

## **1. Die Welt der Quanten**

Die Quantenphysik beschäftigt sich damit, das physikalische Verhalten von Atomen und Molekülen, aber auch von subatomaren Elementarteilchen (u.a. Elektronen, Protonen und Neutronen) zu ergründen. Alle Elemente, die den Regeln der Quantenphysik unterliegen, werden im Folgenden als Quantenobjekte oder einfach als Quanten bezeichnet. Da unser gesamtes Universum aus Atomen besteht, Atome wiederum aus Protonen, Neutronen und Elektronen, so folgt daraus, dass unser gesamtes Universum letztlich aus lauter Quantenobjekten zusammengesetzt ist. Warum die Gesetze der Quantenphysik dennoch in unserer alltäglichen Mesowelt praktische keine Rolle spielen und wir mit den Regeln der klassischen Physik gut leben können, werden wir später erfahren.

Für die folgenden Ausführungen wird beispielhaft das Elektron als Prototyp eines Quantenobjektes ausgewählt. Die dabei gewonnen Erkenntnisse gelten jedoch im Prinzip ebenso für alle anderen Quantenobjekte. Die grundlegenden Strukturen der Quantenphysik werden hier nur insoweit behandelt, wie sie zum Verständnis der folgenden Kapitel notwendig sind.

### **- Das Elektron: Vom elektrisch geladenen Kügelchen zur Wahrscheinlichkeitswelle**

Das Elektron als Träger der elektrischen Ladung wurde erstmals im Jahr 1874 vom irischen Physiker George Johnstone Stoney vorgeschlagen. Die damalige Vorstellung vom Elektron war die eines durchaus klassischen Teilchens mit einer Masse  $m_e$ , welches zusätzlich die elektrische Ladung  $-e$  trug. Seine Bewegungen im elektrischen Feld und im Gravitationsfeld ließen sich perfekt mit den Gleichungen der klassischen Physik beschreiben und experimentell verifizieren.

Erst bei den Untersuchungen zum Aufbau des Atoms am Anfang des 20. Jahrhunderts stellte man fest, dass irgendetwas mit dem Bild vom Elektron als einem geladenen Kügelchen nicht stimmen konnte. Betrachtet man nämlich das Atom als kleines Planetensystem, in dem die Elektronen um den Atomkern kreisen, dann – das wusste man bereits um 1900 - müssten die Elektronen wegen der andauernden Kreisbeschleunigung wie kleine Antennen Energie abstrahlen. Der Verlust an Energie würde dann aber nach Bruchteilen von Sekunden dazu führen, dass das Elektron in den Kern stürzen und das Atom ins sich kollabieren würde. Aus dieser Not heraus entwickelte man dann die Vorstellung vom Elektron als einer verschmierten, dreidimensionalen Materie- und Ladungswolke um den Atomkern. Die Idee, dass es sich dabei um eine Materiewelle handeln könnte, wurde ursprünglich von dem französischen Physiker Louis de Broglie in Analogie zum Welle-Teilchen Dualismus in der Optik im Rahmen seiner Dissertation (1924) aufgebracht. Nach einem Vortrag des österreichischen Physikers Erwin Schrödinger an der ETH Zürich über die Idee de Broglie's bemerkte der damalige Lehrstuhlinhaber für Theoretische Physik, Peter Debye: „Wenn es Materiewellen gibt, dann muss für diese Wellen auch eine entsprechende Wellengleichung

existieren.“ Daraufhin entwickelte Schrödinger in kurzer Zeit die nach ihm benannte Wellengleichung (1926), immer in der Annahme, bei den Lösungen handle es sich um Materiewellen. Noch im selben Jahr 1926 zeigte jedoch der Göttinger Physiker Max Born, dass es sich bei den von Schrödinger berechneten Wellen nicht um Materiewellen handelte, sondern um Wahrscheinlichkeitswellen. Born behauptete, in Atomen gebe gar keine reellen Elektronen, sondern nur Wahrscheinlichkeitsverteilungen für deren Aufenthaltsorte. Im Falle einer Messung bzw. Störung eines Elektrons im Atom, z.B. bei Streuexperimenten, zeige dieses sich jedoch immer als punktförmiges Teilchen. Für diese in der Physik allgemein anerkannte Wahrscheinlichkeitsinterpretation der Wellenfunktion erhielt Max Born im Jahr 1954 den Nobelpreis für Physik.

Diese schwer fassbare Wahrscheinlichkeitsinterpretation der Elementarteilchen, insbesondere der Elektronen in Atomen, hat Nick Herbert 1987 in seinem Buch „Quantum Reality“ sehr schön anschaulich gemacht: „Wenn man in ein Wasserstoffatom hineinkriechen könnte, was würde man wohl sehen? Die Antwort: gar nichts. Ab und zu ein winziger Punkt, vielleicht ein kleiner Blitz, das Elektron. Ansonsten: leerer Raum. Wie üblich ist das Elektron in einem Zustand der Potentia, eine Quantenwelle, wenn man nicht hinschaut. Wenn man es sieht, ist es ein Punkt.“ (zitiert nach Schäfer, S. 221)

### ***- Die Grundstruktur der Quantenphysik am Beispiel des freien Elektrons***

Es war schon immer und ist noch immer das große Dilemma der Quantenphysik, dass sie zum einen extrem wichtig ist zur korrekten Beschreibung und Berechnung moderner technischer Geräte wie z.B. Mikroprozessoren, LEDs und Laserdioden, ihre Inhalte aber schwer zu vermitteln sind, da das Verhalten von Quantenobjekten in keinsten Weise mit unseren Vorstellungen vom Verhalten alltäglicher Gegenstände übereinstimmt.

