



Michael Haugk / Lothar Fritsche

# QUANTEN- MECHANIK

FÜR AHNUNG?LOSE



HIRZEL

Michael Haugk / Lothar Fritsche  
**Quantenmechanik für Ahnungslose**



# FÜR AHNUNG?LOSE

In dieser Reihe sind bisher erschienen:

Yára Detert, **Mathematik** für Ahnungslose

Yára Detert / Christa Söhl, **Statistik** und Wahrscheinlichkeitsrechnung für Ahnungslose

Werner Junker, **Physik** für Ahnungslose

Katherina Standhartinger, **Chemie** für Ahnungslose

Katherina Standhartinger, **Organische Chemie** für Ahnungslose

Antje Galuschka, **Biochemie** für Ahnungslose

Christa Söhl, **Biologie** für Ahnungslose

Michaela Aubele, **Genetik** für Ahnungslose

Heinz-E. Klockhaus, **BWL** für Ahnungslose

Heinz-E. Klockhaus, **Buchführung** für Ahnungslose

Michael Haugk / Lothar Fritsche

# QUANTEN- MECHANIK

für Ahnungslose

Eine Einstiegshilfe für Studierende

von Dr. Michael Haugk, Herrenberg

und Prof. Dr. Lothar Fritsche, Clausthal-Zellerfeld

Mit 21 Abbildungen



S. Hirzel Verlag

Dr. Michael Haugk  
Kaffeeberg 21  
71083 Herrenberg  
[michael@fam-haugk.de](mailto:michael@fam-haugk.de)

Prof. Dr. Lothar Fritsche  
Institut für Theoretische Physik der Technischen Universität Clausthal  
Leibnizstr. 10  
38678 Clausthal-Zellerfeld  
[lfritsche@t-online.de](mailto:lfritsche@t-online.de)

**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 978-3-7776-2136-4

Jede Verwertung des Werkes außerhalb der Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist unzulässig und strafbar.  
Dies gilt insbesondere für Übersetzung, Nachdruck, Mikroverfilmung oder vergleichbare Verfahren sowie für  
die Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen.

© 2012 S. Hirzel Verlag, Birkenwaldstraße 44, 70191 Stuttgart  
Printed in Germany  
[www.hirzel.de](http://www.hirzel.de)

Satz: le-tex publishing services GmbH, Leipzig  
Druck: Djurcic, Schorndorf  
Umschlaggestaltung: deblik, Berlin

---

## Vorwort

Nur weniges scheint heutzutage so gefestigt wie die allgemein vertretene und dennoch komplett unverständliche Interpretation der Quantenmechanik. Diese versucht den Eindruck zu vermitteln, dass unsere herkömmliche Erfahrungswelt auf der Ebene kleinster Teilchen völlig außer Kraft gesetzt ist. Ein Verstehen durch Nachdenken sei hier nicht mehr möglich.

So gehört es zur Grundausrüstung des aufgeklärten Zeitgenossen, dass er über den Wellencharakter von Teilchen schon in der Schule belehrt worden ist. Ebenso, dass man Impuls und Ort eines Teilchens nicht gleichzeitig genau messen könne – wobei unterstellt wird, dass zum Beispiel der Ort für sich beliebig genau messbar sei. Wie sich ein Teilchen in eine Welle verwandeln kann und wie es möglich sein soll, den Ort des Teilchens „genau“ zu bestimmen mit Geräten, die selbst aus Atomen mit unbestimmter Lage bestehen, gehört eben zu jenen Fragen, die man nicht stellen darf. Dies ist Bestandteil der Philosophie der Quantenmechanik.

Immerhin ist diese merkwürdige Disziplin sehr erfolgreich in der quantitativen Beschreibung fundamentaler Phänomene der uns umgebenden Welt. Und sie erlangt besonders in neuerer Zeit immer mehr öffentliche Aufmerksamkeit – zum Beispiel durch Nano-Partikel in Gebrauchsgegenständen oder durch Quantencomputer. Aus unserer Sicht ist es daher mehr als wünschenswert, den undurchsichtigen Interpretationen ein verständliches Erklärungsmodell entgegenzusetzen. Dabei stützen wir uns auf einen Zugang, welcher durch einen Aufsatz von Edward Nelson inspiriert und von Jutta Aschenbach, einer ehemaligen Studentin Lothar Fritsches, weiter ausgearbeitet wurde. Später wurde dieser erste Ansatz von Lothar Fritsche weiter vervollständigt: um die Erklärung von Spin, Wechselwirkung geladener Teilchen mit elektromagnetischen Feldern, Einfluss relativistischer Effekte und auf Mehrteilchensysteme.

