

REISE

IN WINZIGE WELTEN

Von der Zelle zum Molekül bis zum Atom: Mikroskope eröffnen uns die Welt des Kleinsten. Neue Technik hilft, das für das Auge Unsichtbare immer besser zu erkennen

TEXT: CARSTEN JASNER

Im Okular offenbart **ein Einblatt** **erstaunliche Schönheit**: Hier ist die Epidermis mit jenen Poren zu sehen, die den Gasaustausch der Pflanze regulieren

FOTOS: NAME NACHNAME, NAME NACHNAME

JE KLEINER DAS OBJEKT, DESTO GRÖßER DER AUFWAND



Wir sind Augentiere, wir wollen die Natur mit dem Seh Sinn erfassen – obwohl der eigentlich zu schwach ist. Also bauen wir Hilfsmittel. Während Kameras den Moment festhalten und Teleskope ins Universum zoomen, tauchen wir mit Mikroskopen in die Welt des Winzigen. Der ikonische Klassiker mit Lichtspiegel, Objektiv und Okular ist noch recht handlich. Seit etwa hundert Jahren wird allerdings deutlich: Je kleiner das Objekt, desto größer der Aufwand. Die Reise zum Allerkleinsten, das nah ist, oft in uns, wird immer schwieriger. Von den fantastischen Umwegen, die Forschende dabei nehmen, erzählt diese Geschichte. Von Geräten mit immer komplexerer Technik und komplizierteren Namen. Von abgefeuerten Elektronen, dosierten Photonen und Atomen, die verschoben werden mit quantenmechanischen Tricks. Von etlichen Nobelpreisen. Und warum bei allem Fortschritt das handliche Reismikroskop eines Alexander von Humboldt immer noch eine Rolle spielt.

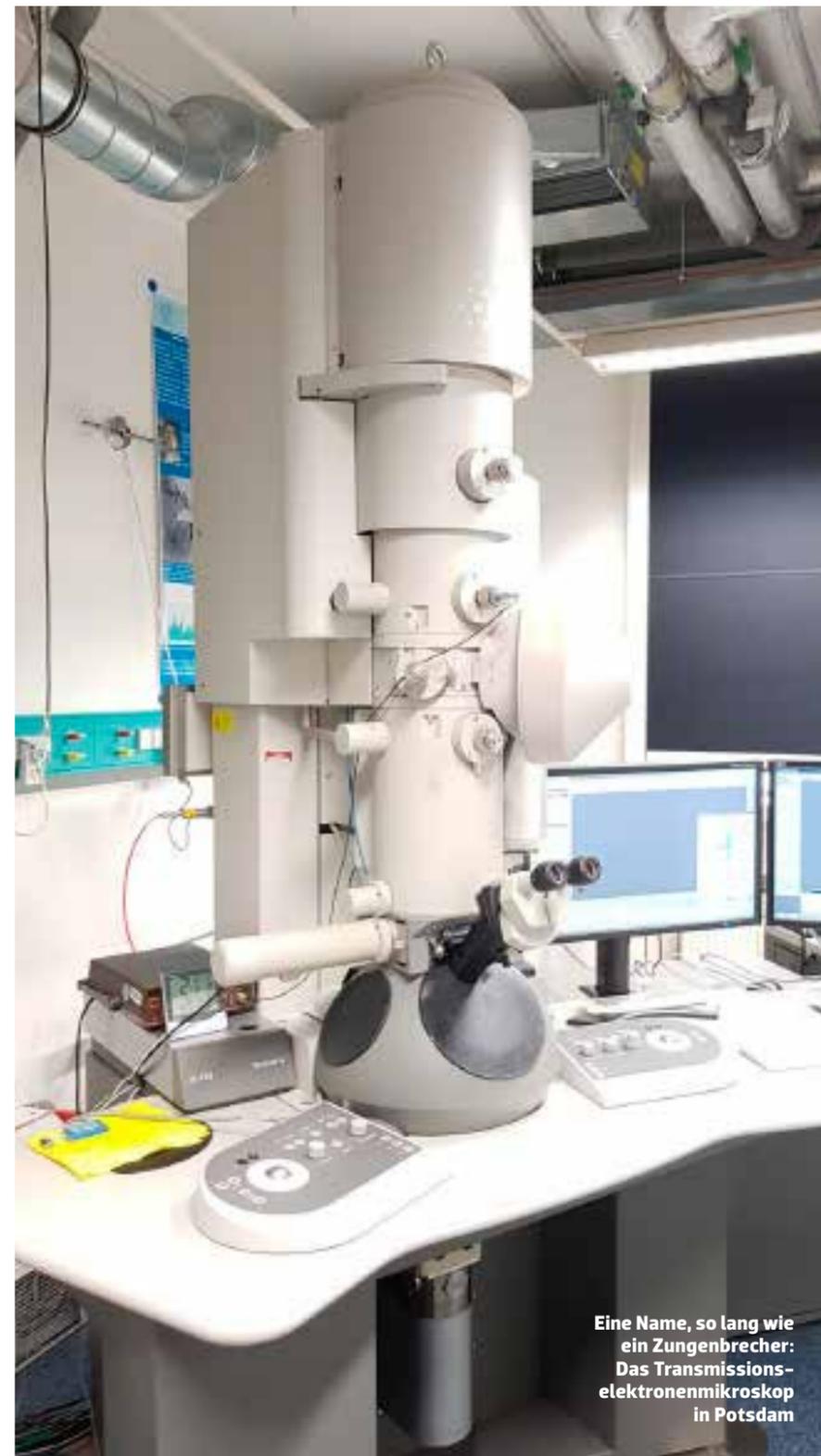
1931 baute der spätere Nobelpreisträger Ernst Ruska das erste Elektronenmikroskop (hier mit einem späteren Gerät). 1939 kam das erste Serienmodell auf den Markt



Das weiß lackierte, aufrecht stehende Ding auf dem Tisch hat die Größe von Kanonenrohren, wie sie manchmal vor Burgen stehen. Innen wird tatsächlich scharf geschossen – aus einem Elektronenbeschleuniger am oberen Ende, angeschlossen an ein Starkstromkabel. Auf halber Höhe des Rohrs ragt ein Griff hervor wie der Hebel einer Espresso-Maschine. Eine Frau zieht daran, zum Vorschein kommt ein metallischer Stab mit abgeflachter Spitze. Mit einer Pinzette setzt Steffi Bach ein Metallsieb ein, gerade mal zwei Millimeter im Durchmesser. Darauf liegt die noch kleinere Probe, die sie untersuchen will. Bach schiebt den Stab zurück und lugt am unteren Ende des Geräts durch ein Fenster. Auf einem Bildschirm in dessen Inneren hat sich die feine Struktur des Siebs zu einem großmaschigen Gartenzaun geweitet, dazwischen ein eidottergroßer Fleck. Bach dreht an einem Knopf – das Gitter weitet sich noch mehr, der Dotter wächst zum Pfannkuchen heran.

