

219 Der Welle-Teilchen-Dualismus

ZUSAMMENFASSUNG

Um das quantenphysikalische Verhalten von Teilchen zu charakterisieren spricht man von einem Welle-Teilchen-Dualismus. Die Bezeichnung ist ungeschickt, denn sie legt nahe, dass sich die Teilchen widersprüchlich verhalten.

Gegenstand

Zur Erinnerung eine Definition (aus Wikipedia):

„Der **Welle-Teilchen-Dualismus** ist eine Erkenntnis der Quantenphysik, wonach den Objekten der Quantenphysik gleichermaßen die Eigenschaften von klassischen Wellen wie die von klassischen Teilchen zugeschrieben werden müssen. Klassische Wellen breiten sich im Raum aus. Sie schwächen oder verstärken sich durch Überlagerung und können gleichzeitig an verschiedenen Stellen präsent sein und dabei auch verschieden stark einwirken. Ein klassisches Teilchen kann zu einem Zeitpunkt nur an einem bestimmten Ort anwesend sein. Beide Eigenschaften scheinen sich gegenseitig auszuschließen.“

Mängel

Schon als Student hatte ich ein Unbehagen, wenn vom Dualismus Welle-Korpuskel die Rede war. Was war gemeint? Sollte etwas erklärt oder nur benannt oder gar verschleiert werden?

1. Das Verhalten eines Elektrons, Photons oder anderer „Quantenobjekte“ wird einem zunächst als widersprüchlich präsentiert. Doch dann erfährt man, dass es sich nicht wirklich um einen Widerspruch handelt, denn es liegt ein Dualismus vor. Verstanden? Vielleicht nicht ganz, aber man weiß, was man in der Prüfung zu sagen hat.

Das Problem dabei ist, dass offenbar vorausgesetzt wird, man glaube, es käme nur eines von zwei vorgegebenen, sich gegenseitig ausschließenden Modellen in Frage:

- Entweder ist das Elektron (oder das Photon...) ein „Teilchen“. Und was ist ein Teilchen? Ein kleines Körperchen, ein kleines Individuum, dessen Ort durch die Koordinaten eines einzigen Punktes beschrieben wird. Damit ist nicht einfach die Position des Schwerpunkts gemeint, sondern die „Position“ des ganzen Teilchens. Es bleibt einem also nichts anderes übrig, als sich das Körperchen punktförmig vorzustellen.
- Oder das Elektron ist eine Welle. Die normale Vorstellung von einer Welle ist etwa so: Man hat irgendeinen Wellenträger, (zum Beispiel Wasser oder Luft) und auf oder in diesem Träger läuft die Welle: eine Zustandsänderung, die sich fortbewegt, und die man sich, dem Namen entsprechend, wellenförmig vorstellt, d.h. es gibt irgendein auf und ab, oder groß und klein; etwas periodisch, aber doch nicht ganz periodisch. Eine Welle hat eine Ausdehnung, und zwar sowohl in Längsrichtung als auch in den Querrichtungen (außer wenn es eine Seilwelle, oder eine Oberflächenwelle ist). Dass die Welle eine räumliche Ausdehnung hat, ist zwar selbstverständlich, aber der punktmechanisch sozialisierte Physiker scheint es doch für nötig zu halten zu betonen, dass eine Welle nicht punktförmig ist, siehe oben: „Wellen können gleichzeitig an verschiedenen Stellen präsent sein.“ Muss man das wirklich erklären?

Da sowohl das eine als auch das andere Modell nicht so recht passen will, muss man nun etwas sagen. Und man sagt es: Es gibt einen Dualismus.

Zurück bleibt beim Lernenden ein Gefühl der Frustration, denn das Zauberwort Dualismus erklärt nichts. Es ist nur eine beschönigende Art auszudrücken, dass etwas, oder mehreres, logisch nicht stimmig ist.

Nun wäre das Problem gar nicht erst entstanden, wenn man nicht damit begonnen hätte, das Elektron oder Photon als kleines Individuum zu präsentieren.

Man mag denken, dass man keine andere Wahl hat; Teilchen und Welle seien nun mal die einzigen Denkkategorien des Menschen, die in unserem Fall in Frage kommen. Ich meine, es sind eher die Denkkategorien des Physikers. Der physikalisch nicht gebildete und auch nicht verbildete hat durchaus andere Modelle oder Vorbilder im Werkzeugkasten, einschließlich der damit verbundenen Anschauungen, die sich durchaus anwenden lassen auf das, was die Physik in ihrer Not ein Quantenobjekt nennt.

Ist es denn so schwierig, sich ein Objekt vorzustellen, das nicht durch eine einzige Ortskoordinate, sondern durch eine Verteilung dargestellt wird? Jeder kennt Dinge, von denen man sagt, sie befinden sich irgendwo, aber man verlangt nicht, dass das Ding jetzt und etwas später noch dasselbe „Individuum“ ist. Man denke etwas an eine Wolke oder eine Flamme, oder noch besser an einen Wellenbuckel auf dem Wasser. Er befindet sich irgendwo, aber nicht in einem Punkt, er ist ausgedehnt, und zwei davon zeigen sogar Interferenz. Würde denn hier jemand von Dualismus sprechen?

