

Biomoleküle – in Szene gesetzt

Für Techniken, die neue Einblicke in die Nanowelt ermöglichen, gibt es immer wieder Nobelpreise. Doch keine dieser Methoden erlaubte es bislang zu verfolgen, wie Enzyme und andere Biomoleküle im Detail arbeiten. Das hat **Frank Vollmer**, Leiter einer Forschungsgruppe am **Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts** in Erlangen, geändert – mit einem plasmonischen Nanosensor.

TEXT **CHRISTIAN MEIER**

Frank Vollmer hat keinen Umweg gescheut. Zwar stecken Wissenschaftler häufig viel Zeit in die Entwicklung neuer Methoden, vor allem, wenn sie etwas fundamental Neues untersuchen möchten. Doch der Biochemiker Vollmer hat rund 20 Jahre als Physiker gearbeitet, um das Werkzeug zu entwickeln, mit dem er sein Vorhaben umsetzen konnte. Denn seit er in den 1990er-Jahren in Hannover Biochemie studierte, wollte er der Maschinerie des Lebens beim Arbeiten zusehen.

Das treibt ihn noch heute an, da er am Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts in Erlangen eine Forschungsgruppe leitet und mittlerweile zum Professor an der Universität Exeter berufen wurde. Er möchte verstehen, warum die winzigen Maschinen, die das Leben am Laufen halten, manchmal ins Stocken geraten und wir krank werden. Um sei-

nen Plan zu verwirklichen, musste Vollmer zum Erfinder werden. Er brauchte eine Art Kamera, welche einzelne Enzyme und die Bewegungen ihrer Komponenten filmt. So etwas schien die Physik jedoch zu verbieten. Und dennoch erhaschte der Wissenschaftler jüngst einen Blick in einen der feinsten Mechanismen des Lebens.

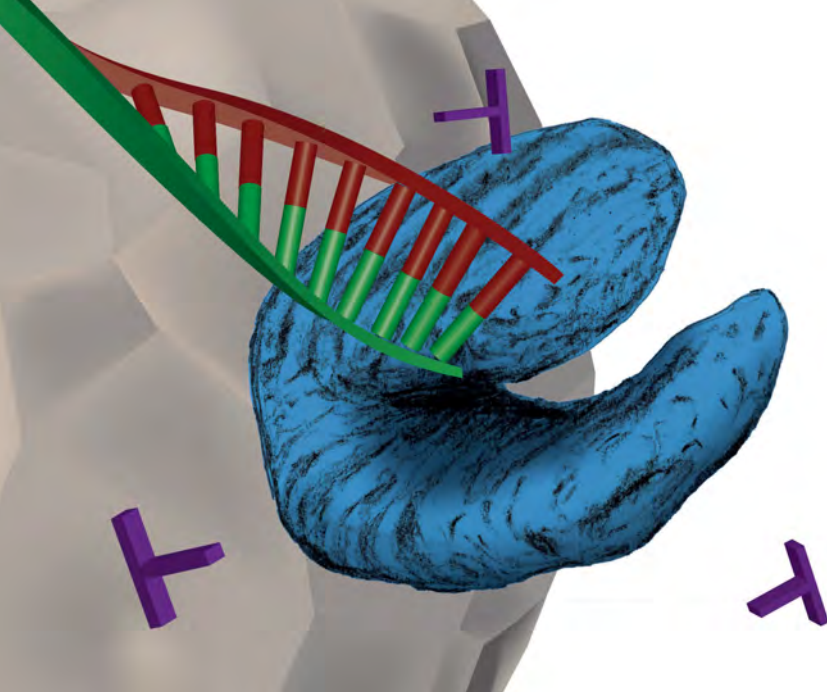
BIOLOGISCHE WERKZEUGE ARBEITEN WIE TECHNISCHE

„Wir bestehen aus Nanotechnologie“, sagt Vollmer. Das stimmt. Denn zum einen messen Proteine, Enzyme und andere Biomoleküle nur wenige Nanometer. Ein Nanometer, der millionste Teil eines Millimeters, ist, verglichen mit einem Fußball, so winzig wie ebendieser Fußball im Verhältnis zur Erdkugel. Zum anderen dienen die winzigen Arbeitstiere des Körpers wie menschen-

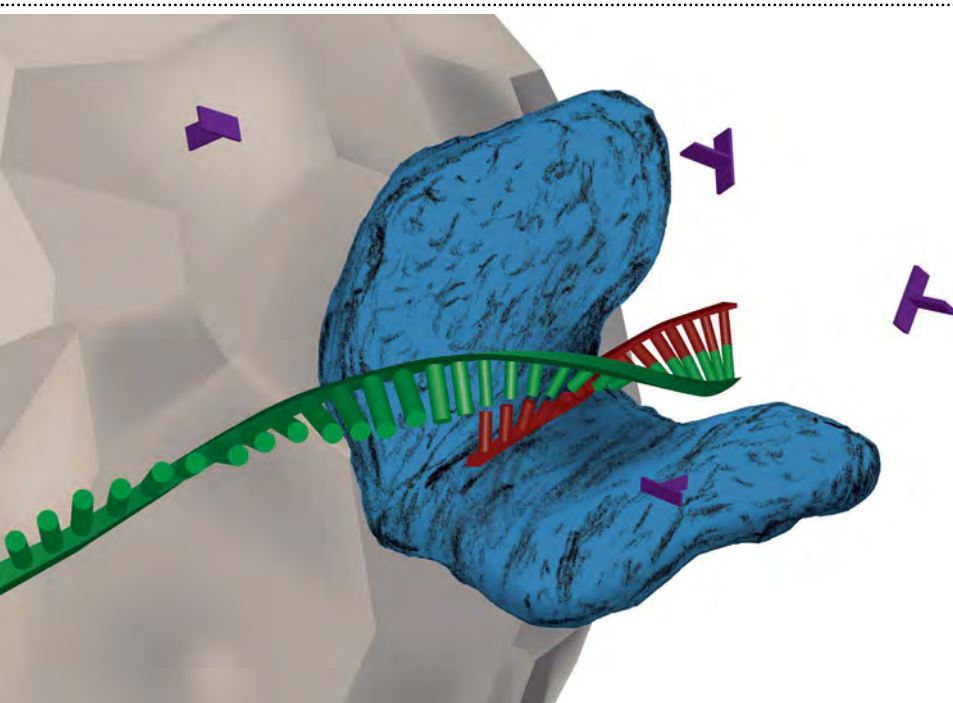
gemachte Maschinen jeweils einem bestimmten Zweck – ein Protein transportiert Sauerstoff, ein anderes zerlegt Zuckermoleküle, ein drittes liest Erbinformation – und haben oft bewegliche Komponenten.