Das Gerät ist ein Transmissionselektronenmikroskop (TEM) im Labor des Fraunhofer-Instituts für Angewandte Polymerforschung in Potsdam. Der Pfannkuchen ist das Profil einer Viskosefaser aus Zellulose, die Polypropylenkleidung und die Reifen von Rennwagen verstärken soll. Die Faser ist so dünn wie ein Haar. Wie müssen die Moleküle im Innern verteilt sein, um die größtmögliche Festigkeit und Beständigkeit zu erzielen? Die Bilder im TEM helfen, die Frage zu klären.

Elektronenmikroskope (EM) lösen Strukturen bis zu 2000-mal genauer auf als die traditionellen Lichtmikroskope (LM). Möglich wurden sie, nachdem Forschende in den 1920er-Jahren bewiesen hatten, dass nicht nur Licht, sondern auch Massepartikel aus Wellen bestehen. Und da die Wellen von Elektronen wesentlich kürzer sind als die von Licht, schlüpfen sie durch extrem schmale Zwischenräume und bilden Dinge, die nur millionstel Millimeter auseinanderliegen, gestochen scharf ab. Die EM-Konstruktion entwickelte der Elektroingenieur Ernst Ruska mit Max Knoll; 1986 erhielt Ruska dafür den Nobelpreis für Physik. Sie ähnelt dem eines klassischen Mikroskops. Statt Licht wird jedoch ein Teilchenstrahl gebündelt, nicht durch optische Linsen, sondern durch elektromagnetische Ringe. Wie Licht werden auch Elektronen durch die Probe gestreut und prallen zurück, werden abgefälscht oder schießen geradewegs hindurch. Ein Detektor macht ankommende Elektronen sichtbar.



FOTOS: NAME NACHNAME, NAME NACHNAME

Eine Name, so lang wie ein Zungenbrecher: Das Transmissionselektronenmikroskop in Potsdam



1 Eine Viskosefaser unter dem Mikroskop: Forschende untersuchen daran, wie Moleküle verteilt sein müssen, damit die Faser besonders widerstandsfähig ist
2 Lyocell ist eine aus natürlichen Rohstoffen industriell hergestellte Textilfaser mit besonders glatter Oberfläche

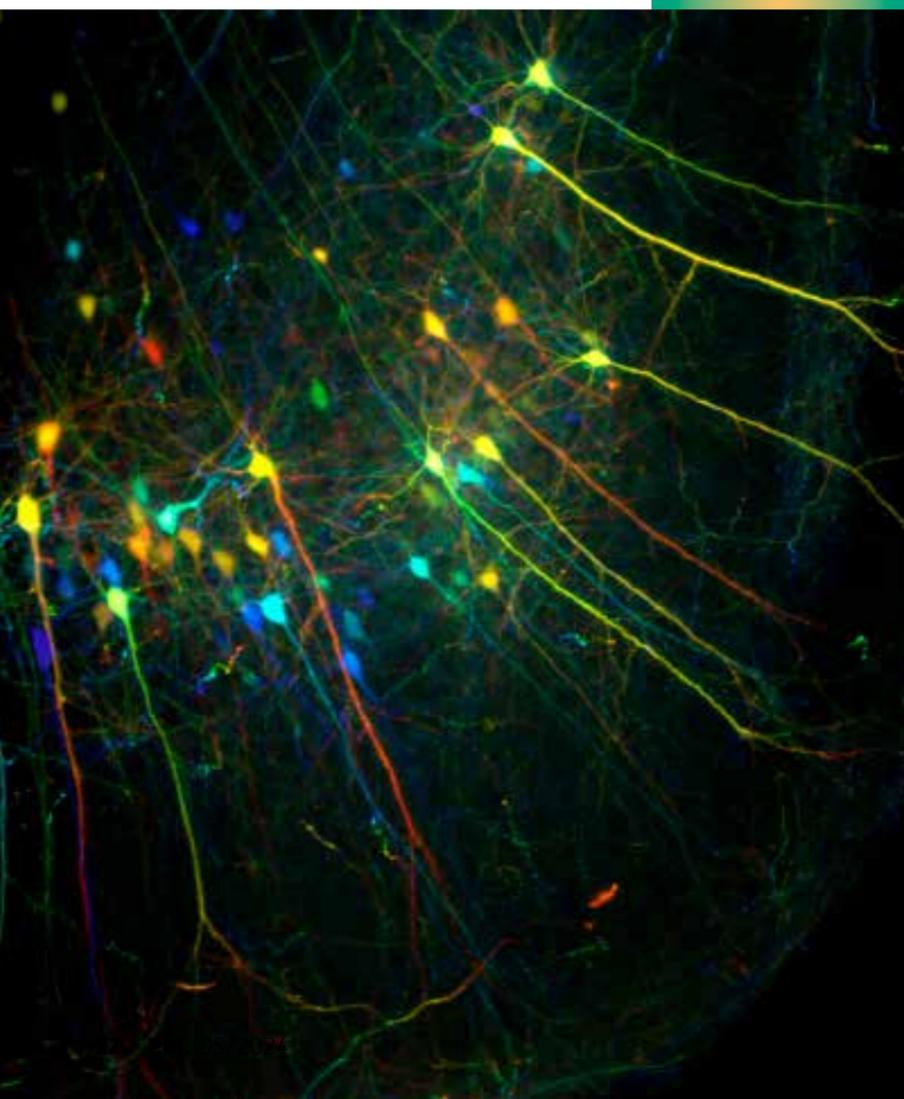
Der fundamentale Unterschied: Elektronen wirken mit ihrer Umgebung stärker im Wechsel als Lichtwellen. Darum herrscht im Innern des TEMs ein Vakuum, damit kein Luftmolekül den Strahl ablenkt. Und die Probe muss einerseits hauchdünn sein, damit der Strahl sie passieren kann, andererseits sehr stabil, damit die Teilchen sie nicht im Nu zerschießen. Die Faser wird darum zuvor in Kunstharz gehärtet, von dem eine Diamantklinge 70 bis 80 Nanometer feine Querschnitte raspelt.

