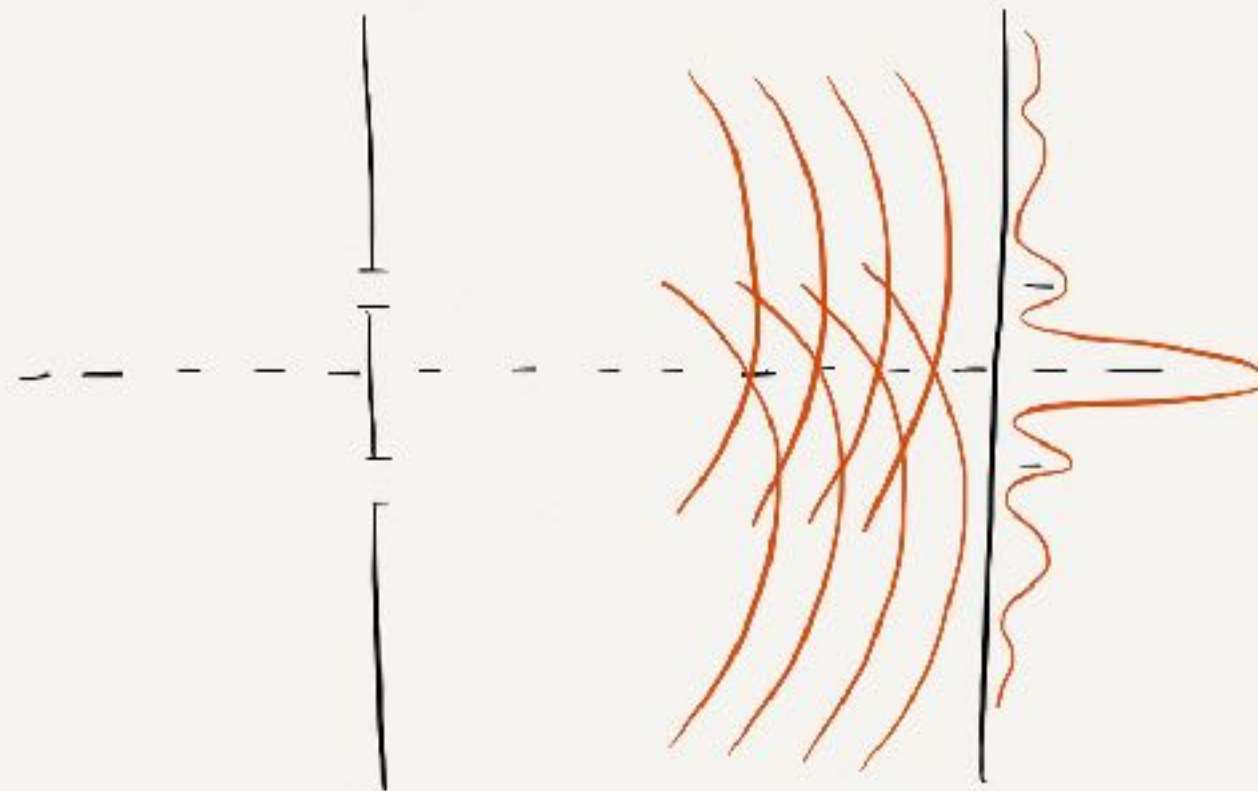


Quantenphysik



Der Welle-Teilchen-Dualismus

Welle-Teilchen-Dualismus



<http://bluesky.blogg.de/2005/05/03/fachbegriffe-der-modernen-physik-ix/>

Erster Eindruck

Video übersetzt von MinutephysicsDE
ICH BIN NICHT DER MACHER DIESER VIDEOS!
MinutePhysics kommt im Original
von Henry Reich.

Ich übersetze nur.