An einem Enzym, das einen Urprozess des Lebens abwickelt, wird deutlich, wie ähnlich biologische und technische Werkzeuge arbeiten: Die DNA-Polymerase reproduziert das Erbgutmolekül und ermöglicht es dadurch Zellen, sich zu teilen. Dieser Vorgang liegt jeder Form der Fortpflanzung zugrunde. Das Enzym erinnert an eine Hand mit Daumen und Fingern, die den zu kopierenden DNA-Strang regelrecht greift.

Enzyme wie die DNA-Polymerase in Aktion zu filmen, ist vor allem dann wichtig, wenn die Biomassen klemmen. Ein Blick auf die Arbeit der Werkzeuge könnte dann enthüllen, woran es hakt. Wenn während der Zellteilung die



Ein Enzym packt zu: Wie eine Hand öffnet und schließt sich die DNA-Polymerase, um die Bausteine des Erbguts zu greifen. Wenn das Biomolekül an ein Nanodrähtchen aus Gold gebunden ist, das Licht stark bündelt, verändert sich dabei der Überlapp mit dem Lichtfleck. Die Bewegung des Enzyms lässt sich so beobachten.

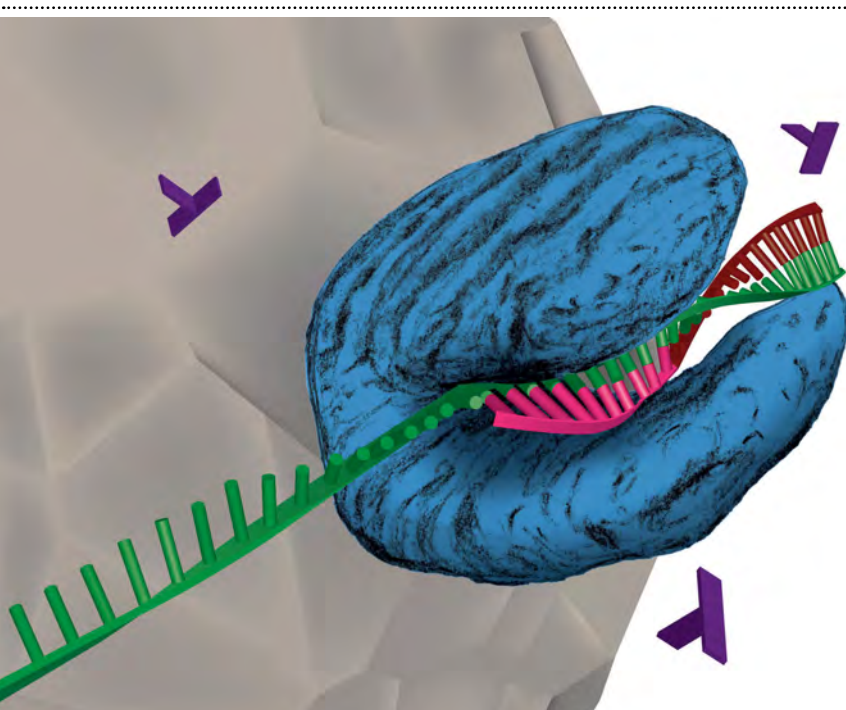


DNA kopiert wird, können Fehler passieren, ähnlich den Druckfehlern in einem Buch. Aus solchen Mutationen können unter Umständen Krankheiten wie etwa Krebs entstehen. Bei anderen Krankheiten, zum Beispiel Alzheimer, verändert sich die Form von Proteinen. Die Biomoleküle verlieren dadurch ihre Funktionsfähigkeit.

Frank Vollmer bedauert, dass die Wissenschaft bislang weitgehend blind ist für die Bewegungen der Biomoleküle. „Was so wichtig für das Verständnis von Krankheiten ist, können wir nicht sehen“, klagt er. „Dass die Hand sehr, sehr schnell auf- und zugeht, macht die Sache nicht leichter.“

Trotz der winzigen Dimensionen und der sehr schnellen Prozesse hat Frank Vollmer einen Weg gefunden, der Nanotechnik der Natur bei der Arbeit zuzusehen. Er bedient sich dabei – wie unsere Augen, Fotoapparate und Filmkameras – des sichtbaren Lichts. Lichtwellen sind ein unschädlicher Teil des elektromagnetischen Spektrums und unterscheiden sich in ihrer Sanftheit etwa von Röntgenstrahlen, deren hohe Energie Moleküle gleichsam pulverisieren kann. Zudem erwärmen sie die Probe kaum. Kurz: Sichtbares Licht ist ein praktisch neutraler Beobachter.