Schon diese Prozedur, spätestens aber das anschließende Elektronengeballer, würde alles Lebendige töten. Für die Erforschung von Organismen taugen EMs somit nicht. Unerlässlich sind sie allerdings für Grenzgänger des Lebens, deren Winzigkeit jedem Lichtmikroskop entgeht: Viren. Am Paul-Ehrlich-Institut in Langen untersucht Jacomina Krijnse Locker, wie sich Pockenimpfviren in Wirtszellen vermehren. Sie sei fasziniert von der »Orchestrierung« dieses Prozesses, sagt sie; in vielen Tausend Einzelbildern hat sie ihn festgehalten. ▶

»Es scheint, als sei er im Detail geplant.« Zunächst werden Genome des Virus von Membranen der Wirtszelle umhüllt. Diese neu hergestellten Viren bewegen sich wie Waggons entlang eines zellulären Schienennetzes zu einer Sammelstelle. Von dort verlassen sie die Zelle für ihren Einsatz.

Bei der Präparation der Probe nutzt die Forscherin die neuartige Kryomethode. Dabei wird die Zelle schockgefroren. Dieses Verfahren wurde unter anderem im renommierten Europäischen Laboratorium für Molekularbiologie in Heidelberg von Jacques Dubochet erfunden. »Man hielt ihn für verrückt. Er hat jahrelang über nichts anderes als über Wasser nachgedacht.« Das Ergebnis, 2017 mit dem Nobelpreis für Chemie geehrt, ist ebenso simpel wie brillant: Man tunkt die Probe in flüssiges Ethan, wo das Zellwasser bei minus 185 Grad Celsius so schnell

Nervenzellen im Gehirn einer Maus durch ein Zwei-Photonen-Mikroskop betrachtet. Die Farben vermitteln die räumliche Lage



MIT TRICKS KÖNNEN WISSEN- SCHAFTLER SELBST DAS LICHTMIKROSKOP NOCH VERBESSERN

erstarrt, dass es keine Zeit hat, Eiskristalle auszubilden, die die Struktur zerstören würden. Das gefrorene Gewebe ist weniger robust als nach einer Einbettung in Kunstharz, hält aber mildem Elektronenbeschuss eine Zeit lang stand. Der Vorzug der Kryopräparation: Feinheiten wie die doppelwandige Membran können dargestellt werden. Und ebendort, in den Zwischenräumen, hat Krijnse Locker Proteine beobachtet, die dem Virus bei dessen Vervollständigung offenbar helfen. Vielleicht, überlegt sie nun, könnte hier ein Wirkstoff ansetzen, um künftige Virusepidemien zu stoppen?

Um lebendes Gewebe von Pflanzen oder Tieren in Aktion zu untersuchen, führt kein Weg an der Lichtmikroskopie vorbei. Das Grundprinzip kennt wohl jeder aus dem Biologieunterricht: Licht wird auf oder durch eine Probe geschickt, die reflektierten oder durchscheinenden Strahlen werden von optischen Linsen gebündelt. Die maximal mögliche Vergrößerung schien lange Zeit beschränkt durch die natürliche Beugung des Lichts. Demnach müssen Objekte mindestens 200 Nanometer auseinanderliegen, sonst verschwimmen sie unter der Linse zu trüben Flecken. Die Beugungsgrenze, das »Abbe-Limit« (siehe Kasten Seite 29), existiert nach wie vor, doch haben Physiker und Physikerinnen allerlei Tricks ersonnen, sie zu unterwandern.

Fluoreszenz ist der erste und wichtigste. Im 19. Jahrhundert als natürliche Reaktion bestimmter Pflanzenzellen unter UV-Licht zufällig entdeckt, galt sie Mikroskopierenden zunächst als störende Lichtverschmutzung. Mit der Zeit gelang es jedoch, sich die Leuchtkraft fluoreszierender Moleküle zunutze zu machen: Bei der Präparation werden Fluoreszenzmoleküle gezielt in die Probe geschleust und an jene Proteine gekoppelt, die man untersuchen will. Fluoreszenz dient so gewissermaßen als Lampe vor Ort – wie das Licht am Helm eines Höhlenforschers.

Die Kunst besteht nun darin, wie und wann man die Helmlampen an- und ausknipst. Oberstes Gebot: so kurz wie möglich anschalten. Denn Fluores-



Schnappschüsse von Elektronen

ATTOSEKUNDENPHYSIK Das Winzigste, das Menschen derzeit in der Lage sind zu beobachten, sind Elektronen. Der Physiker **Ferenc Krausz** hat dafür mit seinem Team eine Apparatur entwickelt, die einen Raum von der Größe einer Turnhalle füllt (und dafür letztes Jahr den Nobelpreis für Physik erhalten). Er vergleicht seine Arbeit mit der eines Fotografen, der mit ultrakurzer Belichtung ein Rennauto scharf aufnimmt. Zunächst erzeugt eine **Laserkanone** den technisch kürzestmöglichen Lichtblitz; er besteht aus einem einzelnen Wellenverlauf. Der Blitz trifft auf Neongas, schlägt dort Elektronen heraus, wodurch ein zweiter Lichtblitz aus ultraviolettem Licht entsteht, der mit wenigen Attosekunden noch kürzer ist als der erste. (Eine Attosekunde ist ein Milliardstel vom Milliardstel einer Sekunde; sie verhält sich zu einer Sekunde etwa so wie eine Sekunde zum Alter des Universums.) Mit diesem **ultrakurzen Blitz** ist es in vielen Einzelaufnahmen möglich, den Weg von Elektronen zu verfolgen, etwa wie sie durch einen Wolframkristall flitzen.

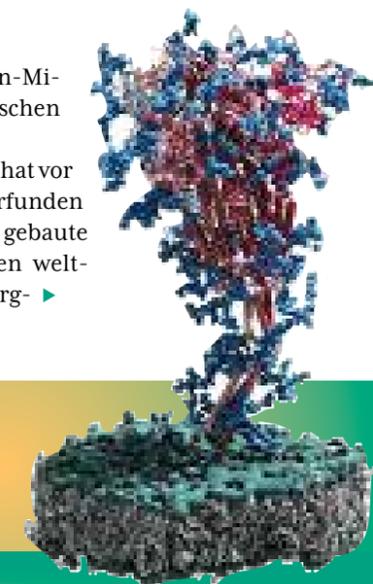
zenz schadet den umgebenden Zellen durch phototoxische Effekte. Zudem bleicht sie das Gewebe nach und nach aus. Forschende am Max-Planck-Institut für biologische Intelligenz in Martinsried wollen diese schädlichen Effekte besonders gering halten, denn sie untersuchen die Nervenzellen im Gehirn lebender Mäuse, Fische und Fliegen. Das von ihrem Direktor Winfried Denk entwickelte Zwei-Photonen-Mikroskop strahlt langwelliges Rotlicht in die Gehirne der Tiere. Es macht sichtbar, wie Nervenfasern und Synapsen auf Reize von außen reagieren.