Im Gegensatz zur Religion „vom Himmel fallender“ Gleichungen bietet diese Vorgehensweise einen einfachen und verständlichen Zugang zur Quantenmechanik. Sie bietet selbst für der Erfahrungswelt scheinbar widersprechende Phänomene wie Tunneleffekt oder Doppelspaltexperiment genauso einfache wie verständliche Erklärungen. Wir sind sicher, dass der aufgeschlossene Leser damit einen grundlegenden Einblick in die Ursachen des sonderbaren Verhaltens kleiner Teilchen gewinnen und sich häufig diskutierte Problemstellungen besser erschließen kann.

Natürlich können wir bei einem dünnen Büchlein wie diesem nur wenig mehr als ein qualitatives Verständnis vermitteln. Für den mathematisch interessierten Leser ist eine Literaturliste angegeben, wo er unter anderem die ausführlichen Berechnungen des hier vorgestellten Ansatzes findet.

Insgesamt will dieses Buch dazu ermutigen, das Unverstandene aus neuer Perspektive aufzuarbeiten, ganz im Sinne eines Zitats aus David Wicks geistreichem Werk „The infamous boundary“:

*„To all heretics and naive realists everywhere. Keep doubting, let others keep the faith!“<sup>1</sup>*

## **Danksagung**

Dieses Buch zu schreiben war uns sehr wichtig. Aber ohne die Unterstützung anderer Menschen wäre es uns nicht möglich gewesen, es fertig zu stellen.

Wir bedanken uns bei Tim Kersebohm, der unser Projekt im Verlag mit viel Einsatz unterstützt hat, und bei Andreas Pehnack, der uns bei der Korrektur des Manuskripts half.

Michael Haugk bedankt sich bei seinem Mentor Professor Lothar Fritsche, dem er neben sehr vielen interessanten Diskussionen und Einsichten auch die Einstellung verdankt, scheinbar gefestigte physikalische Theorien hinterfragen zu dürfen. Michael Haugk bedankt sich weiterhin bei seinem Freund Erik Zierke, der in zahlreichen Gesprächen immer wieder den Finger in die wunden Punkte legte und so dazu beitrug, die oft breit diskutierten Phänomene der Quantenmechanik so ausführlich und verständlich wie nötig zu erklären.

Vor allem aber möchten wir uns bei unseren Familien bedanken, die sehr viel Zeit ohne uns verbringen und es ertragen mussten, wenn es in der Vorbereitung Probleme gab.

Herrenberg und Clausthal-Zellerfeld,  
im Sommer 2012

Michael Haugk  
Lothar Fritsche

---

<sup>1</sup> In etwa: „An alle Häretiker und naive Realisten. Hört nicht auf zu zweifeln und überlasst das Festhalten am Glauben Anderen.“

# Inhalt

<b>Vorwort</b> . . . . .	V
<b>Danksagung</b> . . . . .	VI
<b>1 Einführung</b> . . . . .	1
<b>2 Die Grundannahmen</b> . . . . .	9
<b>3 Ein Ausflug in die Statistik</b> . . . . .	11
3.1 Grundkonzepte der Wahrscheinlichkeitsrechnung . . . . .	11
3.2 Schrödingers Katzenjammer . . . . .	13
3.3 Scharmittel, Verteilungen und Erwartungswerte . . . . .	14
3.4 Existiert Zufall? . . . . .	17
<b>4 Stochastische Bewegung von Punktmassen</b> . . . . .	19
4.1 Einsteins Gesetz über das mittlere Verschiebungsquadrat . . . . .	19
4.2 Die stochastische Bewegungsgleichung . . . . .	21
4.3 Ein kurzer Rückblick . . . . .	22
<b>5 Noch nicht Quantenmechanik</b> . . . . .	23
5.1 Die Heisenbergsche Unschärferelation . . . . .	23
5.2 Der Doppelspalt . . . . .	25
5.3 Der Tunneleffekt . . . . .	30
5.4 Das erste Ehrenfestsche Theorem . . . . .	31
5.5 Die Stabilität von Atomen . . . . .	32
5.6 Wellenförmige Wahrscheinlichkeitsdichten . . . . .	37
5.7 Zusammenfassung . . . . .	39
<b>6 Der Übergang zur Quantenmechanik</b> . . . . .	41
6.1 Die Eigenschaften des Vakuums . . . . .	41
6.1.1 Die Viskosität des Vakuums . . . . .	41
6.1.2 Reibungsfreiheit . . . . .	41
6.2 Die Schrödinger-Gleichung . . . . .	43
6.2.1 Ergebnisse und Interpretation . . . . .	43
6.2.2 Zeitabhängigkeit und -unabhängigkeit . . . . .	44
6.2.3 Impuls und Energie . . . . .	46
6.2.4 Observable . . . . .	48
6.3 Kritiken und Konsequenzen . . . . .	49
6.3.1 Versteckte Parameter . . . . .	49
6.3.2 Wann wird klassische Mechanik zur Quantenmechanik? . . . . .	50
6.3.3 Der Bahnbegriff . . . . .	51
6.3.4 Die Bohmsche Mechanik . . . . .	52
6.3.5 Der Nelson-Ansatz . . . . .	53
6.4 Zerfließende Aufenthaltswahrscheinlichkeiten . . . . .	54



