

Löw | Quanten. 100 Seiten



* Reclam 100 Seiten *



ROBERT LÖW ist Quantenphysiker, lehrt und forscht an der Universität Stuttgart und ist überdies Ausstellungsmacher und Kinderbuchautor. Er studierte an der Universität Regensburg, der Wesleyan University und am Massachusetts Institute of Technology. 2023 erschien sein Kinderbuch *Das Elektron im Swimmingpool – Geschichten aus der unglaublichen Welt der Quantenphysik*.

Robert Löw
Quanten. 100 Seiten

RECLAM 

Der Verlag behält sich die Verwertung der urheberrechtlich geschützten Inhalte dieses Werkes für Zwecke des Text- und Data-Minings nach § 44 b UrhG ausdrücklich vor. Jegliche unbefugte Nutzung ist ausgeschlossen.

2024 Philipp Reclam jun. Verlag GmbH,
Siemensstraße 32, 71254 Ditzingen
Umschlaggestaltung: zero-media.net, München
Grafiken und Illustrationen: © Frieder Löw;
Autorenfoto: © Robert Löw
Umschlagmaterial: Creative Print, Schabert
Druck und Bindung: Esser printSolutions GmbH,
Untere Sonnenstraße 5, 84030 Ergolding
Printed in Germany 2024
RECLAM ist eine eingetragene Marke
der Philipp Reclam jun. GmbH & Co. KG, Stuttgart
ISBN 978-3-15-020712-3

www.reclam.de

Für mehr Informationen zur 100-Seiten-Reihe:
www.reclam.de/100Seiten

Inhalt

- 1 Wer oder was sind diese Quanten?
 - 7 Die drei Urväter der Quantenphysik
 - 34 Teilchen, Teilchen und noch mehr Teilchen
 - 42 Materiewellen
 - 53 Die Kopenhagener Deutung
 - 69 Spukhafte Fernwirkungen und
verschränkte Zustände
 - 75 Die zweite Quantenrevolution –
die Quanten ziehen in unseren Alltag ein
 - 95 Epilog – Quantenforschung global
- Im Anhang Lektüretipps – von leicht bis etwas schwer
Glossar



Wer oder was sind diese Quanten?

Es gibt eine Welt, die ist so verrückt, dass wir sie uns kaum vorstellen können. Dort passieren Dinge, die mit dem gesunden Menschenverstand nicht in Einklang zu bringen sind. Sie widersprechen unseren Alltagserfahrungen und der Realität, wie wir sie kennen, fundamental. Dennoch ist diese Welt, die Quantenwelt, völlig real, ja wir leben sogar mitten in ihr. Warum bekommen wir dann von diesen Verrücktheiten nichts mit? Weil sie im Verborgenen stattfinden. Man muss schon sehr genau hinsehen, um etwas Ungewöhnliches zu erkennen. Genau hingesehen haben vor über 100 Jahren die Urväter der Quantenphysik, und sie erkannten, dass das eine oder andere aus der klassischen Physik bekannte Dogma geopfert werden musste, damit ihre Beobachtungen weiterhin korrekt in Formeln gefasst werden konnten. Diese neuen Formeln haben eine wissenschaftliche Revolution eingeläutet, die sogenannte *erste* Quantenrevolution.

Die Entdeckung der Quanten ist aus heutiger Sicht eine schier unglaubliche Erfolgsgeschichte. Keine andere Theorie zuvor konnte unsere Welt so exakt bis in das winzigste Detail beschreiben. Quantentheorie und Experiment liefern sich hierbei oft ein Wettrennen. Wer kann besser rechnen, und wer

kann besser messen? Mal weiß es die Theorie genauer, und dann übertrifft das Experiment wiederum die Theorie. Es ist von jeher ein Kopf-an-Kopf-Rennen. Unmöglichste quantenphysikalische Szenarien werden erdacht, die so einfach nicht stimmen können, nur um sie dann im Labor genau so real werden zu lassen. Es gibt bislang keinen Widerspruch.