Um aber dennoch eine einigermaßen korrekte Ahnung davon zu bekommen, wie ungewöhnlich sich Quantenobjekte – in unserem Fall Elektronen - verhalten, führen wir folgendes kleine Gedankenexperiment durch:

Stellen Sie sich vor, dass es außer Ihnen als Beobachter nur ein einziges Elektron im weiten Universum gäbe und Sie möchten gerne herausfinden, wo es sich befindet.

Eine Methode, um den Ort des Elektrons zu bestimmen, könnte z.B. sein, den gesamten Raum mit einer Lichtquelle auszuleuchten. Einige der Lichtteilchen könnten dann das Elektron treffen, von ihm abprallen und zurückgestreut werden. Diese zurückgestreuten Lichtteilchen könnten dann unser Auge oder einen Detektor treffen und wir könnten daraus die aktuelle Lage des Elektrons bestimmen. Das Ergebnis dieses Experimentes wäre in der Tat genau so, wie wir es erwarten würden: Wir würden ein punktförmiges Teilchen antreffen, könnten seinen genauen Ort angeben sowie seine bekannte Masse und Ladung.

Im zweiten Schritt schalten Sie nun die zur Beobachtung verwendete Lichtquelle aus. Dann wird – logischerweise - das Elektron, das sich ganz alleine im leeren Raum befinden soll, von

Ihnen nicht mehr wahrgenommen. Wäre das Elektron ein rein klassisches Teilchen (z.B. eine kleine Kugel), dann bliebe es auch im unbeobachteten Zustand genau dort, wo man es vor dem Ausschalten des Lichtes gesehen hätte (da keinerlei Kräfte auf es einwirken). So verhalten sich alle Gegenstände in unserer alltäglichen Umwelt: Ohne Krafteinwirkung verbleiben sie dort, wo sie sind. Elektronen sind jedoch Quantenobjekte und verhalten sich völlig anders.

Ist das Licht ausgeschaltet, befindet sich das Elektron in einem ungestörten, nicht beobachteten bzw. nicht gemessenen Zustand. In diesem Fall zeigt das Elektron seine wahre Quantennatur: Es verliert seine Eigenschaft „Ort“ und geht in einen Wahrscheinlichkeitsmodus über. Es behält zwar die Eigenschaften Masse und Ladung, hat aber keinen Ort mehr. Und das nicht in dem Sinne, dass wir nicht wissen, wo es sich aufhält, sondern in dem Sinn, dass es als Teilchen nicht mehr existiert. Es ist auch nicht so, dass es „verschmiert“ oder „verdünnt“ da wäre, wie Nebel, der wieder zu Wasser kondensieren könnte.

Dieses Phänomen von etwas Ortslosen, was aber Masse und Ladung hat, übersteigt jedes menschliche Vorstellungsvermögen. Von daher sind wohl auch die vielfachen Zitate von Quantenphysikern zu verstehen, die Quantenphysik sei letztlich nicht begreifbar.

Feynman: "Es ist sicher zu sagen, niemand versteht Quantenmechanik." - Richard Feynman, The Character of Physical Law, MIT-Press 1967, Kapitel 6

Das Einzige, was vom Elektron im nicht-beobachteten Zustand bekannt ist, ist seine Wellenfunktion  $\Psi$ . Diese breitet sich als Wahrscheinlichkeitswelle mit sehr hoher Geschwindigkeit im Raum als Kugelwelle aus, die sich mit Hilfe der Schrödinger Gleichung berechnen lässt. Geht man z.B. von einer anfänglichen Ausdehnung des Elektrons von 0,1 nm aus, so erreicht die Wahrscheinlichkeits-Kugelwelle nach einer Sekunde bereits einen Durchmesser von 500 km. (siehe z.B. Gernot Münster: Quantentheorie, /5/ S.8).

Was diese sich ausbreitende Wellenfunktion genau ist, weiß keiner. Fest steht aber, dass der Raum, den diese Welle überstreicht, der Raum ist, in dem das Elektron prinzipiell nachgewiesen werden kann. In dieser Phase „existiert“ das Elektron nicht als physikalisches Teilchen, sondern nur als abstrakter Möglichkeitsraum. Man könnte es so ausdrücken: „Das Elektron erkundet seine Umgebung als Wahrscheinlichkeitswelle und generiert so einen Möglichkeitsraum, in dem es dann, wenn es gemessen bzw. gestört wird, wieder als physikalisches Teilchen mit der Eigenschaft „Ort“ erscheint. Dabei sind aber nicht alle Orte, an denen es auftauchen kann, gleich wahrscheinlich, sondern diese Wahrscheinlichkeit hängt vom Wert der Wellenfunktion an dem bestimmten Ort ab.“

„Ganz allgemein enthalten die Wahrscheinlichkeitswellen bzw. Quantenwellen Informationen für die Ergebnisse zukünftiger Beobachtungen. Wir sagen, dass die Wellenfunktion  $\Psi$  alle Möglichkeiten des Systems enthält, das sie repräsentiert.“ (Schäfer 46)

