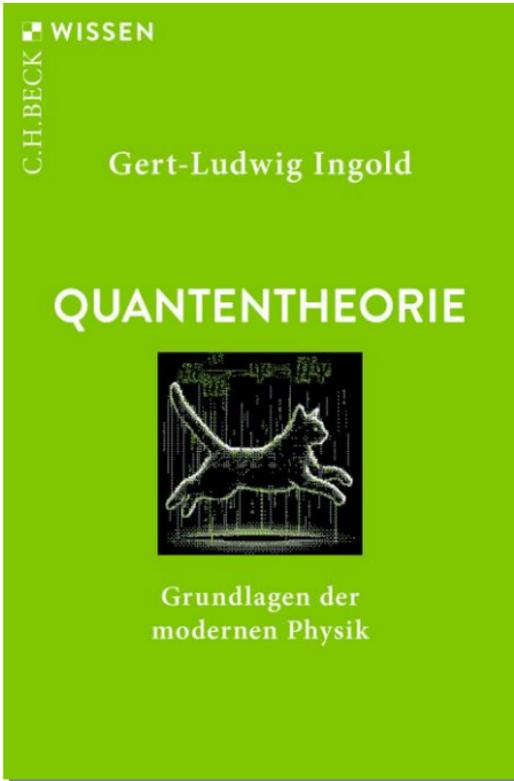


Unverkäufliche Leseprobe



Gert-Ludwig Ingold
Quantentheorie

Grundlagen der modernen Physik

2025. 128 S., mit 29 Abbildungen
ISBN 978-3-406-82943-7

Weitere Informationen finden Sie hier:
<https://www.chbeck.de/37894475>

C.H.BECK  **WISSEN**

Im Dezember des Jahres 1900 hielt Max Planck in Berlin einen Vortrag, der später als die Geburtsstunde der Quantenphysik bezeichnet werden sollte. 1925 gelang es Physikern wie Werner Heisenberg und Erwin Schrödinger, eine konsistente und anwendbare Theorie der Quantenmechanik zu entwickeln. Ihre Aussagen und Erkenntnisse sollten unser Weltbild radikal revolutionieren und bilden inzwischen eine zentrale Grundlage für unser physikalisches Verständnis der Natur. Dieses Buch vermittelt einen kompakten, sachkundigen Überblick über die wichtigsten Elemente der modernen Quantenphysik sowie ihre Auswirkungen auf verschiedene Bereiche der Physik und unseres Alltags bis hin zu den Möglichkeiten von Quantencomputern.

Gert-Ludwig Ingold ist Professor für Theoretische Physik an der Universität Augsburg und forscht hauptsächlich zu quantenmechanischen Fragestellungen. Er ist Mitautor des Buches «Die 101 wichtigsten Fragen – Moderne Physik» (mit Astrid Lambrecht, 2008).

Gert-Ludwig Ingold

QUANTENTHEORIE

Grundlagen der modernen Physik

C.H.Beck

Mit 29 Abbildungen

- 1. Auflage. 2002
- 2., aktualisierte Auflage. 2003
- 3., aktualisierte Auflage. 2005
- 4. Auflage. 2008
- 5., aktualisierte Auflage. 2015

6., aktualisierte Auflage. 2025

Originalausgabe

© Verlag C.H.Beck GmbH & Co. KG, München 2002

Wilhelmstraße 9, 80801 München, info@beck.de

Alle urheberrechtlichen Nutzungsrechte bleiben vorbehalten.

