

Heisenbergsche Unschärferelation - ihre Bedeutung

Bernhard Blank

Aufrufbar unter: www.didaktikmat2chem.de¹

Kurzartikel F

Fassung 3.5

© Copyright Januar 2022

Dieser Artikel ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Autors unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen und Mikroverfilmungen. Die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen ist nur insofern erlaubt, als es für den Dienst von Suchmaschinen und deren Zugriffsmöglichkeiten via Internet erforderlich ist. Es wird untersagt, diesen Artikel über Sharehoster oder anderen Plattformen Dritten zugänglich zu machen.

Eine gewerbliche Nutzung ist nicht zulässig.

¹ Titel der Website: Erklärungen in Mathematik, Physik und Physikalischer Chemie

Heisenbergsche Unschärferelation – ihre Bedeutung

Welche Bedeutung hat die heisenbergsche Unschärferelation? In welchem Zusammenhang steht sie mit der philosophischen Lehre des Determinismus und welches ist das ausschlaggebende Experiment, das den Bezug dazu herstellt? Warum wird hierdurch die Auffassung in seiner absoluten Form negiert, dass alles vorherbestimmbar sei, zumindest im Bereich der Naturwissenschaften?

Verwendete Begriffe: Bahn, Determinismus, Freiheit, Impuls, Körper, klassische Mechanik, Mikrokosmos, Ort, Teilchen, heisenbergsche Unbestimmtheitsprinzip, Unbestimmtheitsrelation, heisenbergsche Unschärferelation.

Ein zentraler Begriff in der klassischen Physik ist der Begriff der **Bahn**. In dieser Physik dachte man sich die Welt so aufgebaut, dass sie nur aus Körpern bzw. Teilchen besteht, die sich auf Bahnen bewegen. Ein Beispiel dafür ist der Mond, der auf einer runden Bahn die Erde umkreist. Aber auch auf der Erde nahm man an, dass der Bahnbegriff der einzig mögliche ist, um die Vorgänge in unserer Welt zu beschreiben. So spricht der Flug einer Kanonenkugel oder ein schwingendes Pendel, das sich schwingend auf festen Bahnen bewegt, für diese Vorstellung. Auch im mikrophysikalischen Bereich ging man davon aus, dass elektrisch geladene Teilchen, die Elektronen, sich nur auf Bahnen um die Atomkerne bewegen. Damit ging des Weiteren die Vorstellung einher, dass die gesamte unbelebte und belebte Natur, die aus Atomen - und den darauf aufbauenden Molekülen - besteht, so aufgebaut ist.

Kennt man nun **gleichzeitig** den Ort und den Impuls eines **Körpers** oder **Teilchens** (zur Erinnerung aus der Physik: Unter dem Impuls eines Körpers versteht man das Produkt aus seiner Masse und seiner Geschwindigkeit), so kann man seine Bahn physikalisch vorausberechnen (was für unser weiteres Verständnis wichtig ist). Dies ist damit eine wichtige physikalische Gesetzmäßigkeit. Diese Kenntnis ist in der uns umgebenden Welt durchaus gegeben, weshalb die Bahn des Mondes um die Erde - und damit sein Verlauf - für sehr, sehr lange Zeiten bekannt ist. Die **heisenbergsche Unschärferelation**¹ (Synonyme: heisenbergsche Unbestimmtheitsprinzip, Unbestimmtheitsrelation) besagt aber, dass eine gleichzeitige genaue Kenntnis von Ort und Impuls eines Teilchens (also hohe **Orts- und Impulsgenauigkeit**) speziell im Mikrokosmos nicht mehr möglich ist. Die Auffassung, dass sich dort alles auf Bahnen bewegt, wie man sich das früher vorstellte, ist daher mit dem Bekanntwerden dieser Relation, zumindest für den Mikrokosmos, nicht mehr haltbar und damit ist hier eine Vorausbestimmung in dieser Weise nicht möglich.

