

Gerhard Murer

Eine Reise durch die Quantenwelt

Von den Anfängen
der Quantenphysik
bis zum Quantencomputer –
anschaulich und kompakt

SACHBUCH

 Springer

Eine Reise durch die Quantenwelt

Gerhard Murer

Eine Reise durch die Quantenwelt

Von den Anfängen der
Quantenphysik bis zum
Quantencomputer –
anschaulich und kompakt



Springer

Gerhard Murer
Graz, Österreich

ISBN 978-3-662-63268-0 ISBN 978-3-662-63269-7 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-63269-7>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert durch Springer-Verlag GmbH, DE, ein Teil von Springer Nature 2021

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Andreas Rüdinger

Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Vorwort

Dieses Buch entstand aus einer Reihe von Vorträgen für die interessierte Allgemeinheit, Blog-Beiträgen und Beiträgen in nichtwissenschaftlichen Printmedien, die ich während und neben meiner beruflichen Tätigkeit bei der Anton Paar GmbH in Graz (Österreich) verfasst habe. Diese sind hier zusammengeführt, ausgebaut und mit einem roten Faden versehen. Begonnen habe ich damit schon vor einigen Jahren, aber einen Gutteil der Arbeit während der Corona-Zeit des Jahres 2020 geleistet und so das unerwartete Zeitangebot nutzbringend verwenden können.

Das Buch richtet sich an Leserinnen und Leser, die über eine naturwissenschaftliche oder technische Grundbildung verfügen und mehr über Quantenphysik wissen wollen, ohne sich in die ausgeprägte Fachliteratur vertiefen zu wollen. Die Idee dieses Buch ist, einen Überblick über dieses uns alle betreffende Fachgebiet in möglichst anschaulicher Form zu geben. Ich spanne den Bogen von der Entwicklung der Quantentheorie und den Schlüsselexperimenten, die dazu gemacht wurden, über wesentliche Phänomene der Quantenwelt, bereits seit längerer Zeit verfügbare Anwendung bis zu den aktuellen Entwicklungen, die im Quantencomputer gipfeln.

VI Vorwort

Die präsentierten Inhalte basieren auf Lehr- und Fachbüchern, wissenschaftlichen Veröffentlichungen, YouTube-Videos, Wikipedia sowie meiner beruflichen Erfahrung im Bereich der Analytischen Instrumente. Im Anhang sind die wichtigsten verwendeten Quellen sowie die interessantesten Möglichkeiten zum Weiterlesen und Weiterlernen angegeben.

Ich danke allen Kolleginnen und Kollegen von der Anton Paar GmbH und der TU Graz, die mich durch ihre Ideen und Hilfestellungen beim Schreiben dieses Buches unterstützt haben. Mein besonderer Dank gilt Herrn Univ.-Prof. i.R. Dr. Günther Malle, der das Manuskript nicht nur gelesen, sondern intensiv studiert, korrigiert und mit wesentlichen Verbesserungsvorschlägen versehen hat. Schließlich möchte ich mich bei Herrn Dr. Andreas Rüdinger und Frau Stefanie Adam vom Springer Verlag für die professionelle Begleitung dieses Buchprojekts herzlich bedanken.

Ich wünsche Ihnen, liebe Leserin und lieber Leser, dass Ihnen dieses Buch spannende neue Einblicke in die Eigenheiten der Natur im Bereich ihrer kleinsten Bausteine bereitet!

Graz, Österreich
April 2021

Gerhard Murer

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
2	Von der Erfahrungswelt zur Quantenwelt	7
3	Das Atom und seine Entdeckung	21
3.1	Von den Anfängen zum Bohr'schen Atommodell . . .	23
3.2	Die Wellenmechanik	38
3.3	Das Periodensystem der Elemente	58
4	Was ist denn eigentlich Licht?	65
5	Wie verhalten sich massebehaftete Quantenteilchen?	83
6	Phänomene der Quantenwelt	97
6.1	Quantisierung und Wellenfunktion	98
6.2	Superposition	105
6.3	Die Heisenberg'sche Unbestimmtheitsrelation . . .	112
6.4	Rotationsquantisierung	119
6.5	Spin	125
6.6	Tunneleffekt	132
6.7	Absoluter Zufall	136
6.8	Verschränkung	139
6.9	Dekohärenz und Messung	148
6.10	Rabi-Oszillationen	155

VIII Inhaltsverzeichnis

7 Anwendungen der Quantenphysik aus der Praxis ... 159

- 7.1 Atomspektroskopie 159
- 7.2 Röntgenfluoreszenzspektroskopie 163
- 7.3 Molekülspektroskopie 166
- 7.4 Magnetresonanzspektroskopie und
Magnetresonanzbilderzeugung 181
- 7.5 Rastertunnel- und Rasterkraftmikroskopie 187
- 7.6 Atomuhren 192

**8 Die neuen Quantentechnologien: Quantencomputer
& Co. 201**

- 8.1 Wie klassische Computer funktionieren 203
- 8.2 Rechnen mit Quantenbits 209
- 8.3 Quantenprozessoren 217
- 8.4 Quantengatter 222
- 8.5 Quantenalgorithmen 228
- 8.6 Realisierungen und Anwendungen von
Quantencomputern 240
- 8.7 Quantendatenübertragung 244
- 8.8 Quantensensoren 250

9 Resümee 257

Anhang: Literatur und mehr 275

Stichwortverzeichnis 283



1

Einführung

„Die Quantenwelt lässt sich nur mathematisch beschreiben, sie kann nicht anschaulich dargestellt werden“, ist die Meinung führender Physiker. Der prominente Quantenphysiker **Niels Bohr** (Abb. 1.1) war der Ansicht, dass eine eigene Quantenwelt gar nicht existiere, sondern nur eine abstrakte Beschreibung quantenphysikalischer Vorgänge, deren Auswirkungen auf unsere Erfahrungswelt wir dann mehr oder weniger gut beobachten können.

