodor Hänsch, Direktor am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching, solchen Glasfasern den Nobelpreis für Physik. 2005 erhielt er ihn zusammen mit den Amerikanern John Hall und Roy Glauber.

Philip Russell, der in Belfast geborene britische Physiker, ist Pionier und Mastermind der Erlanger Faserwelt. Dort

Eine Quelle für weißes Licht: Speziell präparierte photonische Kristallfasern erzeugen aus einfarbigen Laserpulsen ein breites Spektrum an Licht, das am Ende der Faser von einem Prisma aufgefächert wird. Am rechten Rand wird ultraviolettes Licht als weißes Leuchten sichtbar gemacht.

leitet er die 40-köpfige Abteilung Photonic Crystal Fibre Science. „Es geht um die Wechselwirkung zwischen Licht und Materie“, skizziert er das Leitmotiv seiner Forschung. Geduldig erklärt er den fundamentalen Unterschied zu herkömmlichen Glasfasern, ohne die das schnelle Internet nicht denkbar wäre. Mit britisch schwarzem Humor bemerkt er, dass die Glasfaser auch die Verbreitung von Fake-News viel effizienter gemacht habe. Ganz offensichtlich ist er froh, dass seine Forschung nicht der Kommunikationstechnik dient.

„Telekommunikations-Glasfasern funktionieren im Prinzip wie lang gezogene, fast perfekte Spiegel“, erklärt er. Diese Fasern besitzen einen Kern und einen Mantel aus zwei Glassorten mit unterschiedlichen Brechungsindices. Die Grenzfläche zwischen ihnen wirkt

daher als Spiegel, der die Laserstrahlen in der Faser hin und her reflektiert. Das funktioniert ungefähr wie ein Flummball, den man schräg in ein Rohr wirft, in das er immer tiefer hineindotzt.

GLASFASER UND PHOTONISCHER KRISTALL HEIRATEN

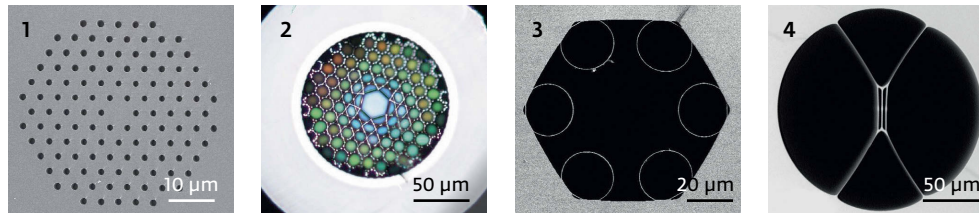
Herkömmliche Glasfasern basieren also auf der Fähigkeit des Lichts, sich als geradlinige Strahlen auszubreiten. Im Gegensatz dazu nutzen Russells Fasern die Tatsache, dass Licht sich wie eine Welle verhalten kann.

Was das bedeutet, vermittelt ein Blick in eines von Russells Regalen. In einem Glaskasten schillert ein Blauer Morphofalter, den der Physiker vor vielen Jahren im Shop eines französischen Naturkundemuseums gekauft hat. Die

leuchtenden Farben des Schmetterlings entstehen nicht durch Farbpigmente, sondern durch winzige Nanostrukturen, die das Licht bei der Reflexion verändern. Die Strukturen müssen dafür gerade so bemessen sein, dass sie zur Wellenlänge sichtbaren Lichts passen. Das sind einige Hundert Nanometer (millionstel Millimeter).

In dieser Größenordnung liegt auch die Architektur künstlicher photonischer Kristalle. In eindimensionaler Form haben solche Materialien inzwischen auch Einzug in den Alltag gehalten, als dünne Antireflexbeschichtung auf Spiegeln, Fenstern oder Linsen von Brillen und Kameraobjektiven.

