

Das Magazin des Deutschen Museums  
02/2024 B 9797 10 Euro

# KULTUR & TECHNIK

Licht und Materie  
Sonderausstellung im Deutschen Museum

**Ein Roboter, der sieht, agiert und lernt,  
programmiert an einem Nachmittag.**

**Das ist Model-Based Design.**

*Für die Entwicklung eines fortschrittlichen humanoiden Roboters, der einen Ball erkennen, werfen und fangen kann, verwendeten DLR-Ingenieure Model-Based Design mit MATLAB und Simulink. Das Ergebnis: Das Team integrierte die Regelung und Bilderkennung für das Fangen, optimierte die Wurfbahn, generierte die Embedded Software und testete, dass alles richtig funktioniert – und das alles an einem Nachmittag. Entdecken Sie Model-Based Design mit MATLAB und Simulink unter [mathworks.de/mbd](https://mathworks.de/mbd)*

*Foto des autonomen Roboters Agile Justin. Mit freundlicher Genehmigung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR).*



# Liebe Mitglieder und Freunde des Deutschen Museums,

eine neue Sonderausstellung lädt Sie ein auf eine faszinierende Reise durch die Geheimnisse von Licht und Materie: Von den ersten Versuchen, Licht zu verstehen, bis zu den revolutionären Entdeckungen der Quantenmechanik, die unser Weltbild radikal umgestaltet hat.

Seit der frühen Neuzeit stehen zwei Modellvorstellungen von Licht besonders im Blickpunkt: Forscher wie Christiaan Huygens hingen einem Wellenbild an, während allen voran Isaac Newton Licht als einen Strom von Teilchen verstand. Im 19. Jahrhundert identifizierten James Clerk Maxwell und Heinrich Hertz Licht als elektromagnetische Welle – des Rätsels Lösung? Weit gefehlt, denn verschiedene Experimente im frühen 20. Jahrhundert passten einfach besser zur Teilchenvorstellung. Erst die Quantenmechanik „versöhnte“ Wellen- und Teilchenbild in einem schlüssigen Modell. Heute stehen wir an der Schwelle zu neuen Entdeckungen und Anwendungen der Quantenphysik. Von der Quantenkommunikation bis zur Quantenverschlüsselung verspricht die Quantentechnologie eine Zukunft, die ebenso faszinierend wie unvorhersehbar ist.

In unserer aktuellen Ausgabe lesen Sie aber nicht nur über über Akteure und Erkenntnisse der Erforschung des Lichts. Sie erfahren auch, wie Phänomene und Entdeckungen, die unsere Vorstellungskraft übersteigen, „sichtbar“ und „erfahrbar“ gemacht werden können. Hier haben unsere Museumswerkstätten wieder einmal meisterhafte Arbeit geleistet. Die Szenoramen, die dort in liebevoller Detailarbeit entstanden sind, können Sie in der Ausstellung bewundern.

Ich freue mich auf Ihren Besuch im Deutschen Museum!

Ihr Wolfgang M. Heckl



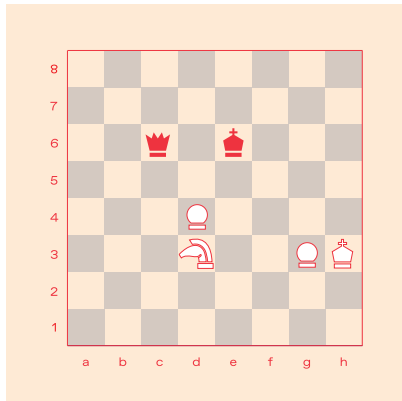
## Erratum: Kultur & Technik 1/2024, Seite 33

Bei der grafischen Übertragung der Spielaufstellung zum Interview Stefan Kindermann sind der Redaktion zwei Fehler unterlaufen:

1. Die weißen und die schwarzen Spielfelder waren verkehrt angeordnet.
2. Schwarze Dame und schwarzer König (in der Grafik rot dargestellt) waren vertauscht.

Untenstehende Grafik zeigt die korrekte Anordnung zur Frage:

„Weiß ist hier am Zug. Wie schätzen Sie die Lage ein? Ist Weiß im Vorteil?“



Anzeige

reisebank.  
Edelmetalle

Goldene  
Aussichten  
Sorglose  
Zukunft

Jetzt auf die Zukunft setzen  
und mit echten Werten glänzen!

Gold fasziniert seit Tausenden von Jahren und eignet sich ideal zum Schenken und Investieren.

Besuchen Sie unsere neue Filiale am Karlsplatz 8 oder 5 weitere Standorte in München! Mit unserer Erfahrung stehen wir Ihnen jederzeit als starker Partner beim Kauf von Gold zur Seite.



Jetzt Gold kaufen mit der Sicherheit einer Bank!



Bequem und sicher online bestellen:  
[reisebank.de](https://reisebank.de)

# INHALT

## Licht und Materie

- 08 – 15**                    **Wellen und Teilchen**  
Meilensteine auf dem Weg in die Quantenwelt von  
Eckhard Wallis und Katharina Stuhrberg
- 16 – 23**                    **Szenarien des Unsichtbaren**  
Ein Besuch in den Werkstätten von Christian Rauch
- 24 – 29**                    **Licht wie es keiner kennt**  
Theorien zur Natur des Lichts von Christian Sicka
- 30 – 35**                    **Eine neue Welt**  
Exzellenzcluster Quantenmechanik
- 36 – 37**                    **Unterwegs im Museum**  
Dem Licht auf der Spur mit Christian Rauch
- 38 – 41**                    **MikroMakro**  
Die Seiten für Kinder und Familien von Melanie Jahreis

## Magazin

- 42 – 45**                    Prof. Dr. Helmut Trischler geht in den Ruhestand  
Neuerscheinungen im Verlag Deutsches Museum
- 46 – 47**                    **Freundes- und Förderkreis**
- 48 – 49**                    **Mitgliederservice**
- 50**                            **Vorschau / Impressum**

# WELLEN UND TEILCHEN

Moderne Quantentechnologie nutzt Licht und Materie, um Informationen zu speichern, zu manipulieren und zu übertragen. **Eckhard Wallis und Katharina Stuhrberg** erläutern zentrale Meilensteine auf dem Weg in die Quantenwelt.

Quanten sind in, und das schon seit einiger Zeit: Neue Technologien auf Basis der Quantenphysik versprechen vielfältige Anwendungen und werden weltweit mit Milliardenbeträgen gefördert. In München soll in Analogie zum Silicon Valley das Munich Quantum Valley entstehen. Außerhalb der Forschungslandschaft stehen zahlreiche Quanten-Start-Ups, aber auch etablierte Großkonzerne in den Startlöchern, um die wirtschaftlichen Potenziale von Quantentechnologien zu sondieren: Leistungsfähigere Supercomputer, abhörsichere Verschlüsselung oder noch präzisere Sensorik.

Das Interesse ist also groß und die Fragen oft noch größer. Antworten gibt es – natürlich! – im Deutschen Museum. Die 2022 neu eröffneten Ausstellungen gehen an vielen Stellen auch auf die Quantenphysik und mögliche Anwendungen ein (siehe Rauch S. 32-37). Einen Überblick über die physikalischen Grundlagen der modernen Quantentechnologien bietet jetzt die neue Sonderausstellung „Licht und Materie“. In einem Streifzug durch das 20. Jahrhundert führt sie von den ersten Experimenten mit elektromagnetischen Wellen bis in heutige Forschungslabore.

## Warum Licht, warum Materie?

Die Botschaft hinter dem Ausstellungstitel: Die Beschäftigung mit der Wechselwirkung von Licht und Materie ist der Schlüssel zur Entwicklung der Quantenphysik

im frühen 20. Jahrhundert, aber auch zum Verständnis der heutigen Quantentechnologien. In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts hat sich für dieses Forschungsfeld der Name „Quantenoptik“ eingebürgert. Mit Licht ist hier und auch in der Ausstellung im weitesten Sinn jede elektromagnetische Strahlung gemeint, also auch „unsichtbares Licht“, wie Infrarotstrahlung oder Mikrowellen.

In Quantentechnologien werden Licht und Materie vor allem zur Speicherung, Manipulation und Übertragung von Information eingesetzt. Informationsträger sind Quantensysteme, wie etwa einzelne Atome oder Ionen, deren Zustand durch Licht manipuliert, ausgelesen und übertragen werden kann. Die großen technologischen Hoffnungen basieren auf Regeln der Quantenwelt, die an einigen Punkten von unserer Alltagserfahrung abweichen. Die Quantenzustände mehrerer Atome können beispielsweise miteinander verschränkt werden: Dadurch entsteht ein Gesamtsystem, das im wahrsten

Linienpektren verschiedener Elemente von Gustav Kirchhoff (1824–1887) und Robert Bunsen (1811–1899) aus dem Jahr 1860. Auf dem durchgehenden Farbband ganz oben wurden durch Absorption dunkle Linien hervorgerufen.



Sinne des Wortes mehr weiß, als die Summe der einzelnen Atome, und so effizientere Rechenverfahren ermöglicht. Auch die Vorstellung einer Messung hat in der Quantenphysik eine wichtige andere Eigenschaft: Das Auslesen von Information wirkt immer auf das Quantenobjekt zurück. Werden geheime Informationen durch den Quantenzustand von Photonen übertragen, so hinterlässt der Versuch des Abhörens zwangsläufig Spuren im Signal.

Dieses Verhalten von einzelnen Quantenteilchen wurde in der theoretischen Physik schon in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts erforscht. Experimente mit einzelnen Quantenteilchen wurden aber erst ab den späten 1970er Jahren möglich. Die Ausstellung zeigt zwei wichtige Entwicklungslinien auf dem Weg dahin. Auf der einen Seite steht das Forschungsfeld der Spektroskopie, das die Energiestruktur von Atomen mit elektromagnetischer Strahlung hochpräzise untersucht. Auf der anderen Seite die Entwicklung des Lasers, ohne den heute kaum ein Labor noch auskommt. Am Anfang der ganzen Geschichte steht aber die fundamentale Frage: Was ist eigentlich Licht?

## Was ist Licht?

Auf der Suche nach einer Definition von Licht muss sich selbst der Duden winden: „etwas, was die Umgebung hell macht, erleuchtet und dadurch Dinge sichtbar macht“<sup>1</sup>. Was ist dieses „Etwas“, wie macht es Dinge sichtbar? Wie kann man sich Licht vorstellen?

Eine große Schwierigkeit gibt es: Wir können Licht nicht sehen, tasten oder hören. Anders als Bakterien können wir es also nicht unter das Mikroskop legen und einen sinnlichen Eindruck gewinnen. Physikalische Vorstellungen von Licht sind deshalb immer abstrakte Modellvorstellungen, die das Verhalten von Licht erklären sollen. Das Bild von Lichtstrahlen beschreibt zum Beispiel die Ausbreitung von Licht, die Perspektive und die Funktion von Brillen oder Fernrohren. Verfeinert man die Modellvorstellungen, so lassen sich weitere oder andere Phänomene erklären.

Das zeigt sich besonders gut am Wellenmodell des Lichts. Um das Jahr 1800 untersuchte der britische Arzt und Universalgelehrte Thomas Young (1773–1829) die Eigen-

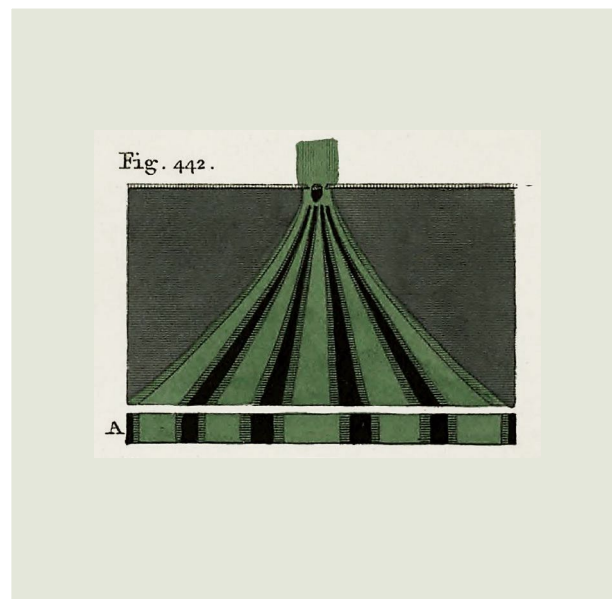
schaften von Licht in verschiedenen Experimenten. Heute ist von diesen Experimenten vor allem sein Doppelspaltexperiment bekannt: Wenn Licht durch zwei Spalten tritt, so entstehen nicht etwa zwei schmale Schatten, sondern eine Abfolge von hellen und dunklen Streifen. Die Schatten entstanden auch dort, wo eigentlich nach den Regeln der Strahlenoptik Licht sein müsste. Der Schlüssel zur Deutung dieses Experiments kam aus einem anderen Bereich: Young hatte zuvor mit akustischen Schwingungen und Wellen in Wasser experimentiert. Deshalb kannte er das Phänomen der Interferenz: Treffen Wellenberge immer auf Wellenberge so verstärken sie sich, trifft jedoch Berg auf Tal, so löschen sie sich aus. Wo sich also Lichtwellen aus den beiden Spalten gegenseitig auslöschten, waren dunkle Streifen zu sehen, so Youngs Deutung.

## Die Bedeutung der Wellenlänge

Die theoretischen Arbeiten von James Clerk Maxwell (1831–1879) und die Experimente von Heinrich Hertz (1857–1894) betteten das Wellenmodell des Lichts in die Physik von Elektrizität und Magnetismus ein: Aus den vier knappen Gleichungen, mit denen Maxwell das Verhalten von elektrischen und magnetischen Feldern beschrieb, ließ sich die wellenartige Ausbreitung von Schwingungen dieser Felder ableiten. Hertz gelang 1886 die Erzeugung und die Detektion solcher Wellen im Labor. Genauso wie Licht ließen sich diese elektromagnetischen Wellen brechen, reflektieren und polarisieren. Das für uns sichtbare Licht wurde damit als Teil

eines großen Spektrums elektromagnetischer Wellen erkannt.

Unsere Augen können nur Wellen mit einer Wellenlänge zwischen 400 und 750 nm (Nanometer) sehen. Andere elektromagnetische Wellen sind Infrarot- und UV-Strahlen, Mikrowellen und Radiowellen, aber auch Röntgenstrahlen. Wie diese Wellen auf Materie wirken, hängt entscheidend von der Wellenlänge ab, aber dazu später mehr!



So zeichnete Thomas Young die von ihm im Doppelspaltversuch beobachteten hellen und dunklen Streifen.

Um das Jahr 1900 war das Wellenmodell des Lichts also wohl etabliert, doch zugleich sammelten sich Beobachtungen, die von diesem Modell nur schwer erklärt werden konnten, etwa der photoelektrische Effekt: Die Einstrahlung von ultraviolettem Licht kann elektrische Ladungen aus Metallplatten herauslösen. Dieser Effekt setzt nur bei sehr kurzen Wellenlängen ein, dafür aber, wenn die Wellenlänge passt, auch bei sehr schwachen Intensitäten.

Ein anderes Problem der Wellentheorie erwuchs aus einem ursprünglich ganz praktischen Problem: Wie konnte man zuverlässig die Helligkeit unterschiedlicher Lampen messen und diese miteinander vergleichen? Diese Frage erforschte ab 1889 der Physiker Otto Lummer (1860–1925) im Strahlungsmesslabor der neu gegründeten Physikalisch-Technischen Reichsanstalt (PTR) in Berlin. Lummer untersuchte insbesondere, wie sich die Leuchtstärke eines glühenden Objekts über die unterschiedlichen Farbanteile des Lichts verteilte. Er bestimmte präzise, wie sich diese Farbverteilung mit der Temperatur änderte.

Die theoretische Berechnung der Messkurve erwies sich als schwierig. Max Planck präsentierte im Jahr 1900 eine passende mathematische Formel, die allerdings nur mit einem Rechenrick funktionierte. In seiner Rechnung führte er eine feste Energieportion  $E = h \cdot f$  ein. (Die Energiemenge  $E$  ist gleich der Schwingungsfrequenz der Lichtwelle  $f$  mal der Proportionalitätskonstante  $h$ .) Planck sprach selbst von einem „Akt der Verzweiflung“<sup>2</sup>, da er selbst nicht genau sagen konnte, was sich physikalisch hinter diesen festen Energieportionen verbarg. Erst 1905 schlug Albert Einstein vor, diese als reale physikalische Objekte, als „Lichtquanten“ zu verstehen. Licht mit kurzer Wellenlänge hat eine hohe Schwingungsfrequenz und folglich eine hohe Energie. Das würde gut dazu passen, dass nur Licht kurzer Wellenlänge genügend Energie mitbringt, um elektrische Ladungen aus einer Metallplatte zu lösen.

## Ein theoretischer Rahmen

Damit stand am Anfang des 20. Jahrhunderts die etwas paradoxe Situation, dass zwar das Wellenmodell des Lichts viele Phänomene sehr gut erklärte, in anderen Experimenten aber offenbar eine Vorstellung von Lichtportionen oder Lichtteilchen bemüht werden musste, für die sich bald der Begriff „Photon“ einbürgerte. Um die Sache noch mysteriöser zu machen, wurde dieser Dualismus von Wellen- und Teilchenverhalten bald auch bei Materieteilchen, wie etwa Elektronen beobachtet. Einen theoretischen Rahmen lieferte in den nächsten Jahrzehnten die Quantenphysik: Das, was sich

wellenartig ausbreitet, definiert zunächst einmal nur eine Wahrscheinlichkeit, das Quantenobjekt bei einer Messung an einem bestimmten Ort zu finden.

## Atombau und Spektrum

„Seit der Entdeckung der Spektralanalyse konnte kein Kundiger zweifeln, dass das Problem des Atoms gelöst sein würde, wenn man gelernt hätte, die Sprache der Spektren zu verstehen.“ Mit diesem Satz eröffnete der Münchner Physiker Arnold Sommerfeld sein im Jahr 1919 publiziertes Lehrbuch *Atombau und Spektrallinien*. Spektren, Spektrallinien und Spektralanalyse – Hinter diesen sperrigen Begriffen steckt im Prinzip ein Naturphänomen, das wir eher mit Wetter als mit Atomphysik verbinden: der Regenbogen! Wenn man weißes Licht durch ein Prisma schickt, so spaltet es sich in seine Farbbestandteile auf. Wenn man diese Aufspaltung sehr fein vornimmt, kann man im Sonnenlicht dunkle Linien beobachten – erstmals gelang das Joseph Fraunhofer (1787–1826) im Jahr 1814. Macht man das gleiche mit dem Licht einer Leuchtstofflampe – die Älteren erinnern sich! – so sind statt einem satten Farbband nur wenige bunte Linien zu sehen.

Diese Linien entsprechen scharf definierten Wellenlängen. Sie entstehen, wenn Atome Licht aussenden (wie in der Leuchtstofflampe) oder Licht absorbieren. Das Linienmuster ist charakteristisch für die jeweilige Atomsorte. Was diese Linien zeigen: Ob Licht emittiert oder absorbiert wird, hängt von der Wellenlänge ab. Wenn die Wellenlänge nicht zum Atom passt, geht das Licht völlig unbeeindruckt daran vorbei.

Das Verhalten lässt sich mit dem Schwingungsmodell des Lichts gut beschreiben: Wie eine Stimmgabel, die nur eine Tonhöhe aussendet, und auch nur von einer Tonhöhe zum Schwingen angeregt werden kann, haben auch die Atome einen Satz an „Resonanzwellenlängen“. Aber warum befinden sich die Spektrallinien genau an diesen Positionen? Was verraten uns die Resonanzwellenlängen über den Aufbau des Atoms? Die Lösung dieser Fragen gehörte zu den frühen Leistungen der Quantenphysik: Nicht nur das Licht transportiert die Energie in kleinen Portionen, die von der Wellenlänge abhängen. Auch die Atome selbst können nur ganz bestimmte Energiebeträge aufnehmen. Nur wenn die Energie und damit die Wellenlänge eines Lichtquants zu einem möglichen Energiezustand des Atoms passt, kann das Photon absorbiert werden. Umgekehrt kann sich das Atom nur in bestimmten Energiezuständen befinden, und deshalb auch nur ganz bestimmte Energieportionen abstrahlen.

Das Verständnis des Zusammenhangs zwischen Atombau und Spektrum beflügelte die Anwendungen. Gleich einer Stimmgabel können Atome als Referenz für die

Frequenzen elektromagnetischer Strahlung benutzt werden. Besondere Bedeutung erlangte die Kontrolle von Frequenzen im Mikrowellenbereich in der Radar-Entwicklung im zweiten Weltkrieg und später im kalten Krieg. Die Physik von Licht und Materie, und insbesondere die Kontrolle von Schwingungsfrequenzen durch Spektrallinien von Atomen und Molekülen wurde so zu einer Angelegenheit der nationalen Sicherheit der Großmächte. Unsere elektronische Technik schwingt deshalb bis heute im Takt der Atome: Die Frequenzen von Spektrallinien geben das Ticken der hochpräzisen Atomuhren in den nationalen Zeitlaboren vor.

## Die Entwicklung des Lasers

Die Wechselwirkung von Licht mit Atomen und Molekülen sollte unsere Welt noch in anderer Hinsicht prägen. Anfang der 1960er-Jahre hielt ein neues und vielseitiges Werkzeug Einzug in Forschung und Technik: Der Laser (light amplification by stimulated emission of radiation). Mit dem Laser war etwas bis dahin Unmögliches gelungen: Die Verstärkung von Lichtsignalen. Verstärkertechnik für Radio- und Mikrowellen war Mitte des 20. Jahrhunderts bekannt. Je kleiner die Wellenlängen wurden, desto kleiner musste die Verstärkerelektronik werden. Lichtwellen im Bereich unter einem Mikrometer lagen damals weit jenseits der Möglichkeiten elektronischer Herstellungstechniken.