Kann man die Quantenwelt so anschaulich darstellen, dass man auch ohne viel Mathematik ein Grundverständnis darüber erlangen kann, frage ich mich zu Beginn dieses Buches. Ich glaube „ja!“, denn ich selber habe auch so meine Schwierigkeiten mit mathematischen Beschreibungen und entwickle daher lieber Bilder, die ich im Kopf behalten kann. Dabei ist völlig klar, dass solche Bilder problematisch sein können, weil sie oft unzutreffende Vorstellungen wecken.

Eine Frage, die sich natürlich sofort stellt, ist die Frage nach dem Warum. Warum in aller Welt sollen sich Normalbürge-



Abb. 1.1 Niels Bohr, dänischer Physiker (1885–1962, Nobelpreis für Physik 1922). (pa · picture alliance, 9944583)

rinnen und Normalbürger für die Quantenwelt interessieren, also: „Wozu braucht man denn das?“. Nun ja, alles, aber auch wirklich alles in uns und um uns herum wird auf den unteren Ebenen von dieser Quantenwelt regiert. Dass es stabile Atome und Moleküle gibt, aus denen unser Universum aufgebaut ist, dass unser Körper funktioniert, dass die Sonne leuchtet, dass es unsere geliebten Handys und das Internet gibt sowie MRT-Bilder aus unserem Körper, falls uns eine schwere Krankheit plagt, moderne spezifisch wirksame Medikamente usw., alles das basiert auf den Gesetzen dieser Quantenwelt. Ist das nicht Grund genug, sich dafür zu interessieren?

Heute stehen wir an der Schwelle zur nächsten Quantenrevolution: Die Quantenwelt wurde vor gut 100 Jahren entdeckt. Einige ihrer Eigenschaften erschienen so bizarr, dass niemand glaubte, sie würden je nachweisbar sein oder gar im normalen Leben Anwendungen finden. Doch das hat sich in den letzten Jahrzehnten geändert. Durch den technologischen Fortschritt konnten auch die besonders fremdartigen Voraussagen experimentell bestätigt werden. Dabei wurden auch neue Anwendungen für Quantentechnologien, etwa der Quantencomputer oder die Quantenkryptografie, erdacht. Diese Quantentechnologien wer-

den heutzutage entwickelt und in den nächsten Jahren auf den Markt kommen.

Erste Systeme zur verschlüsselten Datenübertragung mittels Quantenkryptografie, bei denen erkennbar ist, ob sie abgehört wurden, sind bereits heute verfügbar. Auch einen ersten Quantencomputer für spezielle Anwendungen kann man bereits kaufen, wenn man das nötige Kleingeld dafür hat, wobei umstritten ist, wie viel Quantenfunktionalität dabei tatsächlich verfügbar ist. Und über das Internet gibt es bereits den freien Zugang zu einfachen Quantencomputern, den jeder von uns benutzen kann. Wir können jedenfalls davon ausgehen, dass Quantentechnologien in Zukunft in verstärktem Maße Eingang in unser Alltagsleben finden werden. In allen Industrienationen werden heute hohe Geldbeträge in die Erforschung und Umsetzung von Quantentechnologien gepumpt. Daher ist es hoch an der Zeit, sich auch in der Öffentlichkeit damit auseinanderzusetzen. Dabei will ich mit diesem Buch helfen.

Dieses Buch trägt im Titel den Begriff einer Reise. Wie bei einer gut geplanten Studienreise werden wir nicht jeden Ort der Quantenwelt besuchen, sondern eine Auswahl treffen. Daher werden einige Detail Elemente fehlen, aber das Gesamtbild wird dennoch klar hervortreten. Die einzelnen Abschnitte dieses Buches sind in sich schlüssig und können unabhängig voneinander gelesen werden. Dadurch kommen Inhalte in einigen Fällen mehrfach vor; das hat aber den Vorteil, dass Sie auch dann problemlos weiterlesen können, wenn Sie einen Abschnitt anfangs nicht verstehen können. Wo es mir möglich ist, versuche ich von den uns vertrauten Phänomenen des Alltags auszugehen und ihre quantenphysikalische Bedeutung zu erklären. In einigen Abschnitten gibt es auch kurze mathematische Formeln und Ableitungen. Diese sind als Zusatzinformationen für Interessierte gedacht und für das Verständnis dieses Buches nicht grundlegend.

Im Kapitel „Von der Erfahrungswelt zur Quantenwelt“ gehen wir vom menschlichen Maß – dem Meter – aus und arbeiten uns Stufe um Stufe in die physikalische Unterwelt hinab. Gegenüber einer normalen Treppe hat unsere Stufenleiter eine spezielle Eigenschaft: Jede Stufe nach unten ist zehnmal kleiner als die vorherige. So werden wir nicht weit vorankommen, werden Sie sich wohl denken. Doch lassen Sie sich überraschen. Nicht umsonst hat **Richard Feynman** (Abb. 1.2) schon vor Jahrzehnten darauf hingewiesen, dass es da unten sehr viel Raum zu entdecken gibt. Auf unserem Weg nach unten werden wir immer wieder anhalten und uns vergegenwärtigen, welche Formen von Materie und Licht bzw. Strahlung für die jeweilige Stufe beispielhaft sind.

„Das Atom und seine Entdeckung“ zeichnet die spannende Geschichte nach, warum und wie die einzelnen Teile des Atoms entdeckt wurden und welche Anstrengungen es erforderte, daraus ein konsistentes Bild des Atoms zu entwickeln. Beginnend im 19. Jahrhundert bei einem bekannten Zweifler am Atomaufbau der Materie, dem österreichischen Physiker **Ernst Mach**, und seiner provokanten Frage „Ham’s schon mal eins g’sehn?“, werden wir uns bis



Abb. 1.2 Richard Feynman, amerikanischer Physiker (1918–1988, Nobelpreis für Physik 1965). (pa · picture alliance, 9005236)

etwa 1930 vorarbeiten. Damit war dann das Atom zumindest aus chemischer Sicht so modelliert, wie wir es heute noch als zutreffend ansehen.