Anfang der 1990er-Jahre fragte sich Philip Russell, was dabei herauskäme, wenn er eine Glasfaser mit einem zweidimensionalen photonischen Kristall



Oben Zunächst stellten die Forscher um Philip Russell Fasern mit solidem Glaskern (1) her, die elektromagnetische Wellen genau einer Wellenlänge auf unendlichen Strecken schmal gebündelt leiten. Inzwischen haben sie auch Fasern mit hohlem Kern entwickelt, darunter eine mit Kagomé-Struktur (2), die von japanischen Shinto-Schreinen inspiriert ist und ultraviolettes Licht erzeugt. Manche Hohlkernfasern (3) erzeugen aus einfarbigem Licht ein breites Spektrum elektromagnetischer Wellen. Fasern, die über ihre ganze Länge von senkrechten Membranen durchzogen werden (4), dienen zu optoakustischen Experimenten. Dabei regt das Licht die Membran zum Schwingen an.

Rechte Seite Michael Frosz, Xin Jiang und Philip Russell (von links) verfolgen im Reinraum, wie die Vorform einer Glasfaser in einem Ofen geschmolzen und zu ihrer endgültigen Stärke ausgezogen wird.

verheirateten würde. Dabei sollte eine Glasfaser entstehen, die der Länge nach von regelmäßig angeordneten hohlen Kanälen durchzogen würde, sodass der Querschnitt der Faser ein periodisches Muster von Löchern zeigt. Die Kanäle würden Sprünge in den Materialeigenschaften, genauer: im Brechungsindex, bewirken, wenn ihre Abstände zur Wellenlänge des verwendeten Laserlichts passten. Ein solcher photonischer Kristall würde vor allem die Anteile des Laserlichts manipulieren, welche die Faser seitlich verlassen wollen.

Das war Russells Idee. Doch der Weg zur Realisierung der ersten photonischen Kristallfaser war steinig. „Da hast du diesen Traum“, erzählt Russell, „aber angesichts der Schwierigkeiten sinkt dein Mut.“ Er musste eine Möglichkeit finden, die ohnehin schon haarfeinen Fasern mit noch winzigeren Kanälen zu versehen, die alle eine bestimmte Breite haben und über die gesamte Länge der Faser einen fixen Abstand zueinander einhalten. „Die meisten Kollegen hielten mich für verrückt“, berichtet Russell.

Das waren keine guten Voraussetzungen für den jungen Wissenschaftler,

der damals an der Universität Southampton forschte. Nach vielen Fehlschlägen gelang seinem kleinen Team schließlich der Durchbruch mit einer Technik, die der Herstellung von Zuckerwatte ähnelt. Sie nutzt aus, dass sich Quarzglas bei Temperaturen um die 1850 Grad Celsius wie geschmolzener Zucker verhält. So lässt es sich zu einem extrem dünnen Faden auseinanderziehen, ohne zu reißen. Genauso wichtig: Enthält das Glas ein inneres Lochmuster, dann schrumpft dieses beim Ziehen mit, ohne sich in seinen Proportionen zu verändern.