Dummerweise kann ein normales Lichtmikroskop Nanostrukturen aber nicht abbilden. Denn sichtbares Licht lässt sich nicht beliebig stark zu einem Lichtfleck bündeln: Weniger als etwa





Frank Vollmer ging der Frage nach, wie RNA abgelesen wird. Die dafür passende Methode musste erst entwickelt werden.

die Hälfte seiner Wellenlänge ist nicht drin. Also etwa 200 Nanometer. Zwar gibt es Methoden wie die STED-Mikroskopie, die mit physikalischen Tricks diese Auflösungsgrenze unterbieten. Doch damit lassen sich nur Zellbestandteile beobachten, die mit leuchtenden Molekülen, sogenannten Markern, gekennzeichnet werden. Die Leuchtpunkte zeigen dann an, wie sich die Biomoleküle bewegen, ähnlich wie Autoscheinwerfer nachts verraten, wohin ein Auto fährt. Doch vieles bleibt dabei im Dunkeln. Ob die leuchtenden Punkte zu einem Pkw oder einem Lastwagen gehören etwa oder ob an einem stehenden Auto eine Tür geöffnet wird. Genauso wenig zeigen die Leuchtmoleküle, ob und wie ein Protein seine Form verändert. Außerdem weiß man nie, ob die Markierung die Funktion des zu untersuchenden Biomoleküls nicht stört.

DAS ANALOGON ZU EINER FLÜSTERGALERIE

Frank Vollmer stieß an die Grenzen der optischen Beobachtung, spätestens als er während seiner Doktorarbeit an der New Yorker Rockefeller University der Frage nachging, wie der zweite Träger der Erbinformation, die RNA, abgelesen wird. „An diesem Punkt habe ich erkannt, dass die dafür passende Methode erst noch entwickelt werden muss.“ Der Biochemiker entschied sich, das selbst zu tun, und wurde dafür zum Physiker. Mit dieser Disziplin hatte er immerhin schon vor der Wahl seines Studienfachs geliebäugelt.

Bald begegnete Vollmer einer Technik, die in die richtige Richtung wies. Es handelt sich um das optische Analogon zu einer Flüstergalerie. In einem Rundbau ist ein an die Wand geflüsteres Wort auch an der gegenüberliegenden Seite gut zu verstehen, weil die Schallwellen der Rundung folgen, anstatt sich in alle Winde zu zerstreuen. Auf ähnliche Weise läuft eine Lichtwelle auf der Innenseite eines nur wenige Mikrometer, also tausendstel Millimeter, messenden Glaskügelchens, das Licht dreht darin sogar Zehntausende von Runden. Weil sich die Welle so immer wieder selbst begegnet, funktioniert das nur bei einer genau festgelegten Wellenlänge, die vom Umfang des Glaskügelchens abhängt. Denn nur dann überlagern sich die Wellenberge eines Umlaufs haargenau mit den Wellenbergen der vorangegangenen Umläufe; Physiker sprechen in diesem Fall von einer Resonanz. Das ist ähnlich wie beim Resonanzkörper eines Instruments, das aufgrund seiner Abmessungen nur bestimmte Töne verstärkt.

Der Effekt der optischen Flüstergalerie macht das Glaskügelchen zu einem sehr empfindlichen Sensor. Denn die Lichtwelle lappt ein wenig aus der Kugeloberfläche heraus. Klebt beispielsweise ein Virus oder ein Protein auf dem Mikrokügelchen, so tritt das Teilchen mit dem Licht in Wechselwirkung. Die Lichtwelle wird ein wenig gebremst. Das wirkt sich so aus, als würde sich die Wegstrecke entlang der Kugelwand verlängern. Daher ändert sich durch das Anhängsel die Resonanzwellenlänge des Mikrokügelchens. Zwar