Die Spektroskopie bot hier eine Lösung. Schon Anfang des 20. Jahrhunderts hatte Albert Einstein den Mechanismus der „stimulierten Emission“ beschrieben. Wenn ein Lichtquant mit der passenden Wellenlänge auf ein Atom in einem energiereichen Zustand trifft, dann wird das Atom dazu angeregt, die Energie in Form eines Lichtquants abzugeben. Das zweite Lichtquant hat dabei exakt die gleichen Eigenschaften und die gleiche Richtung wie das erste. Ein eintreffendes Lichtsignal wird durch diesen Mechanismus also verstärkt.

Um die Lichtverstärkung technisch zu erreichen, werden drei wesentliche Komponenten benötigt: ein optisches Verstärkermedium, eine Energiezufuhr zum Medium (Pumpsystem) und ein Mechanismus zum Einfangen des erzeugten Lichts (Resonator). Das Pumpsystem bringt die Atome des Verstärkermediums in einen Zustand mit hoher Energie. Wenn dann Licht der passenden Wellenlänge die angeregten Atome trifft, geben sie durch stimulierte Emission eine exakte Kopie der anregenden Strahlung ab. Der Resonator spiegelt dieses Licht zurück ins Verstärkermedium. So schaukelt sich die Lichtverstärkung immer weiter auf.

Die Eigenschaften von Laserlicht unterscheiden sich deutlich von denen anderer Lichtquellen. Im Gegensatz zum Sonnenlicht oder einer Leuchtdiode erzeugen

Laser monochromatische Strahlung, das heißt Licht einer festen und ganz bestimmten Wellenlänge. Dieses Licht kann sehr hohe Intensitäten erreichen und kontinuierlich oder in äußerst kurzen Pulsen abgestrahlt werden. Im Gegensatz zu anderen Lichtquellen kann ein Laser schmale und fast perfekt gerade Strahlen erzeugen. Bei Laserlicht schwingen die elektromagnetischen Wellen außerdem im Gleichtakt, diese Eigenschaft bezeichnet man als Kohärenz. Interferenzphänomene können deshalb mit Lasern besonders gut erzeugt werden.

Mit der Erfindung des Lasers wurde eine Lichtquelle verfügbar, deren Eigenschaften sehr genau kontrolliert werden konnten, insbesondere mit Blick auf die Frequenz. Laser wurden so zu einem bevorzugten Werkzeug in der Spektroskopie, um die Reaktion von Atomen auf bestimmte Wellenlängen genau zu untersuchen. Ab den 1970er Jahren eröffneten sich dadurch neue Möglichkeiten für die experimentelle Untersuchung der Quantenphysik des Lichts. Die Quantenphysik wurde bis dahin vor allem auf Phänomene angewandt, an denen Atome in sehr großer Zahl beteiligt waren, etwa bei den Linienspektren von leuchtenden Gasen oder bei den Vorgängen in einem Laser. Betrachtet man einzelne Atome und Photonen sagt die Quantenphysik aber ein sehr ungewöhnliches Verhalten voraus.

Viele Prozesse in der Quantenwelt sind offenbar nur vom Zufall bestimmt. Messungen haben unerwartete Wirkungen auf das System selbst. Werden die gemessenen Eigenschaften womöglich erst im Moment der Messung festgelegt? Experimente mit einzelnen Quantenobjekten waren zu dieser Zeit noch nicht möglich. Stattdessen mussten Forschende in der Physik auf Gedankenexperimente zurückgreifen, um die Quantenwelt zu verstehen (siehe Sicks S. 18-25).

## Ionen in der Falle

Erst seit den späten 1970er-Jahren ist es möglich, Atome und Photonen zu isolieren und ihre Wechselwirkung zu studieren. In Ionenfallen können heute einzelne geladene Atome (Ionen) gespeichert werden. Mit Laserlicht kann ihre Bewegung und ihr Quantenzustand kontrolliert werden. Photonen werden in Hohlraumresonatoren gefangen, in denen das Licht an gegenüberliegenden Spiegeln hin und her geworfen wird. Eine besondere Möglichkeit der Kontrolle von Materie mit Licht bietet die „Laserkühlung“. Durch eine genaue Anpassung des Laserlichts auf die Bewegung der Atome kann das Laserlicht einen bremsenden Druck auf eine Atomwolke ausüben. Da Wärme nichts anderes als Bewegung ist, kann auf diese Weise eine Atomwolke mit Laserlicht nah an den absoluten Nullpunkt herunter-

gekühlt werden. Mithilfe der Laserkühlung gelang es Mitte der 1990er-Jahre, einen besonderen Materiezustand herzustellen: das Bose-Einstein-Kondensat. Bei extrem niedrigen Temperaturen treten die quantenphysikalischen Welleneigenschaften der Atome hervor. So wie das Licht im Laser, schwingen sie im Gleichtakt und können zur Interferenz gebracht werden.

Damit schließt sich Ende des 20. Jahrhunderts der Kreis: Was um 1900 mit einem zunächst unbefriedigenden Nebeneinander von Wellen- und Teilcheneigenschaften des Lichts begann, ermöglicht uns heute die experimentelle Arbeit mit den Wellen- und Teilcheneigenschaften von Materie.

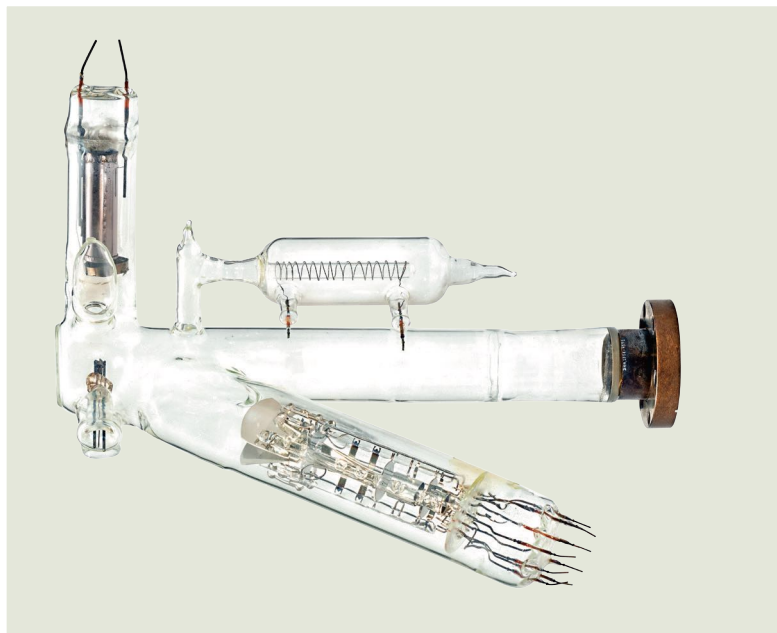
## Zukunft im Licht der Quanten

Im Oktober 1979 diskutierten ein Physiker und ein Informatiker in einem Swimmingpool in Puerto Rico über Quantenphysik und Kryptografie. So erinnert sich zumindest der Informatiker, der Kryptografie-Experte Gilles Brassard. Sein Gesprächspartner Charles Bennett und er hatten zuvor zunächst spielerisch darüber nachgedacht, wie man die mysteriösen Eigenschaften der Quantenphysik rein hypothetisch für fälschungssichere Banknoten oder Verschlüsselungsverfahren nutzen könnte. Natürlich wurde

das Forschungsfeld der Quantenkryptografie nicht allein durch dieses einzelne Gespräch am Beckenrand begründet. Vielmehr lagen Gedankenspiele über Technologien nach den Regeln der Quantenwelt zu dieser Zeit in der Luft. Doch die Zusammenarbeit von Bennett und Brassard mündete 1984 in ein erstes potenziell umsetzbares Schema für Quantenkryptografie.

Die Quantenkryptografie ist heute nur eine von vielen möglichen Technologien auf Basis der Quantenphysik. Aber nicht nur die wirtschaftlichen und industriellen Möglichkeiten dieser Technologien treiben die Forschung an. Denn die Beschäftigung mit Quantentechnologien wird der hier kurz angerissenen Geschichte von Licht und Materie sicher noch das ein oder andere Kapitel hinzufügen. Seien Sie gespannt auf das, was noch kommt. Und was bisher geschah, finden Sie ab sofort 3D und zum Mitmachen in der Sonderausstellung „Licht und Materie“.

Mit einer Ionenfalle wie unten abgebildet wurde im Jahr 1979 erstmals ein Ion, d. h. ein geladenes Atom, eingefangen und für das Auge sichtbar gemacht.



### Verweise

- 1 [www.duden.de/rechtschreibung/Licht](http://www.duden.de/rechtschreibung/Licht)
- 2 Planck an Robert Williams Wood, 7. Oktober 1931, zitiert nach Armin Hermann, Frühgeschichte der Quantentheorie (1899–1913), Baden 1969, S.31

**Eckhard Wallis M.Sc.** ist Physiker und wissenschaftlicher Mitarbeiter am Deutschen Museum. Er betreut das Sammlungsgebiet Optik und ist Teil des kuratorischen Teams der Sonderausstellung Licht und Materie.

**Katharina Stuhrberg** ist wissenschaftliche Volontärin am Deutschen Museum und Teil des kuratorischen Teams „Licht und Materie“.



Bildhauerin Sabine Köhl hat Bösewicht Auric Goldfinger und Geheimagent James Bond modelliert – in dem legendären Kinofilm von 1964 kommt eine fiktive Laserkanone zum Einsatz.

# SZENARIEN DES UN- SICHTBAREN

Meisterhaft gestaltete Modelle und „Szenoramen“ aus den Werkstätten des Deutschen Museums erzählen die spannende Geschichte von den ersten Erkenntnissen über die Natur des Lichts bis zur modernen Quantenphysik.

**Von Christian Rauch**

2019 entschied das Deutsche Museum, eine neue Sonderausstellung „Licht und Materie“ zu bauen. Ein wichtiges Thema: Aus dem Alltag sind Laser, Glasfaser und Kernspintomograph nicht mehr wegzudenken. Aber auch ein schwieriges: Licht als Teilchen und Welle, Doppelspaltexperiment, Planck und Einstein, Quantentheorie. „Das Thema zu veranschaulichen, war eine große Herausforderung“, sagt Eckhard Wallis. Der Physiker, der seine Masterarbeit in experimenteller Quantenoptik an der Ludwig-Maximilians-Universität geschrieben hatte, kam vor fünf Jahren als Volontär ins Deutsche Museum. Heute ist er kuratorischer Mitarbeiter im Ausstellungsprojekt „Licht und Materie“. Hier arbeitet er mit den Bildhauer- und Modellbauer-Werkstätten und vielen anderen Bereichen im Museum für die neue Sonderausstellung zusammen.

## Vom Diorama zum Szenorama

„Licht und Materie“: Das ist eine Jahrhunderte lange Forschungsgeschichte mit aufwändigen Experimenten und Entdeckungen, komplizierten Theorien und Formeln. „Diese Geschichte beinhaltet viele spannende, teils auch tragische Geschichten von Menschen“, sagt Eckhard Wallis. Klassische Dioramen, wie sie im Deutschen Museum seit langem erfolgreich eingesetzt werden, wären diesem komplexen Geschehen nicht gerecht geworden. „Wir haben uns daher sogenannte Szenora-

men ausgedacht“, so Wallis. Während ein Diorama eine einzelne Szene in aller Tiefe beleuchtet, kombiniert ein Szenorama Modelle, Exponate, Zeichnungen und Texte, zwei- und dreidimensional, über- und nebeneinander: eine Collage der Physikgeschichte.

## Der erste Doppelspaltversuch

Im 17. Jahrhundert galt Licht im Rahmen der Newtonschen Physik als Strahl von ominösen, kleinsten Körnchen oder „Korpuskeln“. Man konnte es bündeln, damit Fernrohre und Teleskope bauen. Mehr wusste man nicht darüber. Dass es eine Welle sein könnte, wäre kaum jemandem eingefallen.

Der Niederländer Christiaan Huygens (1629–1695) zog allerdings schon sehr früh Analogien zwischen den mechanischen Wellen des Wassers und Schalls und den Eigenschaften des Lichts.

Dann kam Thomas Young (1773–1829). Der wohlhabende Londoner Augenarzt und Gentleman beschäftigte sich mit Physik und experimentierte auch mit der Ausbreitung von Wellen in Wasser. Später begann er mit der Erforschung des Lichts: Mit einem Spiegel an seinem Fensterladen lenkte er Sonnenlicht in sein Zimmer. Den Strahl ließ er durch zwei in ein Papier geritzte Spalten treten. Das hinterließ nicht nur einen schlichten Schatten an der Wand, sondern Streifen im Schatten – ein Phänomen, das so gar nicht zur Korpuskeltheorie pass-

te. Durch seine Erfahrung mit Wellen hatte Young eine mögliche Deutung parat: Interferenz! Die Wellen löscht sich an manchen Stellen gegenseitig aus. Dieser erste Doppelspaltversuch, den bis heute viele aus dem Physikunterricht kennen, stützte damit sehr klar die Wellentheorie des Lichts.

Das erste Szenorama in der Sonderausstellung veranschaulicht Newtons Lichttheorie und Christian Huygens frühe Wellengedanken in Text und Grafik. Darunter platziert wurde ein elegant in Gehrock und Stiefeln gekleideter Thomas Young mit seinen Experimenten. Sein Labor ist bewusst grau modelliert, die Versuchsgeschäfte farblich hervorgehoben und von der Modellbauabteilung maßstabsgerecht nachgebaut. Beim Doppelspaltversuch aber gab es ein Problem, wie Bildhauerin Sabine Köhl erklärt: „Aufgrund des winzigen dünnen Pappkärtchens und der feinen Streifen im Wellenmuster hätten wir diese Szene sehr groß bauen müssen, um das Entscheidende überhaupt sehen zu können. Wir entschieden uns daher für Auszüge.“ So prangt nun unten im Szenorama ein großes rundes Muster sich überlagernder Wellen – das, was Thomas Young als physikalisches Resultat erhielt. Der Physiker selbst steht daneben mit beidseitig erhobenen Händen und nach oben gerichteten Handflächen. „Ich habe ihn so modelliert, um auch seine Unsicherheit auszudrücken“, sagt Sabine Köhl. „Denn er war selbst nicht wirklich sicher, die Wellennatur des Lichts entdeckt zu haben.“

## Eine Berliner Straßenlaterne

Doch die Wellennatur wurde von Youngs Nachfolgern bestätigt. Und auch der Teilchenaspekt sollte schließlich, in ganz neuer Form, wiederbelebt werden – im Rahmen der Quantenphysik. Daher springt das zweite Szenorama in das Berlin der 1890er Jahre. Auf einem historischen Foto sieht man das Gebäude der eben gegründeten Physikalisch-Technischen Reichsanstalt PTR (Vorgängerin der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt). Davor steht dreidimensional modelliert eine historische Straßenlaterne. Die Bildhauerin Elisabeth Straßer modellierte den Kandelaber, die Kolleginnen aus der Modellbauwerkstatt löteteten so manche Verzierung hinzu und kümmerten sich mit den Elektronikern um das warme Licht, das im Szenorama wie damals auf das Gebäude der PTR scheint.

In der Reichsanstalt vermass man zu jener Zeit die Lichtstärken unterschiedlicher Leuchtquellen – elektrische Lampen machten der Gaslampe zunehmend Konkurrenz. In diesem Rahmen experimentierte der Physiker Otto Lummer (1860–1925) in den Laboren der PTR ab 1897 mit einem schwarzen Strahler: So nennt man ein Gerät, das so gut wie kein Licht oder Wärme

reflektiert, aber durch eine schmale Öffnung selbst Licht ausstrahlt. Dieses ist entsprechend sehr rein, wird also nur von seiner Frequenz, und keiner weiteren Störung wie der Eigenfarbe des Strahlers, beeinflusst. Bei seinen Messungen bestimmte Lummer sehr exakt, wie sich bei einem schwarzen Strahler die Intensität des Lichts auf die verschiedenen Wellenlängen verteilt, und inwieweit diese Verteilung von der Temperatur abhängt.

Wenige Jahre später machte sich Max Planck (1858–1947) daran, Lummers Messkurven mathematisch zu erklären. Als Rechenrick unterteilte er die Lichtenergie in kleine Portionen, gab diesen aber noch keine physikalische Bedeutung). Albert Einstein interpretierte sie 1905 als physikalisch reale „Lichtquanten“. Nun bestand das Licht, wie schon 300 Jahre zuvor postuliert, auch aus Teilchen: Photonen, die jeweils eine minimal kleine Energiestufe tragen.

Unter der Straßenlaterne des zweiten Szenoramas stehen die Protagonisten dieser Erkenntnisse: Lummer als Figur in seinem Labor, neben ihm das kleine Schwarzkörper-Gerät, das die Modellbau-Abteilung des Deutschen Museums millimetergenau nach historischen Plänen aus Berlin fertigte. Und ganz unten eine Originalschrift von Max Planck mit seiner berühmten Formel  $E = h \cdot f$ . Doch das ist nicht alles: „In jedem Szenorama findet sich ein original erhaltenes Exponat“, erklärt Eckhard Wallis. An dieser Station befindet sich neben der modellierten Straßenlaterne eine über 100 Jahre alte, original erhaltene Kohlefaden-Glühlampe, so wie sie einst vor dem Labor Otto Lummers geleuchtet haben könnte. Die Exponate wurden von den Restauratoren des Deutschen Museums aus dem Depot geholt und für die Ausstellung wieder auf Hochglanz gebracht.

An den Szenoramen der neuen Sonderausstellung sind also viele Abteilungen und Menschen des Deutschen Museums beteiligt: Neben den Bildhauerinnen und Mitarbeitern aus Modellbau, Elektronik und Restaurierung auch die Schreiner und Malerinnen für die Gehäuse, die Setzerei, Druckerei und Buchbinderei für die Texte.

## Krieg und Popkultur in der Quantenphysik

Ein weiteres Szenorama zeigt die Zeit des Zweiten Weltkriegs: Im Labor des Massachusetts Institute of Technology (MIT) feilte man Tag und Nacht an immer besseren Radargeräten. Längst war das elektromagnetische Spektrum, diesseits und jenseits des sichtbaren Lichts, den Physikern und Ingenieuren bekannt. Langwelligere Mikrowellen gehörten im Radarbereich zu einer der wichtigsten technischen Anwendungen, vor allem



Bildhauerin Elisabeth Straßer zeigt die junge jüdische Physikerin Alice Golsen, wie sie ihrem Doktorvater, Professor Walter Gerlach, ihren Versuch zur Messung des Strahlungsdrucks erklärt.

in Kriegszeiten. Im Szenorama ist das MIT-Lab ein Papiertheater, die Radarschüssel ein 1:8-Modell und das Display eines damaligen Radargeräts wird simuliert. „Der Krieg hat die Forschung in diesem Bereich unheimlich beschleunigt“, gibt Eckhard Wallis zu bedenken. 15 Jahre nach Ende des Kriegs entwickelt der amerikanische Physiker Theodore Maiman den ersten Laser. Für dieses Szenorama zeigt Sabine Köhl aus der Bildhauer-Werkstatt Mister Maiman in Anzug und Krawatte. Neben ihm seine Versuchsgeräte: Vor allem die wendelförmige Blitzlampe, die einen Rubinstab beleuchtete. Und der emittierte bekanntlich scharfe Lichtpulse, die ersten Laserstrahlen. Ohne Quantenphysik hätte das nicht funktioniert.

Weiter unten im Szenorama entführt Sabine Köhl den Betrachter in die Pop- und Unterhaltungskultur. Denn von Maimans Lasererfindung machte ein Fotograf ein übertriebenes Bild: Dafür sollte der Erfinder eine größere Wendel zur Lichterzeugung zur Hand nehmen, als im Versuch eigentlich eingesetzt worden war. Das Foto ging um die Welt. Bald waren Laserkanonen mit großen, glänzend geschwungenen Lichtwendeln aus Comics und Science-Fiction-Filmen nicht mehr wegzudenken. Im Kinostreifen „Goldfinger“ (1964) will Goldfinger (Gert Fröhe) seinen Kontrahenten James Bond (Sean Connery) mit einer mächtigen Laserkanone zersägen. Auch diese beiden, den Schurken und den berühmten Helden, hat Sabine Köhl für das Szenorama nachgebaut. Seinen kommerziellen Siegeszug trat der Laser allerdings nicht mit blitzenden leistungsstarken Kanonen, sondern klein, friedlich und unterhaltsam in CD-Laufwerken und Glasfaserkabeln an.

## Eine Wolke voller Formeln

Ins Szenorama „Gedankenexperimente“ hat Bildhauerin Sibylle Kobus eine große Wolke in die Mitte gehängt. Sie ist übersät mit Formeln. Manch eine ist vielleicht bekannt, viele sehen kompliziert und wie aus einer anderen Welt aus. Entsprungen sind viele den Köpfen bekannter Physiker wie Albert Einstein oder Niels Bohr. Diese beiden setzte Sibylle Kobus unter ihre Formelwolke.

Bekanntlich waren die Herren hinsichtlich der Quantenphysik sehr uneins, aber ihre Debatte trug maßgeblich dazu bei, die besonderen Eigenschaften der Quantenwelt besser zu verstehen. Wie etwa die geisterhaft anmutende Quantenverschränkung: Miteinander verschränkte Teilchen können, auch wenn sie weit voneinander entfernt sind, physikalisch nicht als einzelne Teilchen beschrieben werden, sondern nur als Gesamtsystem.

Erstmals beschrieben wurde diese vermeintlich „spuk-

hafte Fernwirkung“ in einem Gedankenexperiment von Einstein, Podolsky und Rosen. Für die experimentelle Untersuchung dieses Phänomens erhielten Alain Aspect, John Clauser und Anton Zeilinger im Jahre 2022 den Physik-Nobelpreis. Die drei Physiker zeigt Sibylle Kobus in ihrem Szenorama. Und auch Chien-Shiung Wu hat sie nicht vergessen. Die chinesisch-amerikanische Physikerin erzeugte schon in den fünfziger Jahren erstmals verschränkte Photonen, wenn auch eher am Rande. Bekannt wurde sie für ihre bahnbrechende Forschung zur Parität von Elementarteilchen. Einen Nobelpreis erhielt sie allerdings nie dafür.