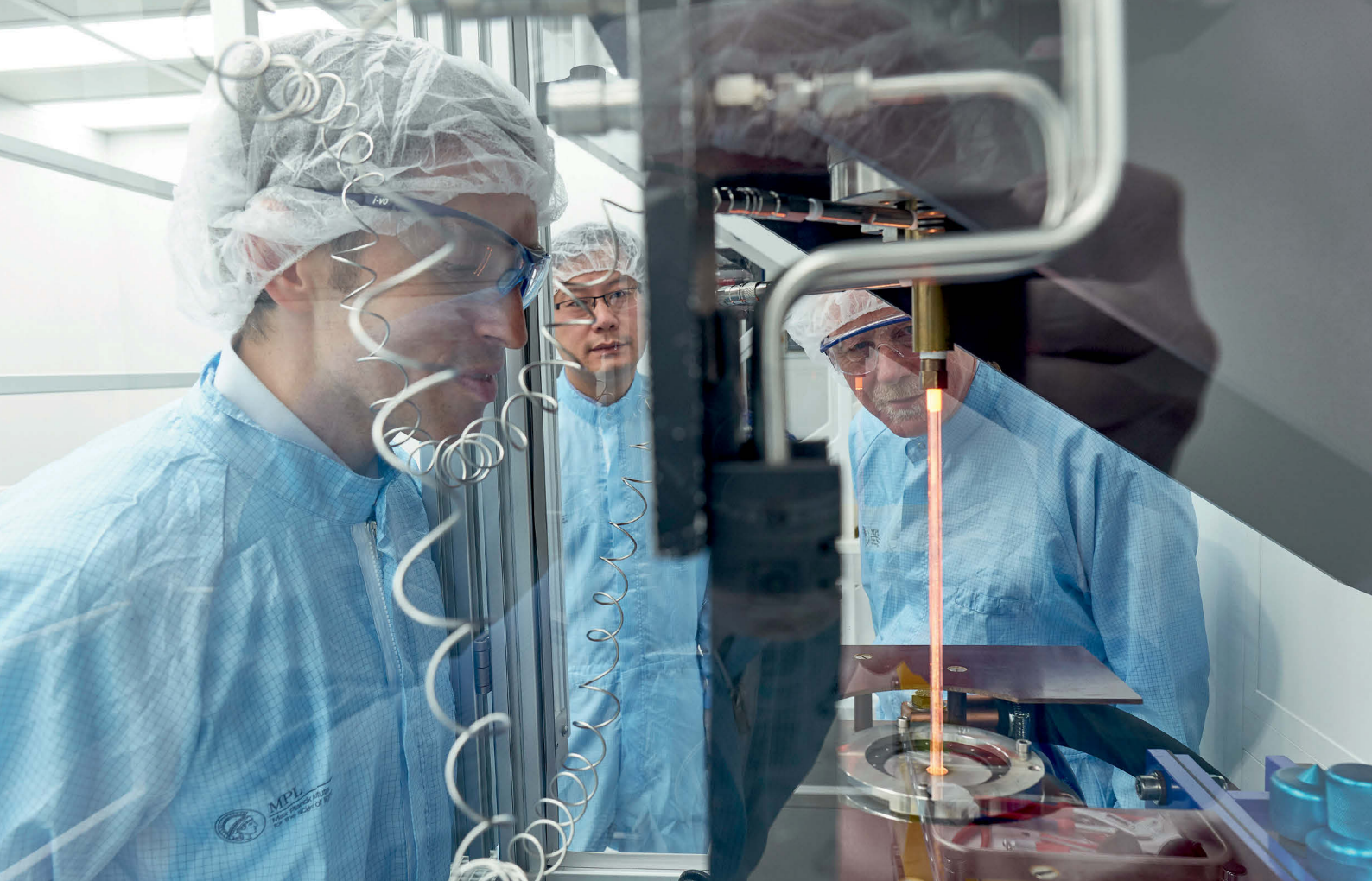
FASERN MIT VÖLLIG NEUEN OPTISCHEN EIGENSCHAFTEN

Nach vergeblichen Versuchen, einen dickeren Glasblock mit Millimeterbohrungen zu versehen und auseinanderzuziehen, kam Russells Team schließlich auf die entscheidende Idee. Die Physiker legten einen Stapel aus Quarzglasröhren im gewünschten Muster zusammen. Dann erhitzen sie diesen Stapel in einem Ofen und zogen ihn zu einer dünnen Faser auseinander. So

entstand die erste funktionierende photonische Kristallfaser.

1996 stellte Russell die erste photonische Kristallfaser vor und hat die Stapel- und-zieh-Methode seither perfektioniert. Die völlig neuen optischen Eigenschaften der Fasern fanden gleich viel Aufmerksamkeit in der Laserszene. Viele Forschungsgruppen stürzten sich darauf, besonders erfolgreich war eine Gruppe an den US-amerikanischen Bell Labs in Holmdel, New Jersey. Sie lieferte jene Fasern, die John Hall und Theodor Hänsch zur nobelpreisgekrönten Erfindung des Frequenzkamms führten. Damit lassen sich die Farben von Licht in nie da gewesener Präzision messen und optische Atomuhren konstruieren, die tausendmal genauer gehen als herkömmliche Atomuhren. Das erlaubt zum Beispiel in Zukunft eine noch präzisere Satellitennavigation. „Wir waren selbst knapp dran“, seufzt Russell, „haben aber diese Möglichkeit nicht verfolgt.“

Was mit dem Licht in solchen Fasern passiert, hängt von der Struktur der Faser ab. Einfach gesagt, reagieren die Fasern wie Instrumente mit Resonanzkörpern auf die Lichtwellen. Rus-



sell, selbst ein versierter Pianist, nimmt die Pauke als Beispiel. Ein Schlag versetzt das Paukenfell in eine Grundschwingung, die den tiefsten Ton des Instruments trägt, und viele schnellere Oberschwingungen. So ähnlich ist es mit dem Laserlicht in der photonischen Kristallfaser. Das Urmodell mit einem Dreiecksmuster der Kanäle ist ein ausgezeichneter Filter. Es wirkt sozusagen wie eine Pauke, die alle Obertöne hinauswirft und nur in der Grundschwingung vibriert.