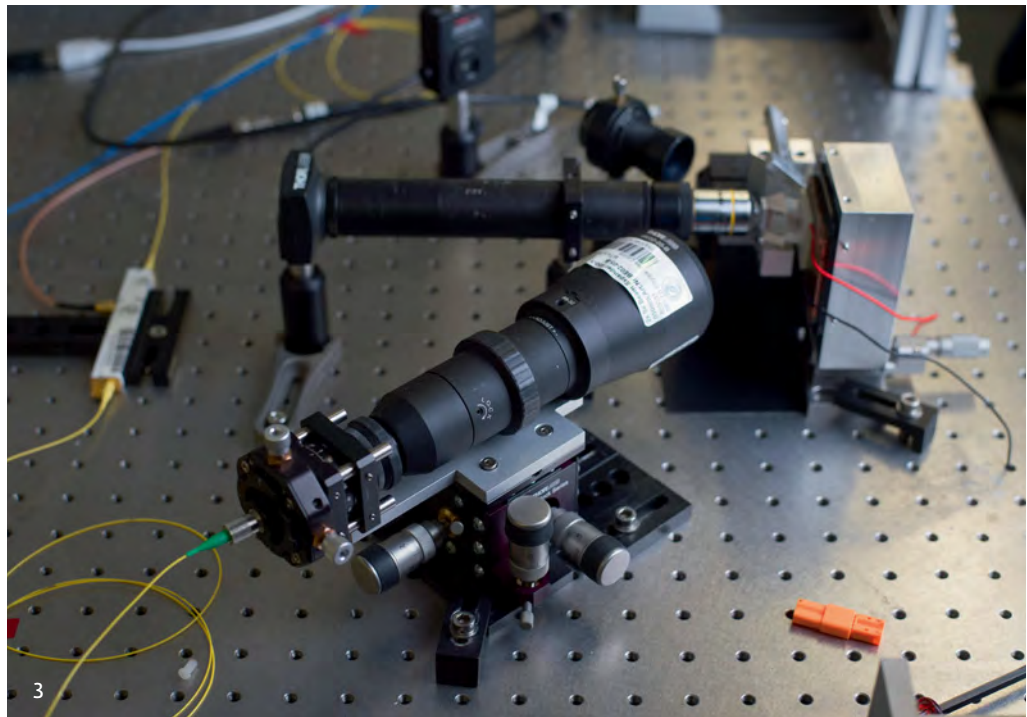
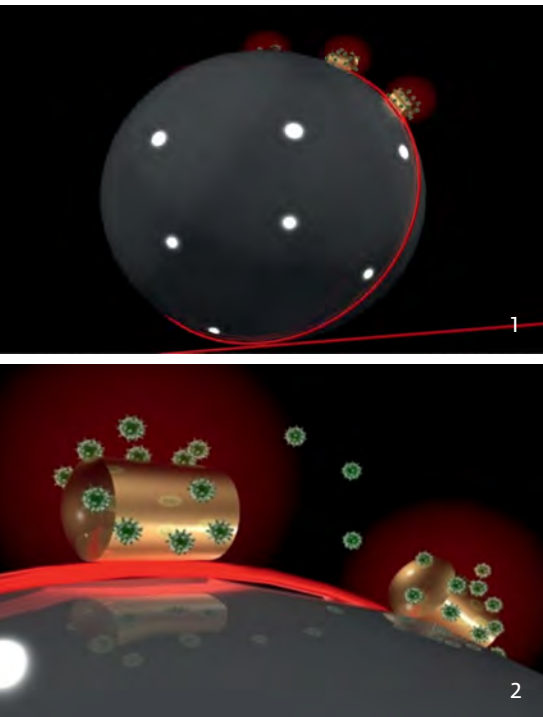
nur minimal. Aber dank der Schärfe der Resonanz lässt sich diese winzige Änderung messen.

Noch in New York gelang es Vollmer, die optische Flüstergalerie zum ersten Mal als Biosensor einzusetzen. Er leitete Laserlicht in ein Glaskügelchen und detektierte damit Proteine. Allerdings gelang es ihm damals lediglich, *viele* an das Kügelchen gebundene Proteine nachzuweisen. Denn nur dann änderte sich die Wellenlänge des umlaufenden Lichts messbar. Wie die Nanomaschinen des Lebens funktionieren, lässt sich aber nur an *einzelnen* Biomolekülen beobachten. Ein Kollektiv zeigt immer nur eine Art Durchschnittswert, aus dem sich das individuelle Verhalten eines Moleküls nicht ermitteln lässt.

DER TRICK: DIE KOMBINATION AUS OPTIK UND PLASMONIK

Als Leiter einer Arbeitsgruppe an der Harvard University entwickelte Vollmer die Methode deshalb weiter. Es gelang ihm schließlich, *einzelne* Viren mithilfe des Glaskügelchens nachzuweisen. Ein Achtungserfolg – doch das eigentliche Ziel, einzelne Biomoleküle zu beobachten, hatte er damit noch nicht erreicht. Denn ein Virus ist immer noch zehnmal größer als ein Protein.

„Wir erkannten schnell, dass es ungleich schwieriger sein würde, einzelne Biomoleküle nachzuweisen“, sagt Vollmer. Der Lichtweg ändert sich im Verhältnis zum Volumen eines detektierten Nanopartikels. Die Änderung durch ein einzelnes Molekül ist also nur etwa ein Tausendstel so groß wie



jene durch ein Virus und lag somit weit unter der Nachweisgrenze. Physikerkollegen empfahlen Vollmer, mit anderen Methoden neu anzusetzen. „Aber diese hätten wesentlich kompliziertere Versuchsaufbauten benötigt“, erklärt Vollmer. Er aber wollte ein Werkzeug, das Bioforscher relativ unkompliziert benutzen können.

Im Jahr 2010 sei dann die Idee gekommen, die den Durchbruch brachte, sagt der Biophysiker. Der Trick lag darin, die Optik mit einem ganz anderen Zweig der Physik zu kombinieren: der Plasmonik. Diese macht es sich zunutze, dass Elektronen in einem Metall eine Art Kollektiv bilden, ähnlich einer Flüssigkeit, die gegenüber den im Kristall fest verankerten Atomrümpfen beweglich ist. Weil die negativ geladenen Elektronen von den positiv geladenen Atomrümpfen wie von einer Spiralfeder angezogen werden, schwingt das Kollektiv hin und her. Die Schwingungen der elektrischen Ladung heißen Plasmonen.

Sie erzeugen eine elektrische Welle, die auf ähnliche Weise aus der Metalloberfläche herauslappert wie das Licht aus der optischen Flüstergalerie. Entscheidend für Vollmers Pläne war zudem, dass solche Plasmonen mit Licht wechselwirken können. Wenn die Forscher nun ein Nanodrähtchen, das etwa so groß ist wie ein einzelnes Biomolekül, auf einer optischen Flüstergalerie befestigen würden, müssten die herauslappenden Lichtwellen in dem Metall Plasmonen anregen. Dies würde wiederum Lichtwellen an der Oberfläche der Drähtchen erzeugen.

