

Rosalind Franklin hat einen Nobelpreis verdient, aber nicht bekommen. Der Preis für die Entdeckung der DNA-Doppelhelix wurde 1962 an James Watson, Francis Crick und Maurice Wilkins gegeben. Rosalind Franklin war bereits 1958 gestorben – 37-jährig.

Es wurde nie bezweifelt, dass Franklins Daten fundamental für die Entdeckung der Doppelhelix waren. Trotzdem entstand die Legende, dass Franklin übervorteilt wurde. In Watsons Buch „The Double Helix“ von 1968, das die Entdeckungsgeschichte beschreibt, gibt er eine unverschämte offene Beschreibung der Protagonisten. Am schlimmsten kommt Franklin weg, die als Einzige nicht mehr lebte. Er beschreibt sie, vernichtend, als unattraktiv, schlecht gekleidet, uncharmant – als „bluestocking“. Er schreibt auch so, als seien er und Crick viel schlauer als sie gewesen. Das nimmt er im Epilog zurück, jedoch nicht aus dem Text. Aber auch bei späteren Gelegenheiten hat er sich weiter über sie lustig gemacht, sie habe ihre eigenen Daten nicht verstanden: „Rosy was a fool.“ Das habe ich selbst erlebt. Sein Ego hatte das wohl nötig als Rache dafür, dass sie früh den unverzeihlichen Fehler machte, ihm zu sagen, was sie von seiner mangelnden Kompetenz hielt.

In Rosalind Franklin eine tragische Heldin zu sehen, die als Frau übergangen und diskriminiert wurde, ist wohl ein häufiges, aber ganz schiefes Bild von ihr. Und sie selbst hat das auch nie so gesehen. Wahr ist allerdings, dass Watson wusste, was DNA war, und Franklin die Strukturanalyse derselben als Auftragsarbeit bekam. Damit hat sie eigentlich großes Glück gehabt, wie auch mit den Virus-Projekten, die ihr später überlassen wurden. Aber sie hat stets experimentell hervorragende originelle Arbeit geleistet. Das ist der springende Punkt. Sie ist ein Vorbild als erfolgreiche, zufriedene Wissenschaftlerin, die, hätte sie länger gelebt, möglicherweise zwei Nobelpreise hätte bekommen können, einen für DNA, mit Watson und Crick, und den zweiten für die Struktur von RNA-Viren, mit Aaron Klug.

Die komplementäre Doppelstrangstruktur der DNA, des Erbmaterials, war die wichtigste Entdeckung der Biologie in der Mitte des 20. Jahrhunderts und von unendlicher Tragweite für die moderne Biologie. Gene sind diskrete Einheiten, die die Merkmale der Lebewesen bestimmen und von Generation zu Generation weitergegeben werden. Ihre Variabilität bewirkt die Verschiedenheit der Organismen und ist die Grundlage für deren Evolution. In jeder Generation werden sie verdoppelt und jeweils eine Kopie an die Nachkommen weitergegeben. Gene bestimmen die Reihenfolge der Aminosäuren in Proteinen.