## Frauen in der Physik

Wie in vielen anderen Bereichen, fristeten Frauen in der Physik lange ein Schattendasein. Dabei waren sie ebenso schlau wie die Männer. Im letzten Szenorama der Reihe hat Elisabeth Straßer exemplarisch die Rolle von Alice Golsen hervorgehoben. Die 1889 in Wiesbaden geborene Jüdin besuchte das erste Mädchen-gymnasium Deutschlands bis zum Abitur und studierte anschließend Physik und Mathematik auf Lehramt. Neben dem Schuldienst ließ die Wissenschaft sie nicht los, und sie begann 1920 eine Doktorarbeit an der Universität Frankfurt.

Ihr Professor Walter Gerlach betraute sie mit einer schwierigen Aufgabe: den Strahlungsdruck genau zu messen. Golsen macht sich selbstbewusst und voller Eifer, meist nachts und in ihrer Freizeit, daran. Vor einer Tafel erklärt sie ihre Versuchsanordnung. Gerlach staunt, doch Golsen hat Erfolg und misst präzise. Das alles hat Elisabeth Straßer in diesem Szenorama veranschaulicht. Heute wird der Strahlungsdruck praktisch genutzt, um Atome abzubremsen und einzufangen. Alice Golsen konnte das leider nicht mehr erleben. Als Jüdin musste sie 1939 aus ihrer deutschen Heimat fliehen. 1940 beging sie in Großbritannien Selbstmord.

„Licht und Materie“ – das ist eine wechselvolle Geschichte menschlicher Schicksale, großartiger Entdeckungen, intensiver Dispute. In sechs großen Szenoramen haben die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der Werkstätten im Deutschen Museum diese Geschichte meisterhaft dargestellt. An mehr als 20 weiteren interaktiven Stationen und zahlreichen Exponaten in der neuen Sonderausstellung kann man das Thema vertiefend für sich entdecken.

Kurator Eckhard Wallis freut sich, dass die spannende Reise vom Licht bis zur Quantenphysik im Deutschen Museum nun fertig ist. Und die Ausstellung wird bleiben: bis Ende 2025 als Sonderausstellung und voraussichtlich ab 2028 auch als Dauerausstellung.



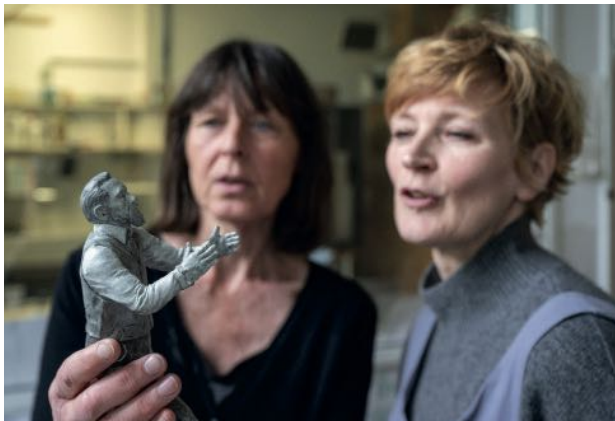
Bilder von oben nach unten:  
Elisabeth Straßer, Eckhard Wallis und Sabine Köhl in den Werkstätten des Deutschen Museums.

In der Bildhauerwerkstatt des Deutschen Museums ist eine zweidimensionale Skizze stets die Basis für die dreidimensionalen Figuren.

Dreidimensional und lebensecht: Der Physiker Otto Lummer in den 1890er Jahren.



Bildhauerei trifft Modellbau: Otto Lummer an seinem Schwarzkörper-Versuchsgerät, das die Modellbau-Werkstatt nach historischer Vorlage für die neue Ausstellung fertigte.



**Christian Rauch** ist freier Journalist für Zeitungen und Zeitschriften. Seine Schwerpunkte sind Wissenschaft, Technik, Reise und Tourismus.

# LICHT WIE ES KEINER KENNT

Experimente mit Photonen beweisen die  
eigenartigen Eigenschaften der Quantenmechanik  
Von Christian Sicka

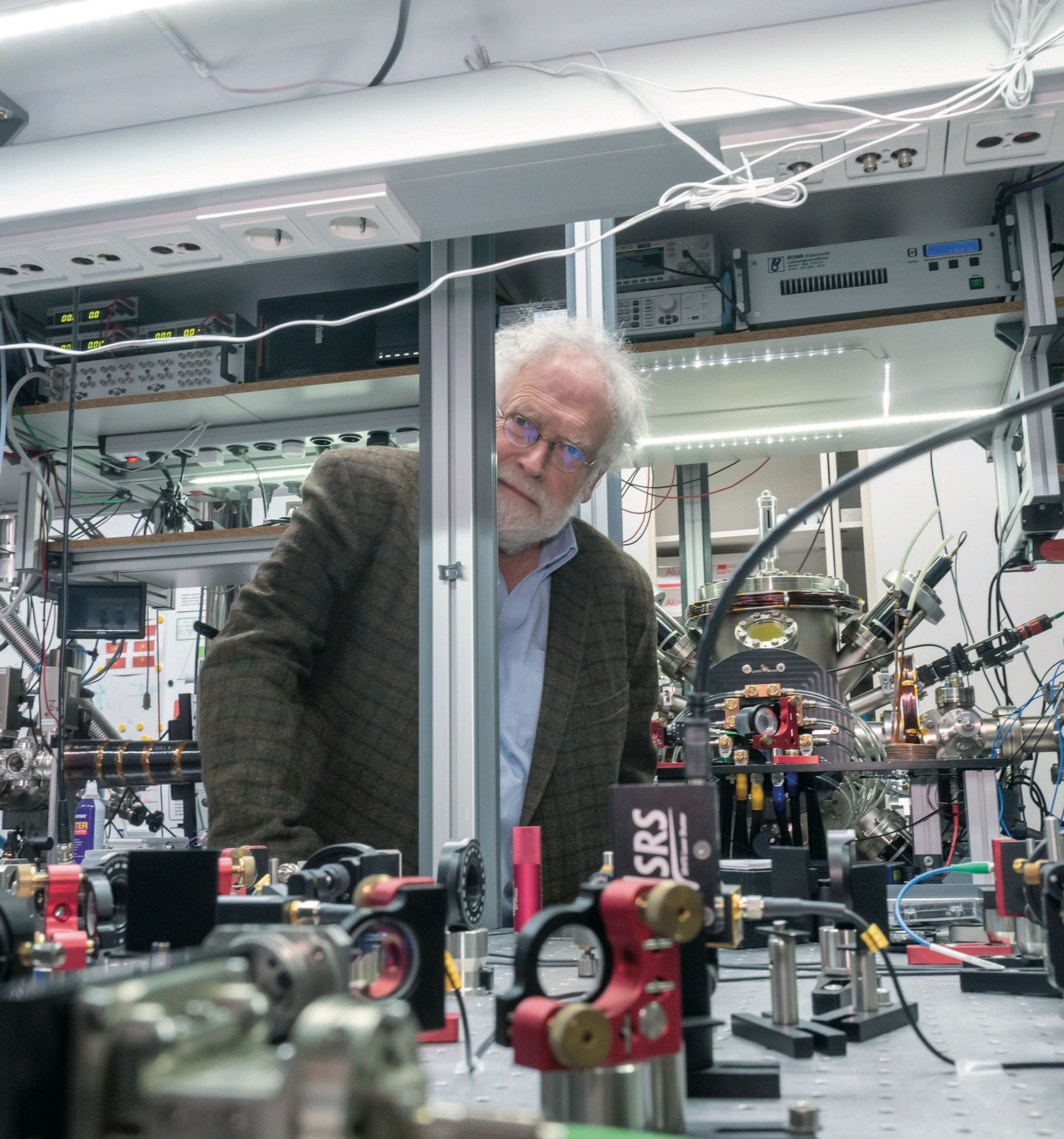
Am 4. Oktober 2022, wurde Anton Zeilinger der Physik-Nobelpreis zuerkannt, den er am 10. Dezember gemeinsam mit seinen Kollegen Alain Aspect und John Clauser in Stockholm entgegennahm. Anton Zeilinger ist einer der Pioniere der Quanteninformation, jener Wissenschaft, die nach fast 100 Jahre die Eigenartigkeiten der Quantenmechanik in die Reichweite konkreter Anwendungen gebracht hat. Seinen Nobelpreisvortrag wiederholt Anton Zeilinger ausführlicher in Deutsch mit wunderschönem österreichischen Akzent kurze Zeit später am Mittwoch, den 25. Januar 2023 im Audimax der Universität Wien. Dabei kommt er nach der Erwähnung eines Doppelspaltexperiments mit Neutronen gleich auf sein eigentliches Forschungsthema zu sprechen, für das er und seine Kollegen den Nobelpreis erhalten hatten – verschränkte Photonen und den experimentellen Nachweis der Verletzung der „Bell-schen Ungleichung“

„Es geht darum, dass ich zwei Teilchen habe, die miteinander in Wechselwirkung getreten sind und wenn ich eines von den beiden messe oder beobachte, so ist das Resultat rein zufällig und das andere ist auch rein zufällig, aber sie zeigen immer dasselbe Ergebnis und die Frage ist, wie kann das gleiche Ergebnis auftreten, wenn das Einzelresultat zufällig ist? Für dieses Phänomen hat Schrödinger kurz nach der Arbeit von Einstein, Podolski und Rosen die Bezeichnung Verschränkung gewählt.“ Wenig später macht Zeilinger den Versuch einer Veranschaulichung: „Das habe ich hier symboli-

siert mit zwei Würfeln (zeigt auf ein Bild mit Sternenhintergrund und Würfeln, die jeweils eine Sechsziffer zeigen, sowie einer Diagonalen, die die Entfernungsstrecke der Würfel im Universum symbolisiert). Wenn das Quantenwürfel sind und ich würfle sie in verschiedenen Ecken des Universums und sie sind verschränkt, dann zeigen sie die gleiche Zahl, obwohl wir heute haben nachweisen können, dass es zwischen ihnen keinerlei Kommunikation gibt und dass es auch bevor sie beobachtet werden, keine verborgene Eigenschaft gibt die festlegt, welches Resultat herauskommt.“

Zeilinger erwähnt, dass schon Erwin Schrödinger diese Verschränkung nicht als „eine“, sondern als „die“ charakteristische Eigenschaft der Quantenmechanik bezeichnet hat. Sie zwingt uns zur einem radikalen Umdenken. „Man kann nicht mehr behaupten, dass Dinge ihre Eigenschaften haben in Raum und Zeit unabhängig von der Beobachtung“, erläutert Zeilinger. Wenn der Physiker in einem seiner zahlreichen Vorträge (von denen übrigens auch viele im Internet abrufbar sind) an diesen Punkt gelangt ist, huscht oft ein sympathisches, geheimnisvolles Lächeln über sein Gesicht, und es folgt eine Gedankenpause. Man kann nicht mehr behaupten, dass Dinge ihre Eigenschaften

Nobelpreisträger Anton Zeilinger  
in einem Labor des Instituts für Quantenoptik  
und Quanteninformation in Wien.



in Raum und Zeit unabhängig vom Beobachter haben – das ist eine gewagte Behauptung. Ist damit geklärt, was die Philosophen schon seit der Antike umtreibt? Haben Anton Zeilinger und seine Physikerkollegen diese jahrhunderte alte Debatte jetzt experimentell entschieden?

## Die Welt außerhalb

Viele Naturwissenschaftler, darunter übrigens auch Einstein, glaubten und glauben an die Existenz einer von unserer Beobachtung unabhängigen Außenwelt. Eine Welt, die außerhalb unserer Wahrnehmungsmöglichkeiten ist, in der Dinge unabhängig von uns existieren und Vorgänge unabhängig von uns ablaufen. Eine Außenwelt also, in der die Dinge zu einer gewissen Zeit einen Ort im Raum haben, und in der sie eindeutige Eigenschaften haben – selbst die ganz kleinen. Wir wissen zwar, dass unsere Beobachtung fehlerhaft sein kann, dass es die Möglichkeit von optischen Täuschungen gibt, und dass die von uns wahrgenommene Umwelt nur unsere eigene Umwelt ist – in dem Sinne, dass unser Gehirn aus unseren Sinneseindrücken mithilfe der dort gespeicherten Daten unsere persönliche Umwelt zusammenbastelt. Aber auch dieses Wissen hindert die meisten nicht daran, fest zu glauben, dass eine objektive, von unseren Beobachtungen unabhängige, dahinterliegende, materielle Welt da ist.

Tatsächlich gab und gibt es bezüglich der „wirklichen“ Welt Meinungsverschiedenheiten besonders unter den Philosophen. Viele Philosophen haben für eine nicht-materielle, „wirkliche“ Welt argumentiert, eine Welt der Ideen. Der erste und berühmteste Vertreter dieses Gedankens ist Platon, bekannt durch sein Höhlengleichnis. Auch gibt es philosophische Strömungen wie den radikalen Konstruktivismus, der die Frage nach einer wirklichen Welt an sich für sinnlos hält und konkurrierende, naturwissenschaftlichen Theorien nach rein pragmatischen Gesichtspunkten als mehr oder weniger austauschbar ansieht. Für die Anhänger dieser Theorie gibt es keine Annäherung oder gar ein Abbild einer dahinterliegenden wirklichen Welt.

Unter Naturwissenschaftlern findet man allerdings wenige Konstruktivisten oder Idealisten. Sie hängen an Ihrem klassischen Weltbild, bestärkt durch die großen Theorien des Elektromagnetismus, der Thermodynamik und der Allgemeinen Relativitätstheorie, alles Theorien, die eine Welt auch ohne Beobachter beschreiben. Aussagen wie die von Anton Zeilinger, die mit diesem Weltbild nicht vereinbar sind, bereiten ihnen schweres Kopfzerbrechen. Nun gibt es verschiedene Auswege, sich das Kopfzerbrechen zu ersparen: Der einfachste ist, nicht darüber nachzutrübeln, sondern

ergebnisorientiert zu denken, nach dem Motto – schweige und rechne, solange die Ergebnisse stimmen.

Dass die Quantenmechanik hervorragende Ergebnisse liefert, darüber gibt es kaum Zweifel. Man denke an die Erklärung des Atombaus, die Erklärung chemischer Bindungen, das Standardmodell der Teilchenphysik, die Festkörperphysik mit all den Anwendungen – Computer, Laser, Solarzellen usw. Rechensymbole der Quantenmechanik sind eben Rechensymbole, nicht mehr und nicht weniger. Tatsächlich dachten und denken Quantenphysiker häufig so, aber gerade in jüngerer Zeit sind Forscher wie Anton Zeilinger auf die Idee gekommen, die so eigenartigen, fundamentalen Eigenschaften der Quantenmechanik nicht nur experimentell zu erforschen, sondern auch für Anwendungen zu nutzen. Die philosophischen Ausflüge der Gründerväter der Quantenmechanik sind so zur Keimzelle einer Forschungsindustrie geworden, die derzeit zu einem Höhenflug ansetzt. Hier fließen momentan Milliarden an Forschungsgeldern.

## Philosophie und Physik

Werden jetzt auch die lediglich am schnöden Mammon interessierten Fans des Quantencomputers und der Quantenkryptologie in die Philosophie getrieben? Am Ende seines Nobelpreisvortrags in Stockholm bemerkt Anton Zeilinger: „Here is a curiosity about the development of our field. These are the citations of the Einstein, Podolsky, Rosen paper from 1935 (zeigt auf eine stark ansteigende Balkengrafik). By now this paper is by far the most quoted paper by Einstein and is quoted nearly twice a day“. Paradox, wenn man bedenkt, dass der Artikel von Albert Einstein, Boris Podolsky und Nathan Rosen (oft EPR abgekürzt) damals als Angriff auf die Theorie der Quantenmechanik gedacht war und dass Einstein ja so einiges andere in der Physik zustande gebracht hat. Anschließend bemerkte Zeilinger, dass der „EPR-Artikel“ von 1935 wohl trotzdem nicht häufiger gelesen wird als kurz nach seinem Erscheinen, als der Artikel nur viermal im Jahr zitiert wurde.

Der Artikel ist schwere Kost, und Einstein war damals offenbar selbst mit den Formulierungen unzufrieden. In einem Brief an Erwin Schrödinger beklagt er, dass der Artikel aus Sprachgründen (Einstein konnte schlecht Englisch) von Podolsky verfasst wurde und nicht so richtig klar wird, was er eigentlich meinte: „die Hauptsache ist sozusagen durch Gelehrsamkeit verschüttet“. Die meisten Physiker wird mit Sicherheit die häufige Verwendung des Begriffs „Reality“ abschrecken haben. In dem nur vier Seiten langen Artikel kommt der Begriff genau 39 Mal vor. Das klingt sehr nach Philosophie und nicht nach Physik.

„Die ganzen 50 Jahre bewusster Grübeleien haben mich der Frage „Was sind Lichtquanten“ nicht nähergebracht. Heute glaubt zwar jeder Lump, er wisse es, aber er täuscht sich.“

**Albert Einstein, 1951**

Worum geht es: Der Titel *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?* deutet es an. Natürlich sollte im Artikel der Beweis erbracht werden, dass die „Quantenmechanische Beschreibung der physikalischen Realität“ gerade nicht komplett sein kann, und dass damit die Quantenmechanik auch keine vollständige Beschreibung der „Realität“ darstellt. Einfach gesagt und wie Einstein sich ausdrückte: Dass die Quantenmechanik „noch nicht der wahre Jakob“ ist. Die Beweisführung erfolgt mit einem Gedankenexperiment und die Grundidee ist einfach: Die QM sagt, dass es unmöglich ist, für ein Teilchen Ort und Impuls gleichzeitig genau zu messen. Wenn ich den Ort genau messe, so bekomme ich eine gewisse Impulsunschärfe und umgekehrt, wenn ich den Impuls genau messe, so folgt eine gewisse Ortsunschärfe. Wenn ich mir jetzt ein Experiment ausdenke, bei dem ich nach den Regeln der Quantenmechanik den Ort und den Impuls eines Teilchens zwar nicht gleichzeitig messen – denn das geht ja nicht – aber doch voraussagen kann, dann habe ich damit gezeigt, dass das betreffende Teilchen tatsächlich einen exakten Ort und einen exakten Impuls hat.

Das prinzipielle Unvermögen der Quantenmechanik, diese beiden Größen aber auch gleichzeitig exakt zu bestimmen zeigt, dass die Quantenmechanik unvollständig ist. So ein Experiment zu finden, ist der Versuch,

die Quantenmechanik mit ihren eigenen Waffen zu schlagen.

Hier das Gedankenexperiment (ohne den mathematischen Formalismus, der natürlich eigentlich die wichtigste Rolle spielt): Man denke sich ein aus zwei Teilchen zusammengesetztes System. Nachdem eine Wechselwirkung zwischen den Teilchen stattgefunden hat, entfernen sie sich voneinander. Die Regeln der QM erlauben, den Gesamtimpuls des aus den zwei Quantenteilchen zusammengesetzten Systems zu messen. Ist der Gesamtimpuls gleich null, so weiß man, dass die Impulse der Teilchen entgegen gerichtet und gleich groß sind. Misst man nach einiger Zeit, wenn die Teilchen sich sehr weit voneinander entfernt haben, den Impuls des einen Teilchens, so kann man den Impuls des anderen Teilchens ableiten, ohne ihn direkt messen zu müssen (und ohne das zweite Teilchen zu stören). Auf die gleiche, indirekte Art und Weise könnte man den Ort des zweiten Teilchens messen. Die Entscheidung, ob man Impuls oder Ort des zweiten Teilchens bestimmt, kann erst kurz vor der Messung getroffen werden, und daher – so die Argumentation – keinen störenden Einfluss auf das weit entfernte zweite Teilchen haben. Ort und Impuls des anderen Teilchens sind also „Elemente der Realität“. Folglich ist die QM unvollständig, weil es im Rahmen der Quantenmechanik keine Möglichkeit gibt, den Ort und den Impuls eines Teilchens (der aber

offensichtlich doch real existiert) exakt anzugeben. Diese Argumentation stimmt allerdings nur, wenn man eine Annahme macht, die Einstein vollkommen selbstverständlich erschien. Eine Messung an dem einen Teilchen darf das andere, sehr weit entfernte Teilchen nicht gleichzeitig beeinflussen (da sich nichts im Raum schneller als mit Lichtgeschwindigkeit fortbewegen kann, war das für Einstein eine sehr offensichtliche Tatsache). Genau diese Annahme, die unserem „natürlichen“ Menschenverstand vollkommen einsichtig erscheint, hat sich als falsch herausgestellt.

Zunächst war das EPR-Gedankenexperiment 1935 ein weiterer Versuch Einsteins, die „Kopenhagener Deutung“ des quantenmechanischen Formalismus von 1927 anzugreifen. Diese Interpretation, die allen voran von Niels Bohr, Werner Heisenberg und Wolfgang Pauli vertreten wurde, hatte starke Gegner, zu denen nicht nur Albert Einstein, sondern auch Max Planck, Louis de Broglie und Erwin Schrödinger gehörten. (Übrigens fand ein zweiter, mit Sicherheit der bekannteste Angriff auf die Kopenhagener Deutung ebenfalls 1935 statt – das Gedankenexperiment „Schrödinger’s Katze“.)

Die sogenannte Bohr-Einstein-Debatte um die Frage, wie die Quantenmechanik zu deuten ist, begann auf der fünften Solvay-Konferenz für Physik (1927) und endete erst mit dem Tod Einsteins 1955, Bohr starb 1965. Damals glaubte niemand, dass man das Gedankenexperiment von Einstein, Podolsky und Rosen jemals real durchführen kann. Aber wie auch bei anderen Gedankenexperimenten von Einstein hat man sich getäuscht.

