MEHRZEIGER

Vorbemerkung: Die Darstellungen in den meisten Schulbüchern zur Unbestimmtheit halte ich für falsch. Sie folgen zwar einer von HEISENBERG selbst eingeführten – nachträglichen – Popularisierung, sind aber mechanistisch und deswegen falsch. Den fachlich haltbaren Hintergrund hinter der Unbestimmtheit bildet die FOURIER- Transformation. Verschiedene eigene Versuche, diese für und mit Schülern zu elementarisieren, scheinen mir nicht besonders gut gelungen, weil es eben doch an mathematischem Rüstzeug fehlt. Meine Erfahrung hat gezeigt, dass die SchülerInnen alle Bearbeitungen mit den FFT- Möglichkeiten von Cassy schnell wieder vergessen haben, weil sie nicht hinter die mathematischen Inhalte blicken konnten.

Deswegen schlage ich nun einen experimentell begonnenen, dann in einem Modell auf Zeigerbasis fortgesetzten Weg vor.

1.Schritt: Arbeit mit einem Modell

In einem Modell, das in Euklid/Dynageo geschrieben wurde, untersucht man die Folgen für die $|\varPsi|^2$ - Verteilung, die sich ergeben, wenn man z.B. acht Zeiger überlagert, deren Frequenzen (oder in anderer Darstellung: Wellenlängen) sich um jeweils 1/8 eines Intervalls Delta_f unterscheiden.

Mehrzeiger.ggb

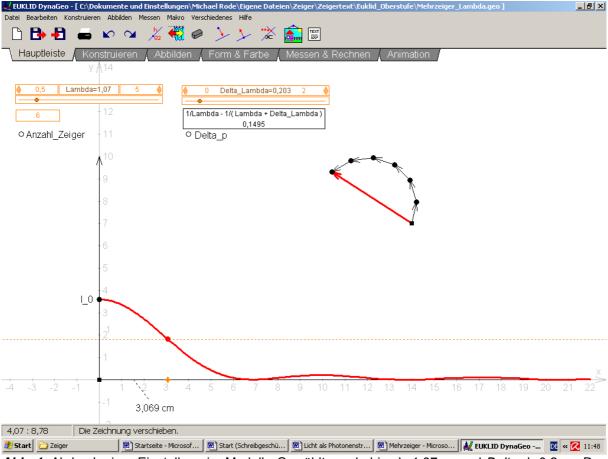


Abb. 1: Abdruck einer Einstellung im Modell. Gewählt wurde hier λ =1,07cm und *Delta_\lambda*=0,2cm. Das bedeutet, dass sich der erste und der letzte Zeiger um diesen Wert voneinander unterscheiden.

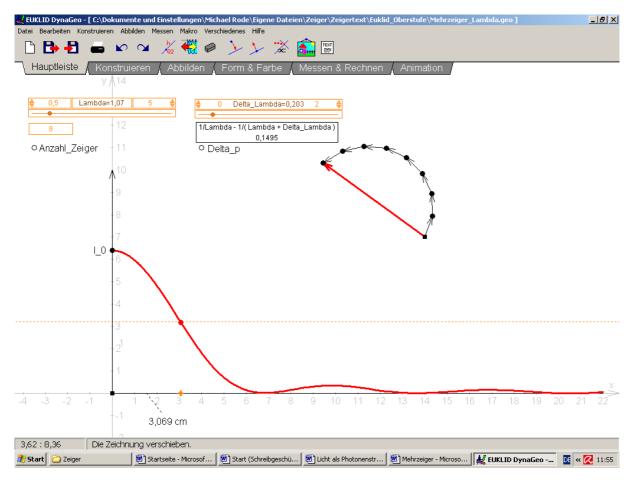
Durch Verschieben des Beobachtungspunktes auf dem Schirm kann man für jeden Ort den Wert von $|\Psi|^2$ ausmessen. In der Abbildung wurde der bewegliche Punkt auf der x- Achse wurde so eingestellt, dass er die Halbwertsbreite der Verteilung anzeigt.

