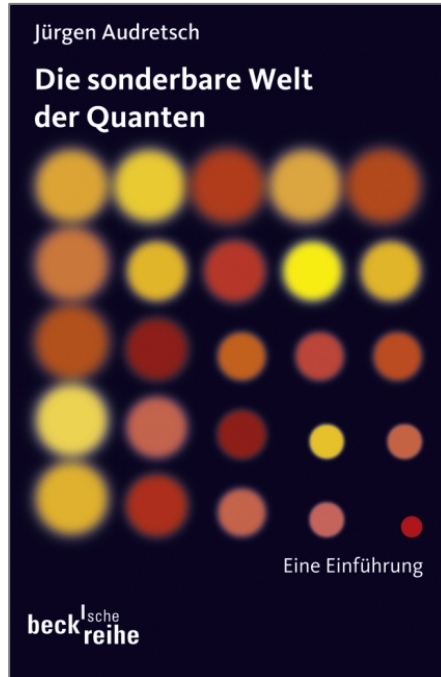


**Unverkäufliche Leseprobe**



**Jürgen Audretsch**  
**Die sonderbare Welt der Quanten**  
Eine Einführung

189 Seiten, Paperback  
ISBN: 978-3-406-57351-4

## Vorwort

Wie wirklich ist die Quantenwelt? Was ist das eigentlich für eine Welt und warum ist sie anders als alles, was wir von der Alltagswelt her gewohnt sind? In den beiden letzten Jahrzehnten sind Experimente mit einzelnen Quantensystemen und wenigen miteinander verschränkten Quantensystemen möglich geworden. Das hat dazu geführt, dass Physiker und Nicht-Physiker neu über die Grundlagen der Quantentheorie nachgedacht haben. Wie ist also die Quantenwelt zu verstehen?

In diesem Buch versuche ich auf zwei Wegen einen Zugang zu finden. Zum einen wird beschrieben, wie sich die Quantentheorie und ihre Wirklichkeitsvorstellungen in das Gesamtschema der theoretischen Physik eingliedern und wie sie von daher plausibel sind. Zum anderen werden Experimente mit einem einfachen Quantensystem – der linearen Polarisation von Photonen – vorgestellt, an denen die Eigenarten der Quantenwelt abgelesen werden können. Die Experimente machen zugleich deutlich, dass auf diesem Gebiet weitreichende technologische Entwicklungen zu erwarten sind.

Mit diesem Buch wende ich mich an Naturwissenschaftler, Geisteswissenschaftler, zum Beispiel Philosophen, Studenten, Lehrer und Schüler, aber insbesondere auch an Leserinnen und Leser ohne detailliertes Fachwissen in Mathematik und Physik. Was zum Verständnis des Inhalts benötigt wird, etwa die Addition zweier Vektoren und ihre physikalische Bedeutung, wird Schritt für Schritt entwickelt. Dennoch ist das Buch keine Unterhaltungslektüre. Die Bereitschaft zum Mitdenken und zur Auseinandersetzung mit dem Stoff ist notwendig, wenn das Hauptziel dieses Buches erreicht werden soll: mit den Grundvorstellungen der Quantentheorie

## 8 Vorwort

aktiv umzugehen lernen und die verschiedenen Behauptungen über die Quantenwelt, die immer wieder aufgestellt werden, selbst kritisch einordnen zu können. So wird es durch die Lektüre möglich, die sonderbare Welt der Quantensysteme und die Struktur ihrer faszinierenden Wirklichkeit zu verstehen und darüber hinaus am Dialog zwischen Natur- und Geisteswissenschaften teilzunehmen.

Ich möchte mich an dieser Stelle gerne bei denjenigen bedanken, die sich jeweils auf ihre Weise um das Manuskript verdient gemacht haben: Stefan Bollmann, Manuel Brendle, Michael Esfeld, Rafael Ferber, Kerstin Giering, Carina Hahn, Hans-Dieter Mutschler, Regina Oehler, Artur Scherer, Christian Speicher und nicht zuletzt meine Familie.

Dem Center for Applied Photonics (CAP) an der Universität Konstanz danke ich für seine Unterstützung.