## Experimente mit Licht

Den Schlüssel für das grundlegende Verständnis der Quantenmechanik sehen viele heute in der Quantenoptik. Das Quantenteilchen des Lichts, das Photon, ist das ideale Modell eines Quantenteilchens. Von Lasern produziert, sind seine Eigenschaften wohl definiert und können durch Spiegel, Polarisationsfilter, Strahlteiler usw. gezielt manipuliert werden. Dabei ist erst seit Anfang des 20. Jahrhunderts bekannt, dass das Licht als Strom von Teilchen aufgefasst werden kann. Zwar war schon Isaak Newton der Meinung, dass Licht ein Strom von Teilchen ist, aber erst als Thomas Young 1802 Interferenzerscheinungen nach dem Durchgang durch einen Doppelspalt beobachtete, haben die meisten Naturwissenschaftler ihre Meinung zugunsten der Wellentheorie des Lichts geändert. Die Gleichungen der Elektrodynamik in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts untermauerten noch einmal diese Entdeckung – Licht ist eine elektromagnetische Welle. Dann kamen Max Planck und Albert Einstein. Planck untersuchte die thermische Strahlung eines Schwarzen Körpers, Ein-

stein den sogenannten lichtelektrischen Effekt, bei dem Licht Elektronen aus Metall herausschlägt. Bei beiden Effekten geht es um die Wechselwirkung von Licht mit Materie und die dabei auftauchenden Fragen waren mit der Wellentheorie des Lichts nicht zu beantworten. 1905 schlug Einstein deshalb vor, dass die Energie des Lichts „aus einer endlichen Zahl von in Raumpunkten lokalisierten Energiequanten, welche sich bewegen, ohne sich zu teilen und nur als Ganze absorbiert und erzeugt werden können“ besteht.

## Unsichtbare Photonen

Die Energie eines solchen Lichtteilchens hängt von dessen Farbe (Frequenz) ab. Blaues Licht ist energiereicher als z. B. rotes. Die Energie eines Lichtteilchens wird durch die Frequenz des Lichts, multipliziert mit einer Konstanten, dem Planckschen Wirkungsquantum, bestimmt. Das Plancksche Wirkungsquantum hat einen sehr, sehr kleinen Wert, so dass jedes Lichtteilchen, auch Photon genannt, nur einen sehr geringen Energiebetrag davonträgt. Die Intensität des Lichts ist durch die Anzahl der vorhandenen Lichtteilchen bestimmt. Warum können wir dann eigentlich die Photonen nicht sehen?

Der Grund ist, dass sehr viele Photonen in unserem Auge ankommen und dieser statistische Effekt dann eine gleichmäßige Beleuchtung suggeriert. Zum Beispiel emittiert eine 60 Watt Glühlampe 100 000 000 000 000 Photonen pro Sekunde. Mittlerweile gibt es aber schon Lichtquellen, die einen Strom einzelner Photonen emittieren und es gibt Detektoren, die einzelne Photonen detektieren können. Das macht das Photon experimentell zugänglich – allerdings noch nicht zum idealen Kandidaten für Experimente, die dem Gedankenexperiment von Einstein Podolsky und Rosen ähneln. Dazu braucht man eine ganz spezielle, nur quantenmechanisch erklärbare Eigenschaft des Photons.

Gewöhnlich hat Licht eine Eigenschaft, die man als Polarisation bezeichnet und relativ einfach messen kann. Polarisation kennt vielleicht der eine oder andere von einem Polarisationsfilter für die Kamera. Das von Glasscheiben reflektierte Licht ist oft polarisiert. Bei geeigneter Drehung des Polarisationsfilters kann man dieses Licht ausblenden, so dass auf dem Foto keine störenden Lichtreflexe der Scheibe erscheinen. Das Phänomen ist gut erklärbar, wenn man annimmt, dass Licht eine Transversalwelle ist, also eine elektromagnetische Welle, bei der sich die elektrischen und magnetischen Felder senkrecht zur Ausbreitungsrichtung periodisch ändern. Einen Polarisationsfilter kann man sich dann als eine Art Kamm vorstellen, der nur eine bestimmte Schwingungsebene der Welle durchlässt.

„Würden wir eine neue wissenschaftliche Idee erst dann zulassen, wenn sie ihre Berechtigung schon endgültig erwiesen hat, ja würden wir auch nur verlangen, dass ihr von vornherein ein deutlich fassbarer Sinn innewohnt, so würden wir dem Fortschritt der Wissenschaft unter Umständen einen schweren Schaden zufügen. Denn wir dürfen nicht vergessen, dass oft gerade Ideen ohne deutlichen Sinn es waren, von denen die Wissenschaft die stärksten Antriebe zu ihrer Aufwärtsentwicklung empfangen hat.“

**Max Planck, 1933**

Aus: Max Planck, „Ursprung und Auswirkung wissenschaftlicher Ideen.“  
Vortrag, gehalten am 17. Februar 1933 im Verein Deutscher Ingenieure, Berlin.

Polarisationsfilter funktionieren aber auch bei einzelnen Photonen. Das Problem ist nur: Photonen sind punktförmige, masselose Teilchen die sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegen, keine Wellen. Wie kann ein einzelnes Photon eine Welleneigenschaft wie Polarisation besitzen? Die Antwort gibt uns die Quantenmechanik: Das Photon ist als Quantenteilchen aufzufassen und dieses Quantenteilchen hat eine eigentümliche Eigenschaft, den Spin. Man hat festgestellt, dass genau dieser Spin der Photonen im Lichtstrom die Polarisation des Lichts festlegt. Der Spin des einzelnen Photons, der übrigens wie der Name nahelegt aus den Eigendrehungen von festen Körpern abgeleitet ist, kann mit Polarisationsfiltern gemessen werden, und damit kann man experimentell direkt auf eine quantenmechanische Größe zugreifen. Das macht das Photon zum idealen Kandidaten, um die fundamentalen Eigenschaften der Quantenmechanik zu testen.

David Bohm vom Birkbeck College in London hat in den 1950er Jahren als erster den Vorschlag gemacht, in einer neuen Version des EPR-Gedankenexperiments den Spin und nicht den Ort oder den Impuls als Teilcheneigenschaft zu nutzen. Die Regeln der Quantenmechanik besagen, dass – so wie bei Ort und Impuls – auch Spinkomponenten von Quantenteilchen in verschiedenen Richtungen nicht gleichzeitig wohldefinierte (exakte) Werte besitzen können.

## Von der Idee zum Experiment

Das Gedankenexperiment funktioniert bei Bohm analog zum originalen EPR-Versuchsaufbau. Bohm dachte sich noch keine Photonen aber ein Protonenpaar (auch Protonen haben die Spineigenschaft), das anfangs in einem sogenannten Singulett-Zustand mit Spin Null vereint ist, dann fliegen die beiden Protonen auseinander und es werden verschiedene Spinrichtungen gemessen. Da man den Gesamtspin kennt, kann man bei der Messung des Spins eines Teilchens in einer Richtung auf den Spin des anderen Teilchens in der gleichen Richtung schließen. Die Logik geht dann wie beim ursprünglichen EPR Experiment und zeigt auch hier anscheinend, dass die Spinkomponenten eines Protons in verschiedene Richtungen „Elemente der Realität sind“, die aber auch hier nach den Regeln der Quantenmechanik prinzipiell nicht gemessen angegeben werden können – also ist die Theorie unvollständig.

Das Ergebnis wäre, wie auch beim ursprünglichen EPR-Gedankenexperiment leicht zu erklären, wenn man annimmt, dass es eine vollständigere Theorie gibt, bei der die Quantenteilchen beispielsweise eine innere Struktur haben (sogenannte verborgene Variablen), die ihre Eigenschaften von vornherein festlegt. Falls das

nicht der Fall ist, bleibt die Möglichkeit, dass eine Messung an dem einen Quantenteilchen ein instantane, „spukhafte“ Fernwirkung auf das andere Teilchen ausübt.

## Teilchen ausgetrickst

Spukhafte Fernwirkung oder verborgene Variablen? Es sah erst einmal danach aus, dass es sich bei den beiden Ansichten um philosophische Standpunkte handelt. Und die Annahme lag nahe, dass wie bei vielen philosophischen Standpunkten die Diskussion weitergeht. Einmal kommt der eine Standpunkt in „Mode“ einmal der andere Standpunkt und das kann über Jahrhunderte so weitergehen. Nicht so in diesem Fall.

Der nordirische Physiker John Stewart Bell, der am CERN, dem europäischen Kernforschungszentrum bei Genf tätig war, machte 1964 einen Vorschlag, wie man die Sache experimentell entscheiden kann. Er bediente sich dazu des von Bohm modifizierten EPR-Gedankenexperiments mit Messung der Spins statt der Orte und Impulse. Und die Verwendung der Spins war am Ende der Schlüssel zum Realexperiment. Bell dachte sich zwei Quantenteilchen, die einen Spin besitzen. Die Quantenteilchen sind in einem gemeinsamen Quantenzustand: sie sind „verschränkt“. Dann werden sie in diesem, immer noch verschränkten Zustand, in entgegengesetzte Raumrichtungen geschickt und wenn beide Teilchen weit entfernt voneinander sind, misst man ihren Spinzustand am Ort A und B. Soweit die Skizze des EPR-Gedankenexperiments. Die Erweiterung von Bell besteht nun darin, die Spins in beliebigen Raumrichtungen zu messen und diese Raumrichtungen durch einen Zufallsgenerator bestimmen zu lassen, kurz bevor die Teilchen den jeweiligen Detektor A, B erreichen. Die Zufallsgeneratoren hat Bell eingeführt, um sicherzustellen, dass die Quantenteilchen nicht beim Loslaufen schon die Einstellung der Raumrichtung kennen, in die gemessen wird und sich dadurch irgendwie darauf einstellen können. Bell definiert anschließend statistische Größen, die sich auf die Messung der Spinrichtung der korrelierten Quantenteilchen bei A und B beziehen. Unter der Voraussetzung, dass in der EPR-Versuchsanordnung beide Teilchen zu jeder Zeit wohldefinierte Spinkomponenten in verschiedene Raumrichtungen haben, so wie Einstein das dachte, konnte Bell eine Ungleichung zwischen den statistischen Größen herleiten. Ist sie verletzt, so stimmt die Voraussetzung nicht, und genau das sollte sich einige Jahre später herausstellen.

Die Experimente wurden nicht mit Atomkernen sondern mit Photonen ausgeführt. Auch dabei ist der Versuchsaufbau trickreich. Die Schwierigkeit liegt in der Pro-

duktion von verschränkten Zuständen von zwei Photonen mit definierten Eigenschaften, als auch in die Messung dieser.

Das erste derartige Experiment wurde von John Clauser und Stuart Freedman 1972 durchgeführt. Die Experimente waren erst noch ungenau und führten zu keinem eindeutigen Ergebnis. Der Durchbruch gelang 1981, als Alain Aspect, Philippe Grangier und Gérard Roger von der Universität Paris die Fehlergrenzen deutlich herunterschrauben konnten. Sie fassten ihre Arbeit so zusammen: „Unsere Ergebnisse, die mit der Quantenmechanik vorzüglich übereinstimmen, verletzen die verallgemeinerte Bellsche Ungleichung auf eklatante Weise und schließen damit die gesamte Klasse realistischer, lokaler Theorien als unzulässig aus.“ Eine weitere, große Herausforderung bestand anfangs darin, beide Messvorgänge wirklich raumartig getrennt ablaufen zu lassen. Um dieses, als „Lokalitätsschlupfloch“ bezeichnete Problem beizulegen, wurde die räumliche Distanz zwischen den beiden Messapparaturen im Laufe der Zeit kontinuierlich erhöht und die Orientierung der Messachsen erst kurz vor eigentlichen Messungen durch Zufallsgeneratoren festgelegt.

Anton Zeilinger mit seiner Forschergruppe konnte auf diese Weise alle „Schlupflöcher“, die die ersten Experimente mit Photonen noch zugelassen hatten, stopfen. In der „Bohr-Einstein-Debatte“, hat das Lager von Bohr damit weiterhin die Nase vorn. Eine Messung des Spins eines Photons auf der Erde kann den Spin eines Photons in Lichtjahren Entfernung beeinflussen, sofort, ohne das Tempolimit der Lichtgeschwindigkeit einhalten zu müssen. Die Annahme, Photonen hätten irgendwelche Eigenschaften, verborgene Variablen, die ihre Polarisation festlegen, bevor sie gemessen werden, ist offensichtlich falsch. Quantenteilchen wie Photonen werden für unser Verständnis damit noch rätselhaftere Objekte und Einstein hat doch irgendwie schon wieder recht als er einige Jahre vor seinem Tod 1951 rückblickend bemerkte: „Die ganzen 50 Jahre bewusster Grübeleien haben mich der Frage ‚Was sind Lichtquanten‘ nicht nähergebracht. Heute glaubt zwar jeder Lump, er wisse es, aber er täuscht sich.“

**Dr. Christian Sicka** ist  
Astrophysiker und Leiter der  
Abteilungen Astronomie, Atom-  
physik und Zeitmessung.

Anzeige



Gruppenprojekt: Collage im  
Rahmen der Begegnungsreihe  
„Frieden braucht Mut“ in Lwiw,  
Ukraine, Schuljahr 2006/07

60 JAHRE



SEIT 1959

KLEINES PRIVATES LEHRINSTITUT

**DERKSEN**

GYMNASIUM

SPRACHLICH • NATURWISS.-TECHNOLOG.  
STAATL. ANERKANNT • GEMEINN. GMBH



[www.derksen-gym.de](http://www.derksen-gym.de)

# EINE NEUE WELT

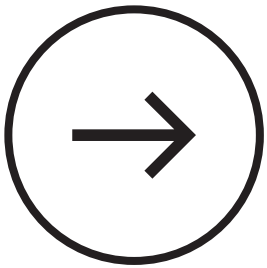
Wie das Munich Center for Quantum Science and Technology (MCQST) ein interdisziplinäres Spitzenforschungszentrum im boomenden Bereich der „Quantum Science and Technology“ aufbaut und Münchens Sichtbarkeit auf internationaler Ebene erhöht.

Es ist eine Geschichte über große Fragen der Wissenschaft, es geht um geheimnisvolle Phänomene wie verschränkte Teilchen genauso wie um sichere Verschlüsselung und Kommunikation, um neue Materialien, die als Sensoren eingesetzt werden, um unvorstellbar schnelle Quantencomputer und das Verständnis von physikalischen Phänomenen wie Supraleitung und Magnetismus.

Vier Forschende aus dem Münchner Exzellenzcluster erzählen, was sie an dieser geheimnisvollen Welt fas-

ziniert, was sie in ihrer Forschung antreibt, warum wir gerade eine Revolution in diesem Bereich erleben und warum der MCQST für viele „ein Traum“ ist. Lesen Sie Ihre Geschichten.

Neben der Ludwig-Maximilians-Universität München und der Technischen Universität München, sind das Max-Planck-Institut für Quantenoptik, das Walther-Meißner-Institut der Bayerischen Akademie der Wissenschaften und das Deutsche Museum als Partner an MCQST beteiligt.



**Immanuel Bloch** ist Quantenphysiker, spezialisiert auf Quantensimulation und einer der Begründer dieses Feldes. Er war mit 32 Jahren bereits Professor. Bloch ist einer der Sprecher des Exzellenzclusters MCQST.

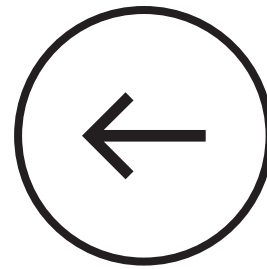
„Unser Cluster ist aus einer echten Grassroot-Bewegung entstanden. Ganz ohne Förderung von außen haben sich vor zehn Jahren Forschende aus München zusammengetan, um ihre Aktivitäten in der Quantenphysik zu bündeln. Munich Quantum Center nannte sich das, Wissenschaftler beider Münchner Universitäten, von Forschungseinrichtungen wie die Max-Planck-Gesellschaft, vom Deutschen Museum und der Bayerischen Akademie der Wissenschaft wollten für München etwas Neues, Einzigartiges schaffen. Viele von uns waren fast freundschaftlich miteinander verbunden. Da hat keiner auf seinen Vorteil geschaut, es ist einer der Gründe, warum wir bis heute so erfolgreich sind.

Wissenschaftlich stellen wir am MCQST gern große Fragen. Wir wollen das Verhalten von miteinander verschränkten Teilchen immer besser verstehen, kontrollieren, manipulieren und dann auch für Anwendungen nutzen wie Quantencomputing, in der Sensorik, in der Simulation, in der Kommunikation. Neu und besonders spannend ist die Verbindung von Informationsverarbeitung und Quantenphysik. Ich selbst leite an der LMU und am Max-Planck-Institut für Quantenoptik, wo ich Direktor bin, sieben große Experimente im Bereich der sogenannten Quantensimulation, dabei geht es vereinfacht gesagt zum Beispiel darum, Festkörper besser zu verstehen, insbesondere Phänomene wie Magnetismus oder Supraleitung. Ich habe enormen Spaß an diesen Entdeckungsmomenten.

Wissenschaftlich betrachtet arbeitet der Cluster extrem erfolgreich. Es gibt weltweit nur sehr wenige Orte, die Quantenforschung in dieser Breite und mit diesem wissenschaftlichen Erfolg abdecken, wie wir das in München tun. Wir werden weltweit beachtet. Es ist ein besonderer internationaler Geist, das kommt vielleicht auch daher, weil wir uns viele Gedanken über unsere Studierenden und Doktoranden machen. Das fängt mit dem Bachelor-Sommerprogramm an, wo sich aus der ganzen Welt Studierende bewerben können, die für ein paar Wochen nach München kommen. Auch das neue Masterprogramm von TUM und LMU, der Master für Quantum Science and Technology, ist ein Erfolg. Wir haben es geschafft, eine neue, internationale Gruppe von Studierenden anzusprechen. Auf Graduiertenebene bieten wir Austauschprogramme mit Graduiertenschulen weltweit an. So bringen wir unsere Studierende mit anderen Top-Institutionen in Kontakt.

Vernetzung ist generell in der Wissenschaft enorm wichtig, wir arbeiten mit einem Netzwerk führender Forscher zusammen, sowohl bei technischen wie bei theoretischen Fragen. Wir sind umgekehrt für Spitzenforscher weltweit attraktiv, der Nobelpreisträger Wolfgang Ketterle etwa kommt dieses Jahr wieder für sechs Monate, um hier sein Sabbatical zu verbringen, der renommierte Physiker Norman Yao aus Harvard wird wieder einige Monate in München forschen. Ich bin auch stolz, wie viele junge Leute, die ich mit ausgebildet habe, als Professorinnen und Professoren tätig sind, mehr als 30 Forscher leiten inzwischen Gruppen an Top-Institutionen weltweit, in Europa, Japan, Korea, China und den USA. Das ist wie eine große Familie. Es ist vielleicht sogar noch nachhaltiger als wissenschaftliche Veröffentlichungen, denn diese Familie trägt unsere Ideen weiter. Es ist schön zu sehen, dass vieles, was wir angestoßen haben, so erfolgreich ist. Das Schönste wäre, wenn die nächste Generation noch erfolgreicher und besser wird als man selbst und uns übertrifft.“





**Barbara Kraus** ist Professorin am Lehrstuhl für Quantenalgorithmen und

-anwendungen, der von der BMW-Stiftung an der Technischen Universität München (TUM) gestiftet wird. Ihre Spezialgebiete sind Quantenverschränkung, Quanteninformation und Quantenkryptographie. Kraus ist designierte Sprecherin des MCQST.

„Quantencomputer und Quantensimulatoren werden in der Zukunft sehr wichtig sein. Im Moment sind diese Geräte aber noch sehr klein und überaus fehleranfällig. Weltweit wird an Anwendungen für diese Systeme geforscht. Wenn wir mit ihnen Berechnungen ausführen wollen, müssen wir wissen, wie groß die Fehler sind. Wir wollen den Ergebnissen von Quantencomputern ja irgendwann auch blind vertrauen können. An dieser Verifikation der Quantenberechnungen arbeiten wir.

Das ist meist eine sehr theoretische Arbeit mit Bleistift und Papier. Wir überlegen uns Methoden und Protokolle, um zu testen, wie gut die Quantenprozessoren arbeiten, bzw. wie groß die Fehler in den Systemen sind. Die Protokolle testen wir dann entweder auf klassischen Computern oder mit Quantenprozessoren. Kennt man den Fehler, weiß man auch besser, wie man gegensteuern kann. Ziel ist es, Vertrauen in die Funktionalität der Systeme zu bekommen und Möglichkeiten zu finden, mögliche Fehler zu vermindern.

Das ist ein sehr wichtiges, innovatives Thema, es geht letztlich darum herauszufinden, welche relevanten Aufgaben von einem Quantensimulator oder Quantencomputer effizient gelöst werden können. Mein Forschungsgebiet ist sehr interdisziplinär, wir arbeiten mit Mathematikern, Informatikern und Experimentalphysikern zusammen. In München finden sich für jeden dieser Bereiche Experten, das ist sehr beeindruckend. Ich habe vorher in Österreich gearbeitet, auch dort gibt es sehr erfolgreiche Forschung im Bereich der Quantenwissenschaft und der Quantentechnologie, aber die Möglichkeiten in München sind noch einmal deutlich besser. Verschiedene Universitäten und Forschungseinrichtungen an einem Ort zu haben, macht einen großen Unterschied. Ich treffe meine Kollegen beim Essen, wir gehen gemeinsam zu Vorträgen, da ist der Austausch tagtäglich möglich, das ist sehr interessant und produktiv. Aus meiner Sicht ist der MCQST ein außerordentlich erfolgreicher Exzellenzcluster. Hier arbeiten die besten Forscher, hier bekommen die Studenten im Masterstudium die beste Ausbildung. Es gibt einen großen Gemeinschaftssinn, der sich auf alle überträgt, auf vielen Ebenen wird zudem großer Wert auf Chancengleichheit gelegt.

Und das wirkt sich auch auf die Forschung aus. Da in München extrem viele, offene Spitzenforscher versammelt sind, gibt es auch für viele Fragen aus meinem Bereich, der Grundlagenforschung, immer gute Ansprechpartner. Wir können gemeinsam innovative Themen und Probleme diskutieren, dabei auch Theorie und Praxis an einem Ort miteinander verbinden. Das gibt es so kaum irgendwo weltweit. Das Spannende an der gemeinsamen Forschung ist



auch immer der Weg. Ich bin überzeugt, dass sich beim Arbeiten mit den Quantensystemen Ideen ergeben werden, an die wir aktuell noch gar nicht denken und die am Anfang vielleicht gar nicht das Ziel waren.