Ist die Quantentheorie damit die letzte Theorie, die alles beschreibt, die den ganzen Kosmos in Gleichungen zu fassen vermag? Zum Glück gibt es noch zahllose Probleme, die zu lösen sind. Die zunächst einfachen Ideen der Quantenphysik haben sich durch all die Jahrzehnte zu einer recht anspruchsvollen, aber sehr eleganten Theorie entwickelt, die als das Standardmodell der Elementarteilchenphysik bezeichnet wird. Damit lassen sich der Elektromagnetismus, die schwache und die starke Wechselwirkung, die nur im Atomkern eine Rolle spielt, 61 Elementarteilchen sowie Teile der Relativitätstheorie unter einen Quantenhut bringen. Gleichwohl sind noch viele Fragen offen. Warum sieht dieses Modell genau so aus, wie es aussieht? Warum weist es manche Symmetrien auf und andere nicht? Was ist mit all den Konstanten, die in das Modell fließen und nicht berechnet, sondern nur gemessen werden können? Dies betrifft die mikroskopische Welt. Aber auch auf kosmischen Skalen gibt es noch viele ungelöste Angelegenheiten. Hier sind die spezielle (ohne Gravitation) und die allgemeine Relativitätstheorie (mit Gravitation) der Goldstandard. Seit der Vereinheitlichung der Quantentheorie mit der speziellen Relativitätstheorie wissen wir, dass es zu jedem Teilchen ein Antiteilchen gibt und dass es kurz nach dem Urknall von beiden Sorten wohl gleich viele gab. Dennoch finden wir in unserem Universum nur Materie und kaum Antimaterie vor. Wo hält sich die Antimaterie also versteckt? Was ist

mit der dunklen Energie und der dunklen Materie? Durch astronomische Beobachtungen wissen wir, dass zusätzliche Kräfte an den Galaxien zerrern. Es scheint, als könnten wir im Universum $1/3$ der Materie und $2/3$ der Energie gar nicht sehen. Sie müssen aber da sein, um die Beobachtungen zur Ausdehnung des Universums zu erklären. Da diese fehlende Materie und die fehlende Energie nur indirekt beobachtbar sind, gaben die Physiker:innen ihnen die Namen »dunkle Materie« und »dunkle Energie«. Etwas Suspense kann ja nicht schaden.

Was im Detail dahintersteckt, ist bislang ein Mysterium. Und wie all das in eine allumfassende Theorie passen könnte, ist dabei das größte Rätsel.

Alle suchen nach den Antworten, aber auch nach den passenden Fragen danach, was unsere Welt im Großen und im Kleinsten zusammenhält. Aber jenseits dieser Gruppe, die der klassischen Forschung zugewandt ist, gibt es Ingenieur:innen, Informatiker:innen, Professor:innen und Techniker:innen, die sich einer ganz anderen Fragestellung widmen: Wie kann man die Verrücktheiten der Quantenwelt im Labor gezielt herbeiführen und kontrollieren, um sie nutzbar zu machen? Können sie als reale Apparaturen unsere Welt technisch voranbringen? Die Quanten können Dinge, die wir in unserer klassischen Welt nicht können. Zum Beispiel an zwei Orten gleichzeitig sein, über spukhafte Fernwirkungen miteinander kommunizieren, Informationen teleportieren oder potentiell halbtote Katzen in Kisten sperren. Letzteres ist denkbar, aber quantenphysikalisch etwas aufwändiger. Erwin Schrödinger wird sich später im Buch an dieser Disziplin versuchen. Das alles hört sich mitunter obskur an, ist es aber nicht. Alles, was auf der Quantenebene vor sich geht, kann exakt berechnet, in vorher-sagbare Aussagen überführt und mit Messungen verifiziert

werden. So präzise die Quantentheorie jedoch unsere Welt beschreiben mag, so ist sie doch bisweilen etwas sperrig, wenn man sie im Detail durchdringen will. Diese Verständnislücke macht sich die Esoterik gerne zunutze und erfindet die wildesten Dinge, wie zum Beispiel die Quantenheilung – aus wissenschaftlicher Sicht ein großer Quatsch. Wenn Physiker:innen in hochgerüsteten Laboren über Jahre hinweg aufwändigste Experimente entwickeln, um die Quanten überhaupt zu Gesicht zu bekommen, ist mit bloßem Handauflegen quantenphysikalisch nicht viel zu bewirken oder gar zu heilen.

Die Quantenphysik ist real, wurde in Laboren unzählige Male ausgetestet, und ihre Beschaffenheit wurde in Millionen von Fachartikeln beschrieben. Sie ist inzwischen so gut erforscht, dass sie die Labore hinter sich zurücklassen kann, um der Welt ihr Potential zur Verfügung zu stellen. In diesem Sinne wurde um die Jahrtausendwende eine *zweite* Quantenrevolution ausgerufen. Bei der ersten Revolution ging es noch darum, die elementaren Eigenschaften der Quantenwelt zu durchdringen und zu verstehen, welche Konsequenzen sie auf angrenzende Naturwissenschaften wie die Chemie, die Biologie oder auch die Materialwissenschaften hat. Die heutige Maxime ist, das Potential der Quanten in Form ganz konkreter Anwendungen auszuschöpfen. Um ehrlich zu sein, ist das seit der Formulierung der Quantentheorie schon vielfach passiert (Erfindungen wie der Laser, der Transistor oder die Kernspintomographie gehen auf quantentheoretische Erkenntnisse zurück), wurde aber nicht so programmatisch ausgedrückt. Wir wollen heute explizit Quantencomputer, abhörsichere Quantenkommunikation und Quantensensoren, die alle besser sind als ihre klassischen Pendants. Und es ist tatsächlich so: Die Quantentechnologien ziehen in unsere Lebenswelt ein. Wer