Den Schwingungen eines Tons entsprechen die Moden des Laserlichts, das durch die Faser läuft. Sie unterscheiden sich darin, wie sich die Lichtintensität über den Strahlquerschnitt verteilt. In der Grundmode bildet sie ein einziges Maximum in der Mitte der Faser, in den höheren Moden entstehen immer kompliziertere Muster. „Auf die Grundmode des Laserlichts wirkt das Lochgitter wie die Gitterstäbe eines Kerkers“, erklärt Russell: „Sie bleibt eingesperrt.“ Die höheren Moden, also quasi die Obertöne, können dagegen durch die Gitterstäbe entkommen. Die Folge: Licht, das auf den photonischen Kris-

tall abgestimmt ist, läuft anders als ein Laserstrahl in der Luft oder im Vakuum des Weltalls durch die gesamte Glasfaser schmal gebündelt. „Diese endlose Einzelmodenführung war eine unerwartete Entdeckung“, sagt Russell.

In den vergangenen 20 Jahren hat Russells Teams vielfältige Glasfaserstrukturen entwickelt, seit 2009 am Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts. Im Institut führt Xin Jiang zum Allerheiligsten, dem mehrere Stockwerke hohen Reinraum, in dem die Faserziehtürme stehen. Da die Faserrohlinge empfindlich gegen Staub sind, können wir nur durch ein Fenster hineinschauen.

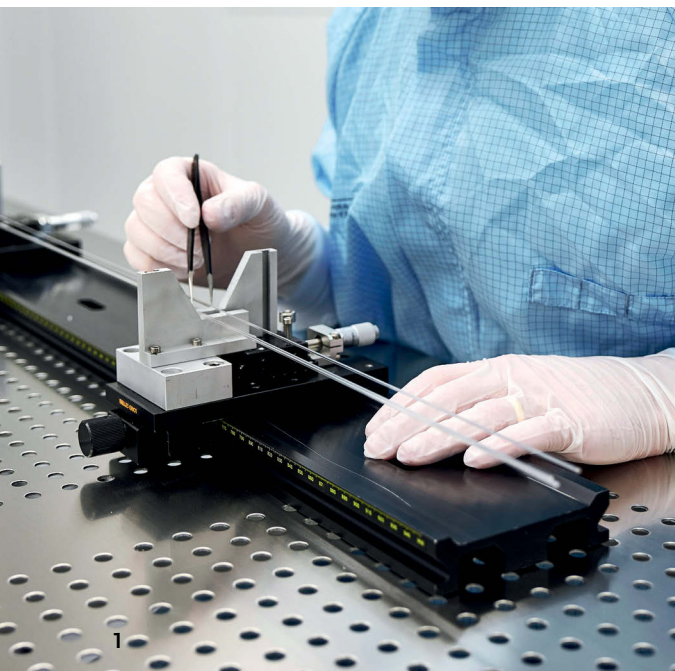
EINE METHODE FUNKTIONIERT WIE EINE PASTA-MASCHINE

Die Erlanger Forscher stellen ihre Glasfasern in zwei Schritten her, erklärt Michael Frosz, der Leiter des dafür zuständigen Teams. Zunächst legen sie einen Stapel vorgefertigter Glasröhren im gewünschten Muster zusammen, erhitzen den Stapel und ziehen ihn zu einer einige Millimeter dicken Vorform auseinander. Diese Vorform spannen sie dann

oben im Faserziehturm ein, der für Quarzglas eine Höhe von etwa acht Metern erreicht. Dort sitzt ein kompakter, rohrförmiger Graphitofen, der die Vorform schmilzt. Dann wird ihr unteres Ende zu einer haarfeinen Faser gezogen, mit schützendem Kunststoff ummantelt und unten auf einer Trommel aufgerollt.