Der Verlag behält sich auch das Recht vor, Vervielfältigungen dieses Werks zum Zwecke des Text and Data Mining vorzunehmen.

www.chbeck.de

Reihengestaltung Umschlag: Uwe Göbel (Original 1995, mit Logo),
Marion Blomeyer (Überarbeitung 2018)

Umschlagabbildung: Künstlerische Darstellung von Schrödingers Katze,
© Shutterstock | cybermagician

Satz: C.H.Beck.Media.Solutions, Nördlingen

Druck und Bindung: Druckerei C.H.Beck, Nördlingen

Printed in Germany

ISBN 978 3 406 82943 7



verantwortungsbewusst produziert
www.chbeck.de/nachhaltig
produktivsicherheit.beck.de

Inhalt

Einleitung	7
1. Das Markenzeichen der Quantentheorie	10
1.1 Sind Naturkonstanten eigentlich konstant?	10
1.2 Ein heißes Eisen und die Anfänge der Quantentheorie	14
1.3 Winzig, aber wichtig: das plancksche Wirkungsquant	16
2. Welle oder Teilchen?	20
2.1 Licht – Welle oder Teilchen?	21
2.2 Von Wasser- und anderen Wellen	24
2.3 Und Newton hatte doch nicht ganz unrecht	28
2.4 Nur Teilchen oder auch Welle?	30
2.5 Man kann nicht alles wissen	33
2.6 Nichts geht mehr in geregelten Bahnen	36
2.7 Mit dem Kopf durch die Wand	39
3. Maßstäbe und Uhren mit Atomen	44
3.1 Atomare Fingerabdrücke	48
3.2 Das Atom – ein kleines Planetensystem?	49
3.3 Zwei Urlauber auf Entdeckungsreise	51
3.4 Frei oder gebunden	54
3.5 Lücken im Regenbogen	57
3.6 Es muss nicht immer nur ein Zustand sein	60
3.7 Ein Springbrunnen als Uhr	64
4. Das Vakuum ist überhaupt nicht leer	72
4.1 Das Pendel kommt nicht zur Ruhe	72
4.2 Jetzt wird Licht gequetscht	76
4.3 Warum sich Spiegel anziehen können	80

5. Rechnen mit Quanten	84
5.1 Vom Bit zum Qubit	85
5.2 Konstant oder ausgeglichen	90
5.3 Abhören unmöglich gemacht	97
5.4 Spukhafte Fernwirkung	100
6. Störende Beobachtung	103
6.1 Die Frage nach dem Weg	104
6.2 Ein Atom hinterlässt eine Botschaft	108
6.3 Der Quantenradiergummi	113
7. Von der mikroskopischen zur makroskopischen Welt	117
7.1 Rein oder Gemisch?	118
7.2 Der Einfluss der Umgebung	120
7.3 Schrödingers Kätzchen	121
Quellenverweise und Literatur	125
Register	126

Einleitung

Ungefähr seit der Jahrtausendwende werden wir Zeugen einer zweiten Quantenrevolution: Die gezielte Manipulation von Quantenzuständen beginnt, die Basis für praktische Anwendungen darzustellen. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von Quantentechnologien. Hierzu gehört insbesondere die Quanteninformationsverarbeitung. Quantencomputer versprechen eine höhere Leistungsfähigkeit durch die parallele Verarbeitung quantenmechanischer Überlagerungszustände. Während dadurch klassische Verschlüsselungsverfahren angreifbar werden, erlaubt Quantenkryptographie im Prinzip eine abhörsichere Kommunikation. Die hohe Sensitivität von Quantensystemen macht man sich bei der Entwicklung neuartiger Quantensensoren zu Nutze. Die Entwicklung von Quantentechnologien ist in vollem Gange, und man darf gespannt sein, was die Zukunft alles bereithält.

Bereits die erste Quantenrevolution im frühen 20. Jahrhundert hatte große technologische Implikationen. Mit der Quantentheorie ließ sich die atomare Welt zum ersten Mal adäquat beschreiben. Mit Hilfe der Kernphysik wurde es möglich, Kernreaktoren zur Energiegewinnung zu entwickeln, aber auch die Atombombe zu bauen. Gleichzeitig erklärt die Kernphysik, wie die Energieproduktion in der Sonne abläuft, ohne die Leben auf der Erde unmöglich wäre. Vielleicht werden Fusionsreaktoren eines Tages in der Lage sein, diese Mechanismen zur Energieerzeugung auf der Erde zu nutzen.