2. Es wird oft gesagt, das Elektron (oder Photon) *verhalte* sich manchmal wie ein Teilchen und manchmal wie eine Welle. Also ein und dasselbe Elektron präsentiert sich mal so und mal so. Solche Aussagen beruhen wohl darauf, dass man von der Eigenschaft des Elektrons nur spricht, wenn man gerade eine Messung macht: Entweder man schaut auf das Interferenzmuster, oder auf die Pixel des Detektors. Sieht man hier die Doppelnatur nicht in aller Deutlichkeit? Eigentlich nicht. Denn man muss fragen: die Natur welches Elektrons zu welcher Zeit? Das Interferenzmuster beruht auf der Wellenfunktion der Elektronen, bevor sie detektiert worden sind. Die geschwärzten Pixel danach. Die beiden Eigenschaften beziehen sich also auf Elektronen in verschiedenen Zuständen: einmal in einem Zustand mit scharfem Impuls und unscharfem Ort, und einmal mit scharfem Ort und unscharfem Impuls. Man schließt daraus, Elektronen verhalten sich mal so und mal so. Klarer wäre aber die Aussage: Die Elektronen können sich in verschiedenen Zuständen befinden, und zwar in unendlich vielen verschiedenen Zuständen. Unter diesen gibt es zwei Arten von Extremzuständen: In den einen haben sie einen scharfen Ort, in den anderen einen scharfen Impuls.

3. Ich kann es mir nicht verkneifen, die Wikipedia-Definition noch etwas weiter sprachlich zu zerlegen: (Die Sprache in Wikipedia ist ein Gemeinschaftswerk, und ist damit wohl recht konsensfähig.) Sie bringt, meiner Meinung nach, eine in diesem Zusammenhang typische Ratlosigkeit zum Ausdruck. Beginnen wir mit dem Oberbegriff von „Dualismus“. Der Dualismus ist eine „Erkenntnis“, so wird gesagt. Da ich das nicht so ausgedrückt hätte, habe ich im Wikipedia-Artikel rasch mal umgeschaltet auf einige andere Sprachen, um nachzusehen, ob der Dualismus dort auch eine Erkenntnis ist. Aber nein, es ist nicht. Im Englischen ist er ein „Prinzip“ (concept), im Französischen und Niederländischen ein „Prinzip“ (principe, beginsel), im Spanischen ein „Phänomen“ (fenómeno), im Chinesischen ein Verhalten (行为). Davon gefällt mir das chinesische noch am besten. Nirgends ist es übrigens eine Eigenschaft.

Interessant ist auch, wie die Philosophen, Theologen etc. mit der Bezeichnung Dualismus umgehen. Schon das macht mich als Physiker etwas misstrauisch.

Aber lesen wir weiter: Die Quantenobjekte haben „gleichermaßen“ die Eigenschaften von Teilchen und Welle. Gleichermaßen ist nicht dasselbe wie gleichzeitig. Auch hier sind die Formulierungen in anderen Sprachen interessant. Betrachten wir etwa die französische: Danach zeigen die Teilchen manchmal Teilchen- und manchmal Welleneigenschaften, also nicht gleichzeitig.

Und schließlich noch das Wörtchen, das im Physikunterricht so oft zu Verschleierungszwecken eingesetzt wird: Den Quantenobjekten werden die Teilchen- und Welleneigenschaften „zugeschrieben“. Sie *haben* die Eigenschaften nicht, sondern die Eigenschaften werden ihnen *zuschrieben*. Wo sonst benutzt man das Wort zuschreiben? Ich empfehle (wie auch bei anderen Gelegenheiten, bei *Linguae* nachzusehen.)

Herkunft

Es waren die beiden Kategorien am Ende des 19. Jahrhunderts: Licht war eine Ätherwelle; die erst kürzlich entdeckten Elektronen waren kleine Körperchen.

Als es klar wurde, dass auch Elektronen Interferenz zeigen, und Licht quantisiert ist, lag die Idee nahe, dass beide, Licht und Elektronen, eine merkwürdige Doppelnatur haben.

Erst kurz danach kam die Auflösung: 1926 die Schrödingergleichung und 1927 die Unschärfebeziehung.

Diese Reihenfolge hat wohl das Lehrmuster festgelegt.

Hätte die Wellenfunktion am Anfang gestanden, wäre die Vorstellung des Dualismus wahrscheinlich nicht entstanden.

Entsorgung

Vermeiden, etwas zu erzählen, was einem später im Wege steht, also

- den Begriff und das Wort Dualismus nicht benutzen;
- nicht die Erwartung wecken, dass die Teilchen punktförmig sind;
- die Interferenzfähigkeit nicht an der Sinuswelle festmachen.

Man stellt das Elektron vor als ein Gebilde mit der Ladung e und der Masse m_e . Manchmal ist es größer, manchmal kleiner, manchmal „monochromatischer“, manchmal weniger, aber immer interferenzfähig.

Die Größe ψ als Funktion von Ort und Zeit – die Lösung der Schrödinger-Gleichung – enthält alles was es zu sagen gibt (wenigstens solange wir noch nicht die Teilchenphysik und das Standardmodell behandeln). Sie versteckt auch nichts, was man zu interpretieren oder in geheimnisvolle Worte zu kleiden hätte.