Der Frage „Was ist denn eigentlich Licht?“ werden wir uns im nächsten Kapitel widmen. Schon jetzt sei verraten, dass es darauf mehr als eine Antwort gibt und dass jede dieser Antworten irgendwie unvollständig ist. Wir werden beim Gelehrtenstreit zwischen **Isaac Newton** und **Christiaan Huygens** in die Geschichte einsteigen. Über die Erklärung des Spektrums des schwarzen Strahlers durch **Max Planck** werden wir schließlich zur Quantenhypothese des Lichts von **Albert Einstein** und seinen Folgen gelangen.

Wenn Licht, das wir meistens als Welle beschreiben, auch Teilcheneigenschaften hat, dann sollten massebehaftete Teilchen auch Welleneigenschaften haben, dachte sich **Louis de Broglie** 1923 (Abb. 1.3) und löste damit eine Revolution aus. „Wie verhalten sich massebehaftete Quantenteilchen?“, werden wir uns fragen und nach einem kurzen Abriss über das Thema „Masse“ auf das Wellenbild der Quantenteilchen bauen. Vom berühmten Davisson-Germer-Experiment aus dem Jahr 1927 bis zu den spannenden Experimenten von



Abb. 1.3 Louis de Broglie, französischer Physiker (1892–1987, Nobelpreis für Physik 1929). (pa · picture alliance, 107573559)

Anton Zeilinger und **Markus Arndt** in den letzten Jahrzehnten werden wir dabei den Bogen spannen.

Im Kapitel „Phänomene der Quantenwelt“ werden wir schließlich in die wichtigsten Eigenheiten der Quantenwelt eintauchen. Wir werden uns von der Entdeckungsgeschichte leiten lassen und auch die Auswirkungen auf unseren Alltag aufzeigen, wenn diese erkennbar sind. Mit den einfachst möglichen Mitteln werden wir Fragen wie „Was bedeutet Quantisierung und wie entsteht sie?“ beantworten. Auch vor so spannenden Eigenheiten wie der Verschränkung, die heute als die wichtigste Eigenschaft von Quantensystemen überhaupt gilt, werden wir dabei nicht zurückschrecken.

Im vorletzten Kapitel werden wir uns „Anwendungen der Quantenphysik aus der Praxis“ widmen. Es geht darum, wie quantenphysikalische Zusammenhänge genutzt werden, um neue Erkenntnisse zu gewinnen und Standards herzustellen. Wir werden Verfahren aus der chemischen Analytik, medizinischen Diagnostik, Metrologie und Materialcharakterisierung kennenlernen, die sich auf die Quantenphysik stützen.

Im letzten Kapitel „Die neuen Quantentechnologien: Quantencomputer & Co.“ werden wir die neuen Quantentechnologien skizzieren, die derzeit entwickelt werden oder bereits verfügbar sind. Wir werden uns vor allem auf den Quantencomputer konzentrieren und ganz grundlegend diskutieren, wo die Unterschiede zwischen klassischem Computer und Quantencomputer liegen. Insbesondere werden wir zu verstehen versuchen, für welche Anwendungen der Quantencomputer Vorteile verspricht und welche Realisierungsmöglichkeiten dafür heute verfolgt werden. Abschnitte über Quantendatenübertragung und Quantensensoren beschließen dieses Kapitel.

Begeben wir uns also auf die Reise und beginnen mit unserem Abstieg in die Quantenwelt ...



2

Von der Erfahrungswelt zur Quantenwelt

Die meisten erwachsenen Menschen sind zwischen einem und zwei Meter groß. Das hat zwar mit der **Meterdefinition** nur mittelbar zu tun, denn diese wurde erstmals 1799 aus dem damals bekannten Erdumfang abgeleitet. Doch war die Idee dabei klarerweise, eine Längeneinheit zu schaffen, die in ihrer Größenordnung der des Menschen entspricht. Seit 1983 wird die Metereinheit aus der Strecke abgeleitet, die Licht im Vakuum in knapp mehr als einer Dreihundert-millionstelsekunde durchläuft.

Für die Quantenwelt ist der Meter eine völlig unpassende Einheit, weil er viel zu lang ist. Wir werden uns daher mit winzigen Bruchteilen eines Meters herumschlagen müssen, eine echte Hürde für alle, die nicht täglich damit zu tun haben. Weil Mathematiker, Physiker und Chemiker aus gutem Grund schreibfaul sind, haben sie sich besondere Zeichenfolgen ausgedacht, um nicht jedes Mal eine lange Schlange an Nullen hinter dem Komma schreiben zu müssen. Gerne werden Hochzahlen verwendet. Eine negative Hochzahl nach einer „10“ bedeutet etwa, dass entsprechend

viele Nullen inklusive der Null vor dem Komma anzuschreiben sind, bevor dann eine Eins folgt. Die wichtigsten Bruchteile des Meters sind (Tab. 2.1):

In der Quantenwelt treffen wir auf noch zwei Einheiten, die gerne verwendet werden: Ein **Ångström** (abgekürzt 1 Å) ist ein zehnmilliardstel Meter oder 0,1 nm und entspricht etwa dem Durchmesser eines Atoms. Ein **Fermi** ist ein Femtometer und entspricht etwa dem Radius – das ist der halbe Durchmesser – eines Protons, dem Kern des Wasserstoffatoms. Nachdem wir uns nun das Rüstzeug für die Orientierung in der Quantenwelt besorgt haben, kann unser Abstieg beginnen. Dazu erstellen wir uns einen Abstiegsplan und illustrieren auf diesem die wichtigen Stufen mit Größenbeispielen. Gegenüber einer normalen Treppe hat die in Abb. 2.1 dargestellte eine besondere Eigenschaft: Mit jeder Stufe nach unten wird das Längenmaß um den Faktor 10 kleiner.