Konstanz, im April 2008

Jürgen Audretsch

### **3. Einzelne Quantensysteme: Grunderfahrungen und Theorie**

In diesem Kapitel begegnen wir zum ersten Mal der Quantenwelt. Wir beschränken uns dabei noch auf Quantensysteme, die nicht aus mehreren Objekten oder Systemen zusammengesetzt sind. Am Beispiel der linearen Polarisation von Photonen als Quantensystem lassen sich die grundlegenden Effekte der Quantentheorie und die Elemente ihrer theoretischen Beschreibung besonders einfach darstellen. Im Folgenden wird die Frage nach der Existenz einer Quantenwelt besprochen. Die Konzepte Zustand, Eigenschaft und Messung bekommen eine – verglichen mit der klassischen Physik – neue Bedeutung. Das hat immer wieder für Verwirrung gesorgt und das Verständnis der Quantentheorie erschwert. Schließlich werden zwei techniknahe Anwendungen vorgestellt, die die Besonderheiten von Quantenzuständen und des Quantenmessprozesses noch einmal verdeutlichen.

#### **3.1. Photonen, die Quantenobjekte des Lichts**

Das physikalische System, das als erstes die Formulierung einer Quantentheorie nahegelegt hat, war das Licht. Die Hohlraumstrahlung ist die elektromagnetische Strahlung, die sich in einem Hohlraum herausbildet, dessen Wände eine einheitliche Temperatur haben. Am Ende des vorvorigen Jahrhunderts stellte die Spektralverteilung dieser Strahlung, also die charakteristische Weise, in der sich ihre Intensität mit der Frequenz verändert, für die Physiker ein großes Rätsel dar. Max Planck (1858–1947) konnte in einer Arbeit, die er am 14. Dezember 1900 vorlegte, eine befriedigende Lösung des Rätsels vorschlagen. Die Hohlraumstrahlung enthält

### 46 3. Einzelne Quantensysteme: Grunderfahrungen und Theorie

Licht verschiedener Frequenzen. Planck betrachtete die Gesamtenergie, die zu einer Frequenz gehört. Er nahm an, dass sie aus gleichen, sehr kleinen Energieportionen zusammengesetzt ist. Planck nannte diese Energieportionen Energieelemente. Sie heißen heute Energiequanten oder auch Lichtquanten. Es ist bemerkenswert, dass Planck in seiner Arbeit noch nicht von einer fundamentalen Quantennatur der Strahlung spricht. Er führt die Quantelung der Strahlungsenergie stattdessen auf das Verhalten von Oszillatoren in der Wand des Hohlraums zurück, die die Strahlung emittieren. Er hat also die richtige Rechnung durchgeführt, aber eine noch unbefriedigende physikalische Begründung dafür gegeben.

Erst in einer Arbeit von Albert Einstein (1879–1955) aus dem Jahr 1905 wurde die Lichtquantenhypothese aufgestellt. Beim Photoeffekt trifft Licht auf eine Metalloberfläche und löst Elektronen heraus. Einstein konnte die dabei beobachteten Effekte mit Hilfe der Annahme begründen, dass das Licht selbst aus Energieportionen der Größe  $E = h\nu$  besteht. Dabei ist  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Joule-Sekunden die Plancksche Konstante. In den physikalischen Einheiten der Alltagsphysik ist  $E$  ein extrem kleines Energiepaket. Das ist mit ein Grund dafür, dass man erst zu Beginn des vorigen Jahrhunderts eine solche gekörnte – also *gequantelte* – Struktur der Strahlungsenergie beobachten konnte. Wenig später hat Albert Einstein mit Hilfe der Quantenhypothese eine befriedigende Theorie der spezifischen Wärme fester Körper aufgestellt und dadurch dem Quantenkonzept allgemeine Anerkennung verschafft. Max Planck blieb aber skeptisch und fand auch in späteren Jahren, wie mancher ihrer Gründerväter, die Quantentheorie unbefriedigend. Mit Hilfe der Quantenhypothese gelang Niels Bohr (1885–1962) in seiner Atomtheorie von 1913 eine erste Erklärung der Spektren der Atome. Das experimentelle Material und der Erfolg dieser Theorie waren trotz mancher Ungereimtheiten dann so groß, dass immer mehr junge Physiker es als eine große Herausforderung empfanden, für Licht und Materie eine befriedigendere Theorie

der Quantenphänomene zu entwickeln. Im Jahr 1921 erhielt Albert Einstein den Nobelpreis in erster Linie für seine Arbeit zum Fotoeffekt.

