



Wellencharakter der Atome

Sara: Also langsam habe ich den Eindruck, dass alle meine bisherigen Vorstellungen, was Temperatur, Kühlmethoden, Vakuum und anderes angeht, so ziemlich daneben liegen; aber wenn mir jetzt jemand erklären will, dass Atome Wellen sind, dann weiß ich nicht, wer hier eigentlich spinnt. Ich habe mich ja schon an so manche Eigenschaft der Atome gewöhnt, aber das wird jetzt einfach zuviel!

Anja: Jetzt beruhige dich erst einmal, du wirst sehen, das ist alles halb so schlimm. Erstens ist hier und auch kein anderer Physiker verrückt, zweitens muss ich dir nochmal mit Betonung sagen, dass das, was wir hier besprechen, so weit von unserer Erfahrungswelt entfernt ist, dass es ganz klar ist, dass all deine Vorstellungen scheinbar über Bord geworfen werden müssen. Das sind einfach zwei verschiedene Welten, man kann sagen unser Alltagsleben entspricht der klassischen Physik, aber die Bose-Einstein-Kondensation gehört zur Quantenphysik. Da bist du auch nicht die Einzige, die damit Probleme hat: Das geht allen Menschen, die sich damit auseinandersetzen, so; vor allem die Physiker haben daran zu beißen, denn viele von ihnen haben ständig mit dieser abstrakten Theorie zu tun.



Sara: Das ist ja beruhigend, dass es nicht nur mir so geht, aber dadurch wird es natürlich nicht klarer. Wenn man es sich überlegt, dann ist es eigentlich viel spannender, wenn mal alles entgegen unserer Vorstellung verläuft. Es sind ja auch völlig unvorstellbare Bedingungen, unter denen diese Phänomene auftreten.

Anja: Die Einstellung höre ich gerne – außerdem kann ich dir gleich zu Beginn sagen, dass das, was du gerade bemerkt hast, hier ziemlich genau passt. Du musst dazu wissen, dass man das Atom prinzipiell bei jeder Temperatur als Welle betrachten kann. Aber weit vom absoluten Nullpunkt entfernt ist die Wellenlänge eines heißen Atoms so gering, dass es kaum einen Unterschied macht, ob man das Atom nun als Welle oder als Teilchen betrachtet. Erst nahe 0 K fallen die Welleneigenschaften ins Gewicht, da hier ihre Wellenlänge erstmals im Bereich von $10\ \mu\text{m} = 10^{-5}\ \text{m}$ liegt, was schon sehr viel ist. Bei zum Beispiel 1K ist sie 1nm, das sind $10^{-9}\ \text{m}$, oder bei 100K 0,1nm, also $10^{-10}\ \text{m}$.

Sara: Aha, dann ist meine Vorstellung nicht völlig daneben, wenn ich an Atome als Bausteine denke, aus denen ja auch wir selbst und die Dinge um uns herum aufgebaut sind. Aber wenn du so selbstverständlich über Wellen redest, merke ich,

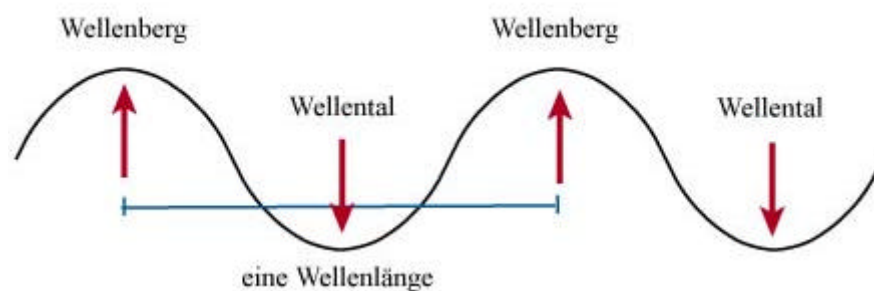
wie fremd mir dieses Thema ist.