<b>7</b>	<b>Der Spin</b> . . . . .	61
7.1	Die Historie des Spins in Experiment und Theorie . . . . .	61
7.2	Der Spin als Ergebnis der Streuung an virtuellen Teilchen . . . . .	62
7.3	Die gyromagnetische Anomalie . . . . .	67
7.4	Der Stern-Gerlach-Versuch . . . . .	68
7.4.1	Keine freien Elektronen in Spin-Experimenten . . . . .	69
7.4.2	Die Spin-Präzession im Magnetfeld . . . . .	69
7.4.3	Ein Modell für das Stern-Gerlach-Experiment . . . . .	72
<b>8</b>	<b>Verschränkung</b> . . . . .	75
8.1	Ein Grenzfall für Verschränkung . . . . .	76
<b>9</b>	<b>Lichtemission</b> . . . . .	79
9.1	Der Aufbau des Wasserstoff-Atoms . . . . .	79
9.2	Licht wird abgestrahlt . . . . .	82
9.3	Verbotene Übergänge . . . . .	86
<b>10</b>	<b>Mehrteilchensysteme</b> . . . . .	87
10.1	Die Schrödinger-Gleichung für Mehrteilchensysteme . . . . .	87
10.2	Fermionen und Bosonen . . . . .	88
<b>11</b>	<b>Ausblick</b> . . . . .	91
	<b>Literaturverzeichnis</b> . . . . .	93
	<b>Sachregister</b> . . . . .	95

# 1 Einführung

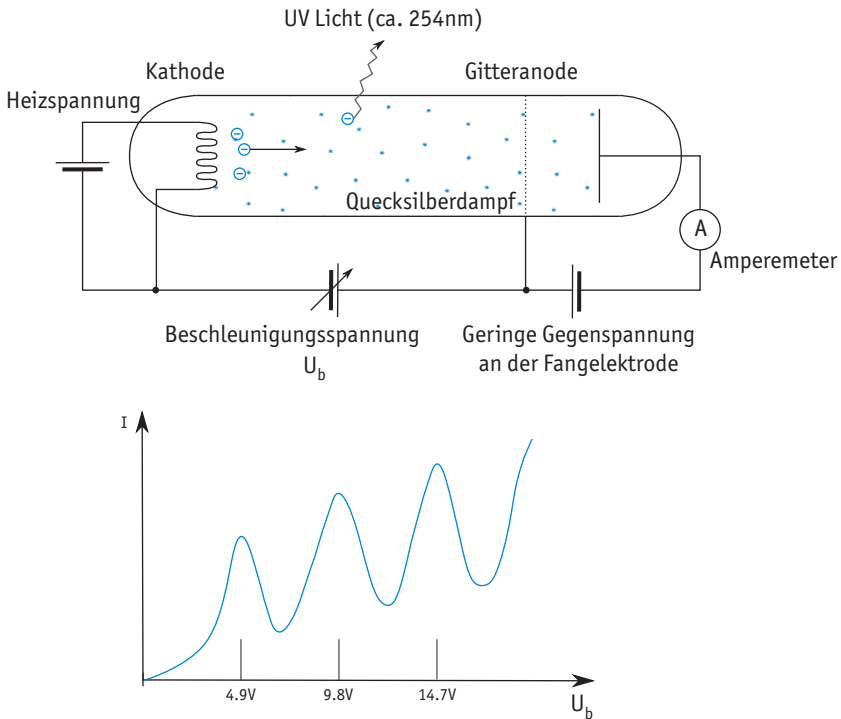
Es gibt wohl kaum einen Zweig der Naturwissenschaften, der heutzutage so erfolgreich ist wie die Quantenmechanik. Mittels numerischer Lösungen ihrer Grundgleichung kann man neben der Stabilität von Atomen, Molekülen oder Festkörpern auch deren chemische und physikalische Eigenschaften bestimmen. Viele Bereiche der Industrie, wie Halbleiterproduktion oder Chemieindustrie, sind heute auf diese Simulationen angewiesen. Es scheint absehbar, dass man in Zukunft auch komplexe chemische Reaktionen im Computer nachstellen kann. In der Medizin wäre die bekannte Kernspintomographie (MRT) ohne Quantenmechanik nicht möglich gewesen. Und mit dem Fortschreiten der Nanotechnologie werden die Ergebnisse dieser Theorie auch weiter in unser Leben Einzug halten.