Ich arbeite noch an einem zweiten großen Forschungsgebiet, der sogenannten Verschränkungstheorie. Verschränkung ist ein wichtiges quantenmechanisches Phänomen, eine geheimnisvolle Verbindung, bzw. starke Korrelation zwischen Teilchen. Diese besteht, auch wenn sich die Teilchen weit entfernt voneinander aufhalten. Für zwei Teilchen ist diese Verschränkung gut verstanden, für mehrere Teilchen noch viel zu wenig. Die Vielteilchenverschränkung ist aber sowohl für Quantencomputer als auch für das Verhalten von Vielteilchensystemen, z.B. in der Festkörperphysik, zentral.

Es ist nicht immer ganz leicht, unsere Forschung der Allgemeinheit verständlich zu machen. Für mich war schon als Studentin Quantenphysik überwältigend, die Tatsache, dass sich die Natur so ganz anders beschreiben lässt, als wir sie jeden Tag erleben. Ich rede oft mit meiner Schwester über dieses Thema, wenn wir gemeinsam Bergläufe machen oder gemeinsam trainieren. Die übergeordneten Fragen kann ich ihr dann schon verständlich machen.“

**Nadezhda Kukharchyk** ist Quantenphysikerin  
und wissenschaftliche Mitarbeiterin am Walther-Meißner-  
Institut für Tieftemperaturforschung in Garching.

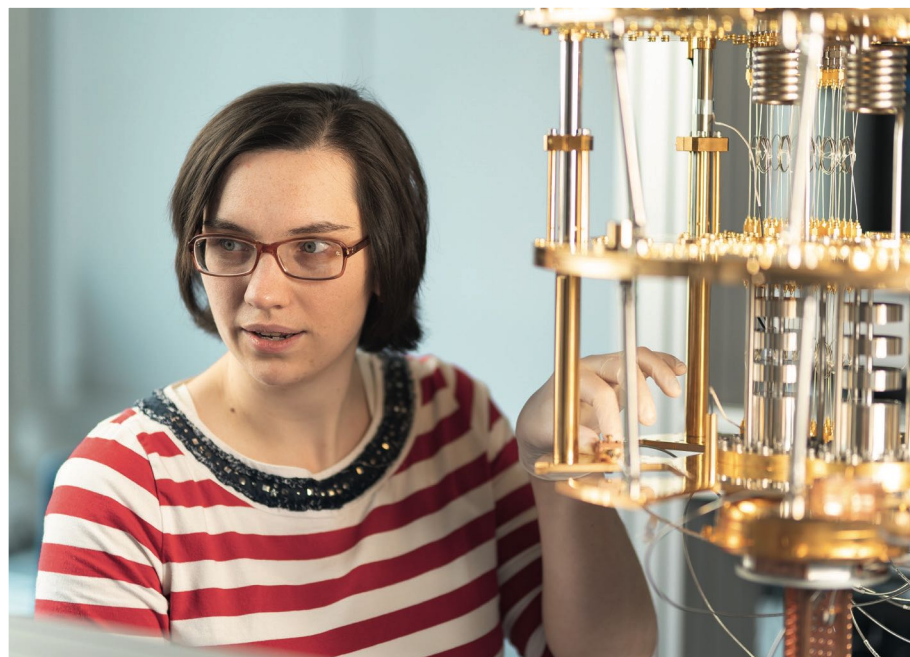
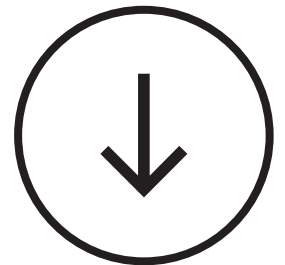
„Mein Forschungsfeld beschäftigt sich mit Quanteninformation, wir entwickeln Strukturen, die es ermöglichen, komplexe Aufgaben mit hoher Geschwindigkeit zu lösen, und wir versuchen, Lösungen für einen sicheren und fälschungssicheren Informationsaustausch zu finden. Mein Spezialgebiet sind Speicherelemente für Quantencomputer. Wir testen die Bauteile bei uns am Institut in unseren Laboren. Es sind sehr empfindliche Elemente, wir müssen sie auf extrem niedrige Temperaturen wenige tausendstel-Grad über dem absoluten Nullpunkt herunterkühlen. Dafür brauchen wir große zylinderförmige Kühlschränke, in deren Innerem in mehreren Stufen die Temperatur immer weiter sinkt. Das ist sehr aufwändig, früher mussten wir die Kühlung per Hand steuern, jetzt läuft das fast vollautomatisch. Heute hört man nur noch den Rhythmus der Pumpen, die das Vakuum in den Zylindern erzeugen und Helium für Kühlung hin und her pumpen.

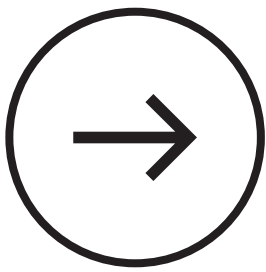
Die Speicher im Inneren müssen Quanteninformationen für einen gewissen Zeitraum erhalten können. Das ist extrem schwer. Und sie sollen mit den bestehenden Elementen der Quantencomputer wie den Qubits am Institut „reden“, also Informationen austauschen können. Das ist die Idee. Die Kommunikation kann in verschiedenen Wellenlängenbereichen stattfinden, im optischen Bereich oder wie bei uns im Mikrowellenbereich. Meine Quantenspeicher sind sogenannte Spin-Ensembles, wir verwenden dafür seltene Erden, das sind Elemente, die wir im Mikrowellenbereich ansteuern können. Aber sie sind auch extrem empfindlich. Mittlerweile gelingt es, Informationen etwa 23 Millisekunden lang zu speichern. Das ist schon ganz gut, ideal wären aber eher Speicherzeiten von ein paar Stunden.

Ich habe im Lauf meiner Karriere gelernt, geduldig zu sein. Unser Forschungsbereich ist sehr dynamisch und entwickelt sich rasend, man muss ständig neue Ideen ausprobieren. Das ist aber auch genau das, was mich motiviert. Und es ist toll, dass es im Exzellenzcluster viele Möglichkeiten gibt, über Stipendien und Funding-Projekte finanzielle Unterstützung zu bekommen. Das ist gerade für jüngere Forscher sehr wichtig, um an eigenen Ideen arbeiten zu können.

Ich habe bei dieser Ausstellung am Deutschen Museum mitgemacht, weil ich es wichtig finde, unsere Forschung den Menschen richtig zu erklären. Wir sollten ehrlich sagen, wo Quantencomputer einmal verwendet werden könnten, ein Durchschnittsbürger wird in nächster Zeit nicht mit ihnen arbeiten. Aber in der Informationssicherheit werden sie eine wichtige Rolle spielen.

Und ich will gerade als Frau auch junge Mädchen für Physik begeistern. Der Cluster tut sehr viel für Gleichberechtigung, unterstützt uns Frauen in der Forschung. Ich habe selbst ein kleines Kind, man braucht sehr viel Energie für Forschung und Familie. Da ist ein gutes Umfeld wichtig. Ich will jungen Mädchen erklären, was in der Wissenschaft passiert und ob das auch für sie interessant sein könnte. Wir reden ja viel über das Thema „Frauen in der Wissenschaft“, früher war Physik eher Männersache, mein Vater hat mal gesagt, dass Forschung nichts für Frauen sei. Das ist natürlich ein altes Bild, das sich gerade ändert. Es ist gut, zu träumen, aber ich habe auch gelernt, dass es gut ist, wenn man sich an der Realität orientiert. Dafür muss man selbst etwas ausprobieren. Dann merkt man besser, was zu einem passt. Ich bin in Belarus aufgewachsen, habe dort Physik studiert, dann bei einer Firma gearbeitet, die Chips für Satellitenkommunikation entwickelt. Später in Deutschland habe ich mich für Halbleiterphysik, Nanoelektronik und dann für Quantenphysik interessiert. Ich denke, jedes junge Mädchen sollte einfach für sich Sachen ausprobieren, um zu entscheiden, was ihr am besten gefällt.“





**Lukas Homeier** ist Doktorand am Lehrstuhl für theoretische Nanophysik der LMU und Mitglied des MCQST. Er beschäftigt sich mit den mysteriösen Eigenschaften von Quantensystemen.

„Ich arbeite als theoretischer Physiker viel mit Stift und Papier. Das ist ganz anders als viele Kollegen, die bei ihren Experimenten mit hochkomplexer, oft sehr teurer Technik umgehen müssen. Ich entwerfe als Doktorand analytische Modelle für physikalische Phänomene, die man im Idealfall in Experimenten dann auch testen kann.

Mein Spezialgebiet nennen wir Physiker stark korrelierte Quantenvielteilchensysteme. Es geht also um viele kleine Quantenteilchen, die sich gegenseitig alle sehr stark wahrnehmen und daher eine gewisse Ordnung annehmen. Diese Ordnung ist wichtig, um die Eigenschaften eines Materials zu verstehen. Ich behandle auch ganz fundamentale Fragen der Physik die sogar relevant sein könnten um das Innere von Neutronensternen im Weltall zu modellieren. Diese Bandbreite ist für theoretische Physiker ganz toll.

Während andere mit Hochleistungscomputern wie dem SuperMUC rechnen, beschäftige ich mich in meiner Doktorarbeit wie man mit Hilfe von Quantengasen die Vielteilchenwelt simulieren kann. Solche Systeme, die man auf Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt herunterkühlt, untersuchen Experimentalphysiker am MCQST in ihren Laborversuchen. Dabei haben sie neue Phänomene beobachtet, die wir nun in unsere Modelle einbauen wollen. Ein neues Thema sind Hochtemperatursupraleiter, ganz spezielle Materialien, die unterhalb einer bestimmten Temperatur ohne Widerstand Strom leiten können. Bei einigen dieser Materialien wissen wir selbst vier Jahrzehnte nach deren Entdeckung überhaupt nicht, warum sie supraleitend werden. Hier haben wir uns, ausgehend von Experimenten, überlegt, ob die fundamentalen Ladungsteilchen, die für den Stromfluss verantwortlich sind, nicht etwa punktförmige Elektronen sind sondern eine innere Struktur ähnlich zu Atomen haben. Das habe ich theoretisch in Gleichungen beschrieben und Vorhersagen abgeleitet, wonach die Kollegen nun im Experiment suchen können.

Wir haben in München das Glück, dass wir sowohl in der Breite wie in der Spitze an der LMU und am Max-Planck-Institut für Quantenoptik sehr viele Ansprechpartner für solche theoretischen Ideen haben. Der persönliche Austausch und die fachlichen Diskussionen sind gerade für junge Forscher wie mich extrem wichtig, auch meine beiden Forschungsaufenthalte in den USA in Stanford und Harvard waren toll. Zudem kommen oft internationale Top-Forscher zu Vorträgen oder Workshops. In diesem Rahmen lerne ich auch Kolleginnen und Kollegen aus anderen MCQST-Gruppen kennen. Wir fahren beispielsweise dann auch gemeinsam zu Konferenzen, jüngst war in Castelldefels bei Barcelona auf einer Tagung. Auf solchen Veranstaltungen diskutieren wir mit anderen Doktoranden auch abends mal bei einem Bier, dieser persönliche Austausch ist in der Forschung wichtiger, als sich viele vorstellen.

Ich habe auch gemerkt, wie viel Spaß es mir macht, mein Wissen an andere weiterzugeben. Dieser Outreach-Gedanke ist fest am MCQST verankert. Wir haben uns kürzlich mit Studierenden der Bauhaus-Universität in Weimar getroffen. Ralph Caspers vom WDR, den man von der *Sendung mit der Maus* oder *Wissen macht Ah!* kennt, war auch dabei. Wir wollen gemeinsam versuchen, Themen aus der Quantenphysik verständlich zu kommunizieren. Mir bringt das selbst sehr viel, wenn ich gezwungen bin, meine theoretischen Ideen in einfacher Sprache zu erklären und Bilder dafür zu finden. Dabei merkt man nämlich oft, was man selbst nicht verstanden hat und wo eigene Schwachstellen in der Theorie sind.“



# UNTERWEGS

Von der Optik über die Atomphysik bis zur Kryptologie:  
Auch in den Dauerausstellungen des Hauses  
finden Sie viel Wissenswertes  
rund um das Thema „Licht  
und Materie“.

Von Christian Rauch

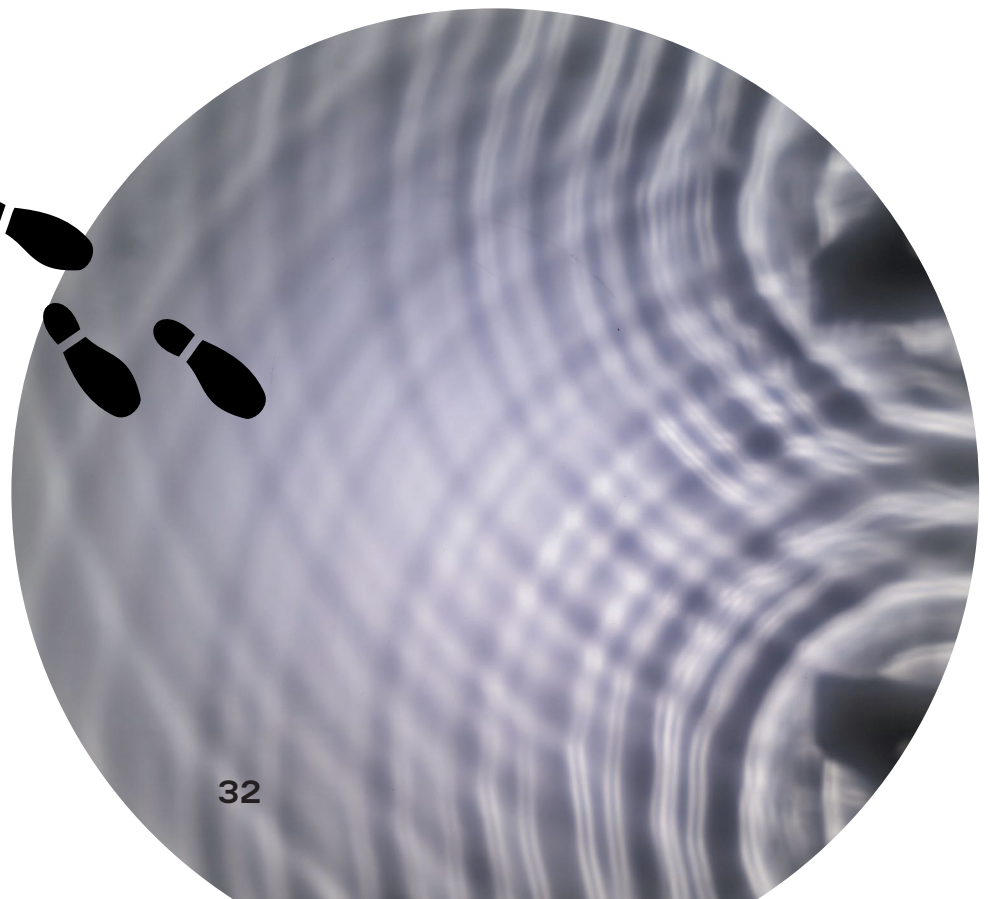
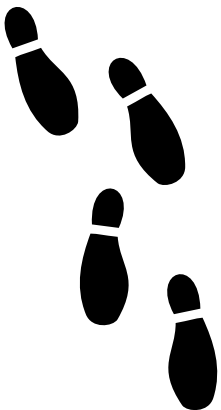
Ebene



## Wellenausbreitung

### Ebene 1: Optik

Für unseren Rundgang spazieren wir vom Eingang durch die Luftfahrthalle zum gegenüberliegenden Café und rechts in die Optik. Wir gehen ganz nach hinten zum Tisch „Wie breiten sich Wellen aus?“ Per Knopfdruck kann man in beleuchteten Wasserbecken Wellen erzeugen und verändern. Unter anderem lässt sich beobachten, wie sich Wellenfronten, die sich treffen, verstärken oder auslöschen. An einem anderen Becken werden Wellenfronten, die zunächst gerade und parallel verlaufen, bei Durchgang durch einen Spalt kreisförmig gebeugt. Der Physiker Christian Huygens erkannte schon im 17. Jahrhundert, dass das, was wir hier bei Wasserwellen beobachten, auch bei Lichtstrahlung auftritt. Dass das Licht eine Welle sein kann, wurde jedoch lange nicht akzeptiert. Thomas Young bereitete 1802 den Weg dafür, wie die Sonderausstellung zeigt, die wir nach Ende des Rundgangs besuchen können.





Ebene

1

### Fraunhofer in der Schatzkammer

#### Ebene 1: Optik

Wir gehen durch die Optik, in der weitere Stationen zum Licht warten, wieder nach vorne. Rechter Hand öffnet sich die Schatzkammer: eine große, halbrunde Glasvitrine mit 220 historischen Exponaten. In der Mitte unten steht der 1814 gebaute Prismenspektralapparat von Joseph von Fraunhofer. Auch wenn der Wissenschaftler damals primär die Herstellung von sehr reinem Glas verfolgte, entdeckte er bei seinen Arbeiten etwas Ungewöhnliches: Als er das Sonnenlicht durch ein Prisma zerlegte, fand er zwischen den gewohnten Regenbogenfarben hunderte dunkler Linien. Mit seinem Apparat studierte Fraunhofer auch die Spektren des Mondlichts und die von Sternen. Auch darin fand er Linien, doch ihre Ursache konnte er nicht ergründen. Erst nach Mitte des 19. Jahrhunderts wurde klar, dass unterschiedliche Gase in den Atmosphären der Himmelsobjekte die schmalen Schatten in den Spektren verursachen, denn Licht wird durch die Atome dieser Gase zum Teil absorbiert. Dass das mit Atomaufbau, Elektronen und Photonen zu tun hat, entdeckten Physiker noch später. Wir erfahren es an den nächsten Stationen.

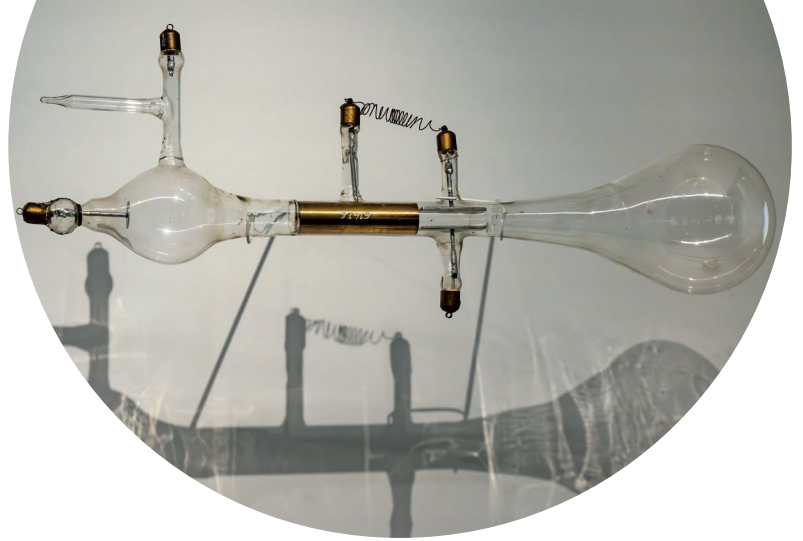
Ebene



### Geißlerröhre

#### Ebene 1: Atomphysik

Aus der Optik gehen wir hinaus zum Café und gegenüber in die Atomphysik. Zu Beginn sehen wir eine gewundene Röhre, an die man per Knopfdruck elektrische Hochspannung anlegt. Die Röhre leuchtet, denn in ihr ist Gas, das durch die Spannung ionisiert wird. Dadurch fließt Strom und das Gas leuchtet. Der Aufbau ist der Geißlerröhre nachgebaut, die im Original darunter zu sehen ist. Der Glasbläser Heinrich Geißler baute sie um 1860, ebenso wie die daneben stehende Quecksilber-Luftpumpe. Mit ihr konnte er in den Röhren ein hochgradiges Vakuum herstellen, um es anschließend mit Gas wie Neon oder Argon zu füllen. Geißlers Arbeiten bereiteten den Weg für die Entwicklung der Kathodenstrahlröhre (Braunschen Röhre) rund 40 Jahre später. Sie half bei der Entdeckung des Elektrons und ermöglichte auch den Bau der ersten (Röhren-)Fernseher.



### Linienpektren

#### Ebene 1: Atomphysik

Wenn wir rechts weitergehen, sehen wir eine der ersten Kathodenstrahlröhren. Links steht dann die interaktive Station „Linienpektren“. Durch drei Vakuum-Dampflampen, ähnlich dem Prinzip der Geißlerröhre, strahlt farbiges Licht aus Natrium-, Quecksilber- und Kadmium-Gas. Per Knopfdruck kann man Gitter zwischen die Lichtstrahlen schieben. Sie zerlegen die Lichtstrahlen in ihre Spektralfarben. Je nachdem welches der drei Gaslichter zerlegt wurde, erkennt man ein anderes individuelles Spektrum. Im frühen 20. Jahrhundert erkannte man, dass diese Spektrallinien (die ähnlich schon Fraunhofer gesehen aber nicht verstanden hatte) mit den sich ändernden Energieniveaus der Elektronen zusammenhängen, die zu den Atomen des jeweiligen Gases gehören. Niels Bohr entwickelte aus dieser Erkenntnis 1913 sein Atommodell (rechts in der Vitrine). In diesem Modell umkreisen Elektronen den Atomkern auf Bahnen. Für die Elektronen und ihre Energieniveaus wandte Bohr erstmals Gesetze der Quantenphysik an.