Damit beenden wir eine sehr kurze Darstellung der Anfänge der Quantentheorie. Wir fassen zusammen, was wir für das Verständnis der nächsten Abschnitte benötigen: *Die Energie des Lichts einer bestimmten Frequenz setzt sich aus vielen gleichgroßen Energieportionen zusammen. Es gibt eine kleinste Energieportion, die nicht mehr zerteilt werden kann.*

Wir wenden uns einem Experiment zu. Nehmen wir an, dass wir eine Quelle für Licht der Frequenz  $\nu$  haben und ihre Energiedichte immer weiter verringern. Nehmen wir weiterhin an, dass sich andererseits die Empfindlichkeit eines Detektors für Licht immer weiter steigern lässt. Wir stellen Quelle und Detektor einander gegenüber und schalten die Quelle an. Der Detektor spricht nur von Zeit zu Zeit an und macht einen Klick. Dabei nimmt er immer dieselbe Energieportion  $E = h\nu$  auf, niemals weniger. Die Energie ist eine Austauschgröße. Die Energieerhaltung besagt, dass die Energie, die von einem System aufgenommen wird, zuvor von einem anderen System abgegeben wurde. Wenn also der Detektor eine Energieportion aufnimmt und klickt, hat die Quelle vorher diese Energieportion abgegeben. Das ist alles, was wir aus der Beobachtung schließen können, mehr nicht. Die *Minimalinterpretation* macht keine weiteren darüber hinausgehenden Aussagen, insbesondere nicht darüber, was zwischen Emission und Absorption passiert. Wir kommen darauf in Abschnitt 3.3 ausführlich zurück.

Man verständigt sich über den Ablauf von Experimenten besonders leicht, wenn man über die Minimalinterpretation hinausgeht. Aus diesem Grund wollen wir das auch hier tun, aber den Schritt später noch einmal überdenken, wenn wir weitere Experimente kennen gelernt haben. Da in unserem Experiment an einem Ort eine Energieportion abgegeben und an einem anderen Ort aufgenommen wird, können wir annehmen: Da war etwas zwischen

Quelle und Detektor, denn der Detektor konnte die Energieportion entnehmen. Wir nennen es ein *Photon*. Es hat die Energie  $E$ . Und da wir im Zusammenhang mit Photonen eine Vielzahl weiterer, für alle Beobachter gleiche, also objektive Aussagen im Rahmen einer Quantentheorie machen können, werden wir beim Photon auch von einem *einzelnen Quantenobjekt* sprechen. Ein Photon kann Gegenstand von Eingriffen werden. Zwei haben wir bereits kennen gelernt: die Präparation durch die Quelle und die Detektion. Wenn man sich den Abschnitt 2.5 über die physikalische Wirklichkeit in Erinnerung ruft, dann sieht man, dass wir mit unserer Interpretation faktisch bereits einen großen Schritt gemacht haben: *Einzelne Photonen sind Objekte einer erschlossenen Wirklichkeit.*

Die Emissions-Absorptions-Situation ähnelt einer anderen Situation, an der sich unser Vorgehen verdeutlichen lässt. Wir können Geld bei einer Bank immer nur in Vielfachen von einem Cent einbezahlen. Eine kleinere Geldmenge gibt es nicht. Die Geldmenge ist also gequantelt. Nachdem wir einbezahlt haben, kann jemand an einem anderen Ort diese Geldmenge beispielsweise in Form einzelner Centstücke wieder abheben. Wieder muss der Betrag ein Vielfaches von einem Cent sein. Einen anderen Betrag bekommt er in Münzen oder Geldscheinen nicht ausgehändigt. Wir können den Energieverlust und den Energiegewinn, ähnlich wie die Vorgänge am Bankschalter, direkt beobachten. Man kann sich auf das beschränken, was der Bankkunde sehen kann. Wenn man die entsprechenden Vorgänge im Detail beherrscht, kann man bereits alle Bankgeschäfte abwickeln. Das entspricht einer Minimalinterpretation.