Schalten Sie nun im dritten Schritt das Licht wieder an, um erneut den Ort des Elektrons festzustellen, wird auf Grund der Störung durch die einfallenden Lichtteilchen die wellenartige Erkundungsfahrt des Elektrons gestoppt. Es kommt zum Zusammenbruch - dem sogenannten „Kollaps“ - der Wellenfunktion und das Elektron geht schlagartig von seinem Wahrscheinlichkeits- bzw. Möglichkeitsmodus wieder in den realen Teilchenmodus mit punktförmiger Masse und Ladung über. Der Ort, an dem das Elektron nun als Teilchen erscheint, ist jedoch auf Grund des Wahrscheinlichkeitscharakters in jedem Einzelfall unvorhersagbar und damit völlig zufällig. Dieser reine Zufall (auch objektiver Zufall genannt) beim Übergang vom Wahrscheinlichkeitsmodus in den Teilchenmodus ist für alle Quantenprozesse charakteristisch und ist eines der fundamentalen Unterschiede zur deterministischen klassischen Physik, in der es bei statistischen Prozessen nur auf Grund von Unkenntnissen einen subjektiven Zufall gibt.

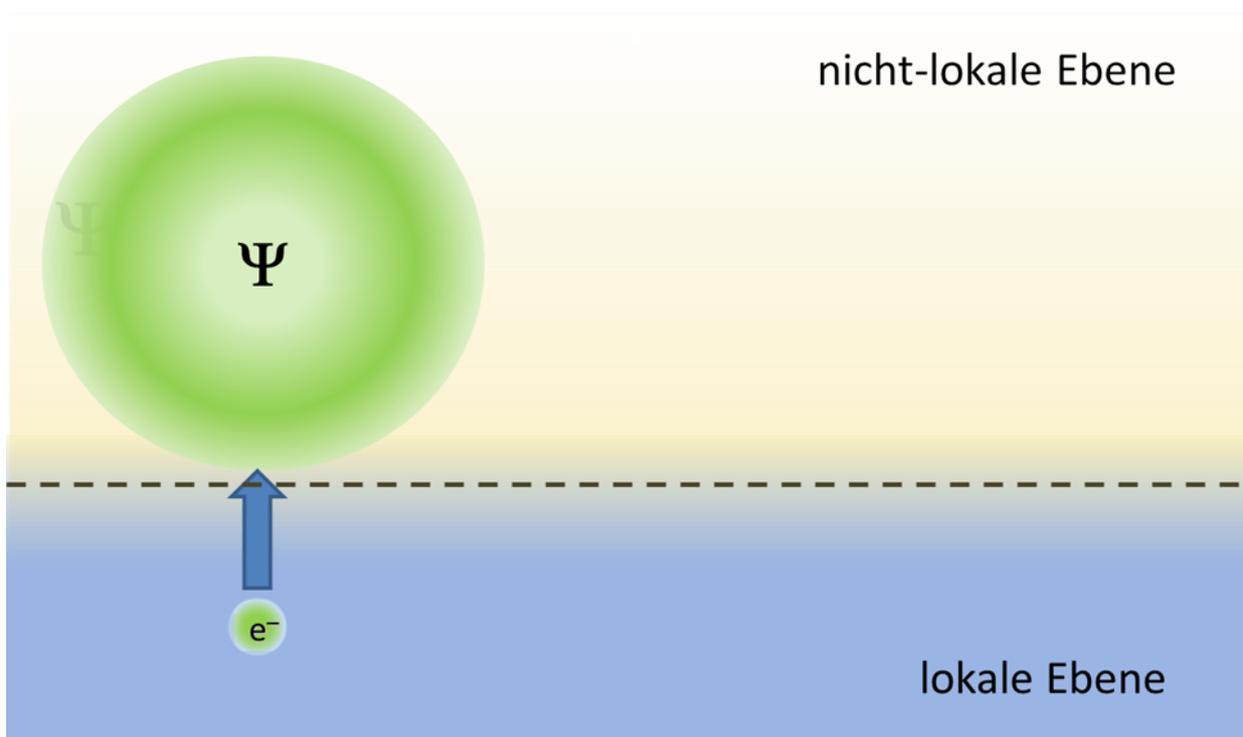
„Indem es Wahrscheinlichkeiten vorgibt, (gleichzeitig) überall zu sein, ist ein Elektron nirgendwo. Die Position eines Elementarteilchens im Raum, die Fähigkeit einen Platz einzunehmen, ist nicht eine dem Teilchen innewohnende Eigenschaft, nicht eine Qualität, die es besitzt oder die ihm angeboren ist, sondern ein Attribut, das durch Beobachtung geschaffen wird.“ (Schäfer, 48)