EIN HOTSPOT VERSTÄRKT DIE WECHSELWIRKUNG

Im Endeffekt würde ein Nanodrähtchen die Lichtwelle also aus dem Glaskügelchen herausziehen und sie auf einen Fleck von etwa der Größe eines Proteins konzentrieren. Diese Fokussierung auf einen Hotspot, wie Vollmer es nennt, würde die Wechselwirkung zwi-

Eine optische Flüstergalerie als Nanosensor: Wenn Laserlicht passender Farbe (hier rotes Licht) über eine Glasfaser in eine gläserne Mikrokugel geleitet wird, zirkuliert es in dem Kügelchen wie Schall in einem Rundbau (1). Nanodrähtchen aus Gold, die auf dem Kügelchen befestigt sind, konzentrieren das Licht durch einen plasmonischen Effekt. Proteine und andere Moleküle, die an die Nanodrähtchen binden (2), verändern die Wellenlänge des im Kügelchen gespeicherten Lichts und lassen sich so nachweisen. Solche Nanosensoren bewährten sich erstmals in einem Versuchsaufbau am Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts (3).

» Ein Nanodrähtchen zieht die Lichtwelle aus dem Glaskügelchen heraus und konzentriert sie auf die Größe eines Proteins.

schen Licht und Untersuchungsobjekt verstärken. Auf diese Weise könnte auch ein einzelnes Biomolekül den Weg des Lichts so weit verlängern, dass die Änderung messbar würde.

An die Umsetzung der Idee machte sich Vollmer am Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts in Erlangen. Die DNA-Polymerase bot sich als Testenzym an. Denn das Öffnen und Schließen ihrer Hand sollte den Überlapp zwischen dem Enzym und dem Licht am Hotspot periodisch vergrößern und verkleinern, ähnlich wie sich der Schattenwurf einer Hand verändert, wenn sie sich vor einer Lichtquelle öffnet und schließt.

Zunächst sollte Isabel Schuldes, eine Masterstudentin in Frank Vollmers Gruppe, nun Nanodrähtchen aus Gold von 10 Nanometer Durchmesser und 40 Nanometer Länge an einem Glaskügelchen von 80 Mikrometer Durchmesser befestigen. Normalerweise binden elektrostatische Kräfte das Gold an das Glas. Doch im Erlanger Fall stand dieser Mechanismus im Konflikt mit den chemischen Bedingungen, wie sie die Polymerase braucht. Der von ihr bevorzugte pH-Wert brach die elektrostatische Bindung. Doch nach einer aufwendigen Suche fand Schuldes ein Linker-Molekül, das den Nanodraht an das Glaskügelchen bindet: „Das war ein tolles Erfolgserlebnis“, sagt die Forscherin.

Nun konnten die Wissenschaftler ihren Nanoscheinwerfer auf Biomachines richten. So befestigten die Wissenschaftler etwa DNA-Stränge an den Nanodrähten und tauchten ihren Nanosensor in eine Polymerase-Lösung. Das Enzym kopierte dann die befestigte DNA. In einem weiteren Experiment hefteten die Forscher die Polymerase an das Nanodrähtchen und mischten die DNA der Lösung bei. Schuldes hatte zuvor bestätigt, dass die Anbindung an das Gold die Aktivität des Enzyms nicht beeinträchtigt. In beiden Fällen befand sich die Polymerase während des Kopiervorgangs innerhalb des vom Nanodrähtchen konzentrierten Lichtflecks und sollte das Messsignal beim Öffnen und Schließen verändern.

DIE FORSCHER BEOBACHTETEN SOGAR EINZELNE IONEN

Und tatsächlich: Die Forscher beobachteten eine Art Atmen ihres Messsignals, mit einer Signaldauer von etwa 20 bis 50 millionstel Sekunden. „Wir haben die Proteindynamik zum ersten Mal ohne Marker beobachtet“, schließt Vollmer, und zwar im Wortsinn live, nämlich unter Bedingungen, wie sie in der Natur herrschen. Vollmer hält es gar für möglich, die Abfolge der genetischen Buchstaben aufzuzeichnen, während die Polymerase sie abliest.

Auch Kopierfehler könnten so detektiert werden. „Außerdem wäre dies eine sehr einfache und kostengünstige Methode, um das Erbgut zu untersuchen“, sagt Vollmer.

Nach diesem Erfolg fragten sich die Forscher, wo die Grenzen der neuen Methode liegen. Zu ihrem eigenen Erstaunen konnten sie sogar *einzelne* Ionen beobachten, also elektrisch geladene Atome. Die Zink- und Quecksilberionen, die sie sahen, haben einen hundertmal kleineren Durchmesser als ein Protein. Dabei half den Forschern, dass die Goldnanodrähtchen an der Spitze in einem einzelnen Goldatom enden. An der Kuppe bündelt sich der plasmonische Lichtfleck daher extrem scharf, sodass die Elektronen mehr Energie gewinnen, als sie sonst im Gold besitzen. Mit der geballten Energie aktivieren die Ladungsträger eine Reaktion zwischen den Goldatomen und den Quecksilberionen. Ebendiese Reaktion beobachteten die Erlanger Forscher.

„Es geht uns dabei nicht um den *Nachweis* einzelner Quecksilberionen“, betont Vollmer. Die Empfindlichkeit für einzelne Ionen lasse sich etwa nutzen, um die Funktion von Ionenkanälen zu untersuchen, meint er. Solche Kanäle sind etwa in die Membranen von Nervenzellen eingebettet und helfen, elektrische Reize durch die Nervenbahnen zu leiten.