Abboniert bitte Henry Reich und seine Videos
über Physik hier:

-klick-

Musik ist von Nathaniel Schroeder:

-soundcloud klick-

<https://www.youtube.com/watch?v=3nlk2wPwtu4>

Welle-Teilchen-Dualismus

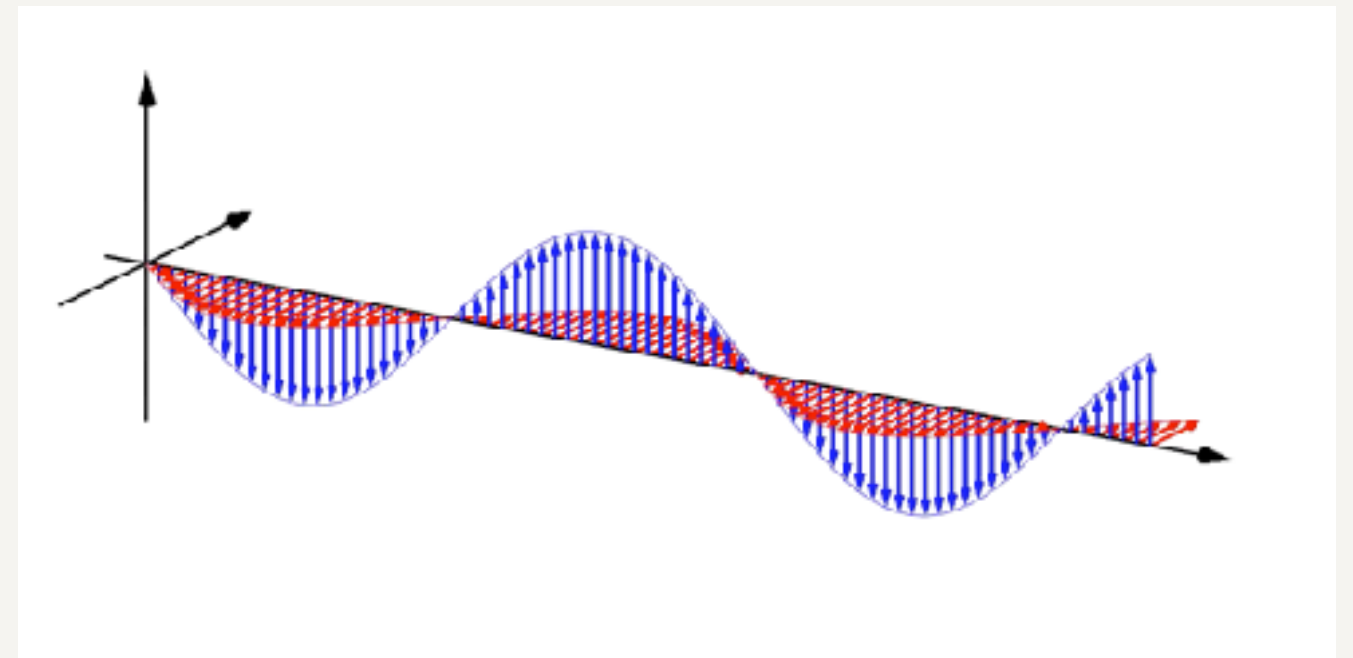
Alles ist gleichzeitig Welle und Teilchen.

Welle-Teilchen-Dualismus

Alles ist gleichzeitig **Welle** und Teilchen.

Welle

- Räumlich und zeitlich periodische Schwingung
- Eine Welle ist nicht an einem Ort, sondern sie ist raumausfüllend.