Anja: Kein Problem, das können wir leicht klären. Woher kennst du denn den Begriff Welle?

Sara: Ja, also...na klar! Das Wasser eines Sees macht bei Wind, oder wenn ein Schiff kommt, ganz beeindruckende Wellen. Da geht es immer so auf und ab – das ist ein schönes Gefühl, wenn man diese Bewegung so spürt. Manchmal fahre ich deswegen extra ins Wellenbad, da kommen sie dann in bestimmten Abständen, aber natürlich künstlich erzeugt.



Anja: Das ist schon mal ein anschauliches Bild – bleiben wir gleich mal dabei. Zuerst wollen wir klären, was die Wellenlänge ist. Sie wird als Abstand zweier



aufeinanderfolgender höchster Punkte, der sogenannten Maxima,

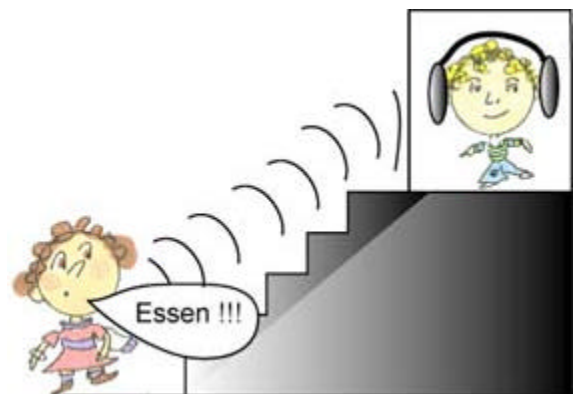
definiert. Anschaulich bei deinen Wasserwellen heißt das, der Abstand der zwei Berge, die da auftreten, zwischen

denen genau ein Tal liegt, ist die Wellenlänge. Der nächste wichtige Begriff ist die Frequenz der Welle. Das hat wieder mit den Maxima zu tun: Es ist die Zahl der beobachteten Maxima, die ein sich in Ruhe befindender Beobachter pro Sekunde sieht. Du zählst sie dann pro Sekunde – dann hast du die Frequenz.

Sara: Das war jetzt ein langer Vortrag, aber er war anschaulich genug, dass ich ihn verstehen konnte. Mir sind auch noch andere Wellen eingefallen: Schallwellen und Lichtwellen! Allerdings habe ich die noch nicht so deutlich gesehen wie die Wasserwellen, aber ich weiß, dass es sie gibt. Wenn meine Mutter mir zum Essen

ruft und ich die Türe verschlossen habe, kann ich sie nicht oder schlecht verstehen, weil die Schallwelle nicht durch die Tür kommt.

Anja: Sehr gut, du hast also verstanden. Wie du richtig bemerkt hast, wird im Alltag noch zwischen Welle und Teilchen unterschieden – das ist der wesentliche Unterschied zur Quantenphysik: Hier findet



die Unterscheidung gar nicht mehr statt!

Sara: Das heißt, du willst mir jetzt damit sagen, dass wir das Problem gar nicht hätten, wenn wir in einer quantenphysikalischen Welt leben würden?

Anja: So kann man es auch ausdrücken, aber keine Angst, mir ist schon klar, dass dieses Problem für uns dennoch existiert. Jetzt gibt es noch einen Punkt, der für uns sehr seltsam erscheint: man kann Geschwindigkeit und Ort eines Atoms nicht beliebig genau bestimmen. Das nennt man die Heisenbergsche Unschärferelation, in Formeln geschrieben:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{2\pi} = 1,05457266 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

Dabei steht für die Geschwindigkeit der Impuls p , der das Produkt aus Masse und Geschwindigkeit ist und das Dreieck heißt Delta und steht für die Ungenauigkeit im Ort, also x bzw. in dem Impuls, also p . Die Zahl auf der rechten Seite ist zwar sehr klein, aber man beachte das \geq -Zeichen, das heißt, das Produkt aus Ungenauigkeit in Ort und Zeit muss immer über diesem Wert liegen, der wohlgemerkt über 0 ist. Das Produkt darf also nie 0 werden.

