

Quanten 4

HERAUSGEGEBEN

VON KONRAD KLEINKNECHT

Schriftenreihe der Heisenberg-Gesellschaft

Hirzel Verlag



Quanten 4

Herausgegeben von Konrad Kleinknecht

SCHRIFTENREIHE DER HEISENBERG-GESELLSCHAFT

Herausgegeben von der
Heisenberg-Gesellschaft e.V., München
Band 4

Quanten 4

HERAUSGEGEBEN

VON KONRAD KLEINKNECHT



S. Hirzel Verlag

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

ISBN 978-3-7776-2540-9 (Print)

ISBN 978-3-7776-2576-8 (E-Book)

Jede Verwertung des Werkes außerhalb der Grenzen des Urheberrechtsge-
setzes ist unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Übersetzung,
Nachdruck, Mikroverfilmung oder vergleichbare Verfahren sowie für die
Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen. Gedruckt auf säurefreiem,
alterungsbeständigem Papier.

© 2016 S. Hirzel Verlag Stuttgart

Druck: Offsetdruck Bokor, Bad Tölz

Printed in Germany

Inhalt

- 7 *Vorwort des Herausgebers*

RAINER BLATT

- 9 *Quantencomputer – Rechenkunst nach Heisenberg*

PETER SCHMÜSER

- 46 *Faszination Quantenmechanik –
Eine geheimnisvolle Theorie ist die Basis
der modernen Technologie*

WERNER HEISENBERG

- 88 *Brief an Wolfgang Pauli vom 24.Juni 1925*
99 *Brief an Wolfgang Pauli vom 9.Juli 1925*

WOLFGANG PAULI

- 104 *Brief an das Nobelkomitee vom 29.Januar 1932*

KONRAD KLEINKNECHT

107 *Drei Wunderjahre der Physik*

118 *Autoren*

Vorwort des Herausgebers

Der November 2015 stand im Zeichen des 100. Geburtstags der Allgemeinen Relativitätstheorie Albert Einsteins. Dabei stellte ich fest, dass auch zwei andere Jubiläen zu feiern waren: die spezielle Relativitätstheorie wurde im Jahr 1905 veröffentlicht, und den grundlegenden Durchbruch zur Quantenmechanik publizierte Werner Heisenberg im Juli 1925. Über diese drei Wunderjahre der Physik berichte ich im letzten Kapitel dieses Buches.

Auch zwei Briefe, die Heisenberg mit dem Manuskript dieser Arbeit im Juli 1925 an Wolfgang Pauli, seinen engen Studien- und Forscherfreund schickte, drucken wir hier ab, ebenso wie den Vorschlag Paulis an das Nobelkomitee, der zusammen mit weiteren 28 Vorschlägen von Fermi, Perrin, Planck, Bohr, Wentzel, Klein, Einstein, Joos, Franck u.a. zur Verleihung des Nobelpreises 1932 an Heisenberg führte.

Die beiden ersten Kapitel sind den Vorträgen bei der Mitgliederversammlung im Oktober 2015 gewidmet. Rainer Blatt

(Innsbruck) beschreibt den Weg zum Quantencomputer, und Peter Schmüser (Hamburg) schildert, wie unser heutiges Leben von den Anwendungen der Quantenmechanik bestimmt wird.

Im Februar 2016

KONRAD KLEINKNECHT
VORSITZENDER DER HEISENBERG-GESELLSCHAFT

Quantencomputer – Rechenkunst nach Heisenberg

Neue Rechentechniken sind seit Jahrtausenden die Grundlage für den technischen Fortschritt und haben in den meisten Fällen große technologische Umwälzungen zur Folge. Mit zunehmender Komplexität der zu bewältigenden Probleme wurden Algorithmen, Rechenhilfen und Rechenmaschinen entwickelt, mit denen immer aufwändigere Routineaufgaben bearbeitet werden konnten. Trotz visionärer Ideen war die technische Realisierung von maschinellen Rechnern in einigen Fällen für viele Jahre nicht möglich, weil ausgereifte Technologien nicht zur Verfügung standen. So hat zum Beispiel Charles Babbage (1791–1871) um 1830 eine Differenzenmaschine entworfen, mit deren Hilfe mechanisch multipliziert und dividiert werden kann. Deren technische Ausführung hätte aber mehrere Tonnen Materialien benötigt und wäre mit der damals verfügbaren Technologie kaum möglich gewesen, so dass ihre Konstruktion schließlich nach Jahren eingestellt wurde. Die grundlegenden Ideen von Charles Babbage zur Konstruktion dieser

und der nachfolgenden Maschinen waren aber wegweisend für die Entwicklung mechanischer Rechenmaschinen. Den ersten mechanischen, frei programmierbaren Computer der Welt hat schließlich Konrad Zuse (1910–1995) mit seiner Z1 im Jahre 1937 im Wohnzimmer seiner Eltern konstruiert und betrieben. Danach setzte die Entwicklung elektrischer bzw. elektronischer Rechner in großem Stil ein. Im Jahre 1947 arbeitete der ENIAC (Electronic Numerical Integrator And Computer) an der University of Pennsylvania mit mehr als 18.000 Vakuumröhren, wog etwa 30 Tonnen und hatte die Ausmaße eines kleinen Saales. Erst die Entwicklung des Transistors und die daraus resultierende Entwicklung der integrierten Schaltkreise hat die Rechnertechnologie der vergangenen Jahrzehnte ermöglicht.