Nun muss man das Bild quantenphysikalisch deuten. Dazu scheint es mir wieder besonders hilfreich, über ein Experiment mit einzelnen Photonen nachzudenken.

Wenn man ein einzelnes Photon auslöst, wird es nur dann an jedem beliebigen Ort auf dem Schirm mit gleicher Wahrscheinlichkeit auftreffen, wenn Delta $\lambda=0$ ist.

Davon überzeugt man sich durch entsprechende Einstellung am Schieberegler für Delta_Lambda.

Wenn man Delta_\(\lambda\) vergrößert, kontrahiert der Bereich, in dem man das Photon mit großer Wahrscheinlichkeit finden wird. Verwendet man nur wenige Zeiger, kommt es irgendwann dazu, dass die Zeigerlinie sich zum Kreis schließt, danach würde sich die Verteilung wiederholen. Je mehr Zeiger man verwendet, desto weiter muss man gehen, bis dieser Zustand eintritt, im Grenzfall unendlich vieler beteiligter Zeiger tritt dieser Fall nicht auf. Wir ersetzen in diesem Modell die eigentlich notwendige Arbeit mit beliebig vielen Zeigern im Intervall durch eine mit insgesamt acht und stellen die Situation so ein, dass nur das erste Maximum auf dem Bildschirm sichtbar ist.



Dann kann man am Modell quantitativ untersuchen, wie Delta $_{\lambda}$ und Delta $_{x}$ zusammenhängen.

Um mit der üblichen Darstellung in Lehrbüchern überein zustimmen, wird im Modell aus Delta $_\lambda$ die Größe Delta $_p$ abgeleitet und in der oberen Mitte des Bildschirms dargestellt. Man kann z.B. die folgenden Ergebnisse erzielen:

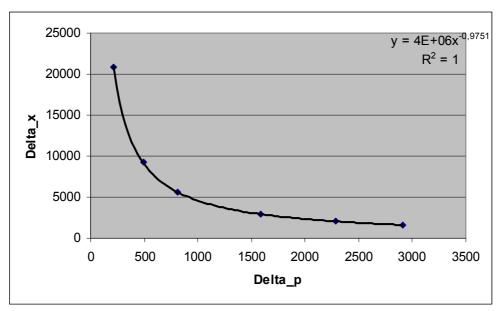


Abb.2: Mit dem Modell gewonnener Zusammenhang von Delta_p und Delta_x. Man erkennt sehr gut die Antiproportionalität, die in der Unbestimmtheitsrelation für Ort und Impuls beschrieben wird.

Wegen der Strukturgleichheit der Beschreibung von Momentaufnahmen einer Welle und der Schwingung eines Oszillators kann man die gewonnenen Ergebnisse direkt zu Delta f*Delta t übertragen.

3. Was uns das alles lehren kann:

Bemerkenswert ist, dass die Antiproportionalität sich allein aus der Zeigerdarstellung für das Interferenzverhalten von Photonen und der zugehörigen Wahrscheinlichkeitsdeutung ergibt. Es ist keine Rede von Photonen, die irgendwie mit den Spaltkanten kollidieren und irgendwelche mystischen Zusatzimpulse erhalten. Das ginge ja auch gar nicht. Photonen, die mit Materie wechselwirken, vergehen dadurch!

Vielleicht fragt nun jemand, wie es denn bei Experimenten mit dem Laser sei: Man könne doch die Peakmitte für jedes Maximum beliebig genau bestimmen. Dann entfalle doch die Unsicherheit für die Bestimmung von λ .

Sicher, aber die Unbestimmtheitsrelation verbietet das auch gar nicht. Vielmehr spricht sie über die in ein und dem selben Experiment vorzunehmende Bestimmung von Impuls und Ort an einem einzigen Photon.

Und erst dann – und nur dann in voller Schärfe – tritt die Unbestimmtheit zu Tage.

Deswegen ist es für den Unterricht zwingend, erst über einzelne Photonen nachzudenken, bevor man die Quantenwelt betritt. Sonst verdecken die Massenphänomene alles, was man zum Verständnis benötigt.