Jugendliche lassen sich bekanntlich gerne von der Musik aus tragbaren Soundmaschinen unterhalten. Vielleicht ist Ihnen aufgefallen, dass die Antenne für den Radioempfang etwa einen Meter lang ausgezogen werden kann. Der Grund dafür ist, dass eine Antenne unter geeigneten Bedingungen gut funktioniert, wenn ihre Länge etwa ein Viertel der Wellenlänge des Radiosignals beträgt. Radiosignale sind Wellen, und zwar **elektromagnetische Wellen**. Diese breiten sich mit **Lichtgeschwindigkeit** aus, also mit etwa 300.000 km/s bzw. $3 \cdot 10^8$ m/s. Das erscheint unfassbar schnell, doch in kosmischen Maßstäben gedacht ist das gar nicht so schnell. Immer-

Tab. 2.1 Längeneinheiten für die Quantenwelt

1 Meter	1 Meter	1 m	10^0 m
1 tausendstel Meter	1 Millimeter	1 mm	10^{-3} m
1 millionstel Meter	1 Mikrometer	1 μ m	10^{-6} m
1 milliardstel Meter	1 Nanometer	1 nm	10^{-9} m
1 billionstel Meter	1 Pikometer	1 pm	10^{-12} m
1 milliardstel Meter	1 Femtometer	1 fm	10^{-15} m
1 trillionstel Meter	1 Attometer	1 am	10^{-18} m

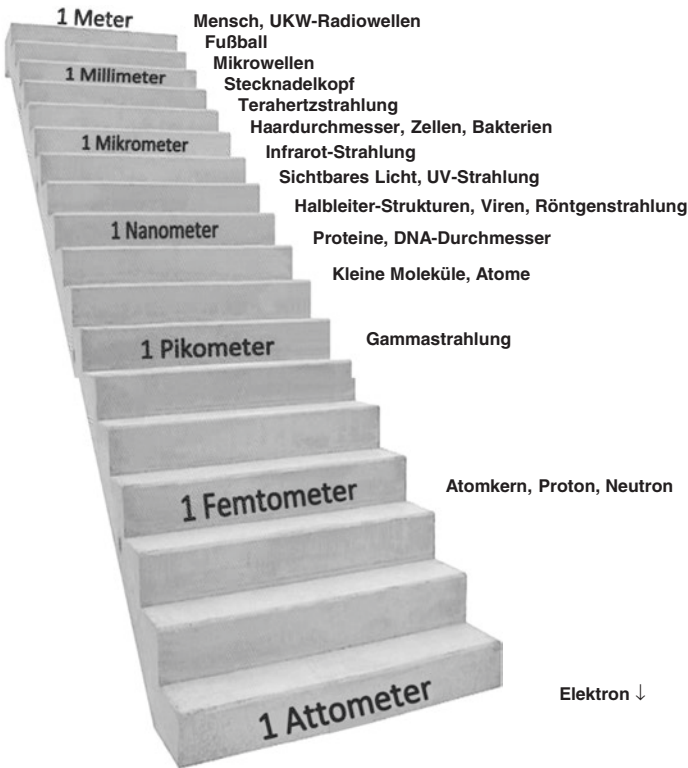


Abb. 2.1 Die Stufen in die physikalische Unterwelt

hin dauert es schon mehr als acht Minuten, bis das Sonnenlicht die Erde erreicht. Vom nächstgelegenen Stern – Proxima Centauri – ist das Licht über 4 Jahre zu uns unterwegs.

Wie Meereswellen haben **Radiowellen** Wellenberge und Wellentäler. Den Abstand zweier Wellenberge oder zweier Wellentäler nennt man **Wellenlänge**. Die Wellenlänge der **UKW-Wellen**, die heute zur Übertragung des Radiosignals verwendet werden, beträgt etwa drei Meter. Daraus ergibt sich die günstigste Länge der Radioantenne von knapp einem Meter. Elektromagnetische Wellen mit dieser Wellenlänge sind nicht nur für Musikfreunde wichtig, sondern

spielen auch in der chemischen Analytik und in der Medizin eine interessante Rolle. In einem Magnetresonanztomografen, das ist diese große, laute Röhre, in die Sie vielleicht im Krankenhaus geschoben werden, senden die Wasserstoffatome in Ihrem Körper solche Radiowellen aus. Daraus kann dann ein Computer Schnittbilder Ihres Körperinneren errechnen.

Ist das menschliche Maß der Meter, so ist das (vorwiegend) männliche Maß der Fußball. Bei der Recherche für dieses Buch habe ich gelernt, dass ein Fußball ungefähr 220 mm Durchmesser hat. Wenn Sie meinen, das sei nicht so wichtig, liegen Sie natürlich richtig. Der Grund für die Erwähnung des Fußballs ist, dass wir mit seiner Hilfe erstaunliche Größenvergleiche bewerkstelligen werden. Ebenso werden wir den auch für die weibliche Bevölkerungshälfte kaum mehr interessanten Stecknadelkopf, der einige Millimeter Durchmesser aufweist, nur dafür heranziehen.

Zwischen Fußball- und Stecknadelkopfdurchmesser liegt die Wellenlänge der **Mikrowellen**, die wir im Haushalt zur Erwärmung von Speisen verwenden. Mikrowellen sind nicht nur im Haushalt nützlich, sie dienen auch zur Signalübertragung bei Mobiltelefonen und haben verschiedenste Anwendungen in der Medizin, Chemie und Materialwissenschaft. Das Handy hat heute keine sichtbare Antenne mehr, denn die ist nur wenige Zentimeter lang und im Gehäuse versteckt. Wenn Ihnen bei manchen Telefonaten mit dem Mobiltelefon die Ohren heiß werden, dann hat dies aber eher nichts mit dem leistungsschwachen Mikrowellenübertragungssignal zu tun. Vielmehr dürfte der Gesprächsinhalt daran Schuld haben, dass Ihr Körper mehr Wärme produziert als üblich. Nachdem aber Auswirkungen elektromagnetischer Strahlung auf unser elektrochemisch funktionierendes Nervensystem nicht grundsätzlich ausgeschlossen werden können, sollte man bei langer Gesprächsdauer besser eine Freisprecheinrichtung verwenden.

Deutlich unter einem Millimeter liegen die Wellenlängen der elektromagnetischen **Terahertzstrahlung**. Wenn Sie diesem Ausdruck noch nie begegnet sind, so sind Sie damit nicht allein. Diese Art der Strahlung findet erst seit wenigen Jahren Anwendung in der Technik. Ihr Haupteinsatzgebiet liegt in der Sicherheitsüberprüfung von Personen in Flughäfen. Wenn Sie dort in eine weitgehend durchsichtige Kabine gehen und die Hände über den Kopf heben müssen, werden Sie mit Terahertzstrahlung durchleuchtet, um am Körper versteckte Waffen oder Sprengstoffe aufzuspüren (Abb. 2.2).