Geld hat, kann sich schon heute einen echten Quantencomputer in ein hinreichend großes Wohnzimmer stellen. Diese Apparaturen sind noch sehr aufwändig, kostspielig und groß. Aber Konrad Zuses erster Computer war auch weit weg von den heutigen briefmarkengroßen Prozessoren. Nebenher entwickeln fast alle Industrienationen ihre Glasfasernetze weiter, um für die abhörsichere Quantenkommunikation vorbereitet zu sein. Und wer es auf die interkontinentale Längenskala abgesehen hat, installiert photonenfunkende Satelliten. Das sind alles größere Infrastrukturprojekte, aber die Quantensensoren spielen bereits jetzt in unserem unmittelbaren Alltag eine große Rolle. Zum Beispiel gibt es zentimetergroße quantenbasierte Magnetsensoren, die mit hoher Genauigkeit die Aktivitäten in unserem Gehirn beobachten. Damit können nichtinvasiv und orts aufgelöst Schädigungen im Hirn erkannt werden. Dasselbe Schema kann benutzt werden, um die Impulse von Nervenenden in amputierten Gliedmaßen zu messen. Damit können völlig neuartige steuerbare Prothesen entstehen.

Wir wissen heute, dass die klassische Welt, wie wir sie sehen, uns nur als solche erscheint und in der Tiefe ganz anders funktioniert. Im Großen spüren wir auch nichts von Raumzeitkrümmungen und relativistischen Zeitdilatationen, da wir einfach zu leicht und zu langsam durch diese Welt reisen. Die Eigenarten der Relativitätstheorie lassen Sie sich am besten von Stephen Hawking in seinen Büchern erklären. Vereinfachend ließe sich aber sagen: Für die kosmischen Skalen sind wir als Menschen viel zu klein und für die Skalen der Quantenwelt viel zu groß. Daher sind uns im Alltag die Relativitätstheorie und die Quantentheorie ähnlich fern. Witzigerweise sogar ungefähr um denselben Faktor. Nehmen wir an, dass unser Leben auf der Meterskala seinen Lauf nimmt, so ist die

Quantenphysik bei einem Milliardstel Meter dominant und die Relativitätstheorie bei Milliarden von Metern. Wir leben genau in der Mitte. Aber in naher Zukunft werden wir der Quantenphysik öfter begegnen, sie passt ja durch ihre winzige Größe auch besser in unsere Welt hinein. Manchmal werden das Forschungsergebnisse aus der Grundlagenforschung sein, aber wahrscheinlicher wird uns die Quantenphysik in Form neuartiger Technologien begegnen, eingehüllt in einen gut isolierten metallischen Kasten mit vielen Kabeln, die zu einem klassischen Computer führen, und weiteren Kabeln, die uns am Monitor oder im Internet anzeigen, was passiert. Von außen wird es schwer sein, zu unterscheiden, ob das nur tolle Elektronik ist oder Quantentechnologien dahinterstecken.

Wie weit kann man als Laie die Quantenphysik verstehen? Ohne ein Studium der Grundlagen der Physik, der Mathematik, in der sie aufgeschrieben ist, und einer Diskussion der philosophischen Konsequenzen kommt man schnell an Grenzen. Aber das ist mit allen Wissenschaften so. Wer durchdringt denn, wie ein Mikroprozessor mit Milliarden von Transistoren funktioniert? Oder wie der mikrobiologische Kosmos unser Leben zusammenhält? Unmöglich. Zu komplex. Aber man kann die elementaren Bausteine verstehen und wie sie zusammenarbeiten und ineinandergreifen. Was macht ein einzelner Transistor in meinem Laptop? Wie kombiniert er seine Transistoren, um $1 + 1 = 2$ zu berechnen? Und was macht ein Quantencomputer mit seinen Quantengattern, was wird wohl das Ergebnis von $1 + 1$ sein? Beides ist gar nicht so schwer zu verstehen, man muss nur etwas genauer hinsehen. Das machen wir jetzt. Los geht's. Ganz von Anfang an.