- Zeitliche Frequenz: $\omega = \frac{2\pi}{T}$

$$A \cdot \sin(kx - \omega t)$$

- Räumliche Frequenz: $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

Interferenz

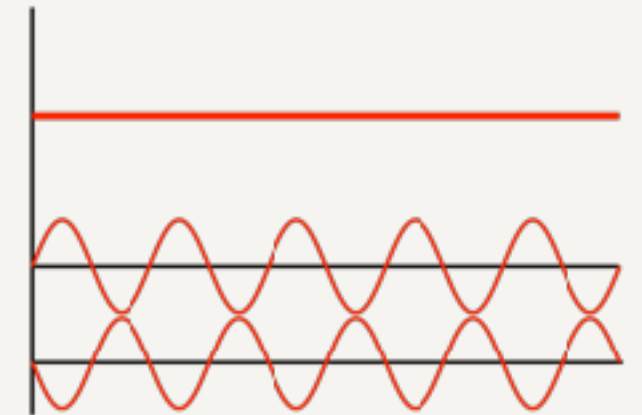
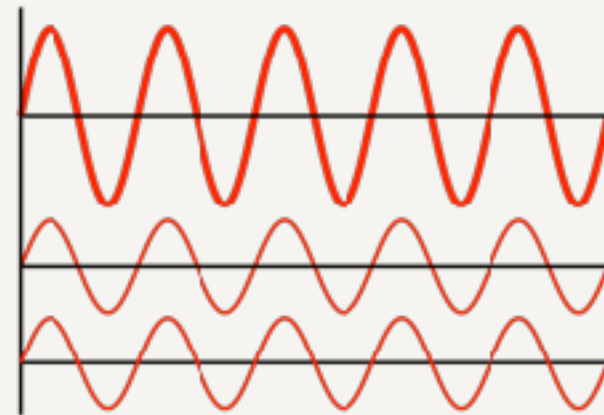
Ein-dimensional

$$A \cdot \sin(kx) + A \cdot \sin(kx + \varphi)$$

- Wenn sich zwei Wellen überlagern kommt es zu Interferenz.
- Je nach relativer Phase zwischen den Wellen kann es zu konstruktiver oder destruktiver Interferenz kommen.

Konstruktive Interferenz

Destruktive Interferenz



$$\varphi = 0$$

$$\varphi = \pi/2$$



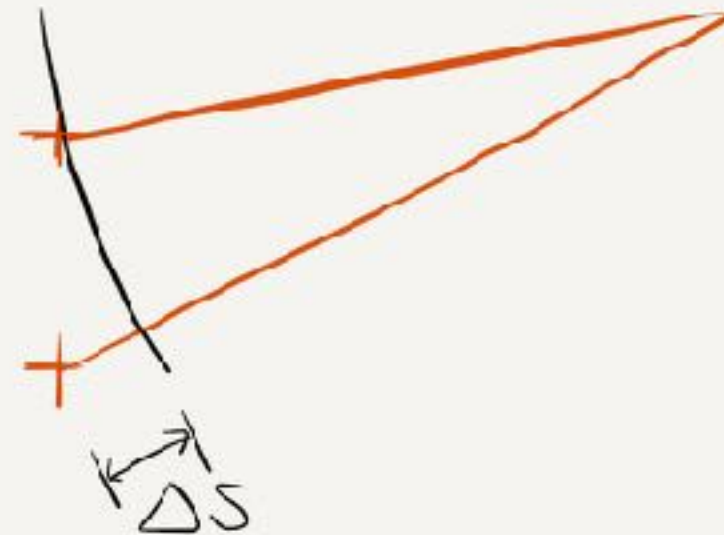
Interferenz im Raum

- Wenn sich zwei Wellen überlagern kommt es zu Interferenz.
- Je nach relativer Phase zwischen den Wellen kann es zu konstruktiver oder destruktiver Interferenz kommen.