Rotlicht hat den Vorteil, dass es Gewebe relativ tief durchdringt, in diesem Fall bis zu einem Millimeter. Jedoch ist es eigentlich zu schwach, um Fluoreszenzmoleküle zum Glimmen zu bringen. Darum erzeugt das Zwei-Photonen-Fluoreszenzmikroskop der Martinsrieder Forscher mit ultrakurzen, intensiven Laserpulsen extrem viele Photonen, von denen ab und zu zwei auf einmal bei einem Farbstoffmolekül eintreffen – gemeinsam sind sie stark genug. Aber exakt nur dort, wohin der Laser zielt. Dadurch entsteht eine große Tiefenschärfe, die schädliche Wirkung des Laserlichts auf das umgebende Gewebe wird reduziert und die fluoreszierende Leuchtkraft verblasst

nur langsam. Nachteil der Zwei-Photonen-Mikroskopie: Die Superlaser sind teuer, zwischen 60 000 und 150 000 Euro.

Hier setzt Jan Huiskens an. Der Physiker hat vor 20 Jahren die Lichtblattmikroskopie mit erfunden und betreibt nun ein Projekt, das selbst gebaute Geräte dieses Typs an Forschungsgruppen weltweit verleiht. Seine Abteilung an der Georg- ▶

Mithilfe der neuartigen Kryopräparation kann die Forscherin Jacomina Krijnse Locker die Struktur von Teilen eines Proteins des Virus Sars-CoV-2 offenbaren



FOTOS: NAME NACHNAME, NAME NACHNAME

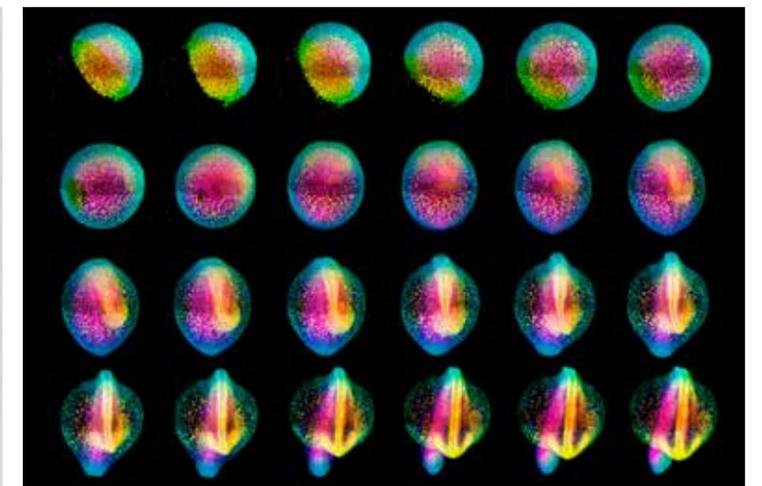
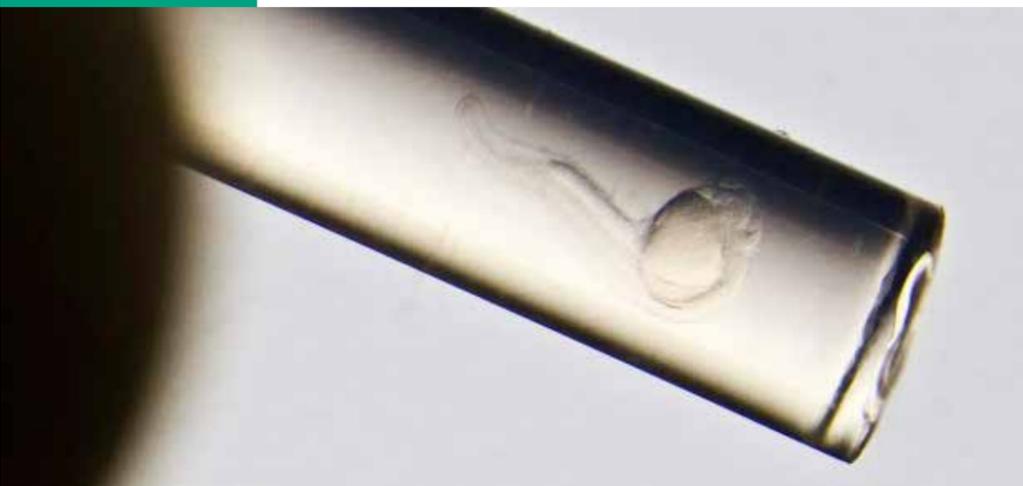


EINE LANGZEIT- UNTERSUCHUNG KANN ZWEI WOCHEN DAUERN

August-Universität in Göttingen ist Werkstatt und Labor zugleich. Auf Tischen liegen Laserlichtleiter, Computer, Elektromotoren, Adapter, Steckdosenleisten, dazwischen Kneifzangen und Inbusschlüs-

sel. Ein Team setzt die Teile zu Einheiten in der Größe von Bananenkisten zusammen. Im Raum nebenan zeigt Michael Weber, ein Mitarbeiter von Huisken, wozu sich Lichtblattmikroskope besonders eignen. Mit einer Pipette saugt er aus einer Petrischale ein fast durchsichtiges Geschöpf – einen vier Tage jungen Zebrafisch, knapp einen halben Zentimeter kurz. Zusammen mit bewegungshemmendem Gel landet das Objekt in einem schmalen Röhrchen, das Weber in einem Mini-Aquarium unter dem Objektiv befestigt. Das Mikroskop ist kaum

1 Das neuartige Lichtblattmikroskop an der Universität Göttingen ist kaum größer als eine Standbohrmaschine **2** Mit ihm lässt sich zum Beispiel ein vier Tage junger Zebrafisch untersuchen, knapp einen halben Zentimeter kurz **3** Die Forschenden gewinnen so besseren Einblick in die Stadien der frühen Entwicklung des Organismus – sogar die einzelnen Zellkerne sind erkennbar



größer als eine Standbohrmaschine. Wenn es nicht gerade im Umbau wäre, könnte Weber das Experiment starten. Im Unterschied zu anderen LMs beleuchtet das Lichtblattmikroskop die Probe mit einem Laser von der Seite, im 90-Grad-Winkel zur Blickachse. Eine zylinderförmige Linse flacht den Strahl ab wie die Spitze eines Meißels, der dann die wenige Millimeter breite Probe als hauchfeines Lichtblatt durchdringt. Ein Motor fährt das Objekt vor und zurück. Schicht für Schicht werden dabei genau jene Fluoreszenzmoleküle angeregt, auf die das Objektiv fokussiert. Hochgeschwindigkeitskameras nehmen Bilder aus verschiedenen Perspektiven auf. Eine Langzeituntersuchung kann dabei schon einmal bis zu zwei Wochen dauern.

