
Altlasten der Physik (81): Ununterscheidbarkeit von Teilchen

F. Herrmann

Gegenstand

Wenn die Gesetze der Quantenstatistik hergeleitet werden, betont man, dass Teilchen identisch und ununterscheidbar sind:

„Zwei Teilchen nennt man identisch, wenn das Ergebnis der Messung einer beliebigen Größe oder Observable des Systems invariant gegenüber einer Teilchenvertauschung ist. Man sagt dann auch, die Teilchen seien ununterscheidbar.“

„Zwei Teilchen heißen identisch, wenn alle inneren Eigenschaften (Masse, Spin, Ladung, usw.) exakt übereinstimmen: Es gibt kein Experiment, mit dem man die Teilchen voneinander unterscheiden könnte. Alle Elektronen des Universums sind also identisch, ebenso alle Protonen oder alle Wasserstoffatome.“

Mängel

Ich hatte bei der Aussage, zwei Teilchen seien identisch oder ununterscheidbar immer ein merkwürdiges Gefühl: Handelt es sich um eine Trivialität oder um eine nur den Objekten der Quantenwelt eigenen, schwer verständlichen Besonderheit? Dass diese Aussagen nicht leicht in den Kopf hineingehen, hat wohl zwei Ursachen.

1. Die beiden Teilchen, die angeblich ununterscheidbar sind, kann man sehr wohl unterscheiden. Stellen wir uns zwei Elektronen vor, eins befindet sich an einem Ort \vec{r}_l (links), eins am Ort \vec{r}_r (rechts). Gewiss, sie sind in fast jeder Hinsicht gleich: gleiche Masse, gleiche Ladung, gleicher Spin, gleicher Anregungszustand, und was sie noch für Eigenschaften haben mögen. (Man sagt auch,

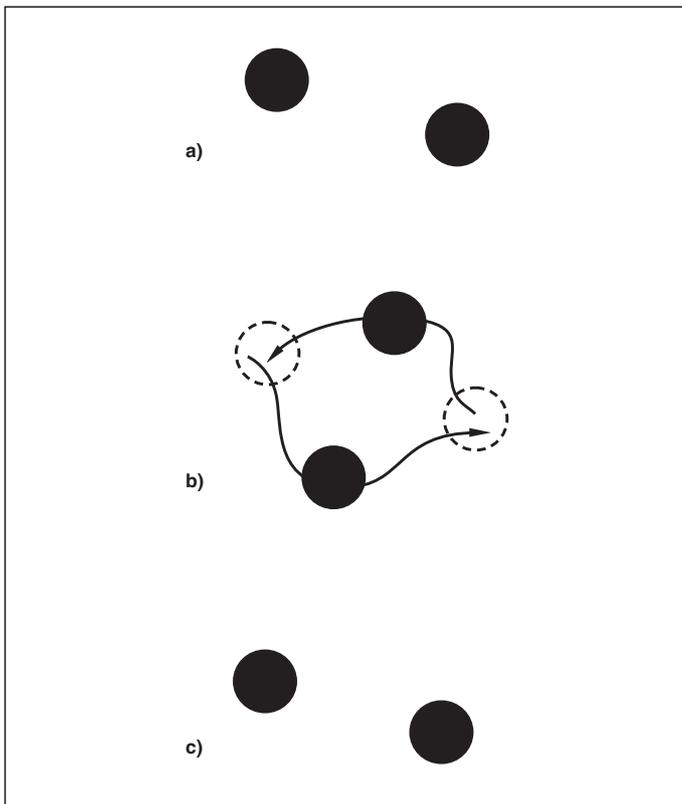


Abb. 1: Die Vertauschungsoperation von Objekten

sie stimmen in ihren „inneren“ Eigenschaften überein.) Aber in einem Merkmal unterscheiden sie sich eben doch: im Ort. Das eine befindet sich am Ort \vec{r}_1 , das andere am Ort \vec{r}_2 . Man kann sie also unterscheiden.

Tatsächlich geht es in der statistischen Physik gar nicht um die Ununterscheidbarkeit von *Teilchen*, sondern um die von *Zuständen*. Wir betrachten wieder unsere beiden Elektronen. Wir betrachten also einen Zustand, in dem sich ein Elektron am Ort \vec{r}_1 befindet, und eins am Ort \vec{r}_2 . Wir bringen nun das linke Teilchen an den Ort \vec{r}_2 und das rechte an den Ort \vec{r}_1 . Der Zustand, den wir damit erhalten haben, ist von dem alten Zustand nicht zu unterscheiden, er ist mit dem alten Zustand identisch, und zwar auch im Sinne der Umgangssprache [1]. In jedem der beiden Zustände können wir aber die jeweiligen Teilchen voneinander unterscheiden: das eine befindet sich links, das andere rechts.