### **- Grundeigenschaften eines Quantenprozesses im Zwei-Ebenen-Modell**

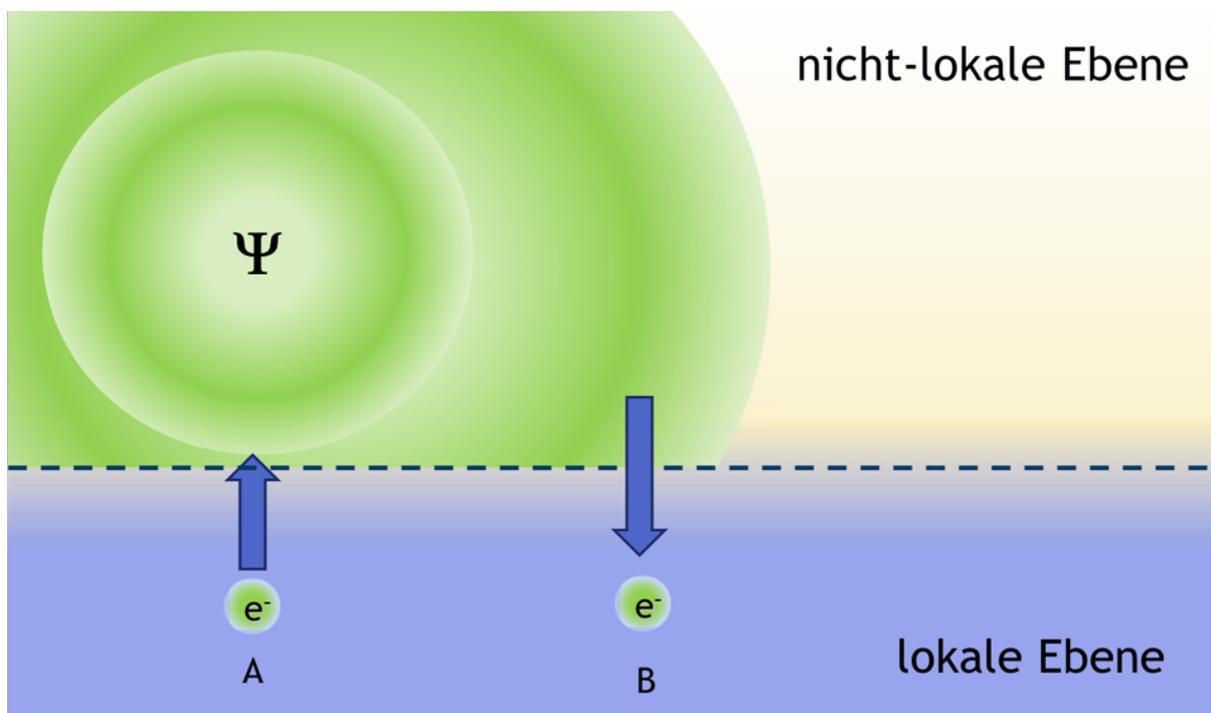
Das prozesshafte Verhalten von Quantenobjekten als Wechselspiel zwischen Wahrscheinlichkeitsmodus und Teilchenmodus lässt sich auf anschauliche Weise mit Hilfe eines Zwei-Ebenen Modells (siehe Abb.1) erläutern:

Solange das Elektron, wie im obigen Beispiel erläutert, mit Lichtteilchen beschossen wird, solange befindet es sich im beobachteten / gemessenen / gestörten Zustand und ist in der Orts-behafteten, lokalen Ebene wie ein klassisches Teilchen anzutreffen. (Abb. 1a, unten) Ändert sich nun dieser Zustand z.B. durch Ausschalten des Lichtes in einen der Nicht-Beobachtung, dann entweicht das Elektron aus dem lokalen Ortsraum und begibt sich in die nicht-ortsgebundene, nicht-lokale Möglichkeitsebene (Abb. 1a, oben). Dort entfaltet das einzelne Elektron dann als expandierendes Wellenpaket einen kugelartigen Möglichkeitsraum. Dieser ist nicht zu sehen und zu messen, lässt sich aber mathematisch exakt durch die Wellenfunktion  $\Psi$  als Lösung der Schrödinger Gleichung beschreiben. Mit fortschreitender Zeit vergrößert sich der Durchmesser der Wellenfunktion (größere grüne Kugel in Abb. 1b). Wird dann eine Messung bzw. durch eine Beobachtung des Elektrons vorgenommen, so kommt es zum Kollaps der Wellenfunktion und das Elektron erscheint an einem nicht-vorhersehbaren Ort wieder in der lokalen Ebene.

Vom Blickpunkt der lokalen Ebene bzw. unserer Umwelt aus verschwindet das Elektron bei Nicht-Beobachtung am Ort A und erscheint bei Beobachtung wieder an einem anderen Ort B. Zwischen dem Ort des Verschwindens (A) und des Wiederauftauchens (B) gibt es allerdings keine kontinuierliche Ortsangabe: „Es vergeht und entsteht“. Würde ein solches



a) Übergang des Elektrons vom Teilchenmodus in den Modus einer Wahrscheinlichkeitswelle



***Es vergeht und entsteht.***

b) Übergang vom Wellenmodus in den Teilchenmodus z.B. durch eine Störung

Abb. 1 Der Quantenprozess in der Zwei-Ebenen Darstellung

Verhalten bei alltäglichen Gegenständen beobachtet, würde man von spukhaften Erscheinungen sprechen. Im Bereich der Quantenobjekte ist ein solches Verhalten jedoch die Regel.

### ***Warum ist unsere Umwelt so stabil?***

Es stellt sich nun die Frage: Wenn es bei allen elementaren Teilchen so ist, dass sie immer in Bewegung sind, hier verschwinden und dort wieder auftauchen, wieso ist dann die Welt, wie wir sie kennen, und die an der Basis ausschließlich aus diesen Teilchen besteht, so stabil? Die Lösung dieses Rätsels liegt in der massiven Störung der Quanten durch die hohe Dichte von Teilchen in unserer Umwelt. Als Beispiel betrachten wir die Anzahl von Luftteilchen in einem Kubikzentimeter. Sie beträgt etwa  $10^{20}$ ! Das sind 100 Milliarden Milliarden Moleküle – in einem Kubikzentimeter. Bei solchen Dichten kann sich die Wellenfunktion eines freien Elektrons überhaupt nicht entfalten. Die ununterbrochenen Störungen führen dazu, dass das Elektron immer an seiner Stelle bleibt. Dasselbe gilt für Atome und Moleküle. Die massiven und fortgesetzten Störungen führen also letztlich dazu, dass wir unsere Umwelt als einigermaßen stabil wahrnehmen.

