

## **Eine Kurzvorstellung der Quantenmechanik**

Abstract: Die Quantenmechanik ist heute *die* grundlegende physikalische Theorie. Mit ihrer erstaunlicher Gestalt, die exotische Eigenschaften wie die Welle-Teilchen-Dualität, eine Wahrscheinlichkeitsinterpretation und den Tunneleffekt beinhaltet, revolutioniert sie nicht nur bereits seit einem Jahrhundert in immer wieder neuen Entdeckungen die Naturwissenschaften, sie fordert auch unsere alltäglichen Intuitionen und Vorstellungen zu Änderungen auf. Mein Vortrag soll eine kurze Einführung in die Grundstrukturen und die Darstellung der Quantenmechanik geben.

Der Klassischen Physik lag bis vor einem Jahrhundert noch die Vorstellung zugrunde, dass im Prinzip jedes physikalische System wie eines aus dem täglichen Leben behandelt werden kann.

Egal, ob es sich dabei um besonders große, besonders kleine, besonders schwere oder besonders schnelle Systeme handelte - die klassische Physik, deren grundlegende Form von Maxwell und Newton gestellt wurde, war universal gültig. Diese Vorstellung hat die damalige Gestalt der Physik so geprägt, dass man sich sogar kurz vor dem 20ten Jahrhundert noch knapp vor der Vollendung der Physik sah. Eine bekannte, illustrierende Anekdote dafür ist die eines der Physikprofessoren Plancks, der diesem bei Beginn seines Studiums deutlich davon abriet, sein Talent an die Physik zu verschwenden. Diese wäre bald beendet und dann kein guter Arbeitgeber mehr für gute Denker.

Glücklicherweise ließ sich Planck aber nicht davon abhalten, Physiker zu werden. Er wurde der Begründer einer der beiden physikalischen Revolutionen, welche die klassischen Vorstellungen bald durchbrechen sollten.

Die physikalischen Revolutionen des frühen 20ten Jahrhunderts entdeckten beide die Ungültigkeit klassischer Prinzipien und klassischer Intuitionen in Extremalbereichen. Eine Revolution war die Relativitätstheorie Einsteins. Sie postulierte die Ungültigkeit der klassischen Physik bei hohen Geschwindigkeiten und hohen Massen und revidierte die klassischen Intuitionen zu Raum und Zeit, in dem beide in relative Abhängigkeit miteinander gesetzt wurden. Mit diesen mystisch scheinenden Intuitionsänderungen wurde sie in der damals durch eine starke öffentliche Präsenz neuer Technologien neu wissenschaftssensibilisierten Zeit unglaublich populär.

Neben ihr verlief noch eine zweite wissenschaftliche Revolution. Sie postulierte 1900 in einer Schrift Plancks die Quantennatur der Physik im Extremalbereich des sehr Kleinen. Damit wich sie nicht weniger stark von den klassischen Vorstellungen ab, aber sie hatte es trotzdem ungleich schwerer, sich in die Öffentlichkeit durchzusetzen. Die Gründe für das damalige Desinteresse waren zum einen die Überpräsenz Einsteins und der Relativitätstheorie, zum anderen die nur sehr langsame Entwicklung einer umfassenden Vorstellung von der Quantenmechanik, den von ihr ausstrahlenden Konsequenzen für unser physikalisches Weltbild und auch der sich ergebenden technischen Möglichkeiten.

Heute sind diese Folgen und Möglichkeiten zentraler Gegenstand der physikalischen Forschung und substantieller, philosophischer Beschäftigung geworden. Die Revolution der Quantenmechanik wurde erst spät richtig erkannt, wirkt aber dafür umso stärker in viele Bereiche unserer Vorstellungen - und bald, in den ersten Quantentechnologien - auch unseres täglichen Lebens.

Im Folgenden werde ich ein Bild der Entstehung der Grundstrukturen der Quantenmechanik anhand ihrer grundlegenden Schwierigkeiten entwerfen.

