

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, korrigierte Publikation 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
	Erratum zu: Eine Reise durch die Quantenwelt	E1
	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-