

IT kompakt

Bettina Just

Quantencomputing kompakt

Spukhafte Fernwirkung und
Teleportation endlich verständlich

EBOOK INSIDE

 Springer Vieweg

IT kompakt

Die Bücher der Reihe „IT kompakt“ zu wichtigen Konzepten und Technologien der IT:

- ermöglichen einen raschen Einstieg,
- bieten einen fundierten Überblick,
- eignen sich für Selbststudium und Lehre,
- sind praxisorientiert, aktuell und immer ihren Preis wert.

Weitere Bände in der Reihe:

<http://www.springer.com/series/8297>

Bettina Just

Quantencomputing kompakt

Spukhafte Fernwirkung und
Teleportation endlich
verständlich

 Springer Vieweg

Bettina Just
THM Technische Hochschule Mittelhessen
Gießen, Deutschland

ISSN 2195-3651

ISSN 2195-366X (eBook)

IT kompakt

ISBN 978-3-662-61888-2

ISBN 978-3-662-61889-9 (eBook)

<https://doi.org/10.1007/978-3-662-61889-9>

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

Springer Vieweg

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2020, 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: Martin Börger

Springer Vieweg 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

*Für meine ganze wunderbare
Familie, und posthum für
Steffen Bohrmann.*

Vorwort

- Was ist Quantenverschränkung?
- Wie funktionieren Quantenalgorithmen?

Das sind die beiden zentralen Fragen, die in diesem Buch beantwortet werden.

Über Quantencomputing wird in Zeiten der künstlichen Intelligenz und der schnellen Algorithmen gesprochen. Man findet Artikel nicht nur in der Fachliteratur und der populärwissenschaftlichen Literatur, sondern auch in ganz normalen Tageszeitungen und Journalen. Man hört von superschnellen Computern, die Verschlüsselungssysteme brechen, im Materialdesign und in der Simulation von Verkehrsflüssen und Logistik eingesetzt werden, und alle Anwendungen der künstlichen Intelligenz enorm beschleunigen könnten.

Das Thema ist jedoch schwer zugänglich. Wer verstehen will, wie die Algorithmen funktionieren, und warum sie so schnell sind, findet in der populärwissenschaftlichen Literatur seltsame Begründungen. Es ist die Rede davon, dass ein Quantenbit zugleich „0“ und „1“ ist, oder von Socken, die zugleich rot und blau, aber gleichzeitig einfarbig sind. In der Fachliteratur liest man schnell von unitären Transformationen in hochdimensionalen Räumen, die im Formalismus der Quantenphysik versteckt sind. Wobei deren Bedeutung nicht direkt einleuchtet, selbst wenn man die Formeln nachrechnen kann. Hier will das vorliegende Buch eine Brücke bauen und einen Einstieg in das Thema „Quantencomputing“ schaffen, der wissenschaftlich korrekt ist, aber ohne besondere Mathematik- und Physikvorkenntnisse auskommt.

Quantencomputer bestehen (wie herkömmliche Computer auch) aus der Hardware, also den Geräten selbst, und aus der Software, also aus den Algorithmen, die auf den Geräten laufen. Das kleinste Stückchen Hardware eines Quantencomputers ist das Quantenbit.

Quantenbits sind kleinste Teilchen, etwa in der Größe von Elektronen oder Photonen (Lichtteilchen), die den Gesetzen der Quantenphysik gehorchen. Diese Gesetze widersprechen unserer klassisch mechanistischen Vorstellung von der Welt. Sie muten so seltsam an, dass der große Physiker Niels Bohr dazu angeblich sagte: „Wer die Quantenphysik verstanden hat, und nicht entsetzt ist, der hat sie nicht verstanden.“

Das seltsamste Phänomen der Quantenphysik ist dabei die sogenannte „Quantenverschränkung“. Quantenteilchen scheinen sich gegenseitig mit Überlichtgeschwindigkeit über beliebig weite Strecken zu beeinflussen. Ein einzelnes Quantenteilchen kann also nicht isoliert betrachtet werden, sondern muss immer als Teil eines Systems gesehen werden – wenn es verändert wird, verändert sich das ganze System. Diese Eigenschaft machen sich die Quantenalgorithmen zunutze.

Das vorliegende Buch behandelt in seinem ersten Teil, welche Experimente (idealtypisch) gemacht werden, welche Resultate sie liefern, und warum diese Resultate der klassischen Mechanik wirklich widersprechen. Dafür wird ein Gedankenexperiment von Einstein, Podolsky und Rozen aus dem Jahr 1935 auf Photonen angepasst. Von Photonen muss man (für die Zwecke dieses Buches) nur akzeptieren, dass sie eine Polarisationsrichtung haben können – mehr wird nicht benötigt.