All diese Erfolge stehen in bemerkenswertem Gegensatz zur „offiziellen“ Interpretation der Quantenmechanik, die in immer breiterem Umfang Unverständnis durch mysteriöse Anschauungen ersetzt. Die drei bekanntesten Beispiele sind dem Leser vermutlich bereits mehrfach begegnet: das Universum spalte sich pausenlos in Paralleluniversen auf (Viele-Welten-Theorie), eine Katze sei gleichzeitig tot und lebendig – solange niemand sie betrachtet (Schrödingers Katze), ein Quant sei gleichzeitig Welle und Teilchen – obgleich es in Experimenten immer nur eine dieser beiden „Eigenschaften“ zeige (Welle-Teilchen-Dualismus). In diesem Zusammenhang empfinden wir es als besonders erschreckend, dass ein Großteil der Experten auf diesem Gebiet gar nicht nach rationalen Erklärungen sucht, sondern sich mittels einer abstrus anmutenden Logik mit einem Mantel des Geheimnisvollen umgibt. Entstandene Glaubenssätze in diesem Weltbild werden einer Religion gleich von Generation zu Generation weitergegeben und dürfen nicht hinterfragt werden.

Ungeachtet solcher Dogmen präsentieren wir in diesem Buch ein konsistentes und verständliches Modell. Dazu wollen wir zunächst kurz zurück zu den Anfängen der Quantenmechanik gehen, um zu sehen, woher die heutigen Verständnisprobleme rühren.

Allgemein wird die Aufstellung des **Planckschen Strahlungsgesetzes** im Jahr 1900 als die Geburtsstunde der Quantenmechanik angesehen. Für die theoretische Herleitung dieses Gesetzes musste Planck von der Annahme ausgehen, dass elektromagnetische Energie nicht in kontinuierlicher Form abgestrahlt wird, sondern in Form „unteilbarer Energieelemente“, den sogenannten **Quanten**.

Daraus folgend entwickelte Bohr 1913 das nach ihm benannte **Atommodell**, das 1915/16 von Sommerfeld noch verfeinert wurde und welches die 1885 entdeckte Linienstruktur für die Lichtabstrahlung des Wasserstoff-Atoms erklärt. Grundlegend ist in diesem Modell, dass sich Elektronen auf festen Bahnen bewegen und Energie nur durch Wechsel zwischen diesen Bahnen abgegeben bzw. aufgenommen werden kann. Ein noch heute verwendeter irreführender Begriff geht sicher schon auf diese Zeit zurück: die sogenannten **Quantensprünge** der Elektronen zwischen zwei



**Abb. 1.1:** Versuchsaufbau zum Franck-Hertz-Experiment und Verlauf der Messkurve (die Stromstärke ist dabei in willkürlichen Einheiten der Größe Ampere aufgetragen)

Zuständen bei Anregung oder Abgabe von Energie. Ein prominentes Beispiel hierfür ist der viel beachtete Artikel aus der Arbeitsgruppe des Nobelpreisträgers Hans Dehmelt aus dem Jahr 1986 [1]. Die Autoren zeigen hier u. a. die Veränderungen im Zeitverlauf der Emissionsintensität eines Barium-Ions, dessen Beleuchtung aus verschiedenen Quellen variiert wird. Tatsächlich treten in diesem Zeitverlauf scheinbar abrupte Änderungen auf – aber auf einer Zeitskala der Einheitslänge 20 s! Wir berechnen später mit einem einfachen Ansatz Übergangszeiten in der Größenordnung von  $10^{-9}$  s, also weit von einem Sprung entfernt.

Der **Franck-Hertz-Versuch** von 1914 bestätigte experimentell die portionsweise Aufnahme bzw. Abgabe von Energie. In diesem Versuch werden Elektronen in einem mit Quecksilberdampf gefüllten Glaszylinder durch ein elektrisches Feld beschleunigt (Abbildung 1.1). Man misst nun den elektrischen Strom im Vergleich zur Beschleunigungsspannung. Dabei nimmt die Stromstärke bei steigender Spannung zunächst zwar wie erwartet zu, bei bestimmten Werten der Spannung bricht sie dann aber plötzlich ein (bei Quecksilber bei Vielfachen von ca. 4,9 eV). Der Einbruch