Mit dem Durchmesser des menschlichen Kopfhaares, der bei 20 bis 80 μm liegt, haben wir auch schon etwa die Auflösungsgrenze des menschlichen Auges erreicht. Zwei Objekte, die kleiner als ein Haardurchmesser sind und etwa so einen Abstand voneinander haben, können wir nicht mehr als Einzelobjekte wahrnehmen, sofern wir keine

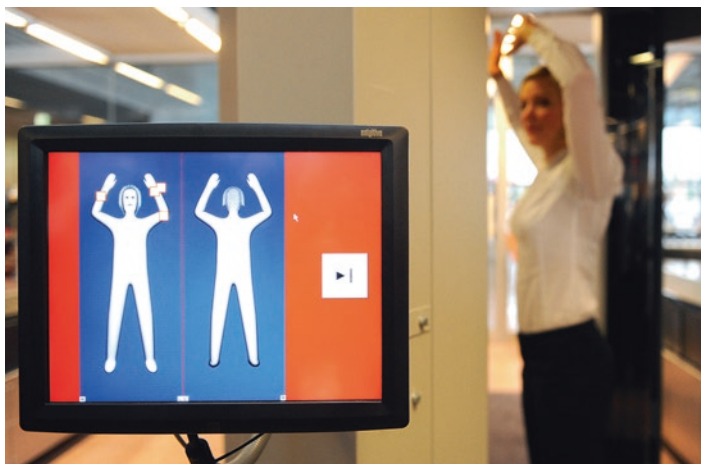


Abb. 2.2 Ein mit Terahertzstrahlung aufgenommenes und digital nachbearbeitetes Bild eines Menschen, unter dessen Kleidung potenziell gefährliche Objekte identifiziert wurden. (pa · picture alliance, Marcus Brandt 20676347)

Hilfsmittel wie Lupen oder Mikroskope verwenden. Daher sehen wir auch die allermeisten menschlichen Zellen und die Bakterien nicht mit freiem Auge, denn diese sind in der Größenordnung von $10\ \mu\text{m}$.

Im Größenbereich von $1\text{--}50\ \mu\text{m}$ sind die Wellenlängen der **Infrarotstrahlung**, die wir als Wärmestrahlung spüren und die in der chemischen Analytik eine herausragende Rolle spielt. So wie alle anderen Strahlungsarten, die wir hier anführen, ist auch die Infrarotstrahlung von elektromagnetischer Natur. Der einzige Unterschied zwischen den hier erwähnten Strahlungsarten ist ihre Wellenlänge und damit ihre Energie.

Nun sind wir in der Welt der Nanometer und der Nanotechnologien angelangt, die heute so oft als das Aushängeschild für den technischen Fortschritt verwendet wird. Irgendwo hier oder auch schon ein paar Stufen höher können wir den Übergang zwischen der Erfahrungswelt und der Quantenwelt ansetzen. Wir werden erkennen, dass es gar nicht so einfach ist, die Quantenwelt nach oben hin abzugrenzen. Heute mehrt sich der Verdacht, dass es auch sehr große Quantenobjekte geben könnte. Beispielsweise könnte das Innenleben der aus der Astronomie bekannten **Schwarzen Löcher**, deren Rand oder „Ereignishorizont“ einen Durchmesser von mindestens $20\ \text{km}$ hat, nur mit den Regeln der Quantenwelt beschreibbar sein.

Was kennzeichnet eigentlich den Beginn der Quantenwelt? In unserer Erfahrungswelt verhalten sich die Dinge (meistens) eindeutig. Die Sonne geht in der Früh auf, durchläuft ihre Bahn am Himmel und geht am Abend unter. Eine Kugel verlässt den Gewehrlauf, bewegt sich auf einer nahezu geradlinigen Bahn und schlägt in die Zielscheibe ein. Kennen wir alle Einflussgrößen, so können wir diese Dinge beinahe beliebig genau berechnen. In der Quantenwelt ist das nicht so. Dinge verlieren ihre Ein-

deutigkeit, können im Einzelnen nicht mehr berechnet werden, haben teilweise gar keine bestimmten Eigenschaften, solange sie nicht gemessen werden. Und wenn sie gemessen werden, werden sie verändert. Ein beispielhafter Satz, der Quantenverhalten beschreibt, wäre: „Quantenobjekte verhalten sich so, als ob sie alle möglichen Wege vom Ausgangs- bis zum Endpunkt gleichzeitig durchlaufen“. Seltsam, oder? Das besondere Verhalten von Quantenobjekten wird uns hier aber noch nicht beschäftigen, wir wollen uns nur einen Überblick schaffen, welche Größenordnungen die Quantenwelt umfasst.

Das **sichtbare Licht** hat einen Wellenlängenbereich von etwa 400–800 nm. Abb. 2.3 zeigt das gesamte Spektrum elektromagnetischer Strahlung, mit dem sichtbaren Licht als schmalen Bereich in der Mitte. Dabei sind die Wellenlänge, die Frequenz und die Energie eines **Photons** (das ist ein Lichtquantum) angegeben. Die Energieeinheit **Elektronenvolt**, abgekürzt eV, entspricht der kinetischen Energie (Bewegungsenergie) eines Elektrons, das durch ein elektrisches Feld mit der Potenzialdifferenz von einem Volt aus dem Ruhezustand beschleunigt wurde. Die Photonenenergie des sichtbaren Lichts liegt im Bereich von ca. 1,5–3 eV.