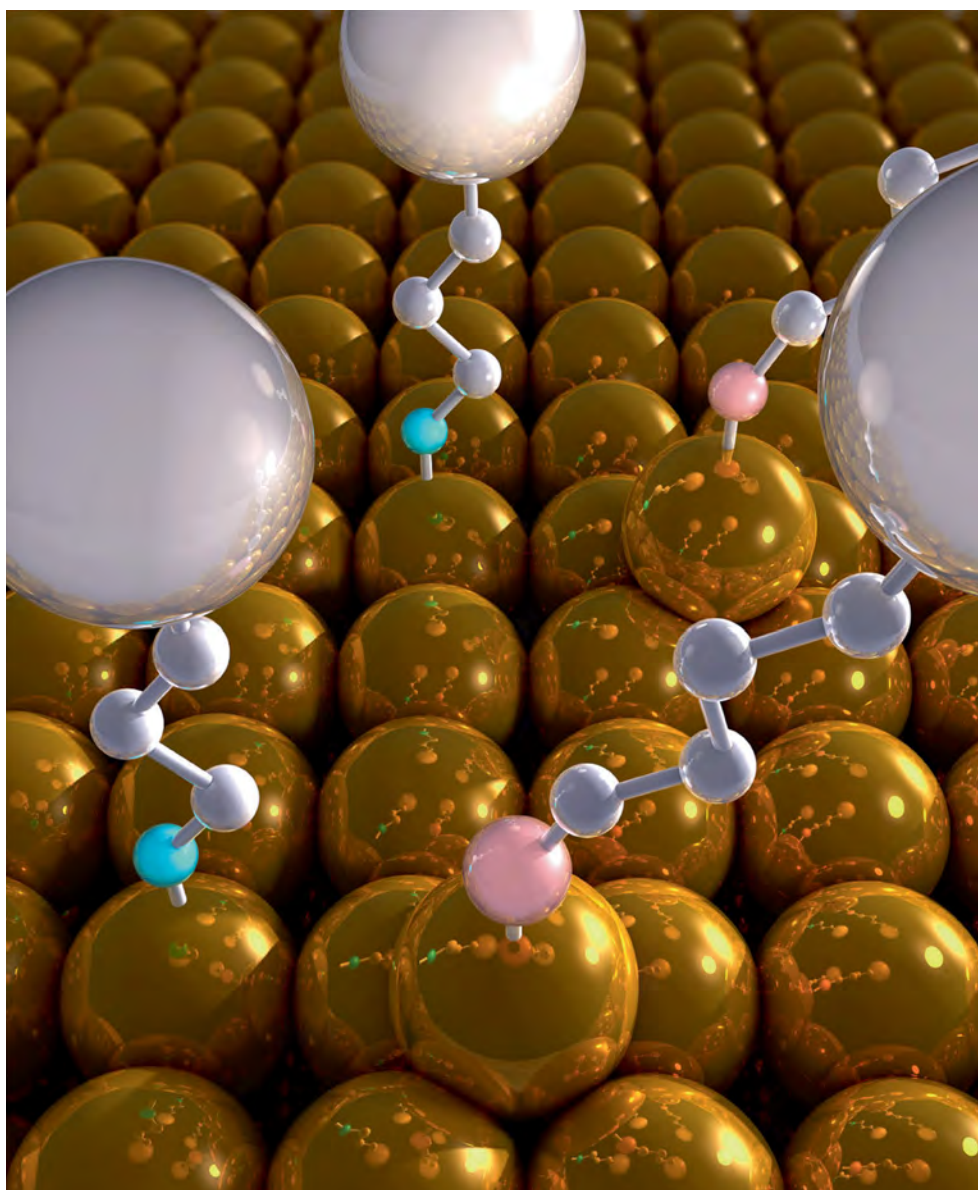
Oben Isabel Schuldes, Ying-Jen Chen und Frank Vollmer (von links) haben den plasmonischen Nanosensor so empfindlich gemacht, dass sie damit sogar Substanzen nachweisen können, die beim Zelltod entstehen. Wenn sie dafür den Laserstrahl in den Sensor koppeln, benötigen sie Fingerspitzengefühl.