## Die Entwicklung der Quantenvorstellung

Die Quantenmechanik beschreibt die Physik der atomaren Dimensionen. Ihre typischen Massen sind von  $10^{-30}$  kg bis  $10^{-25}$  kg, typische Linearabmessungen bewegen sich zwischen  $10^{-15}$  bis  $10^{-19}$  m.

Ihre Grundvorstellung ist dabei, dass sich alle Prozesse dieser kleinsten möglichen Bereiche in ganzen Vielfachen, also in „Stückchen“ abspielen - daher auch der Name

„Quantenmechanik“.

Diese Vorstellung – und mit ihr die gesamte Quantenmechanik – wurde 1900 von Max Planck in dessen Erklärung der Hohlraumstrahlung begründet.

Die Hohlraumstrahlung war damals ein Problem, das mit klassischer Physik nicht lösbar war. Es ging dabei um einen Hohlkörper, der nur ein einziges, winziges Loch in einer Seite hatte.

Durch dieses Loch konnte Strahlung eintreten. Es war aber aufgrund der vielfältigen Strahlungsabsorptionsmöglichkeiten im Innern nahezu ausgeschlossen, dass wieder Strahlung austrat. Die dann dennoch aus dem Loch austretende Strahlung hieß „Schwarze Strahlung“.

Sie sollte mit der Wärmestrahlung im Innern des Körpers identisch sein, und diese war der Gegenstand, der untersucht werden sollte. Die genaue Untersuchung der schwarzen Strahlung ist nun zu kompliziert und würde zu weit führen, das Problem kann aber an der zentralen Darstellung illustriert werden. Zentral für die Darstellung der Wärmestrahlung war die gesamte Energiedichte des Raums in Abhängigkeit zu den Wellenlängen der Strahlung. Für diese gab es zwei Gesetze, das Wiensche Strahlungsgesetz und die Rayleigh-Jeans-Formel, die beide unterschiedliche Kurven für das Verhältnis von Energiedichte zu Wellenlänge entwarfen. Das Problem war nun, dass keine der Kurven mit dem experimentellen Befund übereinstimmte. Zwar funktionierte das Wiensche Strahlungsgesetz für sehr große Wellenlängen, dafür aber dann bei den kleinen nicht mehr. Dort griff die Rayleigh-Jeans-Formel. Aber sie scheiterte an den großen Wellenlängen. Bei ihr kommt es im hochwelligen Bereich sogar zur sogenannten „Ultraviolett Katastrophe“ – die gesamte räumliche Energiedichte wird unendlich. Eine unbefriedigende Situation für eine Physik, die sich damals so nahe an ihrer Vervollständigung sah.

1900 nun kam Planck und erklärte die experimentelle Kurve der Hohlkörperstrahlung korrekt. Allerdings tat er dies unter Zuhilfenahme einer Grundhypothese, die der klassischen Physik so eklatant zuwider lief, dass nicht nur seine spöttelnden damaligen Berliner Kollegen, sondern auch er anfangs lange und ernsthaft an der Erklärung zweifelten. Sie ließ sich aber nicht mehr entkräften – sie war und ist richtig.

Planck führte in seiner Behandlung aus, dass die klassische Physik ein grundlegendes Problem hatte. Sie ging falscher Weise davon aus, dass die Wände des Hohlraums, also dessen Elektronen, *kontinuierliche* Energiespektren haben. Mit diesen ließ sich eben jede beliebige Strahlungsenergie mit dem Hohlraumfeld austauschen und an genau dieser Vorstellung scheiterten die klassischen Modelle. Wenn man hingegen davon ausging, dass die Elektronen nur Energie *in ganzen Vielfachen eines elementaren „Energiequants“* austauschen können, ließ sich die Hohlraumstrahlung völlig korrekt beschreiben.