Computertechnologie – Gestern und Heute

Den rasanten Fortschritt der Computertechnologie, wie wir ihn seit ca. 50 Jahren kennen, hat Gordon E. Moore (* 1929), einer der Gründerväter der Firma Intel, mit dem nach ihm benannten *Moore'schen Gesetz* beschrieben. Nach diesem, in den 60er Jahren zunächst empirisch formuliertem Gesetz, verdoppelt sich etwa alle 18 Monate die Computerleistung. Bestimmt wird diese Leistungsfähigkeit meist mit der Anzahl der Transistoren, die man pro Computerchip unterbringen kann¹. Dies geht in der Regel einher mit einer entsprechenden Verkleinerung der einzelnen Halbleiterbausteine und einer demzufolge schnelleren Schaltzeit. Die beobachtete Leistungssteigerung wurde dann die Grundlage für die so genannten *roadmaps* der Halbleiterindustrie, nach denen die jeweils neuen Werkzeuge rechtzeitig entwickelt und bereitgestellt wurden, um den entsprechenden Zuwachs der Computerleistung auch tatsächlich erzielen zu können. In einer etwas anderen Darstellung hat R.W. Keyes (1921–2010) bereits 1988 aufgetragen, wie viele Atome zur Darstellung eines klassischen Bits benötigt werden. Auch diese Kurve zeigt die Zunahme der Computerleistung durch stets

kleiner werdende Bauelemente. Wenn man diesen Darstellungen folgt und sie extrapoliert, stellt man sehr schnell fest, dass bereits in den kommenden Jahren die Grenze erreicht werden sollte, bei der ein einzelnes Atom zur Darstellung eines einzelnen Bits genügt. Die mikroskopische Welt der Atome und deren Wechselwirkung mit Ladungen und Licht kann aber nicht mehr mit den Mitteln der klassischen Physik beschrieben werden und spätestens an dieser Stelle wird klar, dass die Quantenphysik bei der Informationsverarbeitung nicht mehr ignoriert werden kann. Daher sei hier zunächst kurz zusammengefasst, was die von Heisenberg begründete Quantenphysik von der klassischen Physik so sehr unterscheidet.

Was sind Quanten, was ist Quantenphysik?

Der Begriff des *Quants* wird in der Physik seit Beginn des 20. Jahrhunderts verstanden als ein elementares Paket, d.h. als ein nicht weiter teilbares Paket der Materie oder der Energie, das deren jeweilige charakteristische Eigenschaften besitzt. Die Quanten der Materie sind demnach die Atome, die Quanten der Elektrizität sind die Elektronen und die Quanten des elektromagnetischen Feldes sind die Lichtquanten, oder wie sie modern heißen, die Photonen. Die Gründerväter der Quantenphysik fanden in den ersten Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts sehr schnell heraus, dass es Phänomene gibt, die sich mit der klassischen Physik nicht mehr erklären lassen. Insbesondere gilt, dass ein beobachtetes, d.h. ein einer Messung unterworfenen Quantensystem anders reagiert als ein nicht beobachtetes Quantensystem. Jede Messung (Beobachtung) eines Quantensystems ändert das Quantensystem selbst, was auch als Rückwirkung der Messung bezeichnet wird. Wie Werner Heisenberg als erster erkannt hat, sind bei einer Messung etwa Ort und Geschwindigkeit eines Quants nicht gleichzeitig scharf messbar und Quantensysteme zeigen Welleneigenschaften, die sich beispielsweise in Interferenzphänomenen beobachten lassen. Diese im Expe-

riment überprüfbareren Eigenschaften begründen den Welle-Teilchen-Dualismus: Je nach Experiment und Fragestellung zeigen Teilchen Welleneigenschaften und Wellen zeigen Teilcheneigenschaften. Solche Experimente in der Quantenphysik befassen sich etwa mit dem Verhalten einzelner Quanten, z.B. bei der Wechselwirkung von Licht mit Atomen oder gar von einzelnen Photonen mit einzelnen Atomen. Über Jahrzehnte hinweg wurden solche Quantenphänomene ausgiebig untersucht und die mathematische Beschreibung der Quantenphysik, die sowohl die Wellen- als auch die Teilcheneigenschaften richtig wiedergibt, hat sich bisher in allen Details glänzend bewährt. Damit können quantenphysikalische Phänomene und Eigenschaften berechnet und vorhergesagt werden und für viele Anwendungen seit Jahrzehnten genutzt werden.

Daher hat die Quantenphysik schon seit langer Zeit einen zunehmend großen Einfluss auf technische Anwendungen und ein erheblicher Anteil der Brutto-sozialprodukte der Industriestaaten wird mit Hilfe der Quantenphysik erwirtschaftet. Als Beispiele dafür seien nur die Halbleiterindustrie, die Lasertechniken, die medizinischen bildgebenden Verfahren und die gesamte Telekommunikation genannt, die ohne Quantentechniken heute nicht mehr denkbar sind.

Nach der technischen Revolution des 19. Jahrhunderts, die auf mechanischen und thermodynamischen Erkenntnissen beruhte, führte die Entwicklung und industrielle Nutzung der Elektrodynamik im 20. Jahrhundert u.a. zur modernen Elektronik und Computerindustrie. Aufgrund der vielen, heute weithin oft noch unbemerkten Anwendungen der Quantenphysik ist bereits abzusehen, dass moderne quantenphysikalische Methoden, vor allem zusammen mit den Informationswissenschaften die Basis für die Technologien des 21. Jahrhunderts sein werden. Als Paradebeispiel für die Entwicklung solcher Quantentechnologien wird oft der Quantencomputer genannt; er steht aber nur stellvertretend für viele weitere quantenphysikalische