Neben diesem Standardverfahren hat Russells Team eine zweite Methode entwickelt, das Extrudieren. „Im Prinzip funktioniert das wie eine Pasta-Maschine“, sagt Xin Jiang, der Leiter des sogenannten Glasstudios. Eine Pasta-Maschine presst den Teig durch eine Scheibe mit Löchern. Ganz ähnlich wird in Erlangen die heiße Glasmasse durch Lochscheiben gedrückt. Diese geben dem Faserrohling, der anschließend zu einer dünnen Faser gezogen wird, ein nahezu beliebig geformtes Innenleben mit. „Das gibt uns mehr Freiheit im Design“, erklärt Russell.

Es lassen sich drei Grundtypen von Glasfasern unterscheiden. Ein Typ besitzt Strukturen wie zum Beispiel die dünnen Glasmembranen, der andere hat einen mit Glas gefüllten Kern, der von den winzigen Kanälen des photo-



nischen Kristalls eingefasst wird und durch den das Licht läuft. Der Kern des dritten Typs ist dagegen hohl.

Die Hohlkernfasern verwenden die Erlanger Forscher etwa, um darin Mikropartikel mit Laserlicht zu manipulieren. „Ähnlich wie sogenannte optische Pinzetten verwenden wir hierzu Lichtkräfte“, erklärt der Postdoktorand Shangran Xie. Er entwickelt mit seinem Team eine Technik, die einen mit Licht gehaltenen Partikel als Sensor für elektrische Felder verwendet. Kollegen vom Forschungszentrum Jülich sind an dem Fasersensor interessiert. Sie wollen ihn zur Feldmessung in einer Hochspannungsanlage einsetzen, die Menschen bei Betrieb nicht betreten dürfen.

Dass die Sensoren auf Basis meterlanger photonischer Kristallfasern sich dort einsetzen lassen, wo Menschen sich nicht aufhalten dürfen, könnte auch in Kernkraftwerken hilfreich sein. Denn die Sensoren können auch radioaktive Strahlung messen und lassen sich sogar zwischen verschiedenen Strahlungen umschalten.

Inzwischen verfolgen die Erlanger Physiker eine neue Idee, denn sogar lebende Zellen lassen sich in den durchsichtigen Hohlkernfasern sehr gut untersuchen. Man könnte zum Beispiel eine einzelne Krebszelle in der Faser mit Licht

fangen. Dann könnte man eine Flüssigkeit mit einem neuen Wirkstoff durch die Faser pumpen und testen, wie die Zelle reagiert. Das böte einen innovativen Ansatz für die Pharmaforschung.

Das Hauptgebiet der Erlanger Forschung ist aber die nichtlineare Optik, genauer: die nichtlineare Wellenlängenkonversion. Dieses Gebiet nutzt die Fähigkeit photonischer Kristallfasern, Laserlicht von einer Wellenlänge in ganz andere Wellenlängen zu übersetzen. So erzeugt beispielsweise eine Vollkernfaser den berühmten Frequenzkamm. In der Erlanger Forschung spielen derzeit gasgefüllte Hohlkernfasern eine zentrale Rolle. In solche Fasern schießen die Forscher sehr starke, extrem kurze Laserlichtblitze hinein. Am anderen Ende kommt Licht mit verwandelten Eigenschaften heraus.