Dies war die physikalische Revolution Plancks: die Einführung eines elementaren Energiequants. Es bedeutete für die gesamte Physik, dass die Energien aller mikroskopischen Gebilde (und damit auch aller daraus zusammengesetzten, makroskopischen Gebilde), die ja auch alle Prozesse ausmachten, nur diskrete Werte annehmen können und nicht mehr als kontinuierlich aufgefasst werden dürfen. Energien können nur in gequantelten Paketen absorbiert oder emittiert werden.

Diese Energiequantelung ist in der Dimension „Wirkung“ im *Planckschen Wirkungsquantum* „ $h$ “ inzwischen als physikalische Realität anerkannt. Sie verkörpert die fundamentale Einsicht und den Wandel der Quantenmechanik.

## Die Welle-Teilchen-Dualität

Nach der Entdeckung und Annahme der Quantenmechanik wurden weitere interessante Aspekte der kleinsten Teilchen entdeckt. Der bis heute verwunderlichste darunter ist die Welle-Teilchen-Dualität quantenmechanischer Teilchen. Sie soll an ihrem Standardbeispiel illustriert werden, dem Youngschen Doppelspalt-Experiment.

Der Youngsche Doppelspalt ist ein Versuchsaufbau, bei dem man verschiedene Quellen Teilchen und Strahlungen auf eine Scheibe schießen lässt. Zwischen Quelle und Scheibe wird dann eine weitere Scheibe gestellt, die mit zwei schließbaren Spalten versehen ist und die hintere Scheibe abschirmt. Nun kann man von der Quelle aus verschiedene Dinge durch einen oder beide Spalte auf die hintere Scheibe schießen und sich dann darauf ansehen, in welchen typischen Verteilungen dort die verschiedenen Dinge ankommen. Machen wir mal ein paar Versuche:

- 1) In einem ersten Versuch nehmen wir einfach eine Ballmaschine, die aus verschiedensten Winkeln Bälle durch einen (entsprechend großen) Doppelspalt schießt. Wir schließen erst den einen Spalt und messen damit eine Scheibenverteilung, dann öffnen wir ihn und schließen den anderen Spalt und messen und schließlich öffnen wir beide Spalte gleichzeitig und messen noch einmal. Das Resultat: die Verteilung der Bälle, wenn beide Spalte offen sind, ist gleich der Summe der Verteilungen der beiden Einzelöffnungen.
- 2) In einem zweiten Versuch stellen wir den Doppelspalt in Wasser zwischen die Scheibe und eine Wellenmaschine. Die Wellenmaschine schiebt uns über die ganze Fläche gerade Wellen auf den Spalt zu. Öffnet man nur einen Spalt, so erreicht die Welle diesen, beugt sich an ihm (sie bildet dahinter wieder eine von dem Loch ausgehende Halbkugel) und trifft in einer Intensitätsverteilung auf dem Schirm auf, die ziemlich gleich der Ballverteilung bei nur einem Spalt ist. Öffnet man aber in diesem Versuch beide Spalte, so geschieht etwas anderes als bei den Bällen. Die beiden Spalte verursachen je beide eine Kugelwelle, die vom Spalt weg in alle Richtungen geht. In dem Raum, der zwischen der Scheibe und dem Doppelspalt liegt, treffen diese Wellen nun aufeinander (am stärksten in der Mitte). Dort passiert etwas, das man von Wellen kennt: sie interagieren. Treffen Wellenberge oder Wellentäler aufeinander, so verstärken sie sich und gehen gemeinsam als noch höhere oder noch tiefere Berge oder Täler weiter in Richtung Scheibe. An den Stellen jedoch, an denen genau ein Berg auf ein Tal trifft, löschen sich diese gegenseitig aus und nivellieren sich damit. Diese Interaktion heißt „Interferenz“. Auf der Scheibe erhält man daher ein anderes Muster, als das einer simplen Addition der Einzelmuster. Die Interferenz verstärkt und löscht einiges und man erhält daher das für Wellen typische „Interferenzmuster“.
- 3) In einem dritten Versuch nehmen wir wieder einen trockenen Aufbau und stellen einen Teilchenemitter, der Elektronen ausstrahlt, als Quelle auf. Zusätzlich versehen wir noch die hintere Scheibe mit Rezeptoren, so dass wir merken, ob an ihr ein Teilchen (als kurzer „Aufschlag“ in einem Punkt) oder eine Welle (als breites Auftreffen an mehreren Punkten) ankommt. Öffnen wir nun einen Spalt und verdünnen wir unseren Teilchenstrahl so, dass nur einzelne Aufschläge hinten an der Scheibe ankommen, also einzelne Teilchen nacheinander durch den Spalt gehen, so erhalten wir das typische Verteilungsbild, das wir auch oben schon bei Einzelöffnung der Spalte erhalten haben. Öffnen wir hingegen beide Spalte und schießen weiter mit Teilchen, die auch weiterhin hinten als Einzelaufschläge ankommen, so erhalten wir erstaunlicherweise ein Interferenzmuster. Die Teilchen interferieren also! Und dieses Verhalten behalten sie sogar bei, wenn man nur je einzelne Teilchen durch den Doppelspalt schießt. Obwohl also das Teilchen eigentlich nur durch einen Spalt gehen kann, scheint es doch, wie eine Welle, gleichzeitig durch beide Spalte zu gehen und