Die drei Urväter der Quantenphysik

Große Umschwünge, einmal losgetreten, fühlen sich oft zunächst nicht sehr gewaltig an. Manchmal ist selbst den beteiligten Personen nicht bewusst, dass sie gerade eine Revolution auslösen. So war es auch mit der Quantenphysik, als Max Planck sie 1900 aus der Taufe hob. Dieser Physiker aus Berlin nahm sich eines scheinbar leichten Physikkrätsels an: Mit welcher Farbe leuchten glühende Körper, je nach Temperatur? Das Rätsel war aber recht vertrackt, und es war eine sonderbare Konstruktion, die er zur Lösung des Problems entworfen hatte: Energie soll nur in Paketen bestimmter Größe existieren. Seine Kollegen waren ... skeptisch. Sogar Max Planck selbst wunderte sich, was er da erschaffen hatte. Es passte einfach so überhaupt nicht zu der bislang bekannten Physik. Wie es der Zufall wollte, las weit entfernt in der Schweiz ein junger Albert Einstein die »Abhandlungen (Plancks) mit geteilten Gefühlen«. Aber er las sie mit Neugier und machte sich ernsthafte Gedanken zu dieser seltsamen Theorie. Seine Erweiterungen der Planck'schen Arbeiten verhalfen der Quantenphysik letztendlich zum Durchbruch. Als dritter Urvater folgte etwas später der Däne Niels Bohr, der auch die materielle Welt der Atome quantenphysikalisch erklären konnte. Mit seinem Bohr'schen Atom-

modell war er so etwas wie der Katalysator der neuen Theorie. Seine Interpretation der Quantenphysik aus dem Jahre 1927 ist bis heute kanonisch. Damit ist die ganze Welt, alles Licht und alle Materie, quantenphysikalisch beschreibbar. Die Revolution war an diesem Punkt schon wieder fast vorbei. Nur die Öffentlichkeit bekam davon erst einmal wenig mit, und es dauerte bis in die 1970er Jahre, bis die Quantentheorie etwa im Schulunterricht auftauchte. Diese erste Quantenrevolution war also eine sehr gemächliche. Aber was genau hat Max Planck denn da vor weit über 100 Jahren losgetreten?

Die Quanten kommen

Berlin, 14. Dezember 1900, ein nasskalter Tag, der für die Physik so entscheidend sein wird wie jener Sommertag 1665, als angeblich ein Apfel auf Isaac Newtons Kopf fiel. Max Planck eilt von seiner Wohnung in Grunewald nach Berlin Mitte, um dort einen Vortrag über glühende Körper zu halten und nebenbei die Welt vor einer Katastrophe zu bewahren. Der Ultraviolettkatastrophe, die zwar nicht die Welt bedroht, aber in der theoretischen Physik ein großes Problem darstellt. Im ausgehenden 19. Jahrhundert schien in der Physik vieles geklärt zu sein. Johannes Kepler (1571–1630) hatte die Bewegung der Planeten erklärt, Isaac Newton (1643–1727) hatte sie in exakte Formeln gefasst, und James Clerk Maxwell (1831–1871) hatte die Elektrizität in vier einfache Gleichungen gezwungen. Aufbauend auf diesem Wissen hatte Rudolf Diesel (1858–1913) den ersten Verbrennungsmotor entwickelt und Nikola Tesla (1856–1943) die verrücktesten elektrischen Apparaturen erfunden, wie ferngesteuerte Schiffe und riesige Blitzgenerato-

ren. Aber diese heile Welt war nur scheinbar perfekt, es gab physikalische Phänomene, die sich der sogenannten klassischen Physik entzogen. Phänomene, die sich eben nicht mit Kepler, Newton und Maxwell erklären ließen. Man dachte sich, das seien Detailprobleme, die man schon gelöst bekomme, wenn man nur etwas genauer rechne. Nichts, worum man sich allzu große Gedanken machen müsste. Aber das entpuppte sich als grundlegend falsch. Viele, völlig neue, nie gedachte Gedanken waren nötig, um so etwas Einfaches wie ein glühendes Metallstück korrekt in einer Formel beschreiben zu können. Worum geht es hier? Glühende Körper leuchten je nach Temperatur in verschiedenen Farben. Ein Holzsplitter verglimmt rötlich, eine deutlich heißere Eisenstange leuchtet gelborange, und die wirklich sehr heiße Sonne strahlt gelblichweiß vom Himmel. Das sind ganz unterschiedliche Objekte, aber allen ist gemein, dass nur die Temperatur vorgibt, welche Farbe das ausgesendete Licht hat.

Im Labor benutzten gleich mehrere Forschergruppen erhitztes pechbeschichtetes Platin, einen sogenannten »schwarzen Strahler«, um dieses Farbenspiel genauer zu studieren. Die beiden führenden Teams waren Ernst Pringsheim und Otto Lummer sowie Heinrich Rubens und Ferdinand Kurlbaum. Beide Labore befanden sich in der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt Berlin und zählten zu den bestausgestatteten Forschungslaboren der Welt. Damit waren die wichtigsten Protagonisten allesamt gleichzeitig in Berlin, und der intensive persönliche Kontakt war entscheidend für die rasche Entwicklung der Quantenphysik. Um was für eine Art von Leuchten handelt es sich hier? Es ist keine Verbrennung oder chemische Reaktion – allein die Temperatur erzeugt das Leuchten. Ein Festkörper besteht aus Atomen, die miteinander verbunden