Klassisches Licht einer bestimmten Frequenz enthält sehr viele gleichartige Photonen. *Quanteneffekte*, also die Effekte, die sich mit der Theorie für klassisches Licht nicht erklärt lassen, treten insbesondere dann auf, wenn Experimente mit sehr wenigen Photonen oder, wie in diesem Kapitel, mit *nur einem einzigen Photon*

gemacht werden. Das Überraschende und scheinbar Paradoxe vieler Effekte beruht häufig darauf, dass man bei einem Erklärungsversuch die kleinste Energieportion nicht mehr aufteilen darf. *Ein Photon ist unteilbar*. Es zerfällt nicht, und man kann es nicht «aufspalten». In dem Energiebereich, den wir hier untersuchen, trifft das auch auf Elektronen, Protonen und alle anderen Elementarteilchen zu.

*Wir werden im Folgenden nur linear polarisiertes Licht verwenden.* Wir haben einzelne Photonen erhalten, indem wir die Intensität des klassischen Lichts immer weiter verringert haben. Umgekehrt müssen sehr viele Photonen zusammen sich wieder wie klassisches linear polarisiertes Licht verhalten. Diese Bedingung werden wir in einigen Argumentationen ausnutzen. Wir müssen daher schon dem einzelnen Photon eine weitere Struktur zuordnen, die sich in speziellen Situationen wie eine lineare Polarisation äußert. *Diese innere Struktur ist das Quantensystem, auf das wir uns konzentrieren werden*, da es so besonders einfach und dennoch typisch ist. Das mag an dieser Stelle geheimnisvoll klingen. Aber es lässt sich jetzt schon sagen, dass Photonen sicherlich nicht die kleinen Kügelchen sind, wie man sie in manchen Abbildungen findet, die als Ausdruck der Polarisation noch von kleinen Pfeilen durchbohrt sind. Aber was ist stattdessen gemeint? Das ist eine Frage, der wir in den nächsten Abschnitten im Einzelnen nachgehen werden. Um in die seltsame Welt der Photonen und ihrer Polarisation vorzudringen, müssen zunächst einige Experimente durchgeführt werden, und die stellen wir jetzt vor.

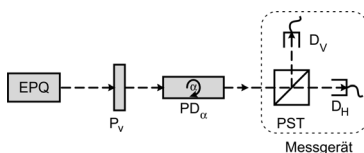


## 3.2. Erster Kontakt mit der Quantenwelt

«Die Quantenmechanik ist sehr Achtung gebietend. Aber eine innere Stimme sagt mir, dass das doch nicht der wahre Jakob ist. Die Theorie liefert viel, aber dem Geheimnis des Alten bringt sie uns kaum näher. Jedenfalls bin ich überzeugt, dass der nicht würfelt.»

Albert Einstein<sup>8</sup>

Bohr soll darauf geantwortet haben: «Einstein, schreiben Sie Gott nicht vor, was er zu tun hat.» Worauf wollte Einstein mit «Würfeln» hinweisen? Für die Experimente mit einzelnen Photonen greifen wir auf unsere Gerätesammlung zurück. Wir verwenden weiterhin die Abbildungen und Schaltbilder aus Abschnitt 2.9. Wieder werden die Geräte auf einer horizontalen Tischplatte aufgebaut. Die Schaltbilder zeigen den Blick von oben. Durch die gestrichelten Verbindungslinien wird nur die relative Lage der Geräte zueinander verdeutlicht werden. Mit den Linien sollten aber keine Wege assoziiert werden, längs derer die Photonen wie Kugeln fliegen. Wir wollen mit Interpretationen so sparsam wie möglich umgehen und erst im nächsten Abschnitt weitere Interpretationsschritte machen. Unsere Gerätesammlung muss noch um ein wichtiges Gerät erweitert werden. Es handelt sich um eine *Ein-Photon-Quelle* EPQ. Auf ihre Realisierung, die nicht einfach ist, können wir hier nicht eingehen.<sup>9</sup> Die Quelle emittiert einzelne Photonen und zeigt dies an. Es gibt sogar Quellen, die einzelne Photonen gewissermaßen «auf Knopfdruck» produzieren.