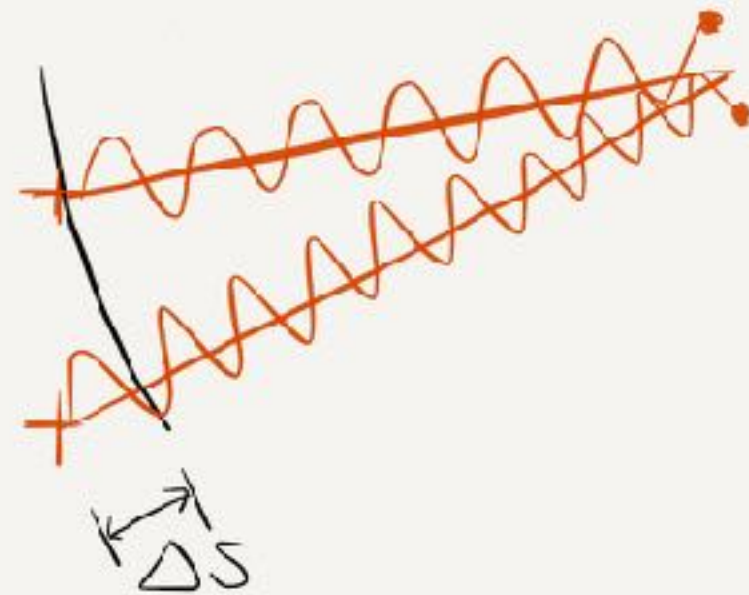
Interferenz im Raum

- Wenn sich zwei Wellen überlagern kommt es zu Interferenz.
- Je nach relativer Phase zwischen den Wellen kann es zu konstruktiver oder destruktiver Interferenz kommen.



Interferenz im Raum

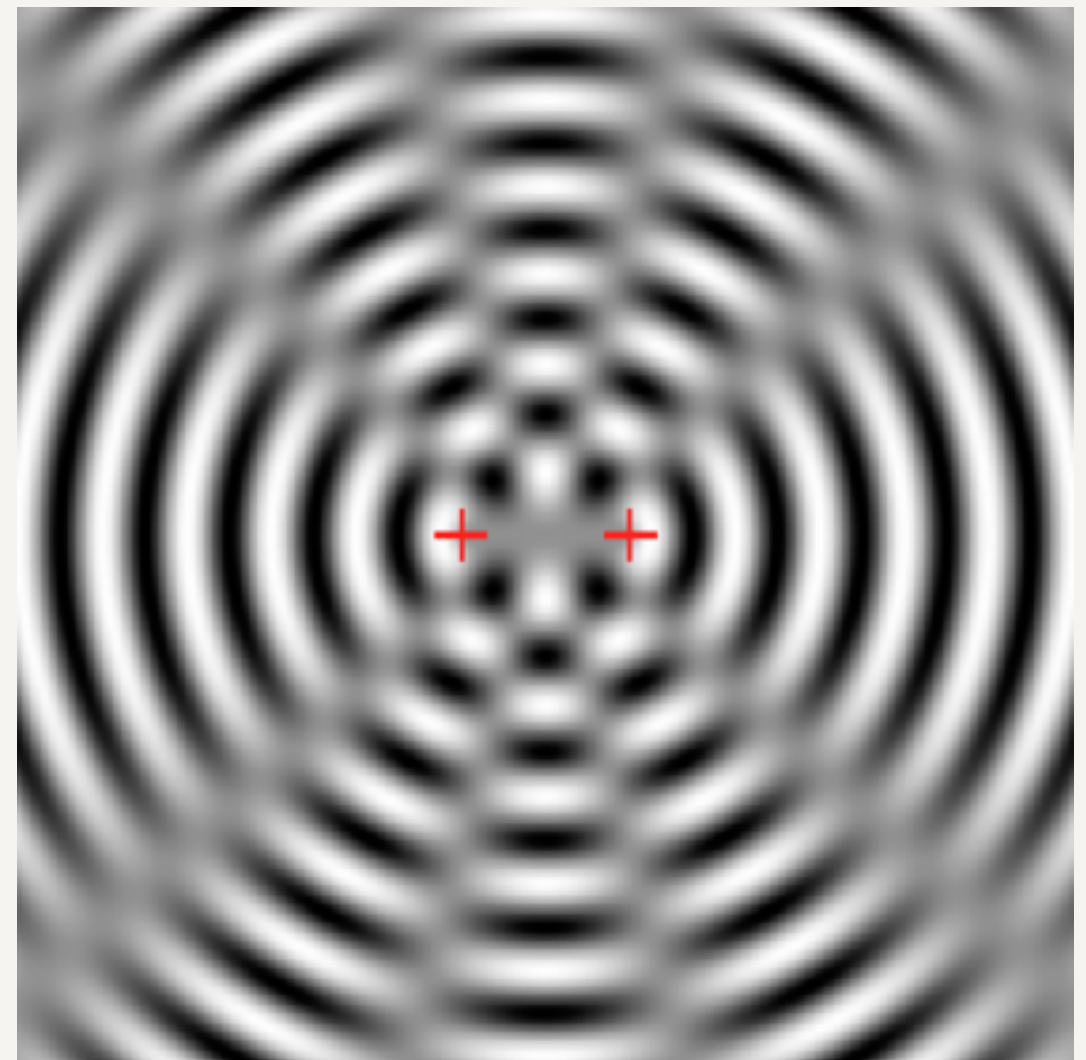
- Wenn sich zwei Wellen überlagern kommt es zu Interferenz.
- Je nach relativer Phase zwischen den Wellen kann es zu konstruktiver oder destruktiver Interferenz kommen.