mit sich selbst zu interferieren! Ein äußerst seltsames Verhalten, das mit der klassischen Trennung von Entweder-Teilchen – Oder-Welle nicht mehr erklärbar ist.

Dieser Versuch begründet die in der quantenmechanischen Theorie auch herleitbare *Welle-Teilchen-Dualität*. Sie besagt, dass sowohl Wellen eine Teilchennatur als auch Teilchen eine Wellennatur zukommt. Beides ist sozusagen immer beides.

### **Unbestimmtheiten der Quantenwelt**

Schwierig ist aber noch die Erklärung des „doppelten Durchgangs“ eines einzelnen Teilchens. Wie genau geht das? Geht das Teilchen erst als Welle durch den Doppelspalt und kommt dann aber als Teilchen auf der Scheibe auf?

Dies ist eine fundamentale „Unentschlossenheit“ quantenmechanischer Teilchen, die in der Interpretation der sogenannten „Materiewelle“ als Wahrscheinlichkeitswelle ihren Ausdruck findet. Das Teilchen ist in diesem Konzept undeutlich wellenartig im Raum „verschmiert“ und nirgends eindeutig als „Einzelnes“ vorhanden. Erst, wenn es interagieren muss, etwa indem es gemessen wird, legt es sich auf eine Form fest. So „bewirkt“ die Messung „Auftreffen-auf-Scheibe“ erst die Festlegung auf die Teilchenartigkeit, während vorher, in der Propagation im Raum, noch die Wellennatur vorgeherrscht hat.

Diese Wahrscheinlichkeitsnatur von Teilchen ist übrigens auch Ursache einiger seltsamer Ereignisse in der Quantenwelt, wie zum Beispiel dem des Tunneleffekts. Er beschreibt die Fähigkeit von Teilchen, sich geisterhaft durch Wände bewegen zu können. In Wirklichkeit beruht dies darauf, dass die Wahrscheinlichkeitswelle, die auf einen massiven Gegenstand trifft, darin erst langsam abflaut und daher auch in dem Gegenstand und – wenn dieser dünn genug ist – auch dahinter noch eine Aufenthaltswahrscheinlichkeit für ein Teilchen besteht.