**Abbildung 3.1:** Ein einzelnes Photon verlässt die Ein-Photon-Quelle EPQ. Einer der Detektoren  $D_H$  oder  $D_V$  spricht an. Dazwischen sind der Polarisator  $P_V$  und der Polarisationsdreher  $PD_\alpha$  aufgebaut.

Wir bauen das in Abbildung 3.1 skizzierte Experiment auf. Es besteht aus der Ein-Photon-Quelle EPQ, dem Polarisator  $P_V$  für vertikale Polarisation und dem polarisierenden Strahlteiler PST mit den Detektoren  $D_V$  und  $D_H$ . Gegen Einflüsse aus der Umgebung auf das Photon soll die Anlage *isoliert* sein. Wir bezeichnen die zuletzt genannten drei Geräte zusammengenommen als *Messgerät*. Das Ansprechen (Klicken) des Detektors  $D_V$  bzw.  $D_H$  ist ein *Messergebnis*. Ihm wird zur Abkürzung der *Messwert*  $V$  bzw.  $H$  zugeordnet. Was da eigentlich gemessen wird, klären wir später. Vor dem Messgerät ordnen wir noch den Polarisationsdreher  $PD_\alpha$  an und stellen ihn so ein, dass er bei linear polarisiertem klassischem Licht eine Drehung der Polarisationssebene um den Winkel  $\alpha$  bewirken würde. Die Photonenquelle wird eingeschaltet und emittiert nacheinander einzelne Photonen. Da sie derselben Quelle entstammen, sind sie alle in gleicher Weise *präpariert*. Was beobachten wir? Zunächst einmal: Ein Detektor reagiert nur dann, wenn vorher die Ein-Photon-Quelle die Emission eines Photons angezeigt hat.

Weiterhin reagiert immer nur entweder der Detektor  $D_V$  oder der Detektor  $D_H$ . In der Abfolge des Ansprechens ist keinerlei Regelmäßigkeit zu entdecken. Daher können wir auch nicht vorher-sagen welcher Detektor ansprechen wird. Wenn ein Detektor angesprochen hat, ist es völlig *zufällig*, welcher Detektor beim nächsten Photon klicken wird.

Wenn wir das Experiment mit einzelnen Photonen sehr häufig wiederholen, machen wir eine weitere Beobachtung, die sich analog auch bei häufig wiederholtem Würfeln mit einem schlechten Würfel anstellen lässt. Wir würfeln zum Beispiel bei 6000 Würfeln 500mal die 6 und jeweils 200mal eine der Zahlen von 1 bis 5. Um die *relative Häufigkeit* eines Ergebnisses zu ermitteln, dividiert man durch die Gesamtzahl der Würfe und erhält für die 6 den Wert  $5/6$  und für die anderen Zahlen jeweils  $1/30$ . Trotz des Zufalls beim einzelnen Wurf liegt bei unserem Würfel die relative Häufigkeit

der Wurfresultate bei einer sehr großen Zahl von Würfeln näherungsweise fest. Sie lässt sich immer wieder reproduzieren. Statt von relativer Häufigkeit spricht man auch gerne von *Wahrscheinlichkeit*. Man kann beim Würfeln eine sichere Prognose über Wahrscheinlichkeiten machen. Sie wird experimentell nachgeprüft, indem wir das Würfeln sehr oft wiederholen. Die Wahrscheinlichkeit, dass eine 6 gewürfelt wird, ist für unseren Würfel  $5/6$  und die für eine andere Zahl  $1/30$ . Die Gesamtwahrscheinlichkeit ergibt sich als Summe aus den Einzelwahrscheinlichkeiten und ist gleich 1. Das besagt, dass sich irgendeine der Zahlen 1 bis 6 mit Sicherheit ergeben wird. Die Nachprüfung der Prognose «die Wahrscheinlichkeit für Ergebnis 6 ist  $5/6$ » kann aber nicht durch einen einzelnen Wurf erfolgen. Wir müssen eine sehr große Zahl von Würfeln durchführen und dann prüfen, ob die festgestellte relative Häufigkeit mit der behaupteten relativen Häufigkeit übereinstimmt. Wahrscheinlichkeit ist ein schillerndes Konzept. Wir präzisieren daher: Wenn wir eine Wahrscheinlichkeit für ein Messergebnis prognostizieren, dann ist damit immer die relative Häufigkeit gemeint, mit der dieses Ergebnis bei einer sehr häufigen Wiederholung des Experiments eintreten wird. Mehr wird in der Physik mit dem Wahrscheinlichkeitskonzept nicht verknüpft.