Ein Computer verrechnet die ungeheuren Datenmengen (oft mehrere Terabyte pro Untersuchung) zu Zeitrafferfilmen in 3-D: Darin bildet sich zum Beispiel aus einem orangefarbenen Zellhaufen eine Hohlkugel, aus der sich Kopf und Torso stülpen. Oder blaue und gelbe Flecken wachsen zu einer Wirbelsäule zusammen. Oder vor schwarzem Hintergrund knüpfen wuchernde weiße Fäden ein immer dichteres Netzwerk aus Nerven. »Die empfindlichsten Komponenten bei unserem Ansatz sind die Proben: relativ große, komplexe Organismen«, sagt Michael Weber. »Ihnen passt sich die Technik an – sie soll kompakt und einfach zu bedienen sein.«

Zwei Kilometer weiter, im Keller des Max-Planck-Instituts für Multidisziplinäre Naturwissenschaften, verfolgt ein junger Mann den gegenteiligen Ansatz: Mittels ausladender, hochkomplexer Anlagen versucht er, minimale Zellaktivitäten dingfest zu machen. Inmitten eines Gewirrs von Kabeln schraubt Julius Peters Stangen, Spiegel, Laser, Farbfilter, ein Objektiv und Detektoren auf einer von Gewindelöchern perforierten Oberfläche eines drei Meter langen Tisches zusammen. Der Raum ist im

1625

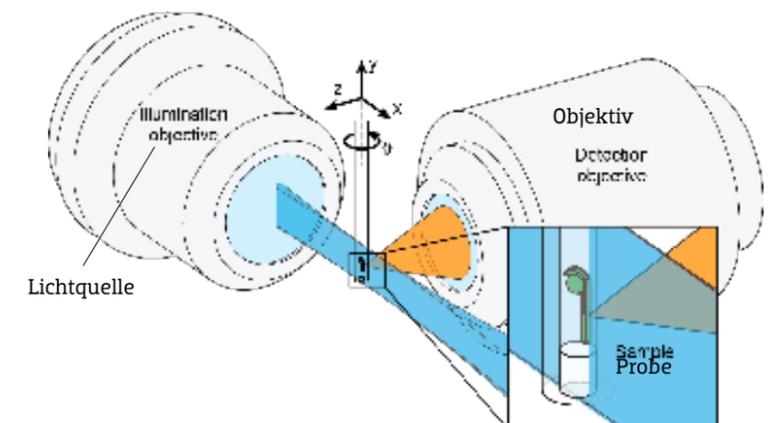
führte der Arzt Johannes Faber aus Bamberg den Begriff »Mikroskop« ein. Er leitet sich aus dem Griechischen für »mikros« (»klein«) und »skopein« (»sehen«) ab. Wer das Gerät erfunden hat, ist unbekannt

umgebenden Berggestein verankert, der Tisch steht auf schwingungsdämpfenden Füßen. Am Ende wird Peters die Anlage mit Pappe abkleben, bevor er seinen Versuch startet. Schon ein einzelner Luftzug könnte das Ergebnis verfälschen.

Peters ist Doktorand bei Stefan Hell, dem als erstem Menschen eingefallen ist, wie man die Auflösungsgrenze für Lichtmikroskope, das Abbe-Limit, überwinden kann. 2014 erhielt er dafür den Nobelpreis für Chemie. Er hat mehrere Mikroskoptechnologien entwickelt, die Akronyme der bekanntesten lauten Sted und Minflux, die alle auf derselben Idee gründen: Wenn es sich nicht verhindern lässt, dass zwei dicht beieinanderliegende Objekte zu einem Lichtklecks verschwimmen, dann nehmen wir sie eben einzeln auf. ▶

Technik für lebende Proben

LICHTBLATTMIKROSKOP Anders als herkömmliche Lichtmikroskope beleuchtet dieser Bautyp die Probe mit einem Laser von der Seite, im 90-Grad-Winkel zur Blickachse.



FOTOS: NAME NACHNAME, NAME NACHNAME

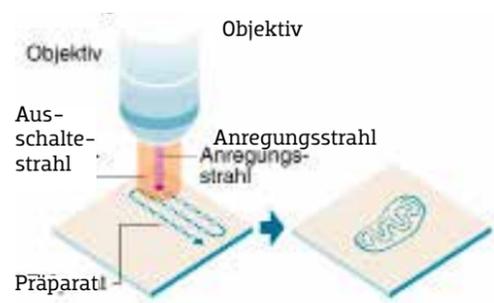
Superauflösende Fluoreszenzmikroskope

AUSGEZEICHNETE METHODEN Drei Nobelpreisträger für Chemie entwickelten **Lichtmikroskope**, die mit Leuchtfarbstoffen sehr scharfe Bilder von Molekülen **in lebenden Zellen** machen können. Dazu werden Fluoreszenz-Farbstoffe an bestimmte Stellen des zu untersuchenden Präparats gebracht und mit **Laserlicht** bestrahlt.

STED-MIKROSKOP

2000 entwickelt vom Deutschen **Stefan Hell**

Ein **starker Laserstrahl** im Fokus des Präparats regt die Farbstoffe zum Leuchten an. Ein zweiter, ringförmiger Laserstrahl schaltet gezielt Farbstoffe im Außenbereich aus.



Viele kleine, nebeneinanderliegende Einzelbilder werden anschließend zu einem Gesamtbild zusammengesetzt.