Ebene



1

**Lichtelektrischer Apparat/Fotozelle**

**Ebene 1: Atomphysik**

An der rechten Wand weiter vorne sehen wir oben (Nr. 3) den Lichtelektrischen Apparat von Julius Elster und Hans Geitel aus den 1890er Jahren. Er beinhaltet eine Fotozelle, in der einfallendes Licht an einer Photokathode Elektronen aus ihren zugehörigen Atomen herausschlägt. Sie erzeugen dann, von einer Anode angezogen, einen Stromfluss. Elster und Geitel fanden, dass die Stromstärke mit der Intensität des einfallenden Lichtes wächst. Der untere Apparat von Hallwachs bewies den Fotoeffekt ebenfalls: Licht fällt auf ein Metall und setzt Elektronen frei. Nach der Jahrhundertwende schlossen Max Planck und Albert Einstein, dass portionierte Mengen an Lichtenergie, Lichtquanten, zu dieser Freisetzung von Elektronen aus ihren Atomen führen. Daraus entwickelte sich das bis heute gültige Verständnis, dass Licht sowohl Welle (wir erinnern uns an die Wasserbecken anfangs in der Optik) als auch quantisiertes Teilchen (Photon) ist. Den photoelektrischen Effekt und die Freisetzung von Elektronen durch Photonen kann man weiter vorne selbst ausprobieren.



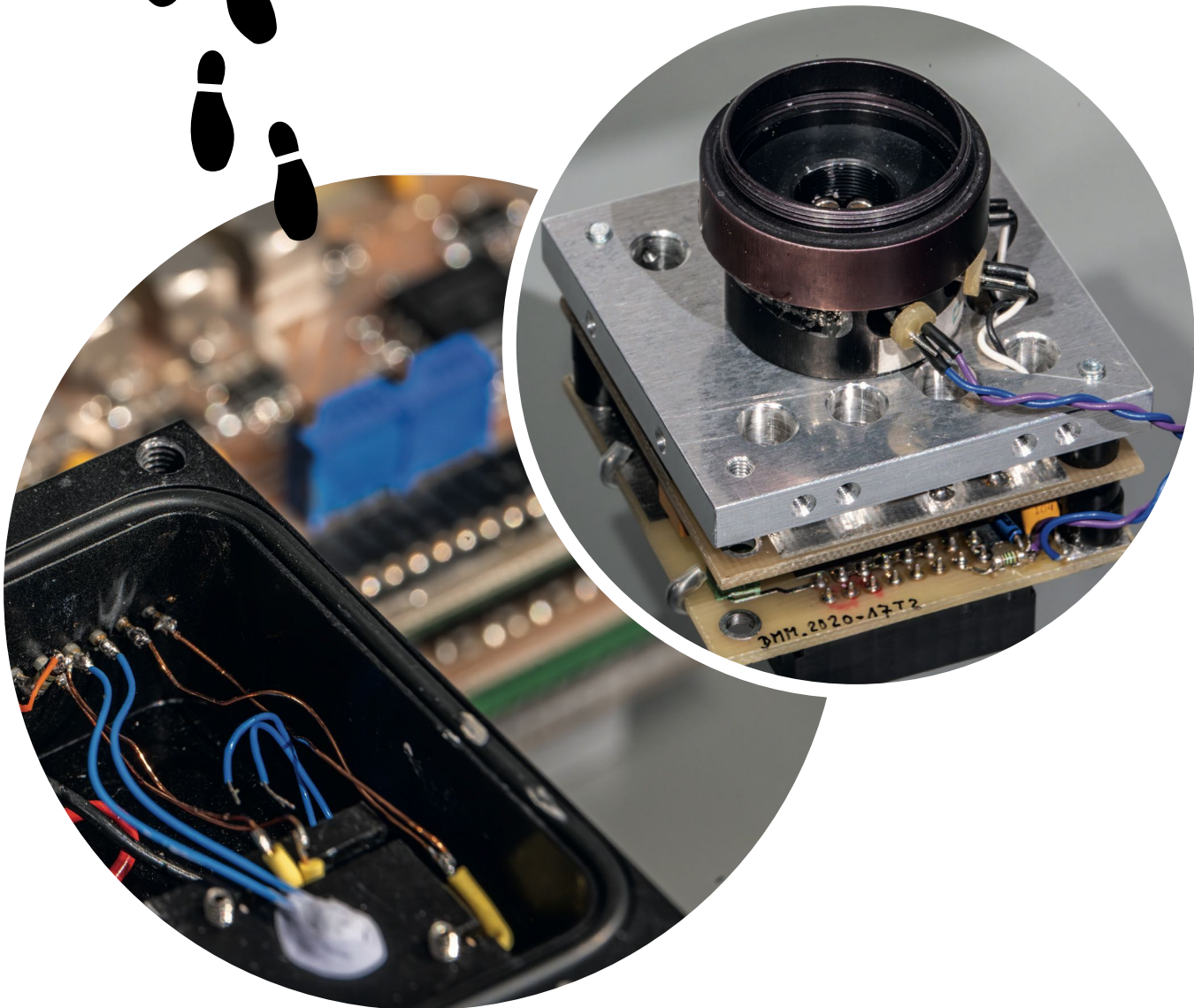
Ebene

2

### Quantenverschlüsselung im Hochgebirge

#### Ebene 2: Bild-Schrift-Codes

Wir können uns nun High-Tech-Anwendungen der Quantenphysik ansehen. Dazu geht es aus der Atomphysik am hinteren Ende hinaus und rechts in die Chemie. Wir durchqueren sie bis zum Liebig-Labor. Von dort gelangen wir per Treppe oder Aufzug in den zweiten Stock und in die Foto/Film-Abteilung. Links geht es in den Bereich „Bild-Schrift-Codes“. Ganz hinten rechts zeigt die Station, wie man Kommunikation abhörsicher verschlüsseln kann – mittels Quantenphysik. Forscher der LMU München sendeten dafür im Jahr 2002 polarisierte Lichtquanten von der Zugspitze zur rund 23 Kilometer entfernten Westlichen Karwendelspitze. Die Quantenphysik macht es potenziellen Hackern nahezu unmöglich, unbemerkt eine solche Kommunikation anzuzapfen. An der Station kann man selbst Spion spielen und dies probieren.



2

**Quantenprozessor**

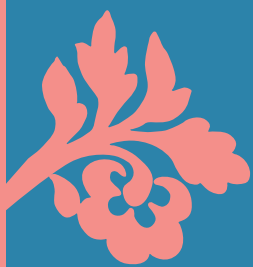
**Ebene 2: Elektronik**

Wir gehen zurück in die Foto/Film-Abteilung und an ihrem anderen Ende in die Elektronik. Im ersten Gang rechts liegt in einem Kasten der Sycamore-Quantenprozessor von Google. Das Unternehmen schenkte dem Deutschen Museum 2021 ein Exemplar. Sycamore wurde berühmt, da er 2019 eine – zugegebenermaßen spezielle – Aufgabe deutlich schneller als herkömmliche Supercomputer gelöst hat. Der ausgestellte Sycamore arbeitet mit 54 Qubits, die anders als gewöhnliche digitale Chips neben den üblichen Einsen und Nullen zusätzliche Quantenzustände annehmen können. Der Nachfolgeprozessor mit 70 Qubits soll laut Aussage von Google im Jahr 2023 noch Millionen mal schneller sein. Für kommerzielle Realisierungen brauchen Quantenprozessoren aber noch viel mehr Qubits. Bisher sind auch die Fehleranfälligkeit und die Anforderungen an die Kühlung hoch.

Wollen wir danach in die Sonderausstellung „Licht und Materie“, begeben wir uns mittels Treppe/Aufzug in Ebene 0. Dort bei den Brücken links, vorbei an der Modelleisenbahn und durch die Robotik zur Sonderausstellung.



Anzeige



**RADSPIELER**  
Seit 1841



***Radspieler – damit Einrichten Freude macht!***

Schreinerei und Inneneinrichtung – Stoffe und Mode – Glas, Geschirr und Tischwäsche  
Betten und Schränke – Stühle – Tische und Teppiche – Radspielereien

## Was ist eigentlich „Materie“?

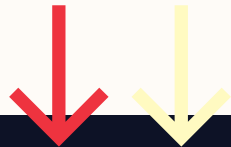
In der Physik wird alles, was eine Masse hat und Platz braucht, als Materie bezeichnet. Materie kann flüssig, fest oder gasförmig sein. Obwohl Materie aus kleinsten Atomen und Elementarteilchen besteht, können wir sie sehen, berühren oder mit anderen Sinnen wahrnehmen. Zusammengesetzt können diese klitzekleinen Bausteine komplexe Einheiten bilden, die unsere Welt formen. Doch Vorsicht – nicht alles besteht aus Materie. Licht- oder Laserstrahlen setzen sich nur aus Photonen zusammen, die keine Masse besitzen. Daher sind sie auch keine Materie.

## Faszination Licht

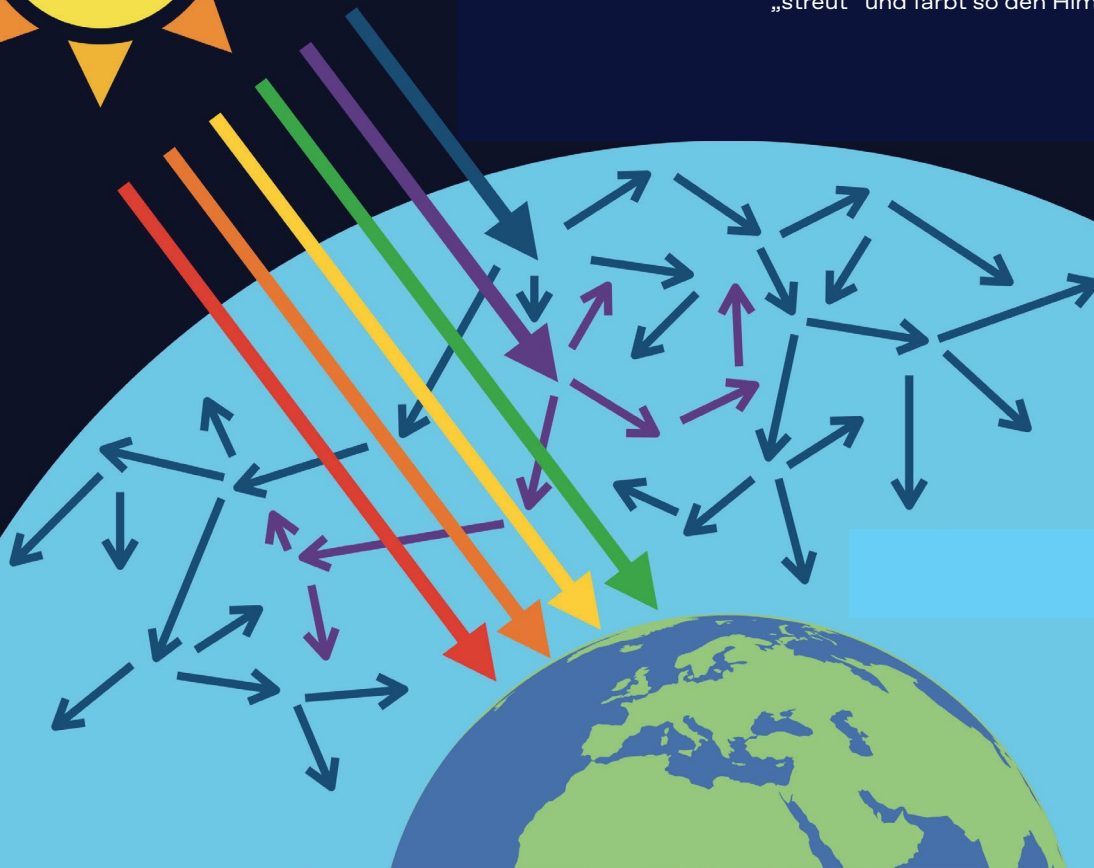
Lichtstrahlen bestehen aus unzähligen winzigen Teilchen, den Photonen. Diese haben viel Energie. Wie das Wasser im Meer breiten sich auch Lichtstrahlen wellenförmig aus. Die Abstände zwischen den einzelnen Wellen können kurz oder lang sein. Kurze Wellen erscheinen als blaues Licht, lange Wellen hingegen als rotes Licht.

Unsere stärkste Lichtquelle ist die Sonne. Sie besteht aus ganz vielen Wellen unterschiedlichster Längen. Auf ihren Weg zur Erde brauchen Sonnenstrahlen 8 Minuten und 19 Sekunden. Dabei bewegen sie sich in Lichtgeschwindigkeit. Das ist so schnell, dass wir die Bewegung nicht wahrnehmen können. Wir sehen nur die Lichtquelle und die Flecken, die das Licht macht.

Zerlegen wir das Licht der Sonne, bekommen wir einen wunderschönen Regenbogen mit all seinen bunten Farben. Mischen sich die Regenbogenfarben gleichmäßig, erscheint das Licht für unsere Augen wieder weiß.



Auf dem Weg zur Erde muss das Sonnenlicht durch die Atmosphäre hindurch. Dort befinden sich winzige Teilchen wie Wassertropfchen oder Staub. Diese Teilchen brechen die Sonnenstrahlen und lenken sie von ihrem Weg ab. Jede Farbe wird anders abgelenkt. Das blaue Licht wird besonders stark abgelenkt. Dadurch breitet es sich in alle Richtungen aus: Das blaue Licht „stret“ und färbt so den Himmel blau.



# MIKROMAKRO

## Atome und Moleküle

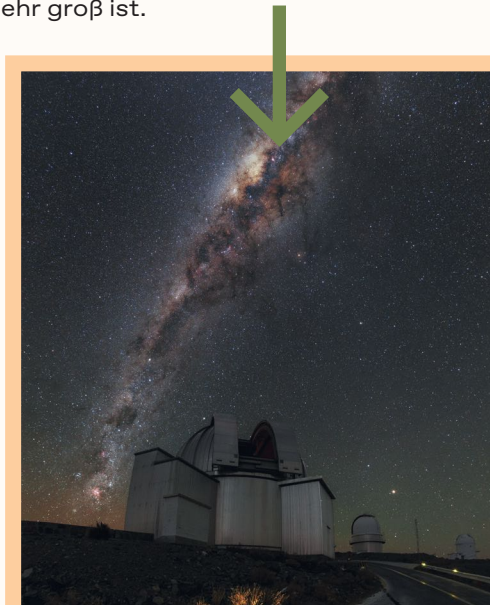
Pflanzen, Tiere, Menschen – die ganze Welt besteht aus Atomen und Molekülen. Ein Atom ist wie ein kleiner Baustein, der zusammen mit anderen Atomen ein großes Bauwerk ergibt. Atome selbst bestehen aus einer Hülle und einem Kern. Der Kern setzt sich aus den noch kleineren Protonen und Neutronen zusammen. Er ist je nach Atom unterschiedlich groß. Die Hülle eines Atoms besteht aus Elektronen, die den Kern wie eine Wolke einhüllen. Sie sind negativ geladen und kreisen blitzschnell um den Kern herum. Dabei werden sie durch die positiv geladenen Protonen des Kerns wie an einem unsichtbaren Faden festgehalten. Ein bekanntes Beispiel für ein Atom ist das Eisenatom. Dieses benötigen wir für den Sauerstofftransport in unserem Blut. Blut besteht zu einem Großteil aus Wasser. Wasser wiederum besteht aus zwei Wasserstoffatomen und einem Sauerstoffatom. So eine Kombination bezeichnet man als Molekül: Im Gegensatz zum Eisenatom besitzt ein Wassermolekül drei Kerne, die von einer Elektronenhülle umgeben sind. Der Kern macht also den Unterschied.

## Grüne Sonnenanbeter

Wenn wir eine Zimmerpflanze auf die Fensterbank stellen, können wir beobachten, dass sie zum einfallenden Licht wächst. Licht ist für Pflanzen das Lebenselixier. Sie brauchen es zur Energiegewinnung. Diesen Prozess nennt man Photosynthese. Dabei produzieren Pflanzen mit Hilfe der Sonne aus Wasser und Kohlendioxid energiereichen Zucker und Sauerstoff. Das Licht nehmen sie mit verschiedenen Photorezeptoren auf. Diese erfassen nicht nur die Stärke des Lichts, sondern auch die spezifische Farbe. Blaues Licht hilft Pflanzen bei der Bildung von Stängeln und Blättern. Rotes Licht hingegen regt ihre Blüten- und Fruchtbildung an. Oftmals enthalten die verschiedenen Lichtquellen in Räumen jedoch nur rotes oder nur blaues Licht. Abhilfe verschaffen dann spezielle Pflanzenlampen. Sie bringen das »Sonnenslicht« ins Haus und ermöglichen Zimmerpflanzen ein gesundes Wachstum.

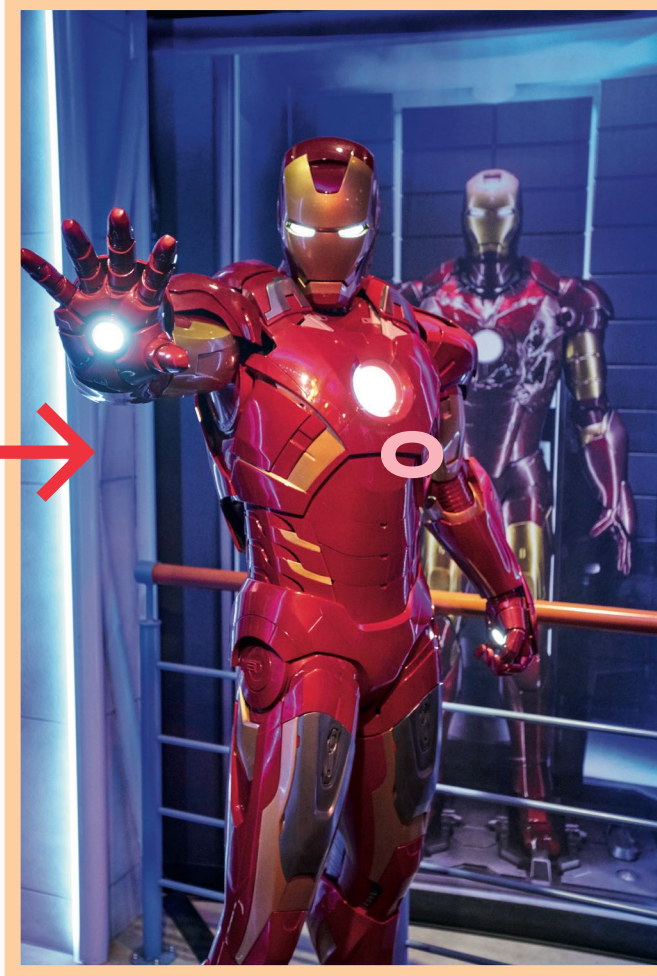
## Was Licht über Sterne verrät

Sterne bestehen aus heißem Gas. Die funkelnden Gaskugeln kann man mit einer Spektralanalyse genau untersuchen. Hierzu lässt man das Licht der Sterne auf ein Beugungsgitter fallen. Dieses Gitter zerlegt den Lichtstrahl in seine einzelnen Farbbereiche. Es entsteht ein sogenanntes Linienspektrum. Jedes leuchtende Gas hat sein eigenes Linienspektrum. Vergleicht man dieses mit dem Linienspektrum eines Sterns, kann man daraus schließen, aus welchen Gasen dieser besteht. Mit den Lichtfarben kann man auch die Oberflächentemperatur eines Sterns bestimmen: Ein kühler Stern erstrahlt im roten Licht, ein sehr heißer Stern leuchtet eher blau. Zieht man zusätzlich seine Leuchtkraft hinzu, kann man seine Größe erahnen: Ein blauer Stern mit kleiner Leuchtkraft ist eher klein, wohingegen ein roter Stern mit großer Leuchtkraft sehr groß ist.



## Die strahlenden Hände von Iron Man

Der coolste Superheld aller Marvel Charaktere ist wohl unangefochten Iron Man. Er kann fliegen, hat Superkräfte und feuert Energiestrahlen aus seinen Händen ab. Doch wäre so etwas tatsächlich möglich? Zumindest gibt es solche Energiestrahlen. In unserer Welt nennt man sie Laser. Das ist ein Strahl aus einer einzigen Lichtfarbe. Normalerweise breitet sich Licht in alle Richtungen aus. Beim Laser hingegen wird das Licht gebündelt, so dass es nur auf einen bestimmten Punkt strahlt. Um einen besonders starken Laserpuls zu erzeugen, braucht man einen Laser mit extrem hoher Leistung. Zudem muss man den Strahl des Lasers auf einen möglichst kleinen Punkt fokussieren. Mit ganz starken Lasern kann man so sogar Diamanten schneiden! Schwächere Laser werden dagegen beim Messen von Entfernungen und Geschwindigkeiten oder in Lichtshows eingesetzt. In der Sonderausstellung »Licht und Materie« kannst du einen richtigen Laser bestaunen.



## Spionageabwehr

Viele Informationen werden heutzutage über E-Mails und Telefonate kommuniziert. Die Informationen werden hierbei in Lichtsignale umgewandelt und dann über Glasfaserkabel blitzschnell verschickt. An ihrem Zielort angelangt, werden sie wieder in Bilder, Sprache oder Schrift zurückverwandelt. Auf ihrem Weg sollten die Informationen nicht an Unbefugte gelangen. Dafür ist ein sicheres Kommunikationsnetzwerk notwendig, bei dem jegliches Abfangen der Daten sofort aufgedeckt wird. Mit dieser Herausforderung beschäftigt sich die Quantenkryptographie. Eine Methode ist zum Beispiel das Quantenschlüsselverteilungsprotokoll. Hier erfolgt der Austausch der Informationen über Quantenteilchen, die Photonen. Versucht jemand die übertragenen Photonen abzufangen, ändert sich deren Zustand. Dadurch wird der Spion sofort entlarvt und die Kommunikation beendet.