### ***- Experimenteller Nachweis des Quantenprozesses an freien Elektronen***

Möchte man den Effekt eines sich entwickelnden Möglichkeitsraumes von Elektronen experimentell nachweisen, so muss man dafür sorgen, dass die Störungen, die auf das Elektron einwirken, möglichst minimal sind. Eine technische Vorrichtung, die eine solche relativ störungsfreie Ausbreitung von Elektronen erlaubt, ist eine evakuierte Elektronenstrahlröhre, wie sie für die Elektronenstrahlmikroskopie verwendet wird. Die Hitachi Forschungslaboratorien in Japan haben eine solche Elektronenstrahlröhre speziell so präpariert, dass die Wahrscheinlichkeitswellen von Elektronen sich voll entfalten konnten. Die Ergebnisse bestätigten die theoretischen Vorhersagen sehr präzise.

Abb. 2 a zeigt eine Anordnung, wie sie von den Hitachi Forschungslaboratorien eingesetzt wurde ( Quelle: [www.hitachi.com/rd/portal/research/em/movie.html](http://www.hitachi.com/rd/portal/research/em/movie.html)). Es handelt sich um ein Elektronenmikroskop, in dem Elektronen benutzt werden, um kleine Objekte sichtbar zu machen. Hier nutzt man die Eigenschaft, nacheinander einzelne Elektronen zu erzeugen, die durch eine Spannung auf eine Empfängerplatte gelenkt werden und die Einschlagsorte sichtbar gemacht werden können. Der Raum vom Austritt der Elektronen aus einer Wolframspitze bis zur Empfängerplatte ist evakuiert, sodass die Elektronen auf ihrem Weg kaum gestört werden.

Würden sich die Elektronen an die Gleichungen der klassischen Physik halten, dann würden sie entlang der kürzesten und damit intensivsten elektrischen Feldlinie verlaufen und immer genau am Ort unterhalb der Wolframspitze auf der Empfängerplatte (Kreisfläche) auftreffen. Was wir jedoch beobachten, ist eine statistische Gleichverteilung der Elektroneneinschläge