Es ist ganz ähnlich wie im folgenden „Experiment“: Wir erzeugen mit einem Zeichenprogramm auf dem Bildschirm zwei ausgefüllte Kreise desselben Radius und derselben Farbe, Abb. 1a. Wir bewegen nun die Kreise mit Hilfe der Maus auf dem Bildschirm herum, Abb. 1b, und stellen schließlich das alte Bild wieder her, Abb. 1c. Bei der Operation haben wir aber die beiden Kreise gegeneinander vertauscht. Das Bild, das wir erhalten, Abb. 1c, ist ununterscheidbar von dem Ausgangsbild, Abb. 1a. Die beiden Kreise dagegen sind unterscheidbar. Sie unterscheiden sich in ihrer Position.

2. Kann es denn wirklich sein, dass durch Vertauschung von zwei Teilchen derselbe Zustand entsteht? Sieht man es dem neuen Zustand nicht doch irgendwie an, dass er aus dem alten durch eine Vertauschung hervorgegangen ist? Man hätte das Problem nicht, wenn man nicht durch lange Übung in der klassischen Mechanik die Gewohnheit angenommen hätte, ein Teilchen als kleines Wesen zu betrachten, das außer durch die Werte

von physikalischen Größen noch durch irgendetwas anderes charakterisiert ist, etwas das man vielleicht als seine Seele bezeichnen könnte. Diese Gewohnheit wird nun in der Quantenmechanik nicht möglichst schnell abgelegt, sondern sie wird durch die Sprache, der sich die Quantenphysik bedient, weiterhin gehegt und gepflegt. Interessanterweise hat man das Problem zwar, wenn es um die Vertauschung von zwei Elektronen geht. Man hat es aber ganz und gar nicht, wenn man zwei Defektelektronen (Löcher) in einem Halbleiter gegeneinander vertauscht. Die Löcher wird man sich intuitiv nicht in demselben Sinne wie die Elektronen als Individuen vorstellen. Sie scheinen den Kreisen auf dem Computerbildschirm viel ähnlicher zu sein als die Elektronen.

Herkunft

Die klassische Mechanik hat es mit individuellen Körpern zu tun. Das Konzept des Individuums passt auf ein physikalisches System, wenn dieses Eigenschaften hat, die es beibehält, und an denen man es zu anderen Zeitpunkten oder in anderen Umgebungen wieder erkennt. Bei den Eigenschaften, die das Individuum charakterisieren, denkt man bei Körpern aus unserer normalen Erfahrungswelt vor allem an die Form, und die Verteilung der Stoffe, aus denen sie bestehen. Wenn die Zahl der Freiheitsgrade des Systems aber immer kleiner wird, und schließlich nur noch eine Masse, ein Impuls, ein Drehimpuls und ein Ort übrig bleiben, so zerrinnt uns der Begriff des Individuums gewissermaßen zwischen den Fingern. Man kann es auch so sagen: Der Begriff erlangt seine Berechtigung und seine Eindeutigkeit asymptotisch für eine große Zahl von Freiheitsgraden. Der aus der klassischen Mechanik stammende Begriff des individuellen Teilchens taugt also nicht als Grundbegriff der Quantenmechanik.

Entsorgung

Unsere Alltagssprache hat kein Problem damit, Dinge zu beschreiben, die keine Individuen im Sinne der klassischen Mechanik sind. Man denke etwa an eine Wolke am Himmel oder an eine Kerzenflamme. Ist die Wolke nach fünf Minuten noch dieselbe wie vorher, ist die Flamme nach fünf Sekunden noch dieselbe? Auf diese Fragen wird man vielleicht mit einem Achselzucken antworten. Man hat mit diesen Gegenständen einfach kein Problem.

In der Quantenmechanik wäre schon viel getan, wenn man die Sprache, und damit natürlich das zu Grunde liegende Modell etwas ändert. So kann man etwa ein Elektron einführen als eine unteilbare Portion eines Stoffes, mit einer bestimmten Masse, einer bestimmten elektrischen Ladung und einem bestimmten Eigendrehimpuls. Wenn sich nun rechts eine solche Portion befindet und eine links, und man vertauscht sie, so fällt es sicher nicht mehr schwer einzusehen, dass der Zustand des Gesamtsystems derselbe ist wie vorher. Die Erwartung von etwas wie einer Seele stellt sich hier gar nicht erst ein.

Literatur

[1] Duden, Deutsches Universalwörterbuch, Dudenverlag Mannheim 1989: identisch [...] völlig übereinstimmend; vollkommen gleich

Anschrift des Verfassers:

Prof. Dr. *Friedrich Herrmann*, Abteilung für Didaktik der Physik, Universität, 76128 Karlsruhe