Die Quantentheorie bildet die Grundlage der gesamten Chemie bis hin zur Molekularbiologie, denn nur sie kann die Mechanismen erklären, die Atome zu Molekülen zusammenbinden. Wichtige Schritte bei der Photosynthese, die den Pflanzen die Gewinnung von Energie aus Sonnenlicht ermöglicht, basieren auf Quanteneffekten.

Auch die Eigenschaften fester Körper lassen sich ohne Quantentheorie nicht verstehen. Erst mit ihr wurde es möglich, Transistoren zu entwickeln, die die Basis unserer modernen Informationsinfrastruktur bilden. Ein weiteres Beispiel für die Anwendung der Festkörperphysik stellen Solarzellen dar. Der Magnetismus ist ebenso ein Quanteneffekt wie die Supraleitung, also die verlustlose Leitung von elektrischem Strom.

Die Wechselwirkung von Materie mit Licht wird mit Hilfe der Quantenoptik beschrieben. Laser, die ab etwa 1960 entwickelt wurden, sind heute in vielen Forschungslaboren zu finden. Sie besitzen darüber hinaus vielfältige Anwendungen, zum Beispiel in der Materialbearbeitung, der Medizin oder der Messtechnik. Die Atom-Licht-Wechselwirkung spielt auch in Atomuhren eine große Rolle, die uns mit einem präzisen Zeitsignal versorgen und das Global Positioning System, kurz GPS, zur Navigation überhaupt erst ermöglichen.

Diese Anwendungen und hundert Jahre Erfahrung mit Quantenphänomenen aller Art zeigen, dass wir uns auf die Quantentheorie verlassen können. Manche im Laufe der Menschheitsgeschichte lieb gewonnene Vorstellung hat in der Quantenwelt jedoch keine Gültigkeit mehr.

So ist das Konzept einer Bahn, entlang der sich ein Objekt bewegt, in der Quantentheorie nicht mehr haltbar. Dies mag manch einen irritieren, da die Vorstellung von der Existenz einer Bahn eigentlich überlebenswichtig ist. Genauso wie der jagende Steinzeitmensch die Bahn seiner Beute vorhersehen musste, um erfolgreich zu sein, so müssen wir heute in der Lage sein, die Bahn der Autos im Straßenverkehr um uns herum vorherzusehen. Das setzt natürlich zunächst voraus, dass diese Bahn überhaupt existiert. Allerdings gibt es keinen Grund, warum Erfahrungen aus der Alltagswelt im atomaren Bereich unverändert gelten sollten.

Mit der Quantentheorie hat auch ein gewisses Maß an Unbestimmtheit Einzug in die Physik gehalten. Noch im 19. Jahrhundert hatte man gedacht, dass sich die Entwicklung eines physikalischen Systems zumindest im Prinzip genau vorhersagen lässt. In der Quantentheorie ist dagegen der Ausgang einer Mes-

sung im Allgemeinen nicht mit Sicherheit vorhersagbar. Dies bedeutet allerdings keineswegs, dass nun dem Zufall Tür und Tor geöffnet wäre. Die Physik liefert weiterhin klare Aussagen, die sich experimentell überprüfen lassen.

Auch wenn die Abkehr vom klassischen Denken schwerfallen mag, so liegt hierin doch eine Herausforderung, die zum Reiz der Beschäftigung mit der Quantentheorie beiträgt. Daraus ergeben sich auch verschiedene Fragestellungen metaphysischer oder philosophischer Natur. In diesem Band wollen wir uns allerdings auf die Aspekte der Quantentheorie konzentrieren, die im physikalischen Experiment überprüft werden können.

Es gibt vielfältige Gründe, sich mit der Quantentheorie zu beschäftigen. Begeben wir uns daher auf eine Entdeckungsreise in die Welt der Quanten.

Mehr Informationen zu diesem und vielen weiteren Büchern aus dem Verlag C.H.Beck finden Sie unter: www.chbeck.de