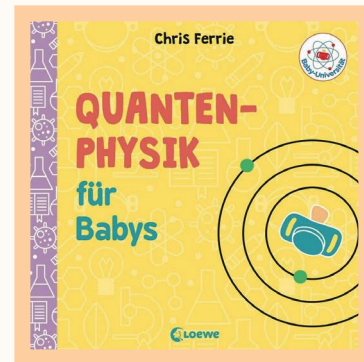
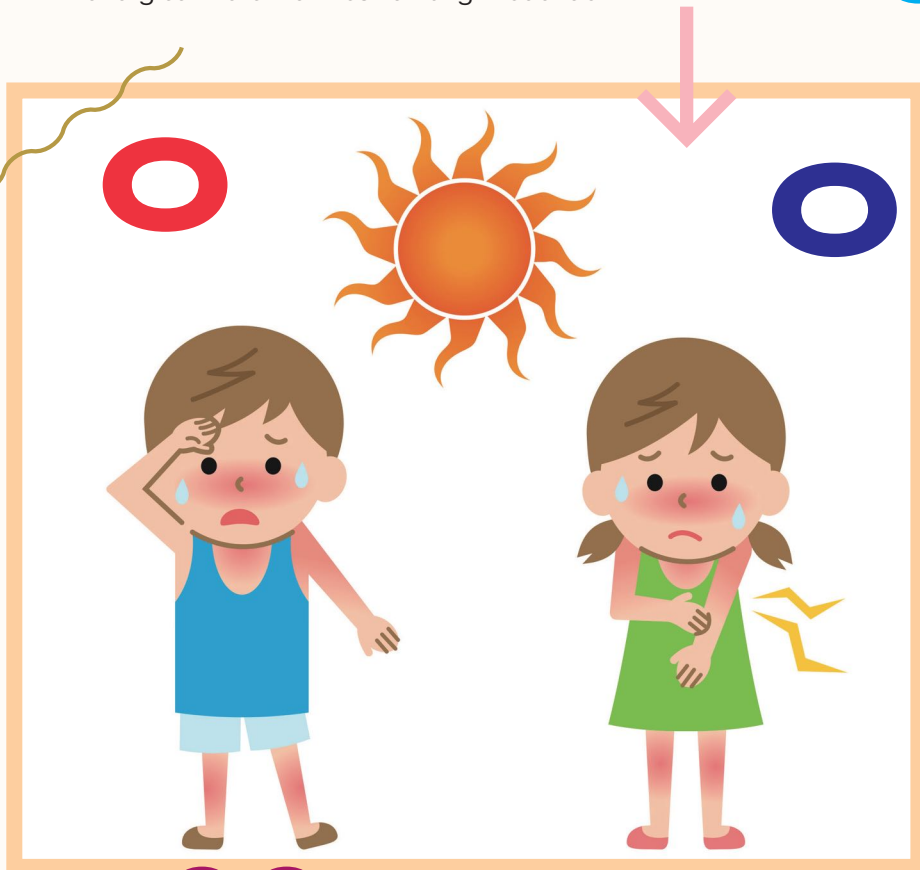
## Atomare Landschaft

Mit einem Rasterkraftmikroskop kann man den Mikrokosmos der Atome und Moleküle sichtbar machen. Es erfasst Oberflächen mit präziser Genauigkeit und stellt diese anschaulich dar. Dabei wird eine ganz feine Nadel mit Hilfe einer speziellen Feder gegen die Oberfläche der Probe gedrückt. Die Feder wird durch die atomaren Kräfte gebogen. Diese Biegung wird mit Licht gemessen. Aus den Messergebnissen wird dann die Kraft berechnet, die zwischen den Atomen der Oberfläche und der Spitze wirkt. Das Ergebnis wird am Ende zum Beispiel in Form von Erhebungen und Vertiefungen dargestellt und erinnert an eine Landschaft aus Bergen und Tälern.

# MIKROMAKRO

## Wenn Strahlung auf Materie trifft

Ob Sonnen-, Mikrowellen- oder Röntgenstrahlen – täglich durchdringen unterschiedlichste Strahlen unseren Körper. Manche Strahlen sind für uns ungefährlich, andere wiederum können uns krank machen. Je nach Art und Energiegehalt kann eine Strahlung mit der Materie auf verschiedene Weise wechselwirken. Elektromagnetische Strahlung, die man beispielsweise bei Mikrowellen findet, kann Teilchen zum Schwingen anregen und so Stoffe erwärmen. Die Bindungen innerhalb des Atoms oder Moleküls bleiben dabei unverändert. Anders verhält es sich beispielsweise mit Röntgenstrahlung. Sie kann Elektronen aus der Atomhülle herauschlagen. Zurück bleiben dann geladene Atome und Moleküle, die im Körper großen Schaden anrichten können. Daher wird Röntgenstrahlung immer nur in kleinen Mengen eingesetzt. Das Sonnenlicht enthält ebenfalls gefährliche Strahlung, nämlich das energiereiche UV-Licht. Liegt man zu lange in der Sonne, bekommt man einen Sonnenbrand und im schlimmsten Fall sogar Hautkrebs. Mit Sonnencremes kann man seine Haut davor schützen. Denn diese absorbieren die schädliche UV-Strahlung und geben sie als energieärmere Wärmestrahlung wieder ab.



## Buchtipps für kleine und große Genies

Das Buch „Baby-Universität - Quantenphysik für Baby“ von Chris Ferrie lässt uns in die faszinierende Quantenphysik eintauchen. Getreu dem Motto „Es ist niemals zu früh, ein Quantenphysiker zu werden!“ liefert es einen verständlichen Einblick in die verrückte Welt der tanzenden Atome. Das Buch eignet sich schon für kleine Forscher ab 2 Jahren. Es ist 2019 erschienen im Loewe-Verlag.

**Melanie Jahreis-Weindl** ist die Autorin der Seiten für Kinder und Familien. Sie studierte Biologie an der Technischen Universität München. Seit 2012 beschäftigt sie sich in Museen und anderen Einrichtungen mit der Vermittlung von Wissen für alle.



# Der Marathon-Mann

34 Jahre lang hat der Historiker, Professor Helmut Trischler das Gesicht des Deutschen Museums mit geprägt. Jetzt verabschiedet er sich in den Ruhestand.



35 Bücher, 180 Aufsätze, unzählige Projekte: 34 Jahre war Helmut Trischler am Deutschen Museum tätig, hat das Konzept für das Deutsche Museum in Bonn mitentwickelt, war Geburtshelfer der Flugwerft Schleißheim – und hat viel für das Renommee des Hauses getan. Kurz vor dem Ruhestand blickt er noch einmal auf seine Zeit auf der Museumsinsel zurück – und verrät, was er in den nächsten Jahren vorhat.

„Wenn man mir mit 18 erzählt hätte, dass ich einmal Leiter der Forschung im Deutschen Museum werde – ich hätte es nicht geglaubt“, sagt Helmut Trischler und lacht. In dem Regal in seinem Büro ist eine breite Palette von Themen zu finden. Da gibt es Bücher über den Klimawandel und seine Auswirkungen auf afrikanische Gesellschaften, über Humboldt, Eisenhower oder Recycling.

Das Bücherregal zeigt auch, dass Trischler von ganz vielen Wissensgebieten etwas versteht. „Ich bin nicht Generalist in dem Sinn, dass ich alles überblicke. Aber ich habe ein ziemlich breites Spektrum, und da hat es mir schon sehr geholfen, dass ich eigentlich aus der Allgemeingeschichte komme.“

Die Höhepunkte in seiner Museums-Karriere: die Gründung des Münchner Zentrums für Wissenschafts- und Technikgeschichte im Jahr 1997 – eine Kooperation von LMU, TU, Deutschem Museum und der Universität

der Bundeswehr; die Gründung des „Rachel Carson Centers für Umwelt und Gesellschaft“, das 2009 von LMU und Deutschem Museum ins Leben gerufen wurde und dessen Co-Direktor Trischler bis heute ist; und schließlich die große Sonderausstellung, die 2014 im Deutschen Museum eröffnet wurde: „Willkommen im Anthropozän“. Trischler selbst hatte die Ausstellung mitkonzipiert. Sie zeigte, wie sehr der Mensch das Gesicht der Erde prägt und es verändert. Es war eine untypische Ausstellung für das Deutsche Museum, und sie wäre ohne Trischler nicht möglich gewesen. Er selbst sagt: „Das Anthropozän war bis dahin ein unbesetztes Thema. Es hat uns neue Türen geöffnet und dabei geholfen, wichtige Zukunftsthemen im Haus zu platzieren. Das Thema hat das Deutsche Museum international sichtbar gemacht.“ Mehr als 190.000 Menschen aus dem In- und Ausland haben die Ausstellung besucht. Eine seiner letzten Amtshandlungen im Deutschen Museum war, das Haus erfolgreich bei der Evaluierung im Januar 2024 zu begleiten: Alle sieben Jahre wird das Haus daraufhin begutachtet, ob es auch alle Forschungsstandards erfüllt – das Renommee, aber auch Zuschüsse in erheblicher Höhe für das Museum hängen vom Ergebnis der Evaluierung ab. Seine Nachfolge sieht Helmut Trischler in guten Händen: Johannes-Geert Hagmann, Physiker und stellvertre-

tender Bereichsleiter für Ausstellungen und Sammlungen am Deutschen Museum, soll ihm als Leiter der Forschung zunächst übergangsweise folgen. Helmut Trischler aber freut sich, endlich mehr Zeit zu haben, um für Marathonläufe zu trainieren.

# Neu erschienen

## Cornelia Kemp: Licht – Bild – Experiment Franz von Kobell, Carl August Steinheil und die Erfindung der Fotografie in München

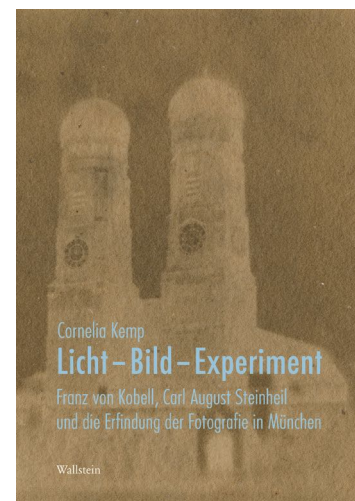
Muss die Geschichte der Fotografie neu geschrieben werden, beziehungsweise die Geschichte ihrer Anfänge? Das ist die Frage, angesichts der neuen Funde, Erkenntnisse und Thesen in Cornelia Kemps um einen Katalog ergänzter Monografie. 1837, also bereits zwei Jahre, bevor Henri Fox Talbot zu Beginn des Jahres 1839 vor der Londoner Royal Society seine Fotografien auf Papier bekannt machte, hatte in München der Mineraloge und Chemiker Franz von Kobell die Frauenkirche und andere Gebäude in Lichtbildern festgehalten, die er auf Papier fixierte. Mit dem konkurrierenden Verfahren, Fotografie auf Metall, beschäftigte sich Kobells Kollege an der dortigen Akademie der Wissenschaften, der Physiker Carl August Steinheil, seit April 1839 – somit drei Monate, bevor am 19. August 1839 in Paris Louis Daguerres Erfindung der »Daguerreotypie« bekannt gegeben wurde. Doch nicht nur mit Fotografie auf Metall und Papier setzten die beiden Münchner Wissenschaftler sich damals auseinander, sondern zusätzlich mit weiteren bildgebenden Verfahren wie Cliché-verre, Galvanoplastik, und Galvanografie. Eingebunden in akademische, künstlerische und gesellige Netzwerke und gefördert durch die Gunst des Königs, galt ihr Interesse, abseits von Kunst und Kommerz, vor allem den Eigenheiten der neuen Technologien, die sie über einige Jahre experimentell erkundeten. Cornelia Kemp erzählt dieses Kapitel der Fotografiegeschichte, gestützt auf umfangreiche Archivrecherchen, zeitgenössische Quellentexte und die Aufnahmen selbst. Sie stellt sowohl die fotografisch als auch die elektrolytisch erzeugten Arbeiten von Kobell und Steinheil erstmals detailliert vor und beleuchtet sie im Kontext der zeitgenössischen Rezeption. Der im Buch enthaltene Katalog mit seinen durchweg hochwertigen neuen Farbaufnahmen, verzeichnet neben Papier- und Metallbildern

sowie Instrumenten der beiden Münchner Pioniere auch ihre aus der Beschäftigung mit der Fotografie hervorgegangenen galvanischen Arbeiten, die bislang so gut wie gar nicht rezipiert wurden, sowie Kobells Clichés-verre, die als die weltweit Ersten überhaupt gelten dürfen.

Die Autorin erweitert damit die bislang vorwiegend auf Frankreich und Großbritannien konzentrierte Frühgeschichte der Fotografie um einen gewichtigen Beitrag aus dem deutschsprachigen Raum. Zugleich revidiert sie mit ihrer Studie auch die bisherigen widersprüchlichen Spekulationen einer Forschung, die hierzu in den 1930er Jahren eingesetzt hatte.

Bereits in zahlreichen Sonderausstellungen, Projekten und Publikationen hat sich die Kunsthistorikerin Cornelia Kemp mit Einzelaspekten wissenschaftlicher, experimenteller und künstlerischer Fotografie beschäftigt. Sie war über 25 Jahre Konservatorin für den Fachbereich Foto und Film im Deutschen Museum, in dessen Besitz sich die meisten der katalogisierten Artefakte befinden und in dem auch die hier erstveröffentlichten, bislang unbekanntenen Datierungen auf Kobells Arbeiten entdeckt wurden.

**Dorothee Messerschmid-Franzen**



Cornelia Kemp, Licht – Bild – Experiment  
Franz von Kobell, Carl August Steinheil und  
die Erfindung der Fotografie in München,  
Deutsches Museum. Abhandlungen und  
Berichte – Neue Folge; Bd. 37  
Wallstein Verlag, Göttingen 2024,  
351 Seiten  
ISBN 978-3-8353-5557-6, auch als E-Book

## Moderne Luftfahrt: Willkommen an Bord!

Gerade ist im hauseigenen Verlag des Deutschen Museums ein Begleitband zur Ausstellung Moderne Luftfahrt erschienen. Die neue Dauerausstellung, die hier zeitlich ab 1945 definiert wird, ist nicht chronologisch, sondern in Themenbereichen angelegt: Die komplexen technischen Entwicklungen im Flugzeugbau verlaufen schrittweise – die meisten Flugpassagiere vermögen eine vierstrahlige Boeing 707 aus der Frühzeit des Jetverkehrs kaum vom rund 40 Jahre jüngeren Airbus A340 zu unterscheiden. Die Ausstellung will daher den Blick unter die Flugzeughaut bieten und viele Facetten technischer Entwicklungen sowie zukünftige Entwicklungspotenziale beleuchten.

Der Band, herausgegeben vom Kurator Robert Kluge, ist bereits der sechste Band in der Katalogreihe »Naturwissenschaft Technik Gesellschaft«. Ziel dieser Reihe – ebenso wie der neuen Dauerausstellungen – ist es eine Brücke zu schlagen von Naturwissenschaft und Technik über Gesellschaft und Politik bis hin zu Kunst und Kultur. Die Luftfahrt bietet hier besonders viele Berührungspunkte, ist doch Fliegen heute für die meisten von uns ein ganz selbstverständlicher Teil des Reisealltags. Seit den ersten erfolgreichen Flugversuchen von Otto Lilienthal Ende des 19. Jahrhunderts hat sich die Luftfahrt zu einem wichtigen Teil der globalen Verkehrsroutine entwickelt. Dabei übt die Fortbewegung mit Flügeln und Rotoren immer noch eine besondere Faszination aus. Warum Flugzeuge überhaupt fliegen, woraus sie gebaut sind, wie sie bedient werden und natürlich was das Fliegen sicher macht, beschäftigt viele Menschen. Antworten auf diese und viele weitere Fragen findet man in der Ausstellung zur Modernen Luftfahrt und natürlich

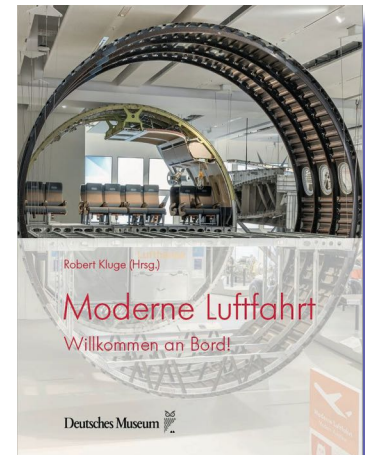
auch ausführlich im dazugehörigen Katalog.

Der mehr als 250 Seiten starke Katalog begleitet die Ausstellung mit zahlreichen Essays, spannenden Objektgeschichten und einem reich bebilderten Objektteil, die den Traum vom Fliegen in all seinen Facetten einfangen. So entsteht ein Querschnitt durch die Luftfahrtentwicklung und -geschichte seit 1945 – neben den komplexen technischen Entwicklungen im Flugzeugbau auch mit Blick auf Umweltaspekte und die Bedeutung für die Gesellschaft. Ausgehend von den Grundlagen des Fliegens geht es über den Flugzeugbau bis hin zur Vorstellung einzelner Systeme und Triebwerke. Eigene Themenbereiche befassen sich mit dem Starfighter und den Drehflüglern.

Im Mittelpunkt steht natürlich die repräsentative und weltweit beachtete Sammlung des Museums mit vorwiegend deutschen Konstruktionen aus allen Epochen der Zivil- und Militärluftfahrt. Großformatige Abbildungen erwecken Exponate wie den Hansa Jet oder Sikorsky-Hubschrauber zum Leben. Riesige Kabinensegmente, Triebwerke, Cockpits oder Flügel sind ebenso zu sehen wie kleinere Ausstellungsstücke, Flugzeugmodelle, interaktive Medienstationen und spannende Demonstrationen. Ein wichtiger Aspekt ist auch die besondere Sicherheitskultur in der Fliegerei, die wesentlich dazu beiträgt, das Flugzeug zum sichersten Verkehrsmittel zu machen. Darüber hinaus werden auch die vergleichsweise jungen Themenbereiche Ultraleichtfliegen, Tragschrauber, digitale Cockpitanzeigen und Drohentechnik mit attraktiven Objekten dokumentiert. Anhand der Objekte und mithilfe von vertiefenden Themenseiten werden komplexe Konzepte verständlich erklärt, sodass auch Leserinnen und Leser ohne tiefere Fachkenntnisse die Inhalte gut

verstehen und sich dem Thema Moderne Luftfahrt aus verschiedenen Perspektiven nähern können. Willkommen an Bord!

**Dr. Claudia Hellmann**



Robert Kluge (Hrsg.)  
Moderne Luftfahrt. Willkommen  
an Bord! Deutsches Museum,  
München, 2024, 258 Seiten  
ISBN 978-3-948808-22-8

## Geschichte – Kunst – KI Der Abschluss des IGGI-Projekts

Das Auditorium des Deutschen Museums war gut besucht, als Ulf Hashagen, Leiter des Forschungsinstituts des Deutschen Museums, die Abschlussfeier des Forschungsprojekts „IGGI – Ingenieur-Geist und Geistes-Ingenieure“ am späten Nachmittag des 15. Dezember eröffnete. Von 2019 bis 2023 hat das am Deutsche Museum angesiedelte Team um Rudolf Seising die Geschichte der Künstlichen Intelligenz in der Bundesrepublik Deutschland untersucht und konnte sich mit einem unterhaltsamen sowie abwechslungsreichen Programm verabschieden. Einblicke in die Arbeitsweise und Untersuchungsergebnisse boten Rudolf Seising und Helen Piel, Postdoktorandin im Projekt. Wie sie berichteten, konnte die Forschungsgruppe ihre Veröffentlichungen nicht nur in internationalen Zeitschriften platzieren, sondern auch komplett neues Quellenmaterial generieren: 42 ZeitzeugInnen-Gespräche wurden geführt und aufgezeichnet, Vor- und Nachlässe von KI-ForscherInnen für das Archiv des Deutschen Museums gesichert.

### Vorträge und abschließende Performance

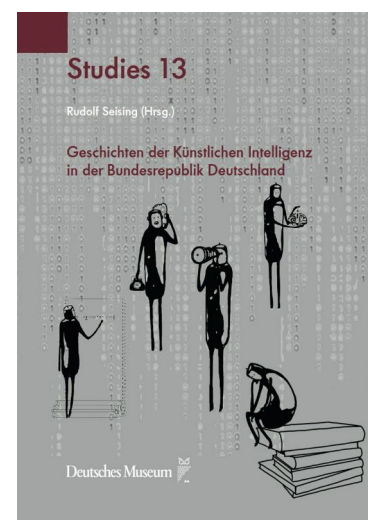
Die weiteren Programmpunkte öffneten den historischen Rahmen, US-amerikanische Entwicklungen, kulturelle Rezeption und künstlerische Reflexion wurden miteinbezogen. Stephanie Dick, Wissenschaftshistorikerin und Assistant Professor an der School of Communication der Simon Fraser University (Vancouver, Kanada), beschrieb am Beispiel des Automatischen Beweisens, wie die Entwicklung von KI als eine Geschichte von begrifflichen Verschiebungen erzählt werden kann. Bedeutungswandel war, so ihr Argument, essenziell für die Implementierung von Beweisverfahren auf Rechenmaschinen.

Georg Holzer, Chefdramaturg für Oper, Ballett und Konzert am Staatstheater Nürnberg, bot anhand ausgewählter Szenen eine Einführung in die Verarbeitung des Themas Künstliche Intelligenz in der Oper „Turing“, die das teils tragische Leben Alan Turings, Pionier moderner Rechnertechnologien, zum Thema hat. Die Künstlergruppe „Opernkollektiv Diva“ beschloss die Veranstaltung mit der Performance „Die seitliche Intelligenz der Diva – im Spangenglobus“ und regte damit Reflexion und Diskussion an.