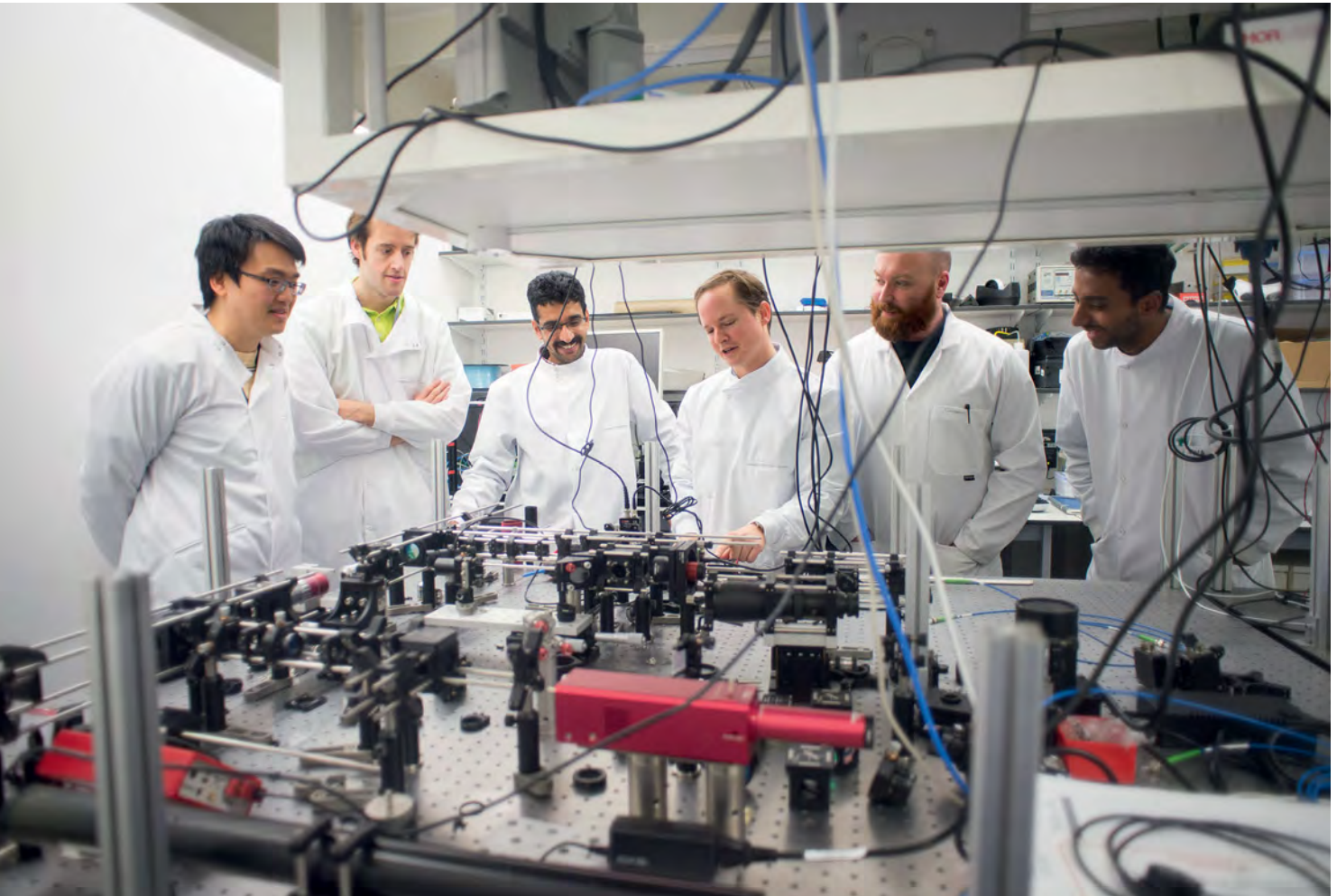
Unten Der Nanosensor eignet sich auch, um chemische Reaktionen zu untersuchen. Damit haben die Max-Planck-Forscher etwa herausgefunden, dass sich Moleküle mit Amino- (pink) an hervorstehende Goldatome auf der Oberfläche des Nanodrähtchens heften. Moleküle mit Thiolgruppen (blau) dagegen binden an die Goldatome, die in die Oberfläche eingebettet sind.



Dank der Möglichkeit, Reaktionen wie beispielsweise die von Goldatomen und Quecksilberionen zu verfolgen, eignet sich der Nanosensor außerdem als ein Werkzeug für Chemiker, erläutert der Biophysiker. Denn damit ließen sich Reaktionsbedingungen testen und optimieren, sprich: Reaktionen ließen sich in gewissem Rahmen *steuern*. Die Erlanger demonstrierten auch, wie. Indem sie die Lichtintensität im gebündelten Lichtfleck erhöhten, erreichten die Elektronen in der Goldspitze besonders hohe Energie. Das ermöglicht eine besonders feste Art der chemischen Bindung, im Fachjargon kovalent genannt. Die Forscher schufen auf diese Weise ein Amalgam zwischen Gold und Quecksilber, gleichsam indem sie den Lichtdimmer aufdrehten.

Wie detailgenau sich mit der Erlanger Methode Mechanismen von chemischen Reaktionen beobachten lassen, zeigten die Forscher in einem Experiment mit zwei Arten von Molekülen. Die eine Art koppelte über eine sogenannte Amino-Gruppe an das Gold, die andere über eine sogenannte Thiol-Gruppe. „Es stellte sich heraus, dass die beiden Gruppen in zwei verschiedenen Mechanismen mit der Goldoberfläche reagieren“, erklärt Vollmer. Während sich die Amine nur mit aus der Oberfläche hervorstehenden Goldatomen verbinden, heften sich die Thiole nur





Ein Sensor mit vielen Sinnen: An der Universität Exeter haben Hsin-Yu Wu, Serge Vincent, Jolly Xavier, Frank Vollmer, Tom Constant und Sivaraman Subramanian (von links) eine Anlage aufgebaut, in der sie verschiedene Ansätze kombinieren: den Effekt der optischen Flüstergalerie in einem Glaskügelchen, die plasmonische Bündelung des Lichts, welches in dem Kügelchen zirkuliert, sowie mikroskopische und spektroskopische Methoden. So wollen die Forscher die Bewegung von Biomolekülen möglichst detailliert analysieren.

an Atome, die voll in die Oberfläche eingebettet sind.

Der Nanosensor, den Vollmers Team entwickelt hat, zeichnet sich aber nicht nur durch seine hohe Empfindlichkeit aus. Als weitere Vorteile hebt der Forscher hervor, dass auch Nichtphysiker sie ohne besonders teure Spezialausrüstung einsetzen könnten. Zudem funktioniert sie auch in wässriger Umgebung. Biologen oder Mediziner erhalten so gewissermaßen ein Auge, das sie mitten im mikrobiologischen Leben platzieren können.

Vollmers Doktorand Ying-Jen Chen etwa beobachtet auf diese Weise den Totenkampf von Zellen. Obwohl dieser Apoptose genannte Prozess im Zellinnern stattfindet, gelang es Chen, ihn von außerhalb der Zelle im Blick zu behalten, mithin ohne den Prozess zu beeinflussen. Per Mikrokugel-Methode detektierte Chen einen Marker, welcher den Zelltod anzeigt: das Protein Cyto-

chrom c. Zu diesem Zweck hatte Chen den Sensor mit einem Antikörper beschichtet, der ausschließlich das Cytochrom c an sich bindet.