Es wäre nun die **Bedeutung** der heisenbergschen Unschärferelation, rein physikalisch gesehen, dass man den Bahnbegriff und die damit einhergehende Vorstellung, in der Natur alles vorausberechnen zu können, nicht absolut aufrechterhalten kann - zumindest was den Mikrokosmos betrifft.

Bisweilen will man, wenn die Frage nach der Bedeutung dieser Relation gestellt wird, auf etwas anderes hinaus:

Die Vorstellung, dass alles Geschehen in der naturwissenschaftlich-gedachten Welt auf Bahnen verläuft, entstand schon früh – unser Planetensystem ist nur ein besonderes Beispiel dafür. [Die zugehörige Teildisziplin der Physik, die sich damit beschäftigt, nennt man **klassische Mechanik** und wurde im 19. Jh. vollständig entwickelt.] Damit ging, wie soeben erläutert, die Vorstellung einher, dass im Prinzip alles berechenbar und im Voraus bestimmbar sei.

Diese Idee hatte eine so große Bedeutung erlangt, dass sich davon sogar eine **philosophische**

¹ benannt nach dem Physiker Werner Heisenberg (1901-1976)

Lehre ableitete, nach der man alles Geschehen auf der Welt als bestimmbar – und somit determiniert – ansah. Diese Lehre nennt sich **Determinismus**. Es ist eine Welt – und das folgerte man daraus – in der es somit auch keine Freiheit mehr gibt (denn es ist ja alles vorherbestimmt). Die heisenbergsche Unschärferelation besagt jedoch, dass der Begriff der Bahn im Mikrokosmos nicht haltbar ist, und sie bringt damit den Determinismus in seiner absoluten Form zu Fall. Das wäre also ihre Bedeutung für die Philosophie.

Das genaue Experiment, das zeigt, warum Ort und Impuls eines Teilchens im Mikrokosmos nicht gleichzeitig genau bestimmt werden können, ist das Folgende (s. dazu Abb. 1):

Lässt man einen Strom aus Teilchen (genommen wurden hier Elektronen) auf eine Wand mit einem Spalt Sp der Breite Δx auftreffen, so müsste für die durch den Spalt gelangenden Teilchen folgende Aussage nach unserer

bisherigen (klassischen) Vorstellung gelten: Die Teilchen bewegen sich danach auf der gestrichelten Linie hinter der Wand fort, sobald sie durch den Spalt gedrungen sind. Die „Ortsunsicherheit“ Δx (hier *n u r* vertikal gedacht) ist dabei aufgrund der geringen Spaltbreite zwangsläufig sehr klein, was eine hohe Genauigkeit über den Ort dieser Teilchen in vertikaler Richtung erlauben würde. Tatsächlich beobachtet man aber, dass die Teilchen nicht nur dahinter auf der dicken Linie L auf dem Schirm Sch auftreffen, sondern eine mehr oder weniger große seitliche Auslenkung in Form einer Verteilung V ¹ erfahren, was durch einen gemittelten Impuls Δp in beiden vertikalen Richtungen gedeutet wird. Die Erklärung für dieses Phänomen ist, dass man hier die Wellennatur dieser kleinen Teilchen zugrunde legen muss, die zu dieser Abweichung führt. Es ergibt sich deswegen die abgebildete Verteilung V am Schirm Sch . Das Produkt mit

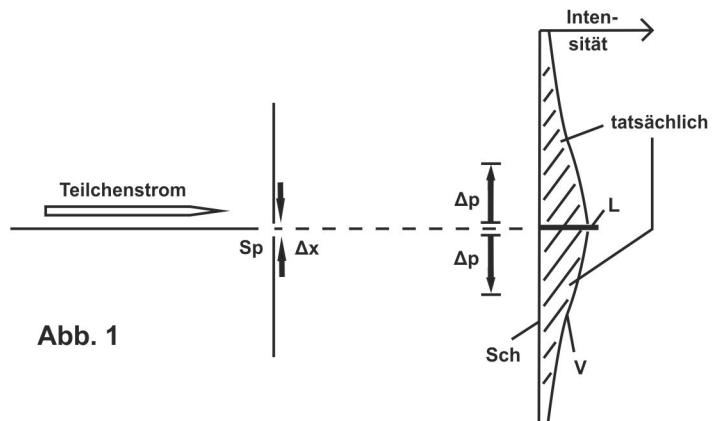


Abb. 1

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2} \quad (F-1)$$

richtet sich sogar nach einer Konstanten und wird als **heisenbergsche Unschärferelation** bezeichnet. ($\hbar \cdot 2\pi = h$ steht für das plancksche Wirkungsquantum.)