Auf der Messungsebene selbst äußert sich aber auch noch eine andere Unbestimmtheit, die mit der Messung selbst zu tun hat. Sie kann leicht einsichtig gemacht werden, wenn man sich vorstellt, dass eine Messung immer aus Interaktion bedeutet. Will ich zum Beispiel den Ort eines Tennisballs „messen“ (also sehen), so muss ich Licht auf diesen werfen, um ihn überhaupt erst einmal zu sehen. Sicher wird in diesem Fall dadurch die Eigenschaft, die ich messen will, nicht beeinträchtigt. Das Auftreffen des Lichts bewegt den Tennisball selbst nicht. In der Quantenmechanik ist das aber anders. Wenn ich den Ort eines Elektrons messen will, so kann ich das zum Beispiel tun, indem ich eben ein Photon auf das Elektron schieße und das dann auffange. Aus dem Reflektionswinkel erhalte ich die Information des Ortes des Elektrons. Allerdings ist das Photon auch Träger von Energie, die es beim Auftreffen auf das Elektron zum Teil an dieses überträgt. Weil diese Energie nun aber nicht vernachlässigbar klein gegenüber dem Elektron ist, beeinflusst es dieses entweder, indem es seinen Ort oder seinen Impuls ändert. Welche Änderung es dabei an dem Elektron vornimmt, ist abhängig von der Art der Messung, genauer von der Wellenlänge des eingestrahlteten Lichts. Wenn man hochwelliges Licht einstrahlt, erhält man ein genaues Bild vom Ort, beeinflusst aber stark den Impuls. Nimmt man dagegen niedrigwelliges Licht, ist der Einfluss auf den Impuls nicht so hoch, aber die reflektierten Wellen „verschmieren“ dafür mehr und der Ort wird schwerer zu erkennen. Da man dazu prinzipiell nicht genau wissen kann, wie stark die Änderung ist, kann man nie gleichzeitig Impuls und Ort eines Teilchens scharf messen. Man benötigt gewissermaßen immer das eine, um das andere zu messen. Dies ist ein Phänomen, das sich auch aus den theoretischen Grundlagen der Quantenmechanik ableiten lässt, und es ist Heisenbergs Verdienst, dies als fundamentales Prinzip erkannt zu haben. Das Prinzip ist also die Heisenbergsche Unschärferelation. Das Problematische an der Unschärfe ist, dass sie einen fundamentalen Indeterminismus in die Quantenphysik bringt, die Gegenstand großer physikalischer und philosophischer Diskussion war und ist. Zu einer präzisen Bestimmung des physikalischen Zustands eines Systems benötigt man nämlich gerade immer genau *die*

Größen gleichzeitig, die sich gegenseitig beeinflussen und damit gerade nicht gleichzeitig verfügbar sind. Auch kann man nur dann präzise Voraussagen über die Entwicklung eines physikalischen Systems machen, wenn man dessen gegenwärtigen Zustand genau kennt. Die Zustände quantenmechanischer Systeme sind also fundamental unbestimmt und ihre Zukunft ist ebenso eine Sache von Wahrscheinlichkeiten. Dies steht erneut im krassen Gegensatz zur klassischen Physik, in der gerade der Determinismus, also die Möglichkeit der exakten Vorhersage zukünftiger Zustände, das größte Wissenschaftsideal begründete.

### **Die fertige „Quantentheorie“**

Ein Problem der Quantenmechanik war damals, dass sie recht lange keine Bewegungsgleichungen hatte, die, analog zu den Newtonschen oder den Maxwellschen Gleichungen, die Propagation quantenmechanischer Teilchen beschreiben konnten. Die Entdeckung dieser fundamentalen Gleichung fällt erst in die Jahre 1925/1926, also ein ganzes Vierteljahrhundert nach der Grundlegung der Quantenmechanik. In diesen Jahren entwickelte Erwin Schrödinger im Rahmen seiner Wellenmechanik die sogenannten Schrödinger-Gleichung, die fortan als die fundamentale Gleichung der Quantenmechanik gelten sollte. Sie gab ihr eine einheitliche Gestalt und ermöglichte ihre Systematisierung.