Sein erstes Mikroskop dieser Art, das Sted, sendet einen zentralen Laserstrahl und einen zweiten, der ihn ringförmig umgibt – wie ein Donut, sagt Hell. Der erste schaltet fluoreszierende Moleküle an, der zweite unterbricht den Anschaltprozess bei den Molekülen ringsum. So bleibt die Umgebung dunkel, nur wenige Moleküle im Zentrum leuchten. Der Donutstrahl ist wie eine Lochblende aus Energie, die sich beliebig verengen lässt. Minflux macht es umgekehrt: Eine Art Suchscheinwerfer mit einem Punktschatten in der Mitte kreist ein gesuchtes Molekül ein, bis es exakt lokalisiert ist.

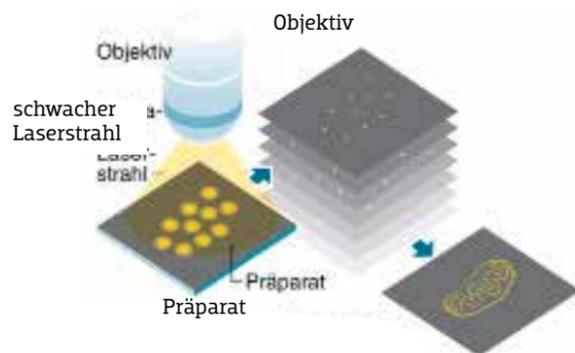
Kürzlich hat Hells Team Aufnahmen davon gemacht, wie ein einzelnes Protein durch eine Zelle wandert – mit einer Genauigkeit von 1,7 Nanometern pro Millisekunde. Kinesin-1, so der Name des Moleküls, ist eine Art Spediteur, der auf einem Netz von Straßen Lasten transportiert. Sogar die Motorik des Proteins lässt sich beobachten: »Es hat fußähnliche Teile«, sagt Steffen Sahl, ein langjähriger Mitarbeiter in Hells Labor. »Es verdreht sie, bevor es mal acht, mal 16 Nanometer weit schreitet.«

-273
Grad Celsius
Auf diese Temperatur knapp über dem absoluten Nullpunkt friert die vibrationsfreie Magnetkühlung die Probe im Rastersondenmikroskop im Forschungszentrum Jülich

EINZELMOLEKÜLMIKROSKOPIE

2006 entwickelt von den Amerikanern **Eric Betzig** und **William Moerner**

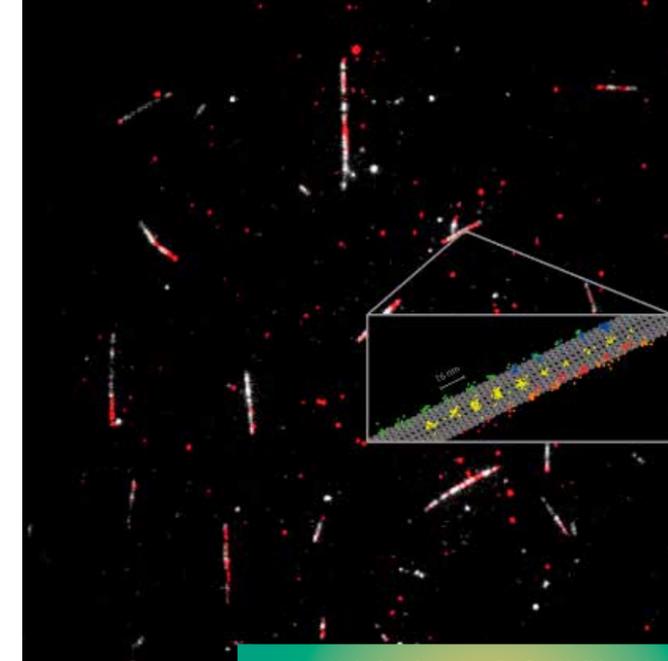
Ein **schwacher Laserstrahl** regt wenige fluoreszierende Moleküle zum Leuchten an. Das entstehende Bild wird gespeichert. Der Vorgang wird wiederholt, wobei immer andere Moleküle leuchten.



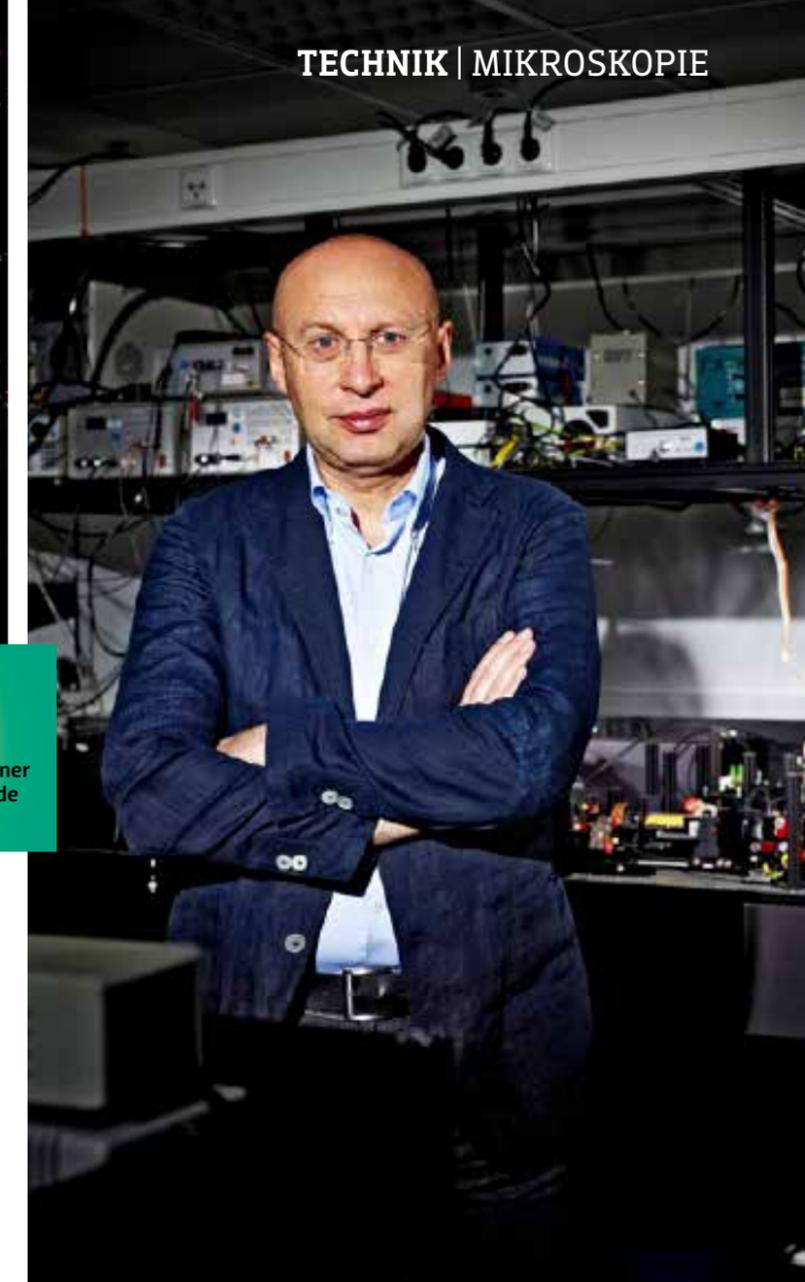
Die Einzelbilder werden übereinandergelegt. Alle Leuchtpunkte zusammen ergeben das Gesamtbild.