Sara: Oh je, mit Formeln habe ich es überhaupt nicht! Zu allem Übel kann ich die Bedeutung auch gar nicht verstehen. Was soll mir diese Gleichung denn sagen?

Anja: Ich erkläre es dir mal: Nehmen wir mal an, dass wir glauben, den Ort eines Atoms ziemlich exakt bestimmen zu können, dass also $\Delta x \approx 0$ ist, da ja kaum ein Fehler in der Ortsbestimmung vorliegen kann, weil man ja den Ort einigermaßen genau weiß. Jetzt muss aber unsere Unschärferelation erfüllt sein, das heißt die Impulsunschärfe Δp muss sehr groß sein, damit man erreicht, dass das Produkt

wieder größer oder gleich $\frac{h}{2\pi}$ ist. Ort und Impuls können also nicht beide beliebig genau bestimmt werden, denn: Jede Steigerung der Genauigkeit in der Ortsbestimmung eines Teilchens geht stets auf Kosten der Genauigkeit in der Impulsbestimmung.

Sara: Das ist aber jetzt ziemlich abstrakt und mathematisch. Ich glaube, da brauche ich jetzt ein anschauliches Beispiel, sonst ist es so schwer zu verstehen.

Anja: Dazu wollte ich gerade kommen: Sagen wir mal $\Delta x = 10^{-10}$ m, das wäre wohl die beste Lokalisierung für ein Atom, denn das liegt in der Größenordnung seines Durchmessers. Damit aber das Produkt jetzt in der Größenordnung von 10^{-34} Js liegt muss Δp in der Größenordnung von 10^{-24} Ns liegen. Für den Impuls

scheint das jetzt vernachlässigbar wenig zu sein, aber wenn man die kleine Masse eines Atoms in der Größenordnung von 10^{-27} kg betrachtet, bedeutet das eine Unschärfe in der Geschwindigkeit von 10^3 m/s. Das ist somit der Fehler, der bei der Angabe der Geschwindigkeit auftritt. Grundsätzlich können weder Δp , noch Δx , noch beide Null werden, das heißt, man kann den Ort oder / und den Impuls nicht ohne einen Fehler bestimmen.

Sara: Nun wird es mir schon klarer: So kann man über die Geschwindigkeit eines Atoms gar keine Angabe machen, bei einer Abweichung von 1000 m/s. Würde man einen festen Ort oder Impuls angeben, wäre es praktisch immer eine Lüge.

Anja: Du hast es erfasst – solche Aussagen sind schon fast idiotisch. Das Gleiche tritt auf, wenn man versucht, den Impuls eines Atoms mit einem möglichst geringen Fehler anzugeben, dann wird der Ort mit einem ähnlich großen Fehler behaftet sein. Man kann also über ihn keine vernünftige Aussage mehr machen. Prinzipiell gilt diese Unschärferelation auch für makroskopische Körper, nur spielt sie hier keine Rolle, da die technischen Messfehler viel größer sind – kein Kunststück bei einer Größenordnung von 10^{-34} ! Dieses Phänomen tritt also nicht erst in der Quantenphysik mit winzigsten kleinen Teilchen auf, sondern es fällt erst da ins Gewicht.

Sara: Okay, das habe ich jetzt geschluckt. Aber irgendwie schließt sich der Kreis noch nicht: Ich weiß nun, dass man Atome bei sehr niedrigen Temperaturen als Wellen betrachten muss und dass man ihren Aufenthaltsort nicht genau bestimmen kann, wenn ihr Impuls sehr gering ist, sie also sehr langsam sind. Aber wie hängt das denn jetzt zusammen?