Auf die experimentalphysikalischen Aspekte wird dabei nicht eingegangen, denn es geht „nur“ um das grundsätzliche Verständnis der Experimente und ihrer Resultate.

Vom einzelnen (Quanten)Bit zum (Quanten)computer ist es dann ein weiter Weg. Viele Bits müssen bereitgestellt und koordiniert werden. Das ist bei Quantenbits besonders schwierig, denn sie sind sehr empfindlich. Sie ändern ihren Wert, wenn sie mit Materie in Kontakt kommen. Und ihre „Koordination“ umfasst auch, dass sie miteinander verschränkt werden können. Die Hardware des Quantencomputers ist aktuell die größte Schwierigkeit

im Einsatz von Quantencomputern. Ein kurzer Abriss über die Hardware von Quantencomputern findet sich im letzten Kapitel des Buchs.

Der zweite Teil des Buchs beschäftigt sich dann – jenseits der Hardware – ausführlich mit der Software, also mit der Funktionsweise von Quantenalgorithmen. Schaltkreise bilden die Basis von Algorithmen, also werden Quantenschaltkreise betrachtet. Vorgestellt werden einige Quantengatter und der Algorithmus zur Teleportation, einer der spannendsten und zugleich einfachsten Algorithmen in der Welt des Quantencomputing.

Besondere mathematische Kenntnisse sind dafür nicht erforderlich. Denn alle Gatter und der Teleportationsalgorithmus werden in diesem Buch graphisch dargestellt. Sie werden zwar außerdem auch nachgerechnet, aber wer nicht gerne rechnet, kann alle Gatter und den Teleportationsalgorithmus auch nur anhand der Abbildungen verstehen. Alle Formeln können einfach übersprungen werden.¹

Das Buch richtet sich an Leser, die Quantencomputing genauer verstehen möchten, und eine einfache, wissenschaftlich saubere Brücke bauen möchten zwischen populärwissenschaftlichen Darstellungen und der Fachliteratur. Es werden keine Kenntnisse in Mathematik, Physik oder Informatik benötigt. Benötigt wird aber für den ersten Teil die Bereitschaft, das klassische mechanistische physikalische Weltbild zu erweitern. Für den zweiten Teil wird die Bereitschaft benötigt, eine ganz neue Welt von Algorithmen zu betreten. Es handelt sich um Algorithmen, bei denen die Veränderung an einem Quantenbit potentiell das Verhalten aller anderen Quantenbits verändert – sozusagen systemische Algorithmen.

Wenn Sie dieses Buch gelesen haben, werden Sie wissen, wie die Quantenverschränkung nachgewiesen wird, und warum sie von Einstein „spukhafte Fernwirkung“ genannt wurde. Sie verstehen die grundsätzliche Funktionsweise von Quantenalgorithmen.

¹Quantenalgorithmen mit z. B. drei QBits werden normalerweise mit unitären Operationen auf einem 2^3 , also 8-dimensionalen Vektorraum beschrieben. In diesem Buch wird erstmals eine anschaulichere Darstellung auf den 8 Ecken eines normalen Würfels gewählt (ein normaler Würfel hat 8 Ecken).

Sie können – je nach ihrem Fachgebiet – weiter in die mathematische, physikalische oder informatische Fachliteratur einsteigen. Und Sie können populärwissenschaftliche Artikel einordnen.

Dieses Buch entstand aus Vorlesungen, die die Autorin an der technischen Hochschule Mittelhessen (THM) hielt, und aus zahlreichen Vorträgen über Quantencomputing innerhalb und außerhalb der THM. Dank geht an alle Hörer dieser Vorlesungen und Vorträge, ohne deren konstruktive und lebendige Fragen und Anregungen das Buch gar nicht möglich gewesen wäre.