Doch zurück zu den Photonen. Es zeigt sich, dass auch in unserem Experiment die relativen Häufigkeiten des Ansprechens der Detektoren  $D_V$  und  $D_H$  bei vorgegebenem Drehwinkel  $\alpha$  festliegen. Wir können für alle Drehwinkel  $\alpha$  eine sichere Prognose machen. Sie wird experimentell nachgeprüft, indem wir das Experiment sehr oft wiederholen. *Photonen zeigen daher Zufall beim Ergebnis der Einzelmessung und völlige Bestimmtheit der relativen Häufigkeiten der Ergebnisse bei vielen wiederholten Messungen zu gleichem Drehwinkel  $\alpha$ .* Wir beziehen uns dabei auf fehlerfrei funktionierende Präparations- und Messgeräte. Die Aussagen gelten im Grenzfall, dass alle Störungen, die im Labor auftreten können, beseitigt sind.

Wir wollen eine Quantentheorie formulieren, die diese Beobachtungen wiedergibt. Dafür gibt es verschiedene Ansätze. Betrachten wir noch einmal den Zufall beim Würfeln. Man kann die Bewegung eines Würfels mit Hilfe der klassischen Mechanik beschreiben. Wenn man alle Anfangsbedingungen genau festlegt, dann gibt es dazu nur eine wohlbestimmte Bewegung. Der Würfel zeigt ein *deterministisches Verhalten*. Das Ergebnis eines Einzelwurfs ist vorherbestimmt. Bei jedem Wurf führt aber die Handbewegung des Würfelnden zu immer wieder anderen Anfangsbedingungen. Dies geschieht so, dass die relativen Häufigkeiten der ausgewürfelten Zahlen für einen Würfel festliegen. Diesen Typ von Zufall, der bei klassisch beschreibbaren Systemen auftritt, bezeichnen wir als *deterministischen Zufall*. Dass wir nur Wahrscheinlichkeitsausagen machen können, liegt in diesem Fall an unserer Unkenntnis (Ignoranz) des jeweiligen Anfangszustands.

Wir haben jetzt die Wahl: Wollen wir bei der Konstruktion einer Quantentheorie einen deterministischen Zufall einbauen? Oder wollen wir verlangen, dass es keinen deterministischen «Hintergrund» gibt? In diesem Fall beruhen Wahrscheinlichkeiten nicht auf unserer Ignoranz. Sie sind grundsätzlich nicht auflösbar.

In der Standard-Quantentheorie, die wir hier beschreiben werden, wählt man den zweiten Zugang und ist damit sehr erfolgreich. Aber wieder sollte klar sein, dass man zu diesem Vorgehen nicht gezwungen ist. Alternativtheorien könnten anders konstruiert sein. Wir kommen auf einen solchen Vorschlag in Abschnitt 4.4. zurück. Die Art des Zufalls ist also abhängig von der gewählten Theorie. Ein Wort noch zum Eingangszitat. Einstein war kein Freund der Standard-Quantentheorie. Gerade der irreduzible Zufall hat ihn gestört. Das sollte wohl stark vereinfacht im Zitat ausgedrückt werden.

Zurück zu unserem Experiment. Quantitativ stellen wir Folgendes fest: *Die Wahrscheinlichkeiten für die Messergebnisse an einzelnen Photonen verhalten sich in Abhängigkeit vom Winkel  $\alpha$*

### 54 3. Einzelne Quantensysteme: Grunderfahrungen und Theorie

*völlig analog zu den Intensitäten beim linear polarisierten klassischen Licht.* Das ist plausibel, denn sehr viele Photonen zusammen müssen klassisches Licht bilden. Durch diese *Analogie* bekommen wir den entscheidenden Hinweis darauf, wie sich eine Quantentheorie formulieren lässt, die die Ergebnisse unserer Messungen an einzelnen Photonen richtig wiedergibt. Wir werden in den nächsten Abschnitten wichtige Bauelemente dieser Theorie vorstellen.