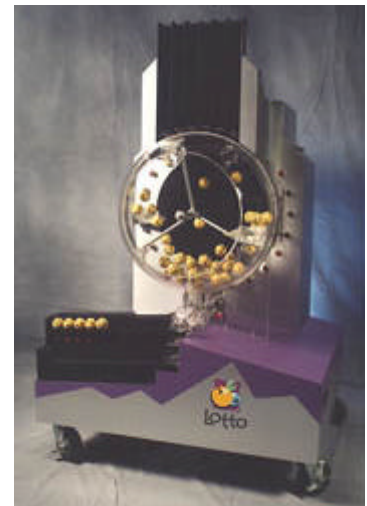
Anja: Ich muss schon sagen, das hast du sehr gut zusammengefasst! Wenn wir nun nicht wissen, wo sich das Atom zu einem bestimmten Zeitpunkt aufhält, dann ist das wie mit den Gewinnchancen beim



Lotto. Da kann

man auch nicht sagen, dass man sicher die richtige Zahlenkombination hat, sondern es gibt nur eine bestimmte Wahrscheinlichkeit, dass man gewinnt. Das Atom an einem Ort X

anzutreffen ist wie ein ``Gewinn``, den man nur mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit erhält. Dadurch entsteht der Wellencharakter des Atoms: es gibt Plätze, an denen sich das Atom öfter aufhält als an anderen, aber man weiß nie wann. Diese Orte entsprechen dann Wellenbergen, denn so ein Berg steht wegen seiner Höhe für die größere Wahrscheinlichkeit, das Atom anzutreffen. Genau das



Gegenteil ist es bei einem Wellental. Dieses steht dafür, dass das Atom hier ganz selten ist. Statt einem Punkt muss man sich nun das Atom wie eine Verteilung, die sich über einen Raum erstreckt, betrachten.

Sara: Na gut, auch wenn es eine sehr fremde Vorstellung ist, muss ich das wohl schlucken. Du hast mir ja schon mal gesagt, dass man bestimmte Dinge zu einem gewissen Grad akzeptieren muss. Mal nebenbei bemerkt erinnert mich dieses Verhalten der Atome an einen Verbrecher, der von der Polizei gesucht wird und an bestimmten, der Polizei bekannten Orten, immer wieder gesehen wird. Man weiß nie, wann er wo ist, aber er hält sich mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit an jedem dieser Orte auf. Wenn man es genau nimmt, ist auch dieser Verbrecher eine Welle. Ihn zu erwischen ist somit reine Glückssache, genau wie es mit den Atomen auch ist. Der Job der Wissenschaftler wird somit immer vielfältiger!

Anja: Das ist ja ein sehr netter Vergleich! Jetzt aber noch mal zu deiner Zusammenfassung von eben. Du hast da von sehr kalten und sehr langsamen Atomen gesprochen und den Problemen, die damit verbunden sind. Wie du ja schon weißt, sind sehr kalte Atome auch sehr langsam, das heißt ihr Ort ist nach der Unschärferelation kaum bestimmbar. Das passt ja auch damit zusammen, dass es immer nötiger wird, das Atom als Welle zu betrachten, zum einem wegen der niedrigen Temperaturen, die auch die geringe Geschwindigkeit der Atome zur Folge hat, also auch zum anderen wegen der großen Ortsunschärfe, die wiederum als Folge auftritt.

Sara: Du hast mich überzeugt – es bleibt mir wirklich nichts anderes übrig, als es zu nehmen, wie es ist. Nach deiner Argumentation ist schon eher der komisch, der das Atom unter diesen Umständen noch als Teilchen betrachtet. Ich muss schon sagen, mit diesen Atomen zu experimentieren ist schon mehr als nervig. Sie werden ständig hinterhältiger und eigenwilliger; ich kann mir immer weniger vorstellen wie man sie in den Griff bekommen soll!

[\[BEC-Home\]](#) [\[Bose\]](#) [\[Einstein\]](#) [\[1924-Story\]](#) [\[1995-Story\]](#) [\[Kondensat\]](#)