Mit sichtbarem Licht können wir Einzelheiten von Objekten abbilden, die größer als die halbe Wellenlänge des Lichts sind. Für praktische Zwecke taugt Licht daher nur

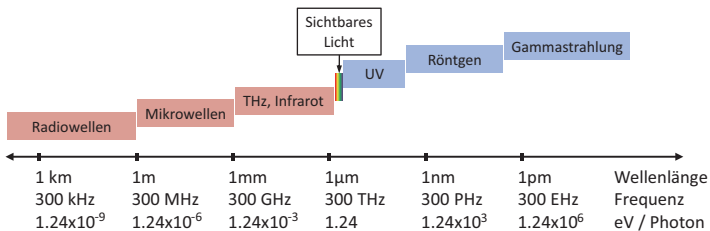


Abb. 2.3 Das Spektrum der elektromagnetischen Strahlung

für Abbildungen im Mikrometerbereich und darüber. In den letzten Jahrzehnten wurden zwar auch Methoden entwickelt, etwa die STED-Mikroskopie, um die optische **Abbildungsgrenze** weit nach unten in den Nanometerbereich zu verschieben. Diese Methoden erfordern jedoch, dass die abzubildenden Objekte mit Fluoreszenzfarbstoffen markiert werden und diese Fluoreszenz kontrolliert abgeschaltet werden kann. Das ist nur bei Anwendungen in den Lebenswissenschaften praktikabel. Doch gibt es andere und im Einzelfall auch leistungsfähigere Methoden, um die Nanowelt und Sub-Nanowelt anschaulich zu machen, wie wir später ausführen werden.

Viren, etwa die gefährlichen Influenzaviren, die die echte Grippe verursachen, sind in der Größenordnung von 15–500 nm beheimatet. Die Influenzaviren haben rund 100 nm Durchmesser, und das Corona-Virus, das seit Herbst 2019 die gefährliche Krankheit COVID-19 verursacht, ist ähnlich groß. Bis heute hat man nur vage Vorstellungen, wie viele verschiedene Viren es geben könnte. Es gibt Vermutungen, wonach es mehrere Millionen sein könnten, von denen man bisher gut 3000 auch tatsächlich identifiziert hat.

Unterhalb des sichtbaren Lichts kommen wir in die Domäne der **Ultraviolettstrahlung**. Hier beginnt auch ein interessanter Gegensatz Wirkung zu zeigen. Während die kleiner werdenden Teilchen immer weniger Masse haben, wird Strahlung mit kürzerer Wellenlänge immer energiereicher. Jeder von uns, der schon einmal einen richtigen Sonnenbrand genossen hat, weiß vermutlich, dass dafür der kurzwellige ultraviolette Anteil im Sonnenlicht verantwortlich ist. Ultraviolettes Licht hat bereits genügend Energie, um organische Moleküle aufzubrechen, das ist dann auch die Ursache für den Sonnenbrand.

Noch kürzere Wellenlängen hat die extreme Ultraviolettstrahlung. Diese wird für die heutigen Nanotechnologien immer wichtiger, z. B. zur Herstellung nanoelektronischer

Strukturen. In den neuesten elektronischen Chips sind Milliarden von Transistoren und anderen Elementen auf einer wenige Quadratmillimeter großen Fläche vereint. Die signifikante Strukturgröße, grob gesprochen die Länge eines Transistors, liegt nunmehr bereits deutlich unter 10 nm. Damit solche Strukturen hergestellt werden können, muss das Ausgangsmaterial mit Strahlung belichtet werden, deren Wellenlänge in dieser Größenordnung liegt.

Im Größenbereich von 1–10 nm finden wir die großen **Moleküle**, beispielsweise die Proteine, die als Bausteine der Zelle bekannt sind. Die Desoxyribonukleinsäure DNA, die unser genetisches Erbgut bildet und u. a. die Baupläne für die Proteine enthält, liegt in ihrem Durchmesser im untersten Nanometerbereich. Die Länge der DNA-Moleküle ist allerdings beträchtlich. So schätzt man die Gesamtlänge der DNA in einer menschlichen Zelle auf etwa zwei Meter.

Kleiner als 1 nm ist beispielsweise unser geliebter Zucker, genauer das **Saccharosemolekül**, es ist etwa 0,6 nm groß (Abb. 2.4). Die ungefähre Größe des Zuckermoleküls wurde erstmals von **Albert Einstein** 1906 in seiner Dissertation aus den in wässrigen Zuckerlösungen gemessenen Diffusionskoeffizienten abgeschätzt. Im Allgemeinen ist es eher schwierig, die Größe von Molekülen genau zu definieren, denn wo genau fängt ein Molekül an und wo hört es auf?

Nun sind wir bei den **Atomen** angelangt, deren Durchmesser in der Größenordnung von 100 pm bzw. 1 Å (Ångström) liegt. Was schon für die Moleküle gilt, gilt für die Atome noch viel mehr. Sie haben keine wohldefinierte Größe, denn ihre Oberfläche wird durch Elektronen gebildet, für die man keine bestimmte Lage angeben kann, sondern nur Wahrscheinlichkeiten ihres Aufenthalts. Atome kann man heutzutage „sehen“, es gibt mehrere abbildende Verfahren, die atomare Auflösung erreichen.

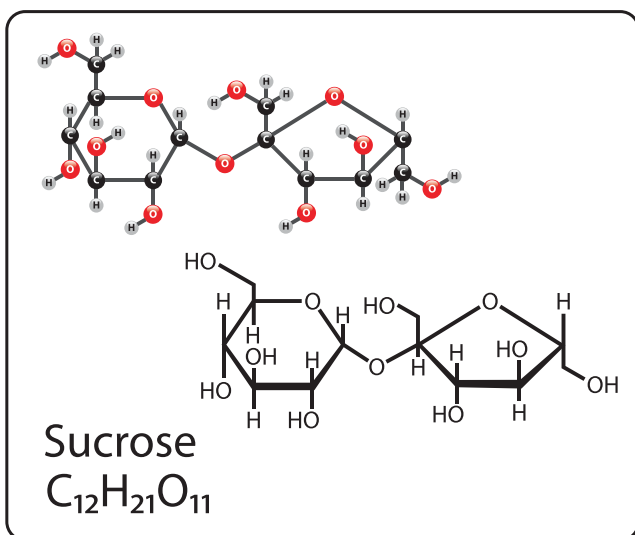


Abb. 2.4 Kugel- und Stäbchenmodell eines Saccharosemoleküls, schwarz sind die Kohlenstoff-, rot die Sauerstoff- und grau die Wasserstoffatome. (Adobe Stock, Gregory 260157243)