CHIPS FÜR SCHNELLE TESTS VON KREBSMEDIKAMENTEN

Gleichzeitig versucht Chen, das Erlanger Mikrokugel-Verfahren auf Chipgröße zu schrumpfen. In Kunststoffplättchen, kaum größer als ein Fingernagel, werden einzelne Zellen in winzigen Kanälen festgehalten. Durch die Kanäle strömt dann ein Toxin, sodass die Zellen die Apoptose einleiten. Das freigesetzte Cytochrom c wird dann ausgespült und zum Sensor geleitet. Dessen Messaufbau nimmt im Moment noch einen großen Teil eines Labortisches ein. Das Ziel sei aber, auch die Messtechnik auf einen Chip zu bringen.

„Mit den Chips könnte man zum Beispiel Krebsmedikamente deutlich

Gravitationswellen entdeckt!

Gravitationswellen sind real – jene Krümmungen in der Raumzeit, die Albert Einstein vorhergesagt hatte. Die Stiftung hat Karsten Danzmann am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik unterstützt – er hat die extrem empfindlichen Detektoren mitentwickelt, die für diese bahnbrechende Entdeckung nötig waren.



schneller testen, als das heute normalerweise möglich ist“, sagt Chen. Viele dieser Arzneien lösen die Apoptose von Krebszellen aus, um den Tumor zu beseitigen. „Unsere Methode eignet sich für die Anwendung als Organ-on-a-Chip“, ergänzt Vollmer. Damit sind Chips gemeint, die ganze Organe simulieren, indem sie Zellkulturen mit komplexen Mikrokanälen oder Mechanismen verbinden.

Inzwischen ist Vollmer an einem Punkt seiner Forscherkarriere angekommen, an dem er sich nach dem Ausflug in die Physik wieder mehr der Biologie zuwenden kann. Den plasmonischen Nanosensor will er nun in einem Umfeld von Biologen und Medizinern einsetzen, nämlich am Living Systems Institute der Universität Exeter. „Das ist

der ideale Platz dafür“, sagt er. Dort will Vollmer etwa krankhaft verformte Proteine untersuchen. Deren Defekte lassen sich sichtbar machen, wenn die Biomoleküle mit Licht in Schwingungen versetzt werden.

Frank Vollmer will den Nanosensor aber auch noch weiterentwickeln – zu einem Laserscanner für einzelne Moleküle. Mithilfe mehrerer fokussierter Lichtflecken sollte es möglich sein, Moleküle Atom für Atom abzutasten und aus den Daten ein atomgenaues 3-D-Bild zu rekonstruieren, und zwar mit mehreren Millionen Bildern pro Sekunde. „Damit könnte man die Nanotechnologie des Lebens schließlich visualisieren“, sagt Vollmer. Dann könnte es bald heißen: Film ab für Biomachines in Aktion. ◀

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- **Max-Planck-Forscher um Frank Vollmer haben einen plasmonischen Nanosensor entwickelt, der es erstmals ermöglicht, Enzyme und andere Biomoleküle in Aktion zu beobachten und dabei auch die Bewegungen von deren Teilen abzubilden.**
- **Der Nanosensor besteht aus einem Glaskügelchen mit einem darauf befestigten Nanodraht aus Gold. Er nutzt zum einen den Effekt einer optischen Flüstergalerie, weil Licht einer festgelegten Wellenlänge in dem Kügelchen Zehntausende Male umläuft. Zum anderen bündelt er das Licht mithilfe von Plasmonen auf dem Nanodraht auf wenige Nanometer. Bindet ein Biomolekül oder ein anderes Nanoteilchen an den Golddraht, ändert sich die Wellenlänge des im Glaskügelchen umlaufenden Lichts ebenso wie bei Bewegungen der gebundenen Partikel.**
- **Mit dem Sensor haben die Forscher Bewegung von DNA-Polymerase, den Prozess des Zelltods und Reaktionen von Quecksilberionen sowie organischen Molekülen mit Goldatomen des Nanodrähtchens verfolgt.**

GLOSSAR

DNA-Polymerase: Das Enzym erstellt bei der Zellteilung eine Kopie der DNA.

Plasmon: Schwingungen der Elektronenwolke eines Metalls können elektrische Wellen erzeugen. Diese Plasmonen lassen sich mit Licht anregen.

STED-Mikroskopie: In der Fluoreszenzmikroskopie werden fluoreszierende Marker an einem Nanoobjekt mit einem fokussierten Laser angeregt. Der Beugungsgrenze zufolge ist es nicht möglich, den Lichtfleck stärker zu bündeln als auf die halbe Wellenlänge des Lichts, also etwa 200 Nanometer. Durch kontrollierte Auslöschung eines Teils der Emission unterläuft ein STED-(Stimulated Emission Depletion-)Mikroskop diese Grenze.

Die Max-Planck-Förderstiftung unterstützt seit über zehn Jahren die Max-Planck-Gesellschaft, indem sie an den mehr als 80 Instituten gezielt innovative und zukunftsweisende Spitzenforschung fördert und so Durchbrüche in der Wissenschaft ermöglicht. Im weltweiten Wettbewerb der Wissenschaften können Sie als privater Förderer einen entscheidenden Unterschied machen und Freiräume schaffen. Gehen Sie mit uns diesen Weg!

Max-Planck-Förderstiftung
Deutsche Bank
IBAN DE46 7007 0010 0195 3306 00



MAX PLANCK FÖRDERSTIFTUNG
FOUNDATION

www.maxplanckfoundation.org