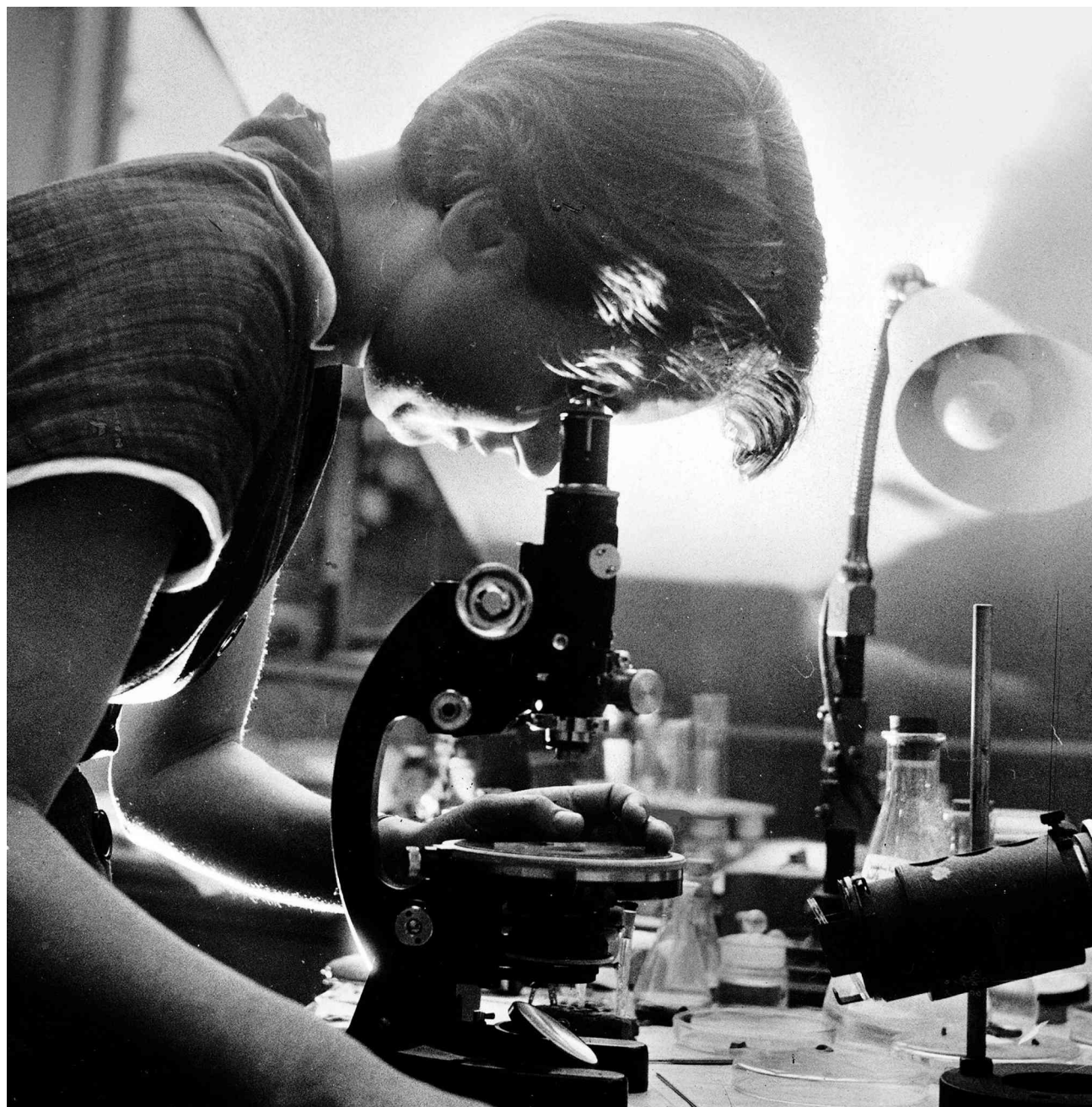
Der Physiker Erwin Schrödinger formulierte die Eigenschaften, die ein Molekül haben muss, um als Gen zu funktionieren, in seinem einflussreichen Buch „What is Life?“ (1946): Gene müssen identisch verdoppelt werden können. Sie müssen die Abfolge von Aminosäure in Proteinen bestimmen können. Makromoleküle, die die Zellen aufbauen, sind Kandidaten. Proteine, lineare Ketten aus Aminosäuren, sind die eigentlichen Bau- und Wirkstoffe der Zelle. Andere Kandidaten für Moleküle, aus denen Gene sind, waren Nukleinsäuren: Desoxyribonukleinsäure, also DNA, 1869 von Friedrich Miescher in Tübingen entdeckt, ist eine visköse Substanz mit hohem Phosphorsäureanteil und Zuckermolekülen. Sie enthält vier verschiedene aromatische Stickstoffverbindungen, die Basen Adenin, Thymin, Cytosin, Guanin. Bei Pflanzen und Tieren ist DNA in Zellkernen lokalisiert. Eine zweite Nukleinsäure, RNA, enthält als Zucker Ribose und ist im Zytoplasma lokalisiert. Proteine haben 20 verschiedene Untereinheiten, Nukleinsäuren nur vier. Haben sie mit nur vier verschiedenen Bausteinen eigentlich genügend Vielfalt, um Gene zu bilden? Sind nicht eher die Proteine, bei ihren größeren Variationsmöglichkeiten, geeignet? Oder etwas ganz anderes?