Die Schrödinger-Gleichung greift dabei das Konzept der Wahrscheinlichkeitswellen auf und beschreibt in einer Differentialgleichung deren Fortpflanzung wie eine Wellenbewegung in zusätzlicher Abhängigkeit zum Planckschen Wirkungsquantum. Die Wellen werden damit noch einmal abstrahiert zu „Wahrscheinlichkeits-Wirkungswellen“.

Mit diesem Konzept ist aus einer grundlegenden Intuition eine sehr leicht zugängliche Arbeitsweise der Quantenmechanik geschaffen, die sowohl die Heisenbergsche Unschärferelation als auch viele andere Charakteristika unmittelbar ergibt und zudem ein sehr leichtes Rechnen ermöglicht. Vor allem in Verbindung mit der Hamilton-Jacobi-Theorie, die ein Konzept „kanonischer Transformationen“, also der Umformung zueinandergehöriger Größen in „rechenpraktische“ Größen verwendet, können die grundlegenden Eigenschaften eines quantenmechanischen Systems leicht herausgefunden werden. Einfache Ableitungen, die man als „Operatoren“ auf die die Welle repräsentierende „Wellenfunktion“ ansetzen kann, ermöglichen einen guten Zugang zu Bestimmungsgrößen wie Impuls, Ort und Energie eines Systems.

Es wurden aber auch weitere Formalismen erstellt, die andere Vorteile boten. Der derzeit gängigste Formalismus ist dabei der Dirac-Formalismus, der eine besonders leichte und eingängliche Schreibweise der Wellenfunktionen und Operatoren anbietet und so eine gute Darstellbarkeit der verschiedensten Messsituationen erlaubt.

Eine übrigens bemerkenswerte Eigenschaft der Schrödinger-Gleichung ist deren Determinismus - sie beschreibt die Fortpflanzung der Wirkungswellen als deterministische Bewegung. In ihr selbst finden sich keine Wahrscheinlichkeits-Größen. Wenn man die Parameter einer Welle zu einem Zeitpunkt kennt, so kann man einfach mittels der zeitabhängigen Schrödinger-Gleichung deren zukünftige Zustände ermitteln. Natürlich ist damit der Indeterminismus nicht aufgehoben – er kehrt zurück, sobald man die Wellen irgendwie misst, sie also aus der Theorie herausholt. Aber dieser Rückkehr einer deterministischen Bewegungsgleichung ist dennoch ein herrlicher Kunstgriff und von großer Wichtigkeit für beispielsweise technische Realisierung der Quantenmechanik.

In der nun in (sicherlich groben) Grundrissen präsentierten Form ist die Quantenmechanik heute zur grundlegenden physikalischen Theorie geworden. War die klassische Physik noch davon überzeugt, dass alles klassisch in Normalgrößen behandelt werden kann, so hat sich dieses Verhältnis umgekehrt. Alles ist quantenmechanisch und die bisher klassische Physik

hat nur Mengen-Aussagen über große Mengen von eigentlich quantenmechanischen Teilchen gemacht. Die Quantenmechanik enthält damit die klassische Physik als Teilgebiet und „Vergrößerung“ ihrer selbst.

Und obwohl es in ihr immer noch ungelöste Schwierigkeiten gibt, wie zum Beispiel ihren fundamentalen Widerspruch zur Relativitätstheorie, erweist sie sich zunehmend als zuverlässige und praktische Theorie, die auch immer erstaunlichere Technologien möglich erscheinen lässt.

Zu diesen letzten beiden Themen des fundamentalen Widerspruchs zur Relativitätstheorie und den erstaunlichen Technologien werde ich in meinem zweiten Vortrag zur Quanteninformationstheorie kommen, zu dem ich leider – aus zeitlichen Gründen – zumindest in diesem Tagungsband nichts Schriftliches geben konnte.

Sandro Gaycken  
Wissenschafts- und Technikphilosophie  
Berlin/ Zürich/ Bielefeld