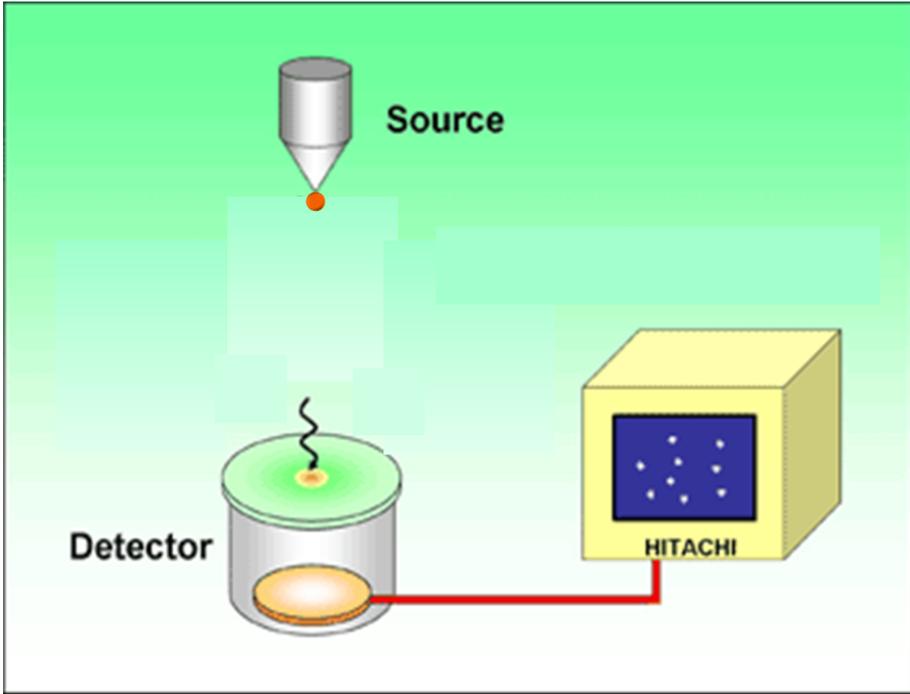


Abb. 2a

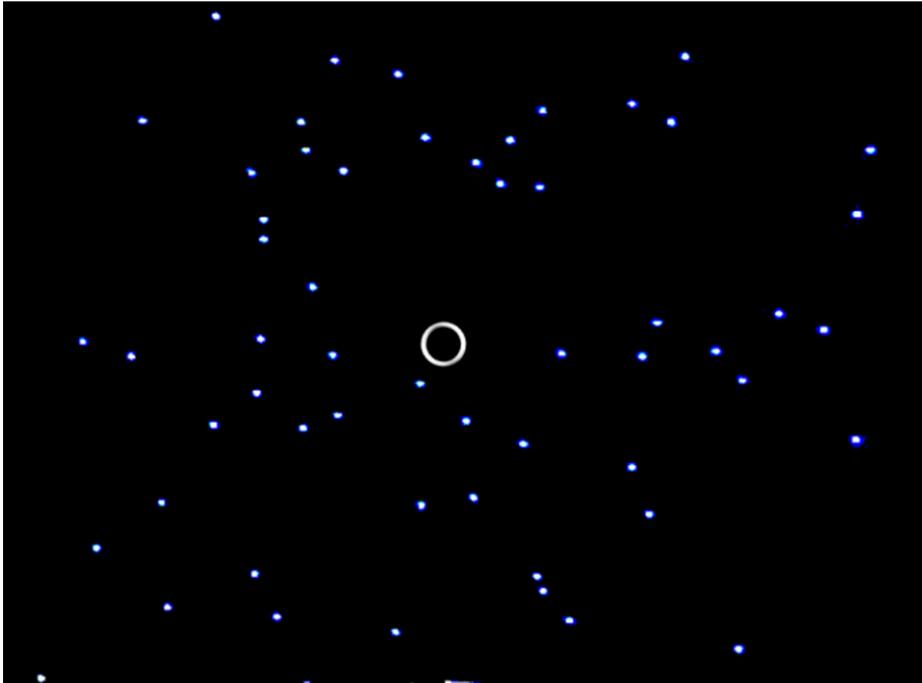


Abb. 2b

auf der gesamten Platte (Abb. 2b). Damit ist gezeigt, dass sich die Wahrscheinlichkeitswellen der einzelnen Elektronen über die gesamte Empfängerplatte hinweg ausgebreitet haben und ihr Amplitudenwert an allen Stellen ungefähr gleich ist.

### Erklärung mit dem Zwei-Ebenen Modell

Zum Zeitpunkt, an dem das Elektron die Woframspitze verlässt, befindet es sich in der realen, lokalen Ebene mit einem definierten Ort. In der evakuierten Elektronenstrahlröhre wird das Elektron aber nicht mehr gestört. Daher geht es von der lokalen Ebene in die nicht-lokale über und entfaltet seinen Möglichkeitsraum in Form einer Kugelwelle. Obwohl das Elektron in der nicht-lokalen Ebene keinen Ort mehr hat, besitzt es aber dennoch die Eigenschaft „elektrische Ladung“ und kann somit von elektrischen Feldern beeinflusst werden. Auf Grund der elektrostatischen Anziehung bewegt sich der Schwerpunkt der Wahrscheinlichkeitswelle hin zur Detektorplatte. Durch die große Ausdehnung der Kugelwelle am Ort des Detektors kann die Fläche der Kugelwelle auf dem Detektor als Ebene angenähert werden. Damit wird die Wahrscheinlichkeit  $|\Psi|^2$ , dass das Elektron an einem bestimmten Ort auf dem Detektor angetroffen wird, nahezu konstant und ist damit überall gleich. Wenn dem so ist, dann sollte das Elektron an allen Stellen der Detektorplatte mit gleicher Wahrscheinlichkeit auftreffen, was durch das Experiment bestätigt wird.

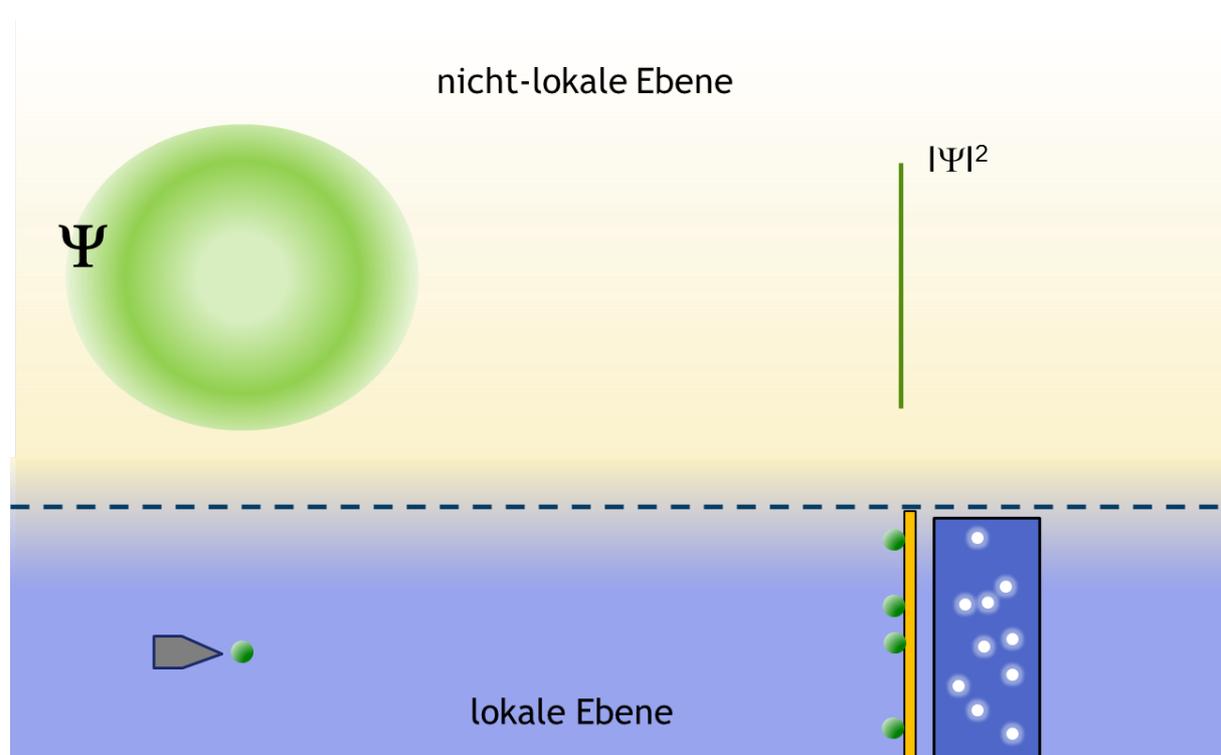


Abb. 3

## - Das Doppelspaltexperiment

Eines der bedeutendsten Experimente zum Nachweis des Wellencharakters der Aufenthaltswahrscheinlichkeit von Quanten ist das Doppelspaltexperiment. (Dieses von Thomas Young im Jahr 1802 entwickelte Experiment diente ursprünglich dem Nachweis des Wellencharakters von Licht.)