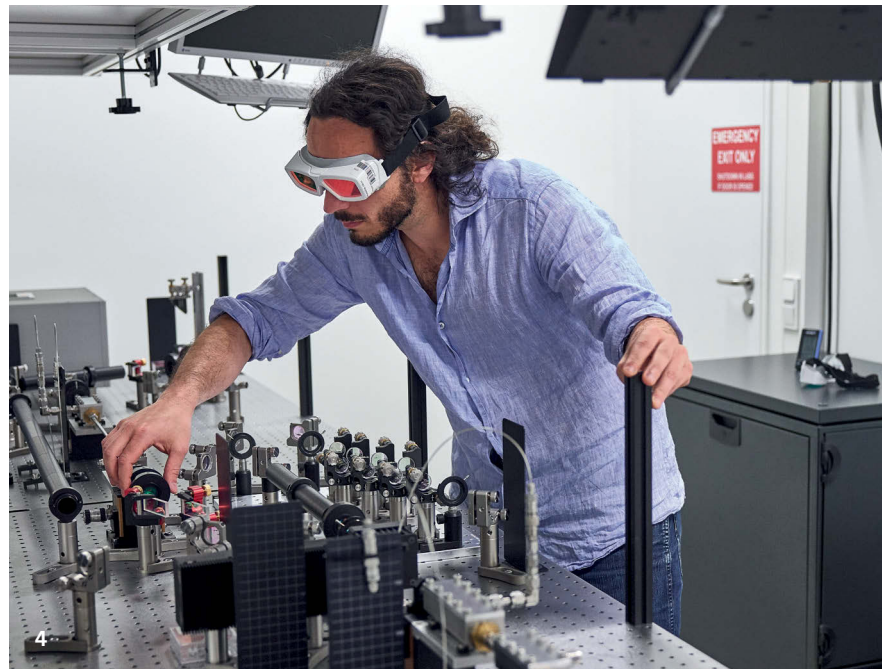
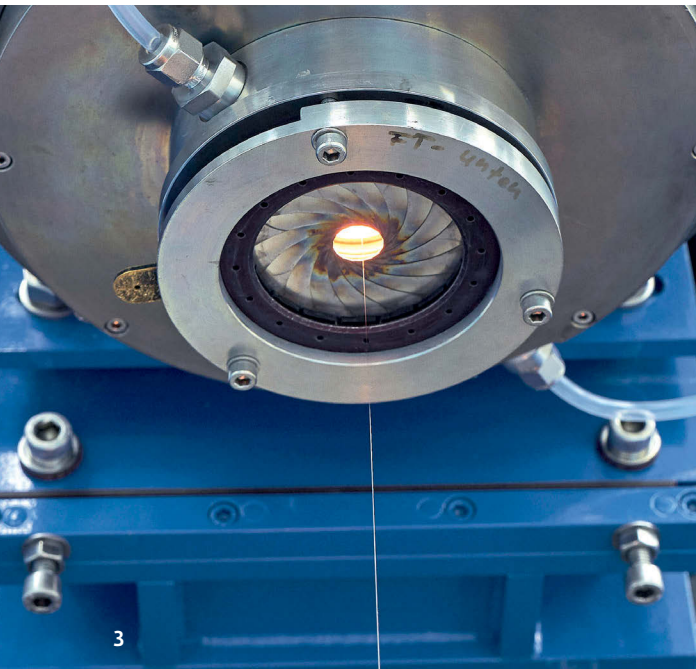
BESONDERS INTERESSANT: ULTRAVIOLETTES LASERLICHT

Das komplexe Geschehen in der Faser vergleicht Russell mit dem, was in der Rockmusik der Verstärker aus dem Signal einer E-Gitarre macht. Solange der Verstärker nur moderat aufgedreht ist, macht er die Welle kräftiger, ohne sie zu verformen. Eine solche Verstärkung ist linear. Ein Rockgitarrist reißt aber den

Verstärker so weit auf, dass er verzerrt. Das erzeugt Obertöne, die der Rockgitarre ihren typischen Klang geben. Eine solche Verstärkung ist nichtlinear, weil sie die Wellenform verändert.

Ungefähr so funktionieren photonische Kristallfasern. Das Team des italienischen Postdoktoranden Francesco Tani zum Beispiel treibt diese Nichtlinearität auf die Spitze. Seine Fasern sind mit einem Edelgas gefüllt, etwa Argon oder Neon. Das Licht starker Infrarotlaserpulse wird so wie bei einem Regenbogen aufgefächert und lässt sich über den Gasdruck in der Faser zwischen verschiedenen Frequenzbereichen durchstimmen: Die Lichtfarbe wird steuerbar. Für zahlreiche Anwendungen in Forschung und Technik ist besonders interessant, dass sich so Laserlicht im Ultraviolettbereich erzeugen lässt.