Abb. 2.5 zeigt eine Graphenoberfläche mit einem X-förmigen Cluster aus sechs Siliziumatomen. Graphen besteht aus einem einlagigen Gitter von Kohlenstoffatomen und wird wegen seiner besonderen Eigenschaften heute intensiv beforscht. Abb. 2.5 wurde mit einem **Rastertunnelmikroskop** aufgenommen. Hierbei wird im Vakuum mit einer atomar scharfen Spitze die Oberfläche abgerastert, ohne dass die Spitze die Oberfläche berührt. Der Abstand der Nadelspitze über der Probenoberfläche wird dadurch eingestellt, dass eine sehr kleine elektrische Spannung zwischen Nadel und Probe gelegt wird und der elektrische Strom, Tunnelstrom genannt, konstant gehalten wird. Dieser Tunnelstrom fließt, obwohl sich Probe und Spitze nicht berühren, und ist äußerst empfindlich vom Abstand zwischen Spitze und Probe abhängig.

Die darunter folgenden Größenordnungen in Abb. 2.1 sind nicht mehr sehr dicht besetzt. Darin finden wir vor

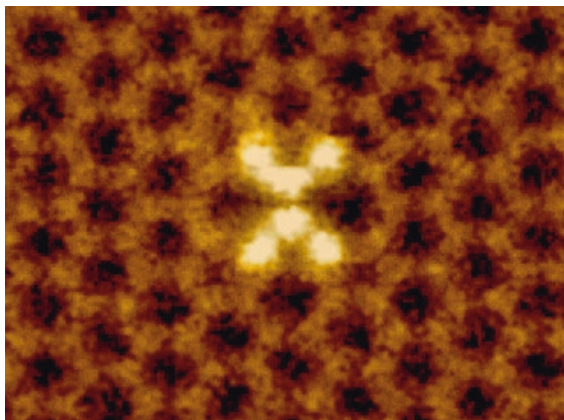


Abb. 2.5 Graphenoberfläche, bei der jeweils sechs Kohlenstoffatome eine ringförmige Struktur bilden, mit einem Cluster aus sechs Siliziumatomen (hell); mittels Rastertunnelmikroskop abgebildet. (Science Photo Library, 11677469)

allein die verschiedenen Formen der **Röntgenstrahlung**, deren Wellenlängen den Bereich von 10 nm bis 5 pm abdecken. Wellenlängen um die 10–20 pm werden beispielsweise in den Röntgengeräten verwendet, die wir aus dem Krankenhaus kennen. Zu ihrer Erzeugung werden Elektronen aus der Kathode einer Vakuumröhre durch hohe elektrische Spannungen stark beschleunigt und dann an der Anode, die z. B. aus Kupfer besteht, scharf abgebremst. Die Bewegungsenergie der Elektronen wird dabei in Strahlung umgewandelt, daher nennt man Röntgenstrahlung auch „Bremsstrahlung“. Der wirkliche Mechanismus zur Erzeugung von Röntgenstrahlung ist etwas komplizierter, wie wir später noch erkennen werden.

Strahlung mit weniger als 5 pm Wellenlänge wird **Gammastrahlung** genannt. Erstmals beobachtet wurde sie beim Zerfall radioaktiver Atomkerne. Gammastrahlung wird heute vor allem in der Strahlentherapie von Krebserkrankungen verwendet, sie schädigt und zerstört Zellen

durch das Aufbrechen chemischer Bindungen. Gammastrahlung dringt sehr tief in Materie ein, beispielsweise beträgt die typische Halbwertsdicke für Blei um die 14 mm. Das bedeutet, dass nach dem Durchdringen von 14 mm Blei noch immer die Hälfte der ursprünglichen Strahlungsintensität vorhanden ist.

Im Größenbereich von 1–10 fm sind die **Atomkerne** beheimatet. Das elektrisch positiv geladene **Proton** hat etwa 1,7 fm Durchmesser. Seine Masse beträgt $1,67 \cdot 10^{-27}$ kg. Das **Neutron**, der elektrisch neutrale Kernbaustein, ist ähnlich groß und schwer. Größere Atomkerne setzen sich aus Protonen und Neutronen zusammen und sind daher elektrisch positiv geladen. Atomkerne kann man nicht mehr direkt abbilden. Ihre Struktur wird dadurch erforscht, dass sie mit hochrasanten Geschossen, z. B. mit energiereichen Protonen, beschossen und dadurch zertrümmert werden. Aus den gemessenen Flugbahnen, Massen und Geschwindigkeiten der Trümmer kann dann die Struktur der Atomkerne und ihrer Bausteine modelliert werden. Durch Streuversuche mit energiereichen Elektronen hat man schon in den 1960er-Jahren festgestellt, dass Proton und Neutron nicht elementar, sondern aus **Quarks** und **Gluonen** zusammengesetzt sind, die wir heute als **Elementarteilchen** verstehen.

Bleibt nur noch ein Atombaustein übrig, und das ist das elektrisch negativ geladene **Elektron**. Nach heutigem Wissensstand hat das Elektron etwa ein Zweitausendstel (genauer: $1/1836$) der Masse eines Protons und ist deutlich kleiner als ein Attometer. Damit wird klar, dass fast die gesamte Atommasse im Atomkern beheimatet ist. Nun ist aber der Kerndurchmesser fast 100.000-mal kleiner als der Atomdurchmesser. Daraus können wir schließen, dass Atome im Wesentlichen leer sind. Es ist wohl ein spannender Gedanke, dass wir selbst aus fast leerem Raum bestehen und dass auch die Erde, auf der wir leben, fast leerer Raum



Abb. 2.6 Ein Fußballstadion. (Adobe Stock, Thaut Images 210893750)

ist. Es sind die Elektronen, die Heisenberg'sche Unbestimmtheitsrelation und das Pauli'sche Ausschließungsprinzip, die dafür sorgen, dass Atome und die daraus aufgebaute Materie nicht kollabieren, sondern vielmehr erstaunlich stabil sind.