Interferenz

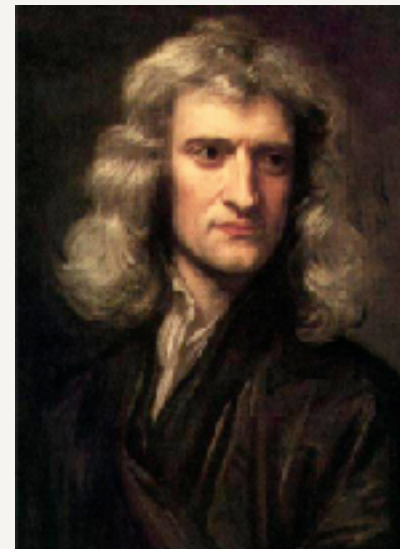
Zwei-dimensional

- An jedem Punkt des Raumes kommen die Wellen mit einer festen aber unterschiedlichen Phase an.
- Punkte, die von beiden Quellen gleich weit weg sind erfahren konstruktive Interferenz.
- Punkte dazwischen können destruktiv interferieren.



Licht als Welle

- **Newton** im 17. Jahrhundert:
„Licht besteht aus Teilchen“.
- **Young**, 1802: Interferenz am Doppelspaltexperiment, Licht sind Wellen.
- **Maxwell**, 1864: Maxwell-Gleichungen
- **Hertz**, 1888: Licht sind elektromagnetische Wellen.