Will man also durch die geringe Spaltbreite experimentell eine sehr genaue Aussage über den Ort eines Teilchens erzwingen (dazu sollte Δx möglichst klein sein), so macht das Experiment deutlich, dass dies misslingt und stattdessen sich eine Verteilung V ergibt, die mit dem durchschnittlichen seitlichen Impuls Δp beschrieben wird. Je kleiner Δx ist, desto größer ist nach (F-1) Δp . Die Verteilung wird dann breiter. Eine genaue Aussage über die Bahn – also nur vertikal gedacht! - ist nach dieser Sichtweise nicht möglich. (Es soll – und das sei noch einmal betont - in diesem Experiment nur eine Ortsbestimmung in der vertikalen Richtung vorgenommen werden, und das ist auch der Sinn des Experiments. Über die horizontale Richtung kann keine Aussage gemacht werden.) Eine vertikale Ortsbestimmung mit zunehmend kleiner

¹ Die Verteilung V ist hier stark schematisiert. Eine genauere Darstellung der Verteilung findet man in Heribert Stroppe, Physik, 11. Auflage. München, Wien (Hanser) 1999, S. 423. Auch dort wird ein seitlicher Impuls Δp angenommen, um die Abweichung vom klassisch erwarteten Verhalten der Elektronen zu erklären.

werdendem Δx bei gleich bleibender kleiner Impulsänderung Δp - in ebenfalls vertikaler Richtung – bleibt uns also versagt.

Eine zweite Aussage dieses Experiments ergibt sich, wenn Δx - und damit die Spaltbreite – sehr groß ist. Dann wäre im Extremfall Δp annähernd null und hinter der Wand würde ein breiter Strahl mit der Breite Δx ausgehen. Allerdings kann man hier nicht mehr genau wissen, wo **i m** Strahl sich die Teilchen befinden. So folgt: Eine genaue Kenntnis über die Bahn innerhalb des Strahls ist ebenfalls nicht möglich. Es bleibt die Ortsungenauigkeit Δx ! (Der Vollständigkeit halber sei angeführt, dass beim Auftreffen des Strahls mit der Breite Δx auf dem Schirm *Sch* die Teilchen im Strahl **s t a t i s t i s c h** verteilt sind, wie man am Schirm *Sch* erkennen kann.) Zusammenfassend gesagt ergibt sich somit folgende Aussage: Man kann nicht **gleichzeitig** $\Delta x = 0$ für eine hohe Ortsgenauigkeit und $\Delta p = 0$ für eine hohe Impulsgenauigkeit bestimmen, denn wäre dies möglich, so ergäbe sich die schon erwähnte gestrichelte Bahn. Daraus ergibt sich allgemein (bei diesem Experiment hat man gerade die Probe aufs Exempel gemacht), dass die Bahn eines Teilchens im Mikrokosmos nicht bestimmt werden kann, da dazu eine genaue Kenntnis von Ort **und** Impuls notwendig ist (beide hier vertikal gedacht). Die Teilchen treffen auf dem Schirm vielmehr statistisch verteilt auf, weshalb von einer Vorausbestimmung nicht mehr gesprochen werden kann. Damit wird auch die Auffassung, dass alles vorherbestimmbar sei, in den Naturwissenschaften (und dort speziell im Mikrokosmos) negiert. Statt einer Vorherbestimmbarkeit tritt stattdessen im Mikrokosmos – und das ist die neue Erkenntnis - ein statistisches Verhalten zutage.