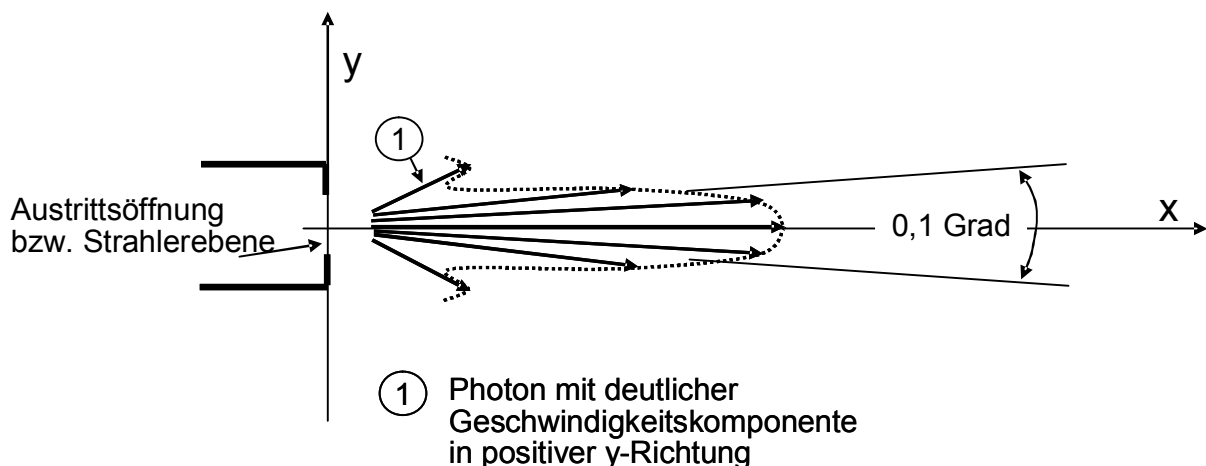


Von der Taschenlampe zur Unschärferelation

von Gunter Berauer

Eine Taschenlampe strahlt ihr Licht vorwiegend nach vorne ab, ein Teil des Lichtes wird aber immer auch zur Seite gestreut. Aus der Erfahrung wissen wir, dass das Licht der Lampe umso besser auf die Hauptstrahlrichtung gebündelt bleibt, je größer ihre Strahlerfläche ist, und dass umgekehrt das Licht umso mehr gestreut wird, je kleiner diese Fläche ausfällt. Verkleinert man die strahlende Fläche bis zu einem Punkt, dann wird das Licht in alle Richtungen gleichmäßig verteilt. Für die unerwünschte Aufweitung des Lichtkegels einer Taschenlampe gibt es viele Ursachen. Eine davon ist auch die (im Rahmen der Quantenmechanik formulierte) Heisenberg'sche Unschärferelation. Diese spielt allerdings bei einer „normalen“ klassischen Taschenlampe, deren Licht sich aus inkohärenten Wellenzügen vieler verschiedener Farben zusammensetzt, nur eine untergeordnete Rolle. Bei den monochromatischen (d.h. einfarbigen) und kohärenten Lichtquellen, um die es sich z.B. bei den Laserpointern handelt, ist die Unschärferelation aber die hauptsächliche Ursache für die Aufweitung des Lichtstrahles.

Schauen wir uns einen solchen Laserpointer etwas genauer an: Bei ihm tritt das Licht in Form kohärenter, gleichfarbiger Photonen (das sind synchronisierte Lichtteilchen ein und derselben Wellenlänge) aus einer Strahlerebene mit einem Durchmesser im Millimeterbereich aus und wird - bei den im sichtbaren Bereich des Lichtes gültigen Wellenlängen - auf einen Strahlenkegel von etwa 0,1 Grad Breite gebündelt. D.h., dass zwar ein Großteil der Photonen etwa in der gewünschten Richtung, sagen wir längs der horizontalen x-Achse senkrecht zur Strahlerebene austritt, viele Photonen aber doch innerhalb des 0,1-Grad-Kegels und sogar auch außerhalb desselben in von der x-Achse abweichenden Richtungen die Austrittsöffnung verlassen. In dem Bild weiter unten ist die Situation schematisch dargestellt. Darin soll die Länge der Pfeile die Häufigkeit andeuten, mit der Photonen in dieser Richtung austreten. Die Geschwindigkeiten der letztgenannten Photonen verfügen damit über eine positive oder negative Komponente in y-Richtung senkrecht zur x-Achse, also in der Strahlerebene. Wie bei der Taschenlampe gilt nun auch beim Laserpointer, dass bei Verkleinerung des Durchmessers der Strahlerfläche, d.h. der Ausdehnung der Austrittsöffnung in y-Richtung, die Bündelung schlechter wird, d.h. immer mehr Photonen immer größere von Null verschiedene Geschwindigkeitskomponenten in y-Richtung aufweisen. Wenn man z.B. die Ausdehnung der Strahlerfläche halbiert, dann weitet sich der Strahl auf die doppelte Breite, in unserem Beispiel also von 0,1 auf 0,2 Grad. Halten wir fest: Je stärker der Austrittsort der Photonen durch den begrenzten Durchmesser der Strahlerebene eingeengt wird, je genauer er damit in y-Richtung festliegt, desto mehr Photonen zeigen genau in dieser Richtung (+y) wie auch in der Gegenrichtung (-y) eine Bewegung.