Beim Doppelspaltexperiment wird eine Platte mit zwei Spalten in den Strahlengang gestellt. Dieses Hindernis bewirkt, dass sich die Quantenobjekte – hier die Elektronen - entscheiden müssen, durch welchen Spalt sie fliegen sollen.

Nach der Vorhersage der klassischen Physik wären nach dem Durchlaufen von vielen Elektronen zwei Maxima jeweils direkt hinter den beiden Spalten auf der Detektorplatte zu beobachten.

Im Experiment stellt sich jedoch ein Streifenmuster ein, welches nach dem Durchlauf von tausenden, unabhängig voneinander durch die Apparatur laufenden Elektronen entsteht. Zu Streifenmuster dieser Art kommt es in der klassischen Physik immer dann, wenn sich zwei Wellen überlagern (Interferenz).

Eine Besonderheit bei dem hier vorliegenden Ergebnis ist, dass sich immer nur ein Elektron gleichzeitig in der Apparatur befindet und daher die Interferenz nur eine Interferenz mit sich selbst sein kann. Vom Standpunkt der klassischen Physik bedeutet das, dass das eine Elektron gleichzeitig durch beide Spalte hindurchtreten müsste und dann mit sich selber interferieren müsste. Das Problem: Man hat noch nie ein Elektron in geteilter Form beobachtet, sondern immer nur ungeteilt und punktförmig. Punktförmige Teilchen können jedoch nicht miteinander interferieren.

Die Lösung: „Elementare physikalische Systeme (wie z.B. Elektronen) entwickeln sich in wellenartigen Zuständen, wenn sie unbeobachtet sind, ziehen sich aber auf die Zustände von Teilchen zusammen, wenn sie unter Beobachtung stehen. Während die Wellenzustände sich über beliebig große Strecken im Raum ausdehnen können, sind die Teilchenzustände auf winzige Punkte beschränkt“. (Schäfer, S. 42)

### Erklärung mit dem Zwei-Ebenen-Modell

Nach der Aussendung des Elektrons von der Wolframspitze in der lokalen Ebene geht es in der ungestörten Umgebung in die nicht-lokale Ebene über und entwickelt sich als Wahrscheinlichkeitsfunktion in Form einer Kugelwelle (Abb. 4). Bei der Wechselwirkung mit dem Doppelspalt durchdringt die Welle die beiden Spalte (gleichzeitig – obwohl es sich faktisch nur um ein Elektron handelt!). Hinter der Platte entwickeln sich nun – wie bei Wasserwellen - zwei Kugelwellen, die sich gegenseitig durchdringen und dadurch das bekannte Interferenzmuster (grüne Kurve) bilden. Dieses Muster gibt die Wahrscheinlichkeitsverteilung an, mit der das einzelne Elektron auf dem Detektorschirm auftreffen wird.

Beim Auftreffen auf dem Detektor handelt es sich um eine massive Störung bzw. Messung, wodurch das Elektron die nicht-lokale Ebene verlässt und punktförmig in der lokalen Ebene auf dem Detektor erscheint.