#### Aufklärung der DNA-Struktur

Das entscheidende Experiment unternahm Oswald Avery (1944). Er untersuchte Pneumokokken – Bakterien, die Lungenentzündung übertragen. Zwischen Bakterien lassen sich Gene für spezifische erbliche Eigenschaften durch zellfreie Extrakte übertragen. Die Reinigung der aktiven Substanz ergab, dass diese die DNA der Bakterien war, die nicht durch Enzyme, die Proteine angreifen, inaktiviert werden konnte. Dagegen wurden sie sofort zerstört, wenn dem Extrakt das DNA abbauende Enzym DNase zugesetzt wurde. Zu Beginn der fünfziger Jahre des 20. Jahrhunderts haben sich dann auch einige Forscher, die Schrödingers Buch gelesen hatten, vorgenommen, die Struktur der DNA aufzuklären, in der Hoffnung, dass diese die identische Verdoppelung und Codefunktion erklärt: Erwin Chargaff in New York, Linus Pauling in Pasadena, Jim Watson in Cambridge, Maurice Wilkins in London.

Rosalind Franklin gehörte nicht dazu. Sie kannte sich in Biologie nicht aus und hat sich das DNA-Projekt nicht selbst ausgewählt. Sie war sich wohl der Brisanz dieses Forschungsobjektes nicht bewusst. Der Chemiker Erwin Chargaff untersuchte die Basenzusammensetzung der DNA vieler Pflanzen und Tiere und fand, dass sie in verschiedenen Organismen unterschiedlich ist, aber gleich in verschiedenen Geweben innerhalb eines Organismus. Er berichtete 1950 eine merkwürdige Regel: Der Gehalt von A gleicht immer dem von T, und der von G dem von C. Dafür hatte er keine Erklärung.

Zur Aufklärung von Molekülstrukturen wurde die Beugung von kleinwelligem Röntgenstrahlen an Atomen in Kristallen verwendet, die Röntgenstrukturanalyse („X-Ray“). Durch die repetitive Anordnung der Atome ergeben sich charakteristische Muster, die als Schwärzung auf Fil-



Verkannt, verhöhnt und doch vielfach bewundert: DNA-Pionierin Rosalind Franklin starb 37-jährig.

Foto Interfoto

# Geistvoll genug für zwei Nobelpreise

Die Mitentdeckerin der DNA-Doppelhelix, Rosalind Franklin, war nicht die tragische Heldin und übergangene Frau, für die sie viele halten. Eine Richtigstellung zu ihrem 100. Geburtstag.

Von Christiane Nüsslein-Volhard

men festgehalten werden. Aus diesen können Topologie und Abstände zwischen Atomen erschlossen werden, aber nicht vollständig. Jedes Muster hat viele mögliche Verursacher. Es braucht zusätzliche Information. Mathematische Theorien können Kristallformen nach ihren Symmetrieeigenschaften klassifizieren. Hilfreich ist auch die Bildung von Modellen. Aufgrund genauer Kenntnis der molekularen Parameter hat Linus Pauling allein durch Modellbildung die Struktur eines häufigen Proteinmotivs, die Alpha-Helix, entdeckt.