Zum Schluss wollen wir zum menschlichen – nein, zum (vorwiegend) männlichen – Maß zurückkehren, also zum Fußball. Damit möchte ich die Größenverhältnisse in einem Atom begreiflich machen. Ein großes Fußballstadion (Abb. 2.6) hat 200–300 m Durchmesser. Wenn ein Atom so groß wie ein Fußballstadion wäre, wie groß wäre dann der Atomkern? Etwa so groß wie (1) ein Aufblasball von der Größe eines Fußballspielers, (2) der Fußball oder (3) ein Stecknadelkopf? Die Lösung finden Sie im nächsten Absatz.

Auch wenn Sie es nicht glauben mögen, die Lösung ist diejenige, die nichts mit Fußball zu tun hat, also der Stecknadelkopf. Wie groß wäre dann ein Elektron? Vielleicht so groß wie ein Influenzavirus, vielleicht auch noch kleiner. Über das Elektron kann man heute nur sagen, dass es kleiner als ein Attometer sein muss und wahrscheinlich keine innere Struktur hat. Es erhebt sich auch die Frage, ob einem Elektron und anderen Elementarteilchen überhaupt eine „Teilchengröße“ zugeordnet werden kann und ob es Teilchen, wie wir sie aus unserer Erfahrungswelt kennen, in der Quantenwelt überhaupt gibt, wie wir später noch sehen werden.



3

Das Atom und seine Entdeckung

Mindestens zweieinhalb Jahrtausende wogte der Gelehrtenstreit, ob Materie immer weiter teilbar ist oder aus kleinsten unteilbaren Einheiten besteht. Wir wollen hier mit einer Debatte in die Geschichte einsteigen, die um die Wende vom 19. zum 20. Jahrhundert von den beiden österreichischen Physikern **Ernst Mach** und **Ludwig Boltzmann** (Abb. 3.1) geführt wurde. Auf beide Namen treffen wir heute noch: Mach lebt in der **Mach-Zahl** weiter, die das Verhältnis einer Geschwindigkeit zur Schallgeschwindigkeit angibt und insbesondere bei Überschallflugzeugen relevant ist. Boltzmann wurde mit der **Boltzmann-Konstante**, die in der Physik und Chemie herausragende Bedeutung hat, ein Denkmal gesetzt.

Die Chemie hatte im 19. Jahrhundert große Fortschritte gemacht, und die Existenz von Atomen wurde unter Chemikern zur akzeptierten Tatsache, die um 1869 im Periodensystem der Elemente durch **Dmitri Mendelejew** gipfelte. Bei den Physikern blieb die **Atomtheorie** noch lange Zeit



Abb. 3.1 Links Ernst Mach (1838–1916) und rechts Ludwig Boltzmann (1844–1906), beide österreichische Physiker. (Links: pa · picture alliance, 9965897; rechts: pa · picture alliance, 8113018)

umstritten. Ernst Mach bezeichnete Atome als eine provisorische Hilfsvorstellung, die in manchen Fällen die Arbeit erleichtere, aber irgendwann überwunden sein werde. Da Atome damals nicht beobachtbar waren, konnte ihre Existenz nicht bewiesen werden, daher war nach Mach die Atomtheorie verzichtbar. Überliefert ist, dass er Fragen zur Atomtheorie gerne mit der Gegenfrage „Ham’s schon mal eins g’sehn?“ abschmetterte.

Boltzmann war überzeugter Atomist, denn Atome und Moleküle bildeten die Grundlage seiner Theorien, etwa seiner Gastheorie. Obwohl seine Theorien empirischen Überprüfungen weitgehend standhielten, konnte er damit die Existenz von Atomen nicht zweifelsfrei nachweisen. Er fand sich deshalb häufig in philosophischen Auseinandersetzungen mit Mach und anderen Anhängern der **Kontinuumstheorie** der Materie wieder. Doch konnte er die Debatte mit dem Argument offenhalten, dass es auch für das Zutreffen der Kontinuumstheorie keinen Nachweis gäbe. Und er brachte vor, dass man die Kontinuumstheorie nur ausgehend vom Konzept des diskontinuierlichen Aufbaus der Materie prüfen könne. Erst die Betrachtung des

Grenzübergangs vom diskontinuierlichen zum kontinuierlichen Aufbau erlaube dann eine Prüfung, welche Theorie der Materie den empirischen Resultaten besser entspreche. Diese Ansicht Boltzmanns zeigte in den Arbeiten von Max Planck zum schwarzen Strahler, die als Beginn der Quantentheorie gelten und auf die wir später zu sprechen kommen werden, glänzend ihre Gültigkeit.

Erst Jahre nach Boltzmanns Tod im Jahr 1906, der mit einer psychischen Erkrankung und eher nicht mit diesen Diskussionen in Zusammenhang stand, war die Atomtheorie auch unter Physikern generell akzeptiert. Mit dem (zu späten) Postulat und der Erklärung der **Brown'schen Bewegung**, der beobachtbaren Zitterbewegung kleinster in Flüssigkeit dispergierter Partikel, durch **Albert Einstein** im Jahr 1905 gab es dann auch keinen gerechtfertigten Zweifel mehr am diskontinuierlichen Aufbau der Materie. Doch beginnen wir nun chronologisch mit der Entdeckungsgeschichte des Atoms und seiner Bausteine.

3.1 Von den Anfängen zum Bohr'schen Atommodell

Spektroskopische Analysemethoden waren im 19. Jahrhundert bereits bekannt. Sie wurden von **Robert Bunsen** und **Gustav Kirchhoff** in Heidelberg in der 1860 erschienenen Abhandlung *Chemische Analyse durch Spektralbeobachtungen* erstmals beschrieben. Man beobachtete Emissionslinien im Licht von in eine Gasflamme eingebrachter Materie und gewann damit Informationen über deren chemische Zusammensetzung. Der wesentliche Aspekt bei diesen Untersuchungen war das Auftreten diskreter **Spektrallinien**, die für das jeweilige chemische Element charakteristisch sind. Die Ursachen für das Entstehen dieser diskreten Spektrallinien sowie ihrer Veränderungen, wenn die Probe auch