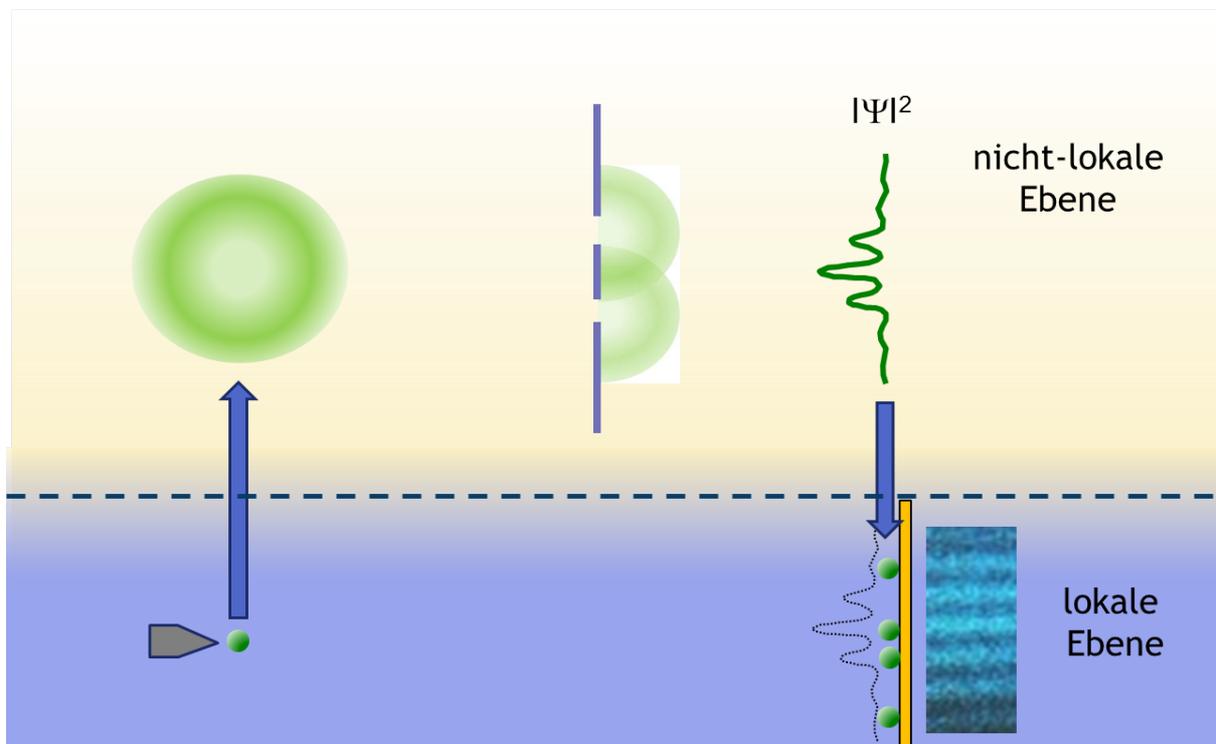


Abb. 4 Erklärung des Doppelspaltexperiments mit dem Zwei-Ebenen Modell

Da es sich jedoch nur um ein Elektron handelt, kann es am Detektor auch nur einen Auftreffpunkt geben. Die ganze Information des Interferenzmusters (eines jeden einzelnen Elektrons) geht also bei der Messung verloren. Die Auftreffwahrscheinlichkeit ist zwar an jedem Ort unterschiedlich, bei einem einzelnen Ereignis kann jedoch im Prinzip jeder Wert angenommen werden. Erst nach dem Durchlauf von Hunderten und Tausenden Elektronen mit identischen Anfangsbedingungen erscheint das ganze Bild des Interferenzmusters. Dieses Bild bzw. die darin enthaltene Gesamtinformation ist vor einer Messung jedem Elektron bekannt. Erst im Augenblick der Messung „entscheidet“ es sich, an welcher Position es erscheinen will.

Wichtiges Fazit: Die Form der unsichtbaren, informationsartigen Wellenfunktion des Einzelelektrons bestimmt letztendlich (auf statistische Weise) die Struktur der entstehenden, sichtbaren Materie. „An der Wurzel der Wirklichkeit finden wir Zahlenverhältnisse (Wahrscheinlichkeiten) - nichtmaterielle Prinzipien-, auf denen die Ordnung dieser Welt gegründet ist. Die Grundlage der materiellen Welt ist nichtmateriell.“ (Schäfer 47)

#### - Fazit

Wir wollen an dieser Stelle die gewonnen Erkenntnisse über die Welt der Quantenobjekte als Ausgangsposition für das folgende Kapitel kurz zusammenfassen:

- Quantenobjekte sind keine Gegenstände so wie die, die wir aus dem Alltag her kennen. Insbesondere ist ihre Eigenschaft „Ort“ keine feste Qualität: Quanten besitzen keinen Ort, solange sie nicht beobachtet / gestört werden; sie erhalten die Eigenschaft Ort erst dann, wenn sie beobachtet werden. Insofern sind Quanten Elemente, die eine zweifache Natur besitzen: Im fall der Beobachtung zeigen sie einen lokalen, teilchenartigen Charakter, wenn sie ungestört sind, wechseln sie in einen nicht-sichtbaren, nicht-lokalen Möglichkeitsmodus. Quanten sind daher weniger als „Objekte“ mit festen Eigenschaften anzusehen, sondern eher als Prozesse zwischen zwei Ebenen: der lokalen Ebene der sicht- und messbaren Teilchen-Realität , und der nicht-lokalen, nicht-sicht- und messbaren Ebene der Möglichkeiten.
- Die Entwicklung der Möglichkeiten eines Quants in der nicht-lokalen Ebene ist genau festgelegt (determiniert) durch die Schrödinger-Gleichung. Die Lösungen der Schrödinger-Gleichung bestimmen und begrenzen den gewichteten Möglichkeitsraum der Quanten sehr präzise und **nur diese Möglichkeiten können auch in die Realität überführt werden.** (Diese Aussage ist für die spätere Diskussion sehr wichtig!) Daraus ergibt sich eine Kausalität, die von der höher anzusehenden Ebene der vielfältigen, gleichzeitig bestehenden Möglichkeiten in die darunter liegende, begrenzte Ebene der Realität zeigt und daher auch Top-Down-Kausalität genannt wird.
- Der Übergang von der Möglichkeitsebene in die Teilchenebene erfolgt nicht deterministisch sondern vollständig und unberechenbar zufällig. Es gibt durch die Gewichtung der Wahrscheinlichkeitsverteilung zwar Tendenzen hin zu den Möglichkeiten mit hohen Wahrscheinlichkeiten, sie sind aber im Einzelfall nicht vorherzusagen. Erst bei mannigfachen Übergängen identisch präparierter Quanten wird die in der nicht-lokalen Ebene vorliegende Wahrscheinlichkeitsverteilung auch in der lokalen Ebene sehr genau abgebildet, wie beim Doppelspaltexperiment zu sehen war.

Wenn wir davon ausgehen, dass die Eigenschaften der nicht-sicht- und messbaren, nicht-lokalen Ebene eher „geistiger“ Natur sind, dann können wir den Quantenprozess auch definieren als eine innere Einheit von „geistigem Hintergrund“ (Potentialität) und „materiell-energetischer Realität“ (Faktizität), die sich wechselseitig durchdringen. Diese Sichtweise, die auf alle am Grund unseres Universums befindlichen Quantenelemente zutrifft, soll uns Wegweiser durch die nächsten Kapitel sein.