Eine Erklärung für diese Beobachtung liefert die Unschärferelation. Sie sagt aus, dass beliebige Teilchen (beim Licht sind es die Photonen) um so mehr Freiheit besitzen, sich in einer betrachteten Richtung im Raum aus einem Spektrum möglicher Geschwindigkeiten, welches durch die Anordnung a priori berechnet werden kann, per Zufall einen Wert auszusuchen, je genauer man ihnen den Aufenthaltsort in dieser Richtung vorschreibt. Deutlich sichtbar ist dieser Effekt nur bei sehr leichten Teilchen wie eben den Photonen (nicht nur beim Laserpointer direkt beobachtbar, sondern z.B. auch bei Beugungsexperimenten am Spalt), wirksam ist er aber *immer*, auch etwa beim Schießen mit Schrotkugeln statt mit Photonen, allerdings bei diesen wegen ihrer großen Masse eben nur unmessbar wenig. Die Unschärferelation führt auch dazu, dass man ein kleines Kügelchen prinzipiell nicht exakt auf einen idealen Bergeskamm legen kann. Denn dazu müsste man seinen Ort exakt festlegen, was ihm wiederum die Freiheit gäbe, spontan fast jede beliebige Geschwindigkeit anzunehmen und deshalb (auch beim absoluten Temperaturnullpunkt ohne thermische Bewegungen) über kurz oder lang unvorhersagbar auf einer der beiden Seiten des Bergeskammes hinabzurollen. Dieser Effekt wäre natürlich auch nur mit mikroskopisch kleinen Kügelchen (etwa Riesenmolekülen) experimentell nachweisbar. Man spricht bei den Größen *Ort* und *Geschwindigkeit* (exakt ist statt der Geschwindigkeit hier der Impuls als das Produkt aus Geschwindigkeit und Masse gemeint) auch von inkommensurablen Größen, da man beide bei einem Objekt niemals gleichzeitig exakt festlegen kann. Das Wort „inkommensurabel“ verleitet zu der Annahme, es handele sich um Messfehler. Nein, es geht nicht um Messfehler, sondern um einen *prinzipiellen* Zusammenhang. Messfehler kommen natürlich in der Praxis zu den quantenmechanisch bedingten Ungenauigkeiten oder Unschärfen immer noch hinzu. Es ist also prinzipiell und nicht nur praktisch unmöglich, einem Körper exakt einen Ort und gleichzeitig einen Impuls (bzw. eine Geschwindigkeit) zuzuweisen oder aufzuzwingen. Legt man seinen Ort fest, dann kann man seine Geschwindigkeit nicht genau angeben oder festlegen, legt man seine Geschwindigkeit fest, dann kann man seinen Ort nicht genau angeben oder festlegen. Nach den Vorstellungen der klassischen Newton'schen Physik war das aber natürlich möglich, weswegen die im Jahre 1927 von Werner Heisenberg gewonnene Erkenntnis auch für große Verwunderung und Verwirrung sowohl unter Fachleuten wie auch bei Laien gesorgt hat. Die Unschärferelation gibt uns aber Antworten auf viele zuvor offene Fragen, z.B. auch auf die, warum Materie eigentlich fest ist und nicht in sich zusammenbricht. Das liegt nämlich daran, dass die Elektronen eines Atoms nicht in den Kern stürzen können, weil sie in dem winzigen Kern wegen ihrer geringen Masse dann zufällig so große Geschwindigkeiten annehmen würden, die sie wieder aus dem Kern vertreiben.

Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass es auch noch eine zweite Unschärferelation gibt, und zwar zwischen den Größen *Zeit* und *Energie*. Auf diese soll aber hier nicht weiter eingegangen werden.

Die Unschärferelationen und andere Aussagen der Quantenmechanik haben unser physikalisches Weltbild dramatisch verändert. Die Theorie ist zwar schon bald ein Jahrhundert alt und ihre Richtigkeit ist auch immer wieder belegt worden. So wird die Quantenmechanik allein schon dadurch täglich bestätigt, dass unsere Computer, inklusive dem, auf dem ich diesen Text schreibe, überhaupt funktionieren. Und noch kein einziges Mal ist etwas beobachtet worden, das der Theorie widersprechen würde. Ihre Auswirkungen auf unser naturphilosophisches Weltbild sind aber bis heute noch lange nicht voll erfasst und verstanden. Wesentliche Grundlagen der Quantenmechanik hat übrigens Albert Einstein u.a. mit der Erklärung des photoelektrischen Effektes gelegt. Die philosophischen Konsequenzen der von ihm selbst mitbegründeten Quantenmechanik hat er aber zeitlebens nicht recht akzeptieren wollen.

(Version vom 14.5.2013)