Tatsächlich kann man starkes ultraviolettes Licht mit photonischen Kristallfasern schon so zuverlässig erzeugen, dass eine Start-up-Firma am Institut das Verfahren kommerzialisieren will. 2016 wurde das Unternehmen ultralumina in Erlangen gegründet. Sechs Leute arbeiten hier zurzeit, und interessierte Kunden haben sie auch schon. Unternehmen aus der Halbleiterindustrie wollen das Ultraviolettlicht in ihren Inspektionsanlagen einsetzen. Damit



prüfen die Produzenten elektronischer Chips die Qualität der Strukturen auf den Silicium-Wafern. „Dazu braucht es sehr helles, kurzwelliges Licht“, sagt der technische Leiter Patrick Uebel. Auch für die Mikroskopie gibt es Interesse an der neuen Lichtquelle. „Das erste Geschäftsjahr lief recht gut“, berichtet sein Kollege Sebastian Bauerschmidt.

Sogar kompakte Quellen für Röntgenlaserlicht könnten photonische Kristallfasern ermöglichen. Röntgenlaser sind bislang riesige, teure Teilchenbeschleuniger, die sogenannten Freielektronen-Laser. Die Glasfasern könnten der Schlüssel zu kleinen Tischanlagen für Materialforschung, Medizin und Technik sein.

Um den vielfältigen Aktivitäten in Erlangen gerecht zu werden, müsste man ein Buch schreiben – gewissermaßen als Bibel der photonischen Kristallfaserwelt. Zumindest laut Google würden die Fasern auch den spirituellen Anspruch erfüllen, der damit verbunden ist. Denn die Suchmaschine kennt Russells Fasern auch als heilig. Bei seinen ersten Präsentationen betonte der Physiker die Löchrigkeit der Fasern mit dem Begriff *Holey Fiber*. Amüsiert erzählt Russell, wie daraus im Netz durch einen Vertipper auch *Holy Fibers*, also heilige Fasern, wurden. ◀

Von der Herstellung zum Experiment: Zunächst stapeln die Erlanger Forscher die hohlen Vorformen zu dem Muster, das die Kanäle in den photonischen Kristallfasern aufweisen sollen (1). Die Idee für die Fertigung der Fasern entwickelte Philip Russell (2) in den 1990er-Jahren. Dabei werden die Vorformen in einem Ofen geschmolzen und zu Fasern gezogen, die etwa so dünn sind wie ein menschliches Haar (3). Mit einer Faser, die einen hohlen Kern besitzt, erzeugt Francesco Tani aus infraroten Laserpulsen ein breites Spektrum an Farben (4). Zu diesem Zweck regelt er die Leistung des Lasers, der in die Faser strahlt.

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Mit photonischen Kristallfasern hat Philip Russell Glasfasern entwickelt, die der Länge nach von einem photonischen Kristall durchzogen werden.
- Die Grundmode des Laserlichts, deren Intensitätsmaximum in der Strahlmitte liegt, leiten die Fasern auch auf unendlich langen Strecken schmal gebündelt.
- Photonische Kristallfasern können die spektralen Eigenschaften des geführten Laserlichts dank nichtlinearer optischer Effekte in vielfältiger Weise manipulieren: Manche konvertieren die Wellenlänge des Lichtstrahls, der durch sie hindurchläuft, in andere Wellenlängen, sogar bis in den ultravioletten Bereich. Andere Fasern eignen sich, um Sensoren für elektrische Felder und unterschiedliche Strahlungsarten zu entwickeln.

GLOSSAR

Photonischer Kristall heißt eine periodische Struktur etwa von Kanälen in Glas, deren Geometrie die optischen Eigenschaften bestimmt. An dieser Struktur kann Licht selektiv nach seiner Farbe (Wellenlänge) reflektiert werden, was das Schillern mancher Schmetterlingsflügel erklärt.

Photonische Kristallfaser: Eine Glasfaser, um deren Zentrum regelmäßig gas- oder flüssigkeitsgefüllte Kanäle, die bis zu wenigen Mikrometern breit sein können, angeordnet sind. Diese Struktur beeinflusst das Licht, das durch die Faser geleitet wird.

Fasernmoden heißen die Lichtstrahlen mit bestimmten, unterschiedlichen Verteilungen der Lichtintensität, die sich in einer photonischen Kristallfaser ausbreiten können. Die Grundmode beispielsweise besitzt ihr Intensitätsmaximum in der Strahlmitte.