



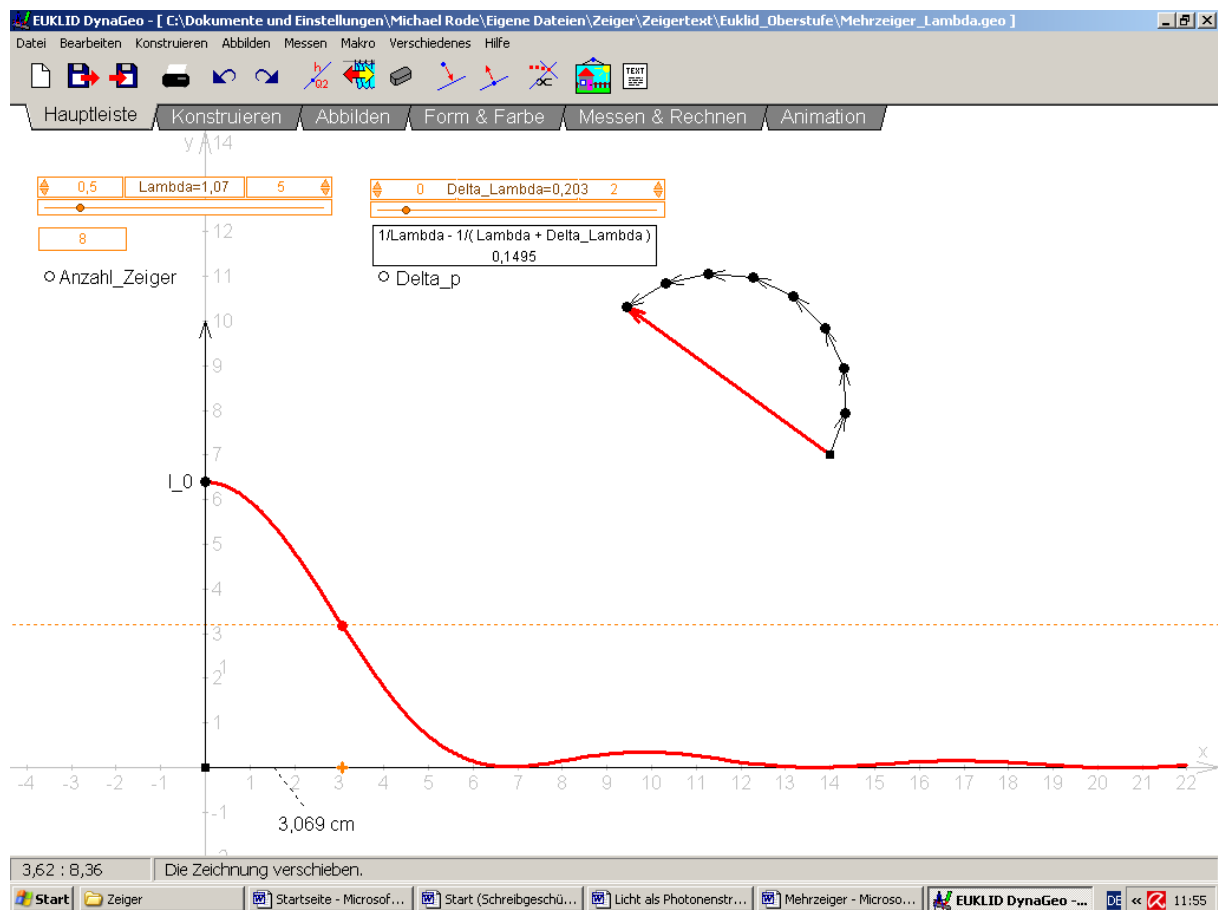
Durch Verschieben des Beobachtungspunktes auf dem Schirm kann man für jeden Ort den Wert von  $|\Psi|^2$  ausmessen. In der Abbildung wurde der bewegliche Punkt auf der x- Achse wurde so eingestellt, dass er die Halbwertsbreite der Verteilung anzeigt.

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 auftreten, wenn  $\Delta\lambda=0$  ist.

Davon überzeugt man sich durch entsprechende Einstellung am Schieberegler für  $\Delta\lambda$ .

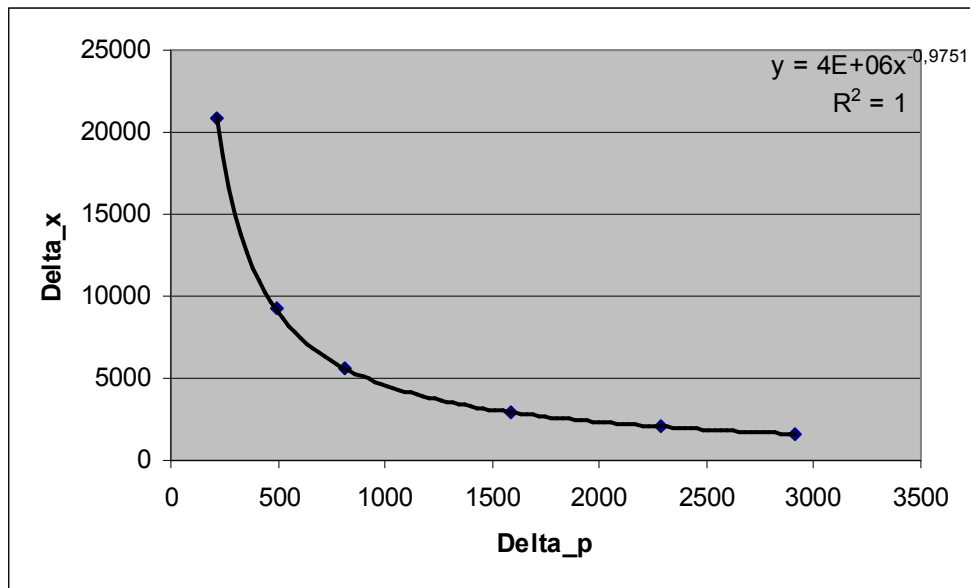
Wenn man  $\Delta\lambda$  vergrößert, kontrahiert der Bereich, in dem man das Photon mit großer Wahrscheinlichkeit finden wird. Verwendet man nur wenige Zeiger, kommt es irgendwann dazu, dass die Zeigerlinie sich zum Kreis schließt, danach würde sich die Verteilung wiederholen. Je mehr Zeiger man verwendet, 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  $\Delta_f \cdot \Delta_t$  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  $\lambda$ .

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.