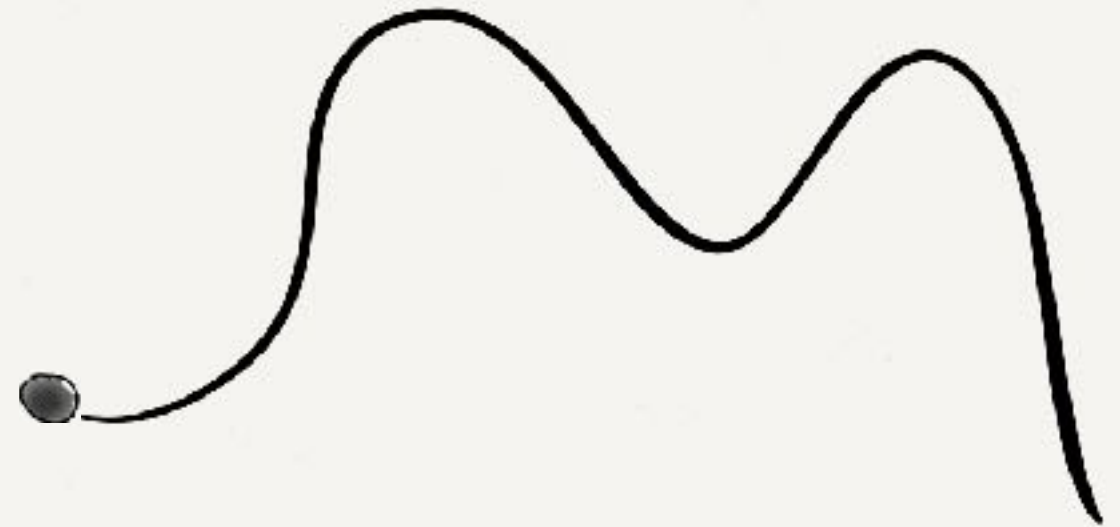


Welle-Teilchen-Dualismus

Alles ist gleichzeitig Welle und **Teilchen.**

Teilchen

- Auf ein kleines Raumgebiet begrenzt, es ist *„lokalisiert“*.
- Es bleibt räumlich begrenzt und bewegt sich auf einer *Bahn*.



Kinetische Energie

$$E = \frac{1}{2}mv^2$$

Impuls

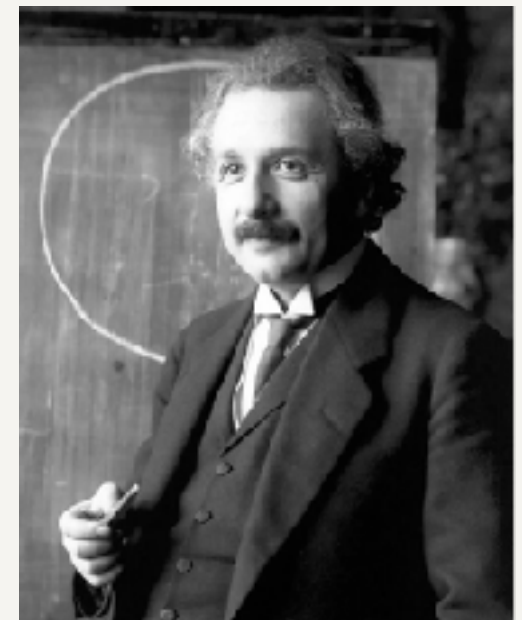
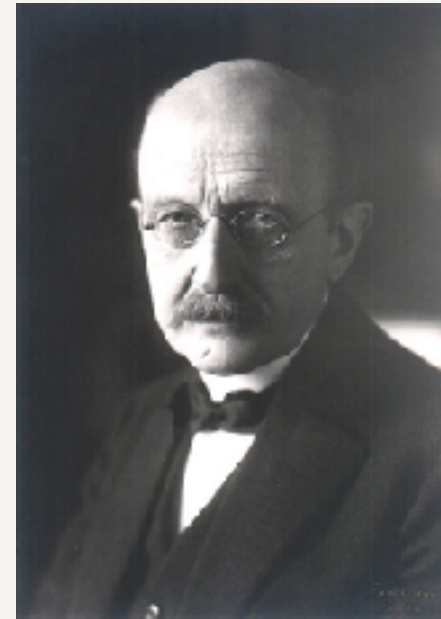
$$\mathbf{p} = m\mathbf{v}$$

Bewegungsgleichung

$$\mathbf{F} = m \cdot \mathbf{a} = m\ddot{\mathbf{x}}$$

Licht als Teilchen

- **Planck**, 1900: Planck'sche Strahlungsformel, Quantisierung des Lichtfeldes.
- **Einstein**, 1905: Erklärung des photoelektrischen Effekts (Nobelpreis 1921).
- **Compton**, 1922: Inelastische Streuung von Röntgenstrahlen, Impuls der Lichtteilchen. (Nobelpreis 1927).



Licht als Teilchen

klassische Mechanik	Licht als Teilchen
$E = \frac{1}{2}mv^2$	$E = \hbar\omega$
$\mathbf{p} = m\mathbf{v}$	$\mathbf{p} = \hbar\mathbf{k}$

- Die Welleneigenschaften ω und k werden mit Teilcheneigenschaften verknüpft.
- Ein Photon hat eine definierte Energie und einen Impuls wie Teilchen.