Besonderer Dank geht an Janka Cholevas für das geduldige und engagierte Erstellen der vielen Grafiken, an Philipp Rangel Martinez für das selbständig erstellte und kreative Programm zur Visualisierung des Würfels und an Jakob Czekansky für seine unermüdlichen und universellen technischen Hilfestellungen. Helmut Roth und Günter Schilling danke ich für das Probelesen und ihre sehr hilfreichen Anmerkungen. Dank geht auch an meine Kollegen Klaus Rinn, Andreas Dominik, Berthold Franzen und Christof Gallus, sowie an Antonia Just und an Carlo Trentanove für ihre große Bereitschaft, zuzuhören und ihre Sichtweise der Dinge mit mir zu teilen. Adrian Just, Yvonne Arnold, Ulrike Beckenkamp und Martin Launert und allen Freunden und Freundinnen danke ich für das stets offene Ohr für Gespräche. Besonderer Dank geht dabei an Jochen Rau und Thomas Stahl für zahlreiche Treffen bei Kaffee und Abendessen, und für das bisweilen schwer zu ertragend ehrliche, aber immer sehr konstruktive und zielführende Feedback.

Natürlich geht Dank an Martin Boerger und Sophia Leonhard vom Springer Verlag für die Anregung, das Buch überhaupt zu schreiben, und für ihre wunderbare Begleitung auf dem Weg von der Idee zum Buch. Und ein vorausgenommener Dank geht an alle Leser für Kommentare und Anregungen – viel Spaß beim Lesen :).

Gießen
August 2020

Bettina Just

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|------------------------------------|---|----|
| 1 | Einführung | 1 |
| Teil I Quantenverschränkung | | |
| 2 | Photonen als QBits | 7 |
| 2.1 | Die Entdeckung der Quanten | 7 |
| 2.2 | Eigenschaften von Photonen | 10 |
| 2.3 | Die Experimente dieses Buches | 16 |
| | Literatur | 18 |
| 3 | Das erste Experiment – Unabhängigkeit | 21 |
| 3.1 | Aufbau des Experiments | 21 |
| 3.2 | Ergebnis des Experiments | 23 |
| 3.3 | Interpretation des Ergebnisses – Unabhängigkeit | 23 |
| 4 | Das zweite Experiment – Gleichheit | 25 |
| 4.1 | Aufbau des Experiments | 25 |
| 4.2 | Ergebnis des Experiments | 27 |
| 4.3 | Interpretation des Ergebnisses | 27 |
| 4.3.1 | Klassische Interpretation: Verborgene Variablen | 27 |
| 4.3.2 | Quantenmechanische Interpretation: Systemzustand, instantan | 28 |

| | | |
|--|---|----|
| 5 | Das dritte Experiment – Spukhafte Fernwirkung | 31 |
| | 5.1 Aufbau des Experiments | 31 |
| | 5.2 Ergebnis des Experiments | 33 |
| | 5.3 Interpretation des Ergebnisses | 33 |
| | 5.3.1 Klassische Interpretation: Verborgene Variablen | 33 |
| | 5.3.2 Quantenmechanische Interpretation: Systemzustand, instantan | 36 |
| | Literatur | 38 |
| 6 | Auswertungen und Deutungen | 39 |
| | 6.1 Strukturelle Beobachtungen in den Experimenten | 39 |
| | 6.2 Modellierung in der Quantentheorie und philosophische Auswirkungen | 40 |
| | Literatur | 43 |
| Teil II Quantencomputing mit dem Beispiel Teleportation | | |
| 7 | Quantenalgorithmen anschaulich | 47 |
| 8 | Quantenbits und Quantenregister | 53 |
| | 8.1 Darstellung eines QBits für Algorithmen | 53 |
| | 8.2 Quantenregister aus zwei und drei QBits | 58 |
| | 8.3 Messen in Quantenregistern | 65 |
| | Literatur | 72 |
| 9 | Quantengatter auf einem QBit | 73 |
| | 9.1 Pauli-X, Pauli-Z und Hadamard (X, Z und H): Gatter auf einem QBit | 74 |
| | 9.2 X, Z, H, angewandt auf ein QBit in einem Quantenregister | 76 |
| 10 | CNOT – ein Quantengatter auf zwei QBits | 89 |
| | 10.1 CNOT in einem Register aus zwei QBits | 89 |
| | 10.2 CNOT in einem Register aus drei QBits | 93 |
| | Literatur | 94 |

| | | |
|-----------|--|-----|
| 11 | Teleportation | 95 |
| 11.1 | Der Algorithmus zur Teleportation | 96 |
| 11.2 | Stand der praktischen Umsetzung | 101 |
| | Literatur | 103 |
| 12 | Weitere Quantenalgorithmen und Hardware | 105 |
| 12.1 | Weitere Quantenalgorithmen | 105 |
| 12.2 | Hardware | 109 |
| | Literatur | 112 |
| | Erratum zu: Quantencomputing kompakt | E1 |