Interessanterweise ist das Molekül genau dort unterwegs, nahe dem Zellkern, wo auch Jacomina Krijnse Locker bei ihren Virenstudien hinschaut – mit dem Elektronenmikroskop. Kann ein Lichtmikroskop neuerdings lebende Prozesse in einer Größenordnung abbilden, die bisher dem Elektronenmikroskop vorbehalten war? »Ja«, sagt Sahl und wirkt dabei ziemlich stolz. »Wir haben den Vorsprung des EMs beinahe eingeholt.«

Man darf diesen Erfolg revolutionär nennen. Und ein weiterer kündigt sich an – in einer dritten Kategorie neben EMs und LMs, der Rastersondenmikroskopie. Bei dieser wird weder mit Photonen noch mit Elektronen geschossen; stattdessen ertastet eine hauchfeine Sondenspitze Atome und Moleküle. Bei Bedarf greift die Spitze sogar in die Probe ein und baut sie um (belohnt mit dem Nobelpreis für Physik 1986 für Gerd Binnig und Heinrich Rohrer). Beim »Tasten« fährt die Sonde, an der eine elektrische Spannung anliegt, mit einem winzigen Abstand über die Probe. Dank eines quantenmechanischen Effekts wird der Abstand durch sogenannten Tunnelstrom überbrückt, der sich exponentiell



Der Nobelpreisträger Stefan Hell hat ein Mikroskop erfunden, das das sogenannte Abbe-Limit (siehe Kasten Seite 29) überwinden und Objekte deutlicher darstellen kann. Minflux, die neueste Entwicklung seiner Forschungsgruppe, macht sogar wandernde Proteine in einer Zelle sichtbar (oben)

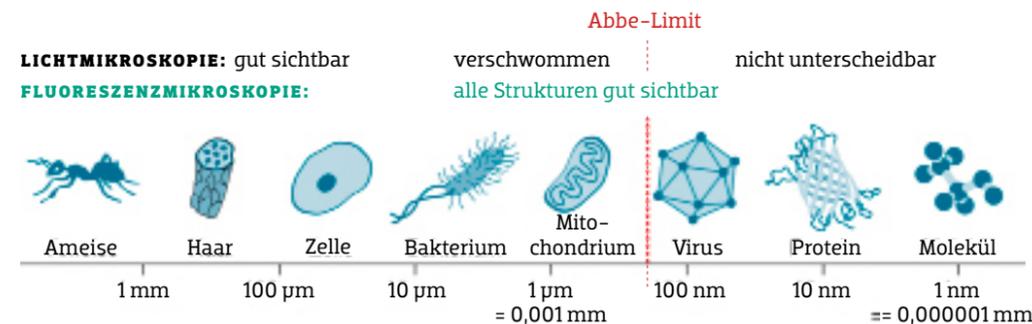


verkleinert, sobald sich die Distanz vergrößert. So gibt die Stromstärke detailliert Auskunft über die Beschaffenheit der Probenoberfläche.

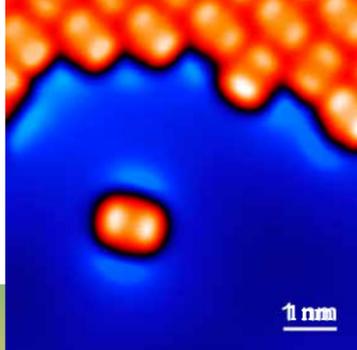
Im Forschungszentrum Jülich befindet sich ein weltweit einmaliges Rastersondenmikroskop in einem Raum, der, vom umgebenden Gebäude getrennt, über luftgefederte Stoßdämpfer auf eigenen Fundamenten steht. Mit Kesseln, Rohren, Leitungen und Isolierfolie erinnert das Gerät an eine mächtige Zentralheizung, doch es heizt nicht, im Gegenteil: Die Probe wird extrem gekühlt. Zudem ▶

AUFLÖSUNGSGRENZEN

Die bisherige Grenze für scharfe Abbildungen (Abbe-Limit) liegt bei Lichtmikroskopen bei einer halben Wellenlänge des Lichts, etwa 0,2 µm (Mikrometer).



FOTOS: NAME NACHNAME, NAME NACHNAME



Das Rastersondenmikroskop im Forschungszentrum Jülich vermag ein einzelnes Molekül darzustellen (oben). Mit zwei Spezialhandschuhen lassen sich die winzigen Objekte gar bewegen. In Echtzeit kann der Forscher das Geschehen in einer 3-D-Virtual-Reality-Simulation oder 2-D-Darstellung auf dem Bildschirm verfolgen und steuern (rechts)



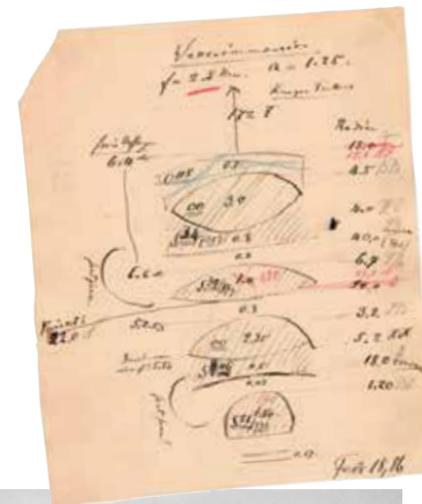
WISSENSCHAFT ODER SCIENCE-FICTION-GAMING?

wird in der winzigen Mikroskopkammer, die kleiner als eine Streichholzschachtel ist, mit größtmöglichem Unterdruck ein Ultravakuum erzeugt. So werden alle unerwünschten Bewegungen und Reaktionen der Probe unterbunden.