Die Forschungen mit dem Ziel, die DNA-Struktur zu finden, begannen 1950 in London durch den Physiker Maurice Wilkins am King's College. Wilkins war vorher kriegsbedingt am Manhattan-Projekt beteiligt und hatte keine Erfahrung mit biologischen Molekülen. Seine ersten X-Ray-Aufnahmen eines hochwertigen DNA-Präparats, die er mit dem Studenten Raymond Gosling machte, deuteten vielversprechend auf eine semikristalline Struktur hin, waren aber zu komplex, um sie zu analysieren. Zur Unterstützung des Projekts wird Rosalind Franklin als erfahrene Kristallographin vom Direktor John Randall eingestellt. Dieser versichert ihr schriftlich und ohne Wissen von Wilkins, dass nur sie und der Student Raymond Gosling am King's an der X-Ray-Analyse von DNA arbeiten werden.

Rosalind Franklin beginnt im Januar 1951 in einem ungemütlichen Labor im Souterrain. Sie leidet sehr unter dem Wechsel aus Paris, wo sie sehr anerkannt

und geschätzt war. Sie vermisst eine kultivierte Atmosphäre und bekommt kaum Kontakt zu den neuen Kollegen, von denen immerhin acht (25 Prozent) weiblich sind. Sie irritiert durch ihr brüskes, wenig konzilianzantes Auftreten und ihre Arroganz. Rosalind Franklin bekommt neue, moderne Geräte und macht die ersten Aufnahmen. Wilkins ist beeindruckt, aber Franklin hat wenig Respekt für ihn, weil er kaum experimentelle Erfahrung hat. Er weiß wohl auch nicht, welch hohen Status sie in Paris hatte, und betrachtet sie zunächst als seine Assistentin. Sie ist aggressiv, er eher verklemt. Rosalind vertreibt ihn energisch aus dem Feld der X-Ray-Analyse (ob sie sich je Gedanken machte, was das für Wilkins bedeutete?), er dagegen traut ihr die mathematische Auswertung ihrer Messungen nicht zu. Gegenseitige Verletzungen, die auch darin begründet waren, dass Randall nicht mit offenen Karten gespielt hat, führen dazu, dass sie bald bittere Feinde werden. Sie ist sehr unglücklich am King's und beschließt, es so bald wie möglich wieder zu verlassen.

Sie entdeckt, dass DNA in zwei Formen vorkommt, der A-Form und einer einfacheren B-Form mit höherem Wassergehalt, die ineinander übergehen können. Die A-Form, die wohl ein Artefakt darstellt, ist sehr schwierig zu analysieren; im Gegensatz zur B-Form ist nicht eindeutig, ob sie eine helikale Struktur hat. Deshalb widerspricht Franklin zunächst den theoretischen Berechnungen des Mitarbeiters Alec Stokes, die nahelegen, dass die DNA-

Struktur eine Helix sei. Im Mai 1952 entsteht mit Gosling die Aufnahme 51 der B-Form, die so schön ist und ohne Zweifel die helikale Struktur zeigt. Die Parameter, die sie daraus berechnet, beschreibt sie Ende 1952 in einem Bericht für die Begutachtung des Instituts.

#### Konkurrenz in Cambridge

Dieser Bericht sickert auch zu Watson und Crick, den Konkurrenten in Cambridge, durch. Jim Watson ist Biologe. Nach schnellem Studium in Chicago ohne viel Chemie oder Physik wurde er bereits mit 22 Jahren mit einer Arbeit über Bakteriengenetik promoviert. Mit 17 hatte er bereits Schrödingers Buch gelesen und ist von DNA fasziniert. Er sieht das X-Ray-Bild von Wilkins auf einer Tagung im Mai 1951 und geht daraufhin an das Cavendish-Labor in Cambridge, das von Laurence Bragg geleitet wird, dem sehr berühmten Begründer der X-Ray-Analyse, der bereits 1915 zusammen mit seinem Vater einen Nobelpreis gewann. Er trifft dort auf den Physiker Francis Crick, der schon über dreißig und wegen des Kriegs noch nicht promoviert ist, und steckt ihn, der auch Schrödingers Buch gelesen hat, mit seiner DNA-Begeisterung an. Sie möchten Pauling kopieren und DNA-Modelle machen, um zu sehen, was passt. Vielleicht ist es ja ganz einfach. Sie diskutieren aber nur sporadisch miteinander, da Crick Proteine als Projekt hat und Watson nicht an DNA, als dem Projekt des King's College, arbeiten darf. Im Juni

## Nur zwei Forschungsjahre für das Verständnis der DNA

Rosalind Franklin war eine britische Physikochemikerin. Sie wurde am 25. Juli 1920 als zweites von fünf Kindern eines reichen jüdischen Bankiers der oberen Mittelschicht in London geboren. 1945 wurde sie mit einer Dissertation über die Eigenschaften verschiedener Kohleformen an der Universität Cambridge promoviert. Danach verbrachte sie vier Jahre in Paris als Forscherin in einem Institut des CNRS, des Nationalen Zentrums für wissenschaftliche Forschung in Frankreich. Dort wendete sie mit großem Erfolg Röntgenstrukturanalyse auf verschiedene Kohleformen an.

Anfang 1951 ging sie an das biophysikalische Institut des King's College London, das von John Randall geleitet wurde. Dort arbeitete sie an der Röntgenstrukturanalyse von DNA. Innerhalb von nur zwei Jahren bestimmte sie die

räumlichen Parameter der helikalen Struktur der DNA mit zwei Strängen. Zeitgleich mit James Watson und Francis Crick publizierte sie ihre Daten im April 1953 in „Nature“.

Im März 1953 begann sie am Birkbeck-College im Institut von John Bernal, einem berühmten Pionier der molekularen Biologie. Dort forschte sie über die Struktur von Pflanzenviren, die als genetisches Material RNA, nicht DNA, enthalten. Bald leitete sie sehr erfolgreich eine Gruppe von Studenten und Postdocs, unter ihnen Aaron Klug, der 1982 einen Nobelpreis für Arbeiten, die er mit Rosalind Franklin begann, gewinnen würde. Sie klärten die Strukturen des stabförmigen Tabakmosaikvirus (TMV) sowie einiger sphärisch aufgebauter Viren auf. Franklin begann auch Studien mit dem menschlichen Poliovi-

rus, das eine ähnliche Struktur wie einige Pflanzenviren sowie Coronaviren aufweist. Sie unternahm zwei ausgedehnte Vortragsreisen in die Vereinigten Staaten, wohin sie für ihre Kohlearbeiten eingeladen wurde, aber auch über die Virusstrukturen berichtete. Für die Brüsseler Weltausstellung 1958 fabrizierte sie ein großes Modell des TMV, wobei Tennisbälle die Proteinmoleküle darstellten.

Rosalind Franklin starb, hochangesehen, am 16. April 1958 an Krebs. Von den 13 Jahren als Forscherin hat sie nur zwei der DNA gewidmet. Sie selbst hat ihre größten Erfolge in der Kohleforschung und der Pflanzenvirologie gesehen. Aber ihr bedeutendster wissenschaftlicher Beitrag ist das berühmte Bild 51, das zur Strukturaufklärung der DNA geführt hat.

1951 präsentiert Linus Pauling in Cambridge seine Alpha-Helix, was große Aufregung bei Watson und Crick erzeugt, die glauben, er löse mit dem gleichen Ansatz als Nächstes die DNA-Struktur. Rosalind Franklin ist auch sehr beeindruckt von Pauling. Wilkins ist mit Crick befreundet, bei dem er über Franklin herzieht („Rosy is a fool“). Watson und Crick machen sich daran, das Modell zu bauen, denn Wilkins und Franklin sind dafür nicht zu erwärmen. Franklin ist Perfektionistin, die sich nicht gestattet, zu spekulieren, bevor alle Daten da sind. Sie hat große Angst davor, Fehler zu machen. Im November 1951 spricht sie für einen „Progress Report“ am King's, zu dem Watson kommt, der sie da zum ersten Mal sieht. Er passt nicht gut auf und macht gleich in Cambridge mit Crick ein Modell mit drei Zucker-Phosphat-Ketten in der Mitte und den Basen außen. Franklin sieht sofort, dass es unmöglich ist, und behauptet, dass die Zucker-Phosphat-Ketten außen sein müssen, die Basen innen. Sie zeigt deutlich ihre Verachtung für die mangelhaften Chemie-Kenntnisse der beiden.

#### Ringen um das beste Modell

Watson und Crick fühlen sich hochgradig blamiert, auch der Direktor Bragg für das Cavendish. Crick hat inzwischen mit anderen eine Theorie entwickelt, die erlaubt, helikale Strukturen zu erkennen, die auch im Hämoglobin, an dem er mit Max Perutz arbeitet, vorkommen. Watson hat X-Ray-Aufnahmen von Tabakmosaikvirus gemacht, die auch diese helikalen Reflexionen zeigen. Crick und Watson bekommen im Januar 1953 ein Preprint, in dem Linus Pauling sein DNA-Modell beschreibt. Das Modell ist so ähnlich wie das, das die beiden schon früher gemacht haben, also falsch (Rosalind schreibt sogar an Pauling und teilt ihm mit, dass ihre Daten zeigen, dass die Zucker-Phosphat-Ketten außen sein müssen). Watson trifft auf Wilkins, der ihm Franklins Bild 51 zeigt, das er schon eine Weile hat. Watson erkennt sofort, dass es super ist und eine Helix bedeutet, deren wesentliche Parameter er sich merkt. Nun fragt er Wilkins, ob er was dagegen habe, dass sie bessere Modelle machen, damit nicht schon wieder Pauling gewinnt. Wilkins stimmt (ungern) zu.

Franklins Auswertungen ihrer X-Ray-Analyse von Bild 51, die im Februar 1953 über Perutz zu Crick und Watson gelangte, zeigen deutlich die helikale Struktur der DNA aus zwei umeinander gewundenen Strängen, die Zucker-Phosphat-Kette außen, die Basen innen. DNA gehört zur C2-monoklinen Raumgruppe. Francis Crick erkennt daraus sofort die Symmetrie der Struktur, nämlich dass die Stränge identisch und gegenläufig sein müssen, also nicht spiegelbildlich symmetrisch entlang der Längs- sondern der Querachse. Das ist sehr wichtig und wurde von Franklin, aber auch Wilkins, übersehen.

In Cambridge baut Watson an einem Modell. Die große Frage ist, wie die Basen hineinpassen. Die Basenformen werden aus Pappe ausgeschnitten und versucht, in der Mitte der Doppelspirale unterzubringen. Jerry Donohue, mit dem Watson ein Büro teilt, bemerkt, dass es die Ketoformen sein müssen, bei der die Wasserstoffatome anders angeordnet sind als bei den Enolformen, die in Lehrbüchern angegeben sind. Und siehe da: Diese erlauben die Verbindung von Adenin mit Thymin und Guanin mit Cytosin durch zwei beziehungsweise drei Wasserstoffbrücken. Beide Paare sind gleich groß und können wunderbar in das Zucker-Phosphat-Gerüst eingepasst werden. Diese Komplementarität erklärt die Chargaff-Regel: A=T und G=C. Die Struktur erfüllt beide Postulate von Schrödinger: Die Abfolge der Basen in einem Strang bedingt eindeutig die in dem anderen Strang. Die Basenreihenfolge einer der beiden Stränge kann die Matrize für die Reihenfolge der Aminosäuren in Proteinen darstellen. Heureka!

King's College wird informiert: Wilkins ist leicht sauer, Randall sehr. Rosalind Franklin dagegen lobt das Modell und erkennt sofort seine Eleganz und Bedeutung. Die kritischen Parameter passen gut zu ihren Daten (vermutlich ahnte sie, dass die beiden ihre Ergebnisse kannten, ging aber großzügig darüber hinweg). Die Basenpaarung konnte aus ihren Analysen nicht geschlossen werden, sondern nur durch Modellbildung. Das war Watsons große Entdeckung. Sie ärgert sich über sich selbst, dass die Gegenläufigkeit der Stränge nicht erkannt hat, das war Cricks Beitrag. Alle sind erleichtert über ihre freundliche Reaktion, merken, dass Franklin gar nicht so dumm war, wie Wilkins es immer dargestellt hatte. Sie selbst findet ihre Messungen viel wichtiger als das Modell, das ja noch gar nicht bewiesen ist – und ist froh, Crick und Watson endlich auf Augenhöhe zu begegnen. Sie sieht sich keineswegs als Verliererin, im Gegensatz zu Randall. Ein weiterer Verlierer ist Chargaff, denn seine Regeln bieten ja eine wunderbare Unterstützung des Watson-Crick-Modells. Dass er Watson und Crick später des Plagiaten bezichtigt hat, statt sich zu ärgern, nicht selbst auf einen Doppelstrang und Komplementarität gekommen zu sein, verwundert bis heute.

Wilkins und Franklin haben sich nie versöhnt, während Franklin später besonders mit Crick und dessen Frau Odile freundschaftlich verbunden war. Es dauerte erstaunlicherweise noch einige Jahre, bis die Doppelhelix allgemein akzeptiert wurde. Die X-Ray-Analyse war für Biologen zu schwierig, und ein Modell ist kein Beweis. Wilkins untermauerte das Modell mit zusätzlichen detaillierteren Messungen. Wichtig war das Experiment von Matthew Meselson und Franklin Stahl (1958), das die semikonservative Replikation bewies. Erst 1962, aber zu spät für Rosalind Franklin, gab es den Nobelpreis für Watson, Crick und Wilkins.

#### Professorin Christiane Nüsslein-Volhard,

die 1995 als erste Frau aus Deutschland den Medizin-Nobelpreis erhalten hat, ist Entwicklungsbiologin in Tübingen.

## Sibiriens Hitzewelle

Analyse zeigt Einfluss des Klimawandels

So klar wie nie zuvor haben Klimaforscher aus sieben Nationen die vom Menschen beschleunigte globale Erwärmung als Ursache für ein Extremwetterereignis ermittelt: Die sibirische Hitzewelle in diesem Frühsommer wäre ohne den Klimawandel „höchstwahrscheinlich“ nicht möglich gewesen. Selbst wenn die seit Jahren messbare Erwärmung in der Arktis Teil eines natürlichen Prozesses wäre, hätten die im Mai und Juni andauernden tropischen Spitzentemperaturen wohl nur einmal alle 130 Jahre stattfinden können. Der Klimawandel habe die Wahrscheinlichkeit dieser ungewöhnlichen Erwärmungsperiode zwischen Januar und Juni sechshundertfach erhöht, schreibt die „World Weather Attribution“-Initiative (WWA) in ihrer vor einigen Tagen vorgelegten Analyse.

Höhepunkt der lang anhaltenden Hitzewelle war ein von der Weltmeteorologiebehörde WMO noch nicht bestätigter Rekordwert von 38 Grad Celsius an der Wetterstation Werchojansk jenseits des arktischen Polarkreises. Überdurchschnittlich viele Waldbrände waren unter anderem die Folge. Insgesamt lagen die in die Studie einfließenden Temperaturwerte in dem großen sibirischen Streifen zwischen 60 und 75 Grad Nord und 60 bis 180 Grad Ost um 5 Grad über dem langjährigen Mittelwert der ersten sechs Monate. Das Forscherteam, an dem neben der an der Universität Oxford tätigen Klimaanalystin Friederike Otto auch russische Wissenschaftler und Experten des Deutschen Wetterdienstes beteiligt waren, hat die Temperaturhistorie der verfügbaren Messstationen mit statistischen Verfahren ausgewertet und sie zugleich systematisch mit den in Klimamodellen ermittelten Werten abgeglichen. Dabei kam heraus, dass ohne Hinzunahme der von Treibhausgasen wie Kohlendioxid angetriebenen starken Atmosphärenwärkung Werte wie im ersten Halbjahr kaum zu simulieren sind.

Extremhitzen wie die von 2020 wären um das Jahr 1900 mindestens zwei Grad Celsius kälter gewesen. Rechnerisch wäre nur alle 80.000 Jahre eine derartige Extremhitze ohne den Anstieg der vom Menschen verursachten Treibhausgase möglich gewesen. Was die Zukunft angeht, weisen die Modelle auf eine weitere überdurchschnittliche Erwärmung Sibiriens und damit auf eine wachsende Gefahr schmelzender, bisher ganzjährig gefrorener Permafrostböden innerhalb der Arktis hin – was irgendwann den Treibhauseffekt durch großflächige Ausgasungen von Methan noch deutlich verstärken dürfte. Noch sind die Forscher unsicher, wie schnell das passieren wird. Bis zum Jahr 2050 müsse aber, so die WWA-Wissenschaftler, mit einer Aufheizung der Großregion um 2,5 bis 7 Grad Celsius gerechnet werden. Mit der Unterscheidung bestätigt sich einmal mehr, dass sich die Arktis und der hohe Norden derzeit etwa zwei- bis dreimal so stark erwärmen wie der Rest der Welt. Das von Friederike Otto mitgegründete WWA-Konsortium hat bislang 350 Analysen von Extremwetterereignissen in jüngerer Zeit vorgenommen und etwa die Buschfeuer in Australien sowie die vorjährige Hitzewelle in Frankreich als wahrscheinliche Resultate des Klimawandels identifiziert. JOACHIM MÜLLER-JUNG

## Quantenspiegel mit Gitterstruktur

Einen Spiegel ganz besonderer Art haben Wissenschaftler vom Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching entwickelt. Statt wie üblich aus einer hochpolierten Metalloberfläche oder einem speziell beschichteten Glas besteht der Spiegel aus nur rund zweihundert Rubidiumatomen. Die Atome werden von sich überlagernden Laserstrahlen räumlich so fixiert, dass sie ein zweidimensionales Gitter bilden. In dem Gitter, das etwa sieben Mikrometer breit und nur wenige Dutzend Nanometer dick und deshalb mit bloßem Auge nicht zu erkennen ist, nehmen die Atome regelmäßige Plätze ein. Der mittlere Abstand der Rubidiumatome untereinander sei größer als die Distanz der Atome in einer Metalloberfläche. Dennoch reflektiere der Spiegel rund 60 Prozent des einfallenden sichtbaren Lichts, schreiben Jun Rui und seine Kollegen in der Zeitschrift „Nature“. Der Grund: Weil die Abstände der Atome geringer ausfallen als die Wellenlänge der einfallenden Lichtwellen, würden die Teilchen zu kollektiven Schwingungen angeregt werden. Das einfallende Licht „sehe“ keine einzelnen Atome, sondern eine verspiegelte Oberfläche. Der Spiegel, der der weltweit kleinste seiner Art sein dürfte, eröffnet nach Aussagen von Rui und seinen Kollegen neue Möglichkeiten bei der Übertragung von Lichtquanten und deren Verarbeitung. mli