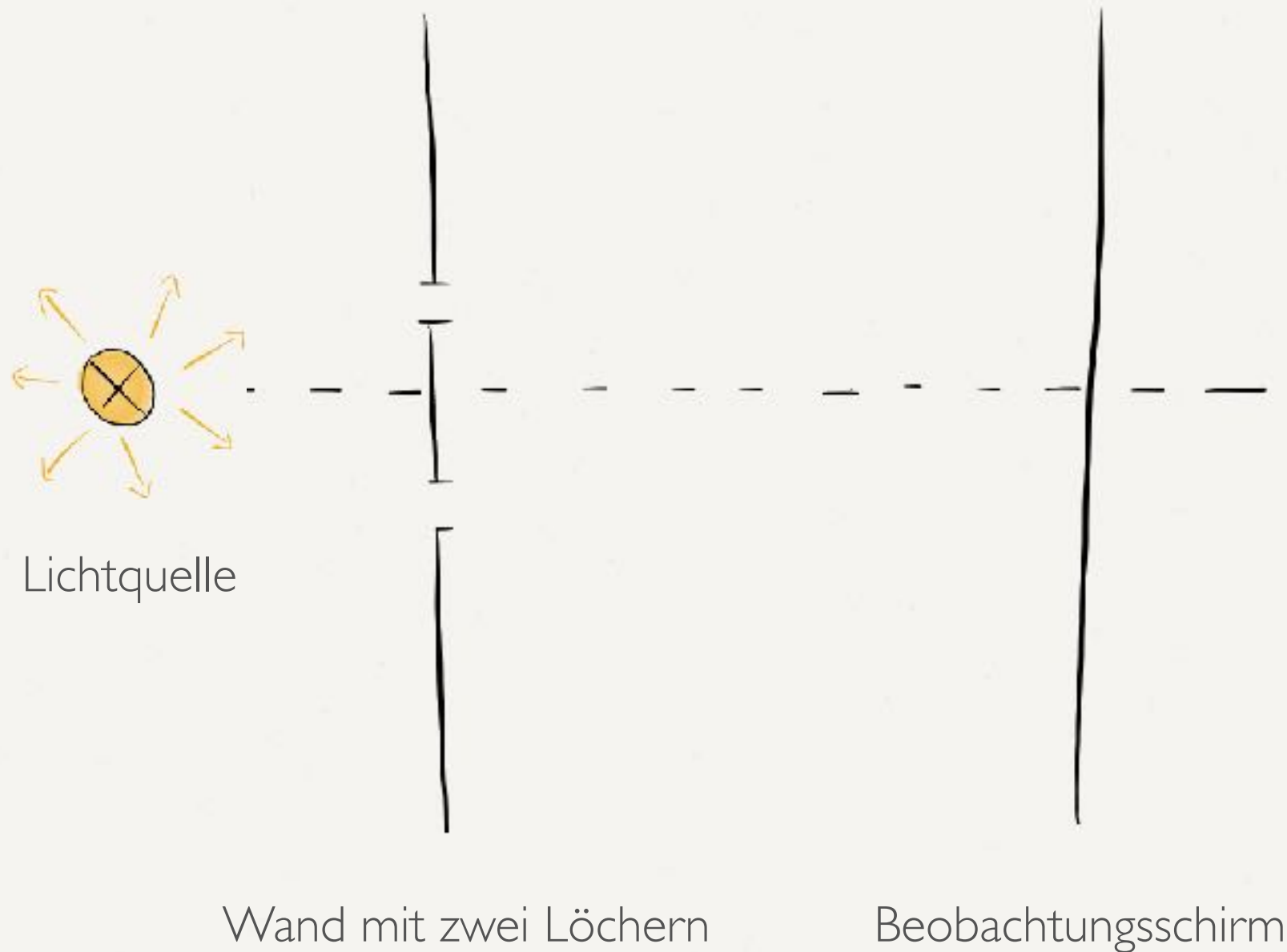
Welle-Teilchen-Paradox

- Nach Definition von Welle und Teilchen schließen sich diese Formen gegenseitig aus.
- Wie soll man dann den photo-elektrischen Effekt **und** die Interferenz von Licht zusammen erklären?