»Wir haben mit diesem Gerät ein Molekül geschaffen, das es sonst nirgendwo im Universum gibt«, sagt Stefan Tautz. Es gilt als mögliches Bauteil für künftige Quantencomputer. Tautz und sein Team haben zunächst die Beschaffenheit eines gewöhnlichen Farbmoleküls ermittelt. »Ferrarirot«, sagt Tautz und zeigt ein Bild: ein längliches Molekül, das seine Atome wie in grafischen Modelldarstellungen über wabenförmige Ringe verbindet. Anschließend haben sie das Mikroskop in seiner zweiten Funktion genutzt, als eine Art Bagger. »Denn wie ein menschlicher Finger kann die Sondenspitze nicht nur tasten, sondern auch schieben.« So fügten sie an eine Seite des Ferrarirots zwei einzelne Silberatome hinzu, an die gegenüberliegende Seite ein weiteres. Die Sonde packte dann dieses dritte Atom, hob es in die Höhe, stellte das Molekül auf die ersten Silberatome wie auf Füßchen und ließ es los. »Erfreulicherweise blieb es stehen, fast schwebend. Eine gute Voraussetzung für Quantencomputer.«

Das Jülicher Rastersondenmikroskop kommt dank seiner Magnetkühlung ohne bewegliche Teile aus und arbeitet nahezu vibrationsfrei. So lassen sich besonders gut die Eigenschaften von Quantenmaterialien erforschen

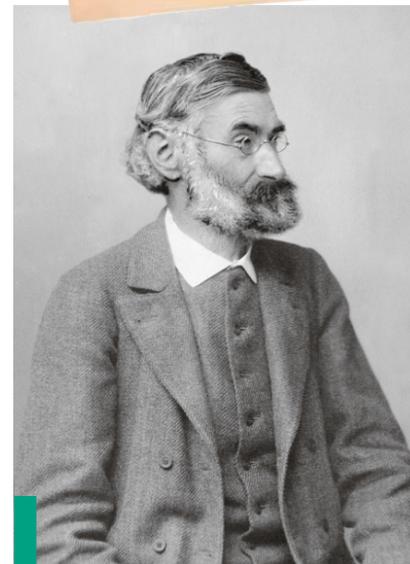
FOTOS: NAME NACHNAME, NAME NACHNAME



Berechnung Ernst Abbes zur Immersion: Der so bezeichnete Einsatz von Flüssigkeit in der Lichtmikroskopie steigert die Auflösung

Die Tücken des Lichts

ABBE-LIMIT Im 19. Jahrhundert begann der Siegeszug des Lichtmikroskops in den Naturwissenschaften. Immer feiner wurden die **Linse**n geschliffen, immer reinere Glassorten entwickelt, immer leistungsfähiger wurden die Geräte. Bis man auf ein seltsames Phänomen stieß: Ab einer bestimmten Vergrößerung wurde das Bild unscharf. Der Physiker Ernst Abbe, Mitarbeiter von Carl Zeiss in Jena, suchte nach der Ursache. Er sandte Licht durch Gitter mit unterschiedlich großen Öffnungen auf einen Bildschirm und erkannte: Damit die Gitterstruktur erkennbar bleibt, müssen die Öffnungen einen Mindestabstand haben. Grund ist die **Beugung des Lichts** in den Löchern zu kreisförmigen Wellen. Diese überlagern sich auf dem Weg zum Bildschirm zu Kernpunkten oder Maxima, welche Bildinformationen über das Gitter enthalten. Mindestens drei dieser Maxima müssen den Schirm – oder das Okular eines Mikroskops – erreichen, sonst verschwimmen die Gitterstäbe zu einem einzigen Schatten. 1873 stellte Abbe fest, dass zwei Punkte nicht näher beieinanderliegen dürfen als die **halbe Wellenlänge** des verwendeten Lichts, damit sie im Mikroskop nicht zu einem Fleck verschmelzen. Im Spektrum sichtbarer Lichtwellen sind blaue mit etwa 400 Nanometern die kürzesten. Für eine brauchbare Auflösung müssen Objekte also mindestens 200 Nanometer auseinanderliegen.



Zukunftsträchtig ist vielleicht auch, wie Tautz die Sonde steuert: Er malte mit Datenhandschuhen eine Kurve in die Luft, die Infrarotkameras, Ortungssystem und Computer hundertmillionenfach verkleinert ans Mikroskop übertrugen. Wissenschaft oder Science-Fiction-Gaming? »Physiker haben einen ausgeprägten Spieltrieb«, räumt Tautz ein. »Aber auch Visionen.« Wenn der Mensch weiter in den atomaren Kosmos dringen und ihn sogar manipulieren wolle, »sollte er lernen, sich körperlich intuitiv durch diese Welt zu bewegen«. Derzeit arbeitet sein Team daran, die mikroskopischen Bauarbeiten in einer Virtual-Reality-Brille abzubilden. Klingt, als wolle der Mensch im fast unsichtbaren Aller kleinsten das Augenmaß wieder einführen.

Vielleicht nähern sich hier zwei scheinbar gegensätzliche Trends der modernen Mikroskopie an. Auf der einen Seite werden die Geräte immer größer, sensibler und immobil. Auf der anderen Seite sollen sie leichter bedienbar werden, sich menschlichen Bedürfnissen anpassen, ja sogar die

Tradition der Forschungsreise wiederbeleben. Jan Huisken hat gerade eines seiner kompakten Lichtblattmikroskope in robusten Transportkoffern nach Südfrankreich geschickt; demnächst fliegen drei weitere zu wissenschaftlichen Teams nach Chile, Uruguay und Brasilien.

Er sei glücklich, sagt Huisken, mit dieser Baureihe an die Expeditionen der Pioniere anzuknüpfen: »Vor 200 Jahren haben Menschen wie der Universalgelehrte Alexander von Humboldt die Welt mit dem Mikroskopkoffer erkundet. Das wollen wir auch mit unseren modernen Geräten ermöglichen.« ■

PM.KOMPAKT

- Herkömmliche Mikroskope arbeiten mit Licht, modernere **Elektronenmodelle** mit einem Teilchenstrahl. Beide Varianten werden ständig fortentwickelt.
- Mithilfe von **Rastersondenmikroskopen** lassen sich Proben nicht nur betrachten, sondern sogar umbauen.
- Dank **Technologie für virtuelle Realität** könnte es einst möglich sein, sich durch atomare Welten zu bewegen.



Carsten Jasner hat sich als Journalist darauf spezialisiert, bei Themen in die Tiefe zu tauchen – und Leserinnen und Lesern so neue Welten zu eröffnen.