Mit der Abschlussveranstaltung fiel auch die Open-Access-Publikation des Sammelbandes „Geschich-

ten der Künstlichen Intelligenz in der Bundesrepublik Deutschland“ (Verlag Deutsches Museum) zusammen. Die von den Projektbeteiligten verfassten „Geschichten der KI“ widmen sich den Bereichen des Automatischen Beweisens, der Sprach- und Bildverarbeitung, der Expertensysteme und der Kognitionswissenschaft. Sie bilden erste Mosaiksteine für eine fundierte KI-Geschichte Deutschlands, die nach wie vor ein Desiderat ist. Der Band macht jedoch bereits deutlich, dass die Genese der KI als Teilgebiet der Informatik als historischer Prozess zu verstehen ist, der sich aus der Zusammenführung diverser Forschungsstränge speiste. Die historische Verortung der Anfänge der bundesdeutschen KI-Forschung in den Grenzgebieten der Physik, Mathematik, Linguistik oder Psychologie sowie deren Einordnung in Forschungsförderung und -politik der Bundesrepublik liefern wertvolle Einblicke in die ursprünglichen Ziele und Nutzen eines Forschungsfeldes, das in seiner medialen Präsenz derzeit wohl kaum übertroffen ist. Es bleibt den Projektbeteiligten, Florian Müller, Dinah Pfau, Helen Piel, Rudolf Seising und Jakob Tschandl, zu dem erfolgreichen Abschluss ihres Projekts zu gratulieren. Die Veröffentlichung der entstanden Dissertationen und Monografien kann man gespannt erwarten. Bis dahin können Interessierte den Sammelband „Geschichten der Künstlichen Intelligenz in der Bundesrepublik Deutschland“ (hrsg. von Rudolf Seising), wie alle bisher erschienen Bände der DM Studies, gedruckt erwerben oder kostenfrei auf den Seiten der DM Studies herunterladen: [www.deutsches-museum.de/dm-studies](http://www.deutsches-museum.de/dm-studies).

**Markus Ehberger**



# Museum für alle barrierefrei

Barrierefreiheit war im Freundes- und Förderkreis Deutsches Museum schon ein Thema, als der Begriff noch wenig bekannt war. Heute ist das Museum führend bei diesem wichtigen Thema. Zeit für einen kurzen Rückblick. **Von Monika Czernin**

Es war ein Gründungsmitglied des Freundeskreises, dem die Barrierefreiheit ein großes Anliegen war, und zwar lange bevor dieser Begriff durch die UN-Behindertenrechtskonvention von 2006 zum allgemeinen Standard werden sollte. Christina Gräfin Podewils entwickelte schon bald nach der Gründung des Vereins im Jahr 2000 die „Seniorenführungen“, die sich bis heute großer Beliebtheit erfreuen und vom Freundeskreis gefördert werden. „Der Schub der Technik-Änderungen ist enorm“, begründete die Enkeltochter des Museumsgründers Oskar von Miller ihre Initiative. Sechzigjährige hätten oft kein Verständnis mehr für die aktuellen Entwicklungen – mit negativen Folgen für die Verbindungen zwischen den Generationen. Das wollte sie mit den Führungen, die sie oft auch selbst leitete, verändern.

## **Gütesiegel für Inklusion**

Seither ist vieles passiert – im Museum wie auch im Freundeskreis, der die Inklusion aller Besuchergruppen zu seinem Selbstverständnis zählt. Seien es Führungen für Gehörlose oder die Installation von Rampen für Rollstuhlfahrer. Auch die Inklusion von Migranten und Flüchtlingen wurde 2015 vom Freundeskreis gefördert. Seit 2023 ist das Museum nun mit dem staatlichen Gütesiegel „Bayern barrierefrei“ zertifiziert. Bei der Zukunftsinitiative wurde

Barrierefreiheit von Anfang an mit eingeplant: „Alles von der Anreise über die Parkplätze, den Kassenbereich, die Rollstühle zum Ausleihen über die Orientierung im Haus bis zu den speziellen Führungen, einer barrierefreien Website mit Informationen für Sehbehinderte, Gehörlose, Rollstuhlfahrer muss mitbedacht werden“, sagt Sandra Kittmann, die im Museum für die Barrierefreiheit zuständig ist. „Ich halte auch Vorträge in anderen Museen, denn wenn man es nicht von Anfang an einplant, funktioniert es meistens nicht.“ Und so geht es im generalsanierten ersten Bauabschnitt nun durchgängig barrierefrei zu. Das beginnt bei Rampen, Aufzügen und Hubliften, mit denen alle Ausstellungsebenen und Zwischengeschosse erreicht werden können, über unzählige Tast- und Hörstationen und endet bei der innovativen Museums App, die 600 Minuten Audioinhalte zu interaktiven Demonstrationen und 60 Tastmodellen sowie „Einfach Erklärt Stationen“ und Videos in Gebärdensprache als Teil der Highlight-Touren anbietet. In der neuen Gesundheitsausstellung kann man etwa eine Oberschenkelfraktur an einem ausgestellten Modell ertasten oder in der Luftfahrtausstellung Modelle der Junkers F13 oder des Flugboots Libelle mit den Händen erspüren und dazu Erklärun-

gen in Braille- oder Prismenschrift lesen. Auch die dreidimensionale Darstellung von Vincent van Goghs Sonnenblumen ist bereits ein Hit – nicht nur für Menschen, die nicht sehen können. „Es macht vielen Menschen Spaß, mit allen Sinnen auf Entdeckungsreise zu gehen“, sagt Sandra Kittmann.

## **Gehörlose führen Gehörlose**

Für Gehörlose gibt es eine Innovation, die in einigen Museen in Bayern angeboten wird: Bei den Sonderausstellungen „Kosmos Kaffee“ und „Energie wenden“ wurde sie zum ersten Mal getestet. Die „Museum Signers Führungen“, bei denen Gehörlose von Gehörlosen geführt werden, sind mittlerweile ein beliebtes Format, das den Austausch und die Kommunikation Gehörloser untereinander besser ermöglicht, als wenn Gebärdensprachdolmetscher eingesetzt werden.

## **Musikführung für Demenzkranke**

Ein weiteres Standbein des inklusiven Museums sind die Führungen für Demenzkranke, die das Museum in der Musikabteilung anbietet. Seit 2016 schon führen die beiden extra dafür ausgebildeten Museumsmitarbeiter Anna Schamberger und Christian Lang durch die Ausstellung und machen immer wieder die Erfahrung, welch große Hilfe Musik für Demenz-

erkrankte ist – sie ruft alte Erinnerungen und Gefühle wach und verbessert dadurch den Allgemeinzustand dieser Menschen.

### Ein Querschnittsthema

„Ein Museum für alle“, das ist der Anspruch, den auch Generaldirektor Wolfgang M. Heckl seit seinem Amtsantritt verfolgt hat. Dass das Museum heute so innovativ ist, verdankt es ihm, den vielen engagierten Mitarbeitern des Museums, angefangen von Sandra Kittmann und ihrem Team bis zu den engagierten Führern und Ehrenamtlichen, die mit viel Herzenswärme auf die speziellen Bedürfnisse besonderer Besuchergruppen eingehen. Ganz klar. Barrierefreiheit ist ein Querschnittsthema und es betrifft uns alle. Der Freundeskreis wird sich auch in Zukunft für dieses Thema engagieren.



Bild oben: Eine Gebärdendolmetscherin erläutert eine Chemie-Vorführung.



Bild unten: Bei speziellen Führungen für Demenzzranke erklingt auch die Orgel in der Ausstellung Musikinstrumente.

#### Jahresbeitrag

- 500 Euro für persönliche Mitgliedschaften
- 250 Euro für Juniormitgliedschaften (bis 35 Jahre)
- 2500 Euro für Mitgliedschaften mittelständischer Unternehmen nach EU-Norm
- 5000 Euro für Mitgliedschaften großer Unternehmen

#### Kontakt

Freundes- und Förderkreis  
Deutsches Museum e. V.  
Museumsinsel 1 · 80538 München  
[www.ffk-deutsches-museum.de/de](http://www.ffk-deutsches-museum.de/de)  
Ihre Ansprechpartnerin:  
Nicole Waldburger  
Tel. 089 / 28 74 84 21  
[info@ffk-deutsches-museum.de](mailto:info@ffk-deutsches-museum.de)  
[www.ffk-deutsches-museum.de/de](http://www.ffk-deutsches-museum.de/de)



Ihr digitaler Ausstellungsführer: Die App des Deutschen Museums fürs Smartphone.



Werden Sie jetzt Mitglied im  
Freundes- und Förderkreis  
Deutsches Museum!

# MITGLIEDER-



## Aktuelles

### Aktion Weltfrauentag im Blog

Der 8. März 2024 war ein besonderer Tag im Deutschen Museum: Am Internationalen Frauentag hatten Frauen und Mädchen in allen fünf Häusern freien Eintritt und standen im Zentrum zahlreicher Angebote. Ein voller Erfolg: Deutlich mehr Besucherinnen als üblich nahmen an Führungen und Workshops für Frauen und Mädchen teil. Ein Angebot, das gefehlt hat? Lassen Sie uns wissen, wenn Sie Interesse an Führungen von Frauen für Frauen haben.



Einblick in die Angebote des Tages finden Sie im Museumsblog



## Mitglieder sehen mehr

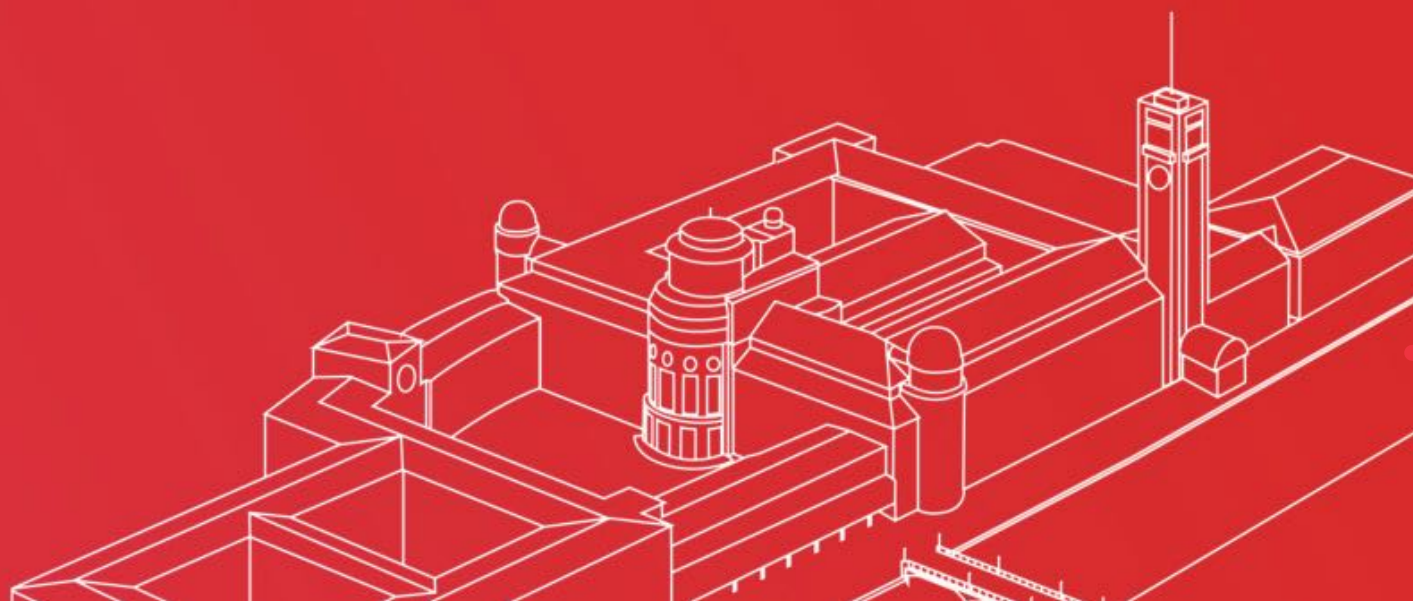
### Exklusive Mitgliederführungen und mehr

Jeden dritten Samstag und jeden dritten Mittwoch im Monat. Immer mit Anmeldung!

- Vor der Sommerpause gibt's Afterwork-Führungen mittwochs in der neuen Sonderausstellung „Licht und Materie“ sowie im Archiv und in der Bibliothek.
- Überraschende Perspektiven erleben Sie mit aktuellen Themen bei den Special-Highlight-Touren samstags auf der Museumsinsel.
- Ausstellungen anders erleben bei Familienführungen mit Workshop samstags.
- Mitgliederführungen samstags in Bonn – auf geht's zur Mission KI.
- Im Zukunftsmuseum Nürnberg können Mitglieder kostenlos an den Wochenend-Highlight-Touren teilnehmen.



Termindetails per Mitglieder-Newsletter und auf der Homepage





## Wir sagen Danke!

Spenden von Mitgliedern haben eine lange Tradition

Die Mitgliedschaft wurde schon von Oskar von Miller eingeführt. Seit rund 120 Jahren unterstützen die Mitglieder das Museum mit ihren Beiträgen und zusätzlichen Spenden.

Für Ihre Spenden im Zeitraum Januar bis März 2024 danken wir Ihnen ganz herzlich!

809 Spenden von 1 bis 199 Euro  
32 Spenden von 200 bis 1.000 Euro



## Unser Tipp!

Änderungen immer direkt an den Mitgliederservice

Ein Nachsendeauftrag bei der Post sorgt nicht unbedingt dafür, dass Sie unser Magazin weiterhin problemlos erhalten. Zwar erhält der Mitgliederservice die neue Adresse (oft, aber auch nicht verlässlich immer), aber das Heft wird vernichtet, nicht nachgeschickt.

Bitte so früh wie möglich an die Mitteilung denken; die Adressen werden drei Wochen vor Versand an den Verlag übermittelt.

Einfach per E-Mail an: [mitgliederinfo@deutsches-museum.de](mailto:mitgliederinfo@deutsches-museum.de)

**Achtung Laufzeit:**  
Die Mitgliedschaft läuft immer mit dem Kalenderjahr!  
Unabhängig vom Beitrittszeitpunkt ist der komplette Jahresbeitrag fällig.

## Mitglied werden

Die Mitgliedschaft im Deutschen Museum bietet viele Vorteile

Eine Karte. Fünf Museen. Jederzeit die Ausstellungen besuchen. Auch mit Begleitung. Kein Warten an den Kassen. An speziellen Führungen und Veranstaltungen teilnehmen. Hinter die Kulissen blicken mit Newsletter und Museumsmagazin. Auch als Geschenkmemberschaft!

### Mitgliederservice

Ansprechpartnerin: Angelika Hofstetter  
Museumsinsel 1, 80538 München  
Tel. +49 89 2179 310 (Mo und Do von 9 bis 12 Uhr)  
E-Mail: [mitgliederinfo@deutsches-museum.de](mailto:mitgliederinfo@deutsches-museum.de)  
Homepage: [deutsches-museum.de/mitgliederservice](https://deutsches-museum.de/mitgliederservice)



# SERVICE

## IMPRESSUM

**Kultur & Technik**  
**Das Magazin aus dem Deutschen Museum**  
**48. Jahrgang**

**Herausgeber:** Deutsches Museum München  
Prof. Dr. Wolfgang M. Heckl  
Museumsinsel 1, 80538 München  
Postfach 80306 München  
Telefon (089) 2179-1  
deutsches-museum.de

**Gesamtleitung:** Dr. Kathrin Mönch (Deutsches Museum)  
Dr. Stefan Bollmann (Verlag C.H.Beck, verantw.)

**Wissenschaftliche Beratung:** Eckhard Wallis

**Redaktion:** Sabrina Landes | publishNET (Leitung)  
Grafik: Rosa Süß, E-Mail: redaktion@publishnet.org

**Verlag:** Verlag C.H.Beck oHG, Wilhelmstraße 9, 80801 München;  
Postfach 400340, 80703 München, Telefon (089) 3 8189-0,  
Telefax (089) 3 8189-398, chbeck.de

**Redaktioneller Beirat:** Dr. Carola Dahlke (Kuratorin Informatik, Kryptologie), Dr. Frank Dittmann (Kurator Energietechnik, Starkstrom-technik, Automation), Gerrit Faust (Leiter Presse- und Öffentlichkeitsarbeit), Dr. Kathrin Mönch (Deutsches Museum Verlagsleitung), Dr. Rudolf Seising (Forschungsinstitut), Dr. Christian Sicka (Kurator Astronomie, Planetarium, Atomphysik, Zeitmessung)

**Herstellung:** Bettina Seng, Verlag C.H.Beck oHG

**Anzeigen:** Bertram Mehling (verantw.), Verlag C.H.Beck oHG,  
Anzeigenabteilung, Wilhelmstr. 9, 80801 München; Postfach 400340,  
80703 München; Disposition, Herstellung, Anzeigen, technische Daten:  
Telefon (089) 3 8189-609, Telefax (089) 3 8189-589.  
Zurzeit gilt Anzeigenpreisliste Nr. 40

**Druck, Bindung und Versand:** Holzmann Druck  
GmbH & Co. KG, Gewerbestraße 2,  
86825 Bad Wörishofen

**Bezugspreis 2024:** Jährlich 35,- Euro, Einzelheft 10 Euro,  
jeweils zuzüglich Versandkosten

**Weitere Informationen:** Deutsches Museum, Mitgliederservice,  
Museumsinsel 1, 80538 München, Telefon (089) 2179-310,  
mitgliederinfo@deutsches-museum.de,  
www.deutsches-museum.de/mitgliederservice

Für Mitglieder der Georg-Agricola-Gesellschaft zur Förderung der  
Geschichte der Naturwissenschaften und der Technik e. V. ist der Preis für  
den Bezug der Zeitschrift im Mitgliedsbeitrag enthalten. Weitere  
Informationen: Georg-Agricola-Gesellschaft, Institut für Wissenschafts-  
und Technikgeschichte, TU Bergakademie Freiberg, 09596 Freiberg,  
Telefon (03731) 393406

Bestellungen von Kultur & Technik über jede Buchhandlung und beim  
Verlag. Abbestellungen mindestens sechs Wochen vor Jahresende beim  
Verlag.

**Abo-Service:** Telefon (089) 3 8189-750  
Fax (089) 3 8189-402, E-Mail: kundenservice@beck.de

Die Zeitschrift erscheint vier Mal im Jahr. Sie und alle in ihr enthaltenen  
Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt. Jede  
Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes  
bedarf der Zustimmung des Verlags.

Der Verlag haftet nicht für unverlangt eingesandte Beiträge und  
Bilddokumente. Die Redaktion behält sich vor, eingereichte Manuskripte  
zu prüfen und ggf. abzulehnen. Ein Recht auf Abdruck besteht nicht.  
Namentlich gekennzeichnete Beiträge geben nicht die Meinung der  
Redaktion wieder. Die Verantwortung für die inhaltliche Richtigkeit liegt bei  
der jeweiligen Autorin/beim Autor.



ISSN 0344-5690



## Vorschau

**Ausgabe 03/2024 erscheint Ende September**

### Die wirkende Kraft

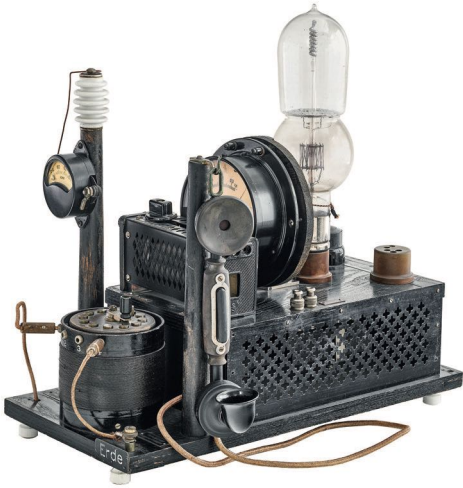
„Energeia“ hatte für die alten Griechen als „wirkende Kraft“ noch rein philosophische Bedeutung. Erst seit dem 19. Jahrhundert beschreibt der Begriff „Energie“ mechanische und physikalische Phänomene in Form potenzieller, kinetischer, elektrischer, chemischer oder thermischer Energie.

Unter dem Eindruck der Klimaveränderungen scheint der Blick auf das umfassende Thema „Energie“ also ziemlich verengt. Höchste Zeit, sich den vielfältig „wirkenden Kräften“ einmal grundsätzlicher anzunähern.

In unserer Ausgabe 3/2024 lesen Sie über die spannende Geschichte des Begriffs „Energie“, Sie erfahren, wie das Thema in den Ausstellungen präsentiert wird. Wir berichten über aktuelle Entwicklungen und Trends und beleuchten die Auswirkungen der „Energiewende“ auf die Trikont-Länder.

#### Bildnachweise Kultur & Technik 2/2024

(1) Rosa Süß; (3) Mehran Abjar; (4) Rosa Süß; (7) Deutsches Museum; (8) Thomas Young: A course of lectures on natural philosophy and the mechanical arts, Vol. 1, London, 1807, Tafel XXX;  
(11) Deutsches Museum, Ionenfallen aus der Arbeitsgruppe von Peter Toschek, Uni Heidelberg;  
(12, 15, 17) Thomas Einberger, argum; (19) picture alliance / Wolfgang Paterno; (27) Jan Greune / LMU; (28) Jan Heddergott / TUM; (29) Jan Greune / MPQ; (30) Christoph Hohmann / MCQST;  
(31) Christoph Hohmann / MCQST; (32-37) Thomas Einberger, argum; (38) depositphoto;  
(39) wikimedia; depositphoto; (40, 41) depositphoto; (42) Deutsches Museum / Reinhard Krause;  
(43) Wallstein Verlag; (44, 45) Deutsches Museum; (47) Deutsches Museum / FFK;  
(50) depositphoto;



Von der Sonnenuhr zum Fischer-Dübel  
100 faszinierende Porträts von Objekten zeigen die Entwicklung von Naturwissenschaft und Technik und spiegeln die großen Zusammenhänge der Weltgeschichte.

# Die Welt der Technik in 100 Objekten

WOLFGANG M. HECKL (HG.)



C.H.BECK

686 Seiten | 290 Abbildungen, davon 203 in Farbe | € 39,95 | ISBN 978-3-406-78314-2

alle Abb. © Deutsches Museum



# C.H.BECK

WWW.CHBECK.DE



**MERKUR**  
PRIVATBANK



# Für Ihre Geldanlage nur das Beste.

Die MERKUR PRIVATBANK gehört seit Jahren zur Elite der Vermögensverwalter im deutschsprachigen Raum.



089 59 99 80



[www.merkur-privatbank.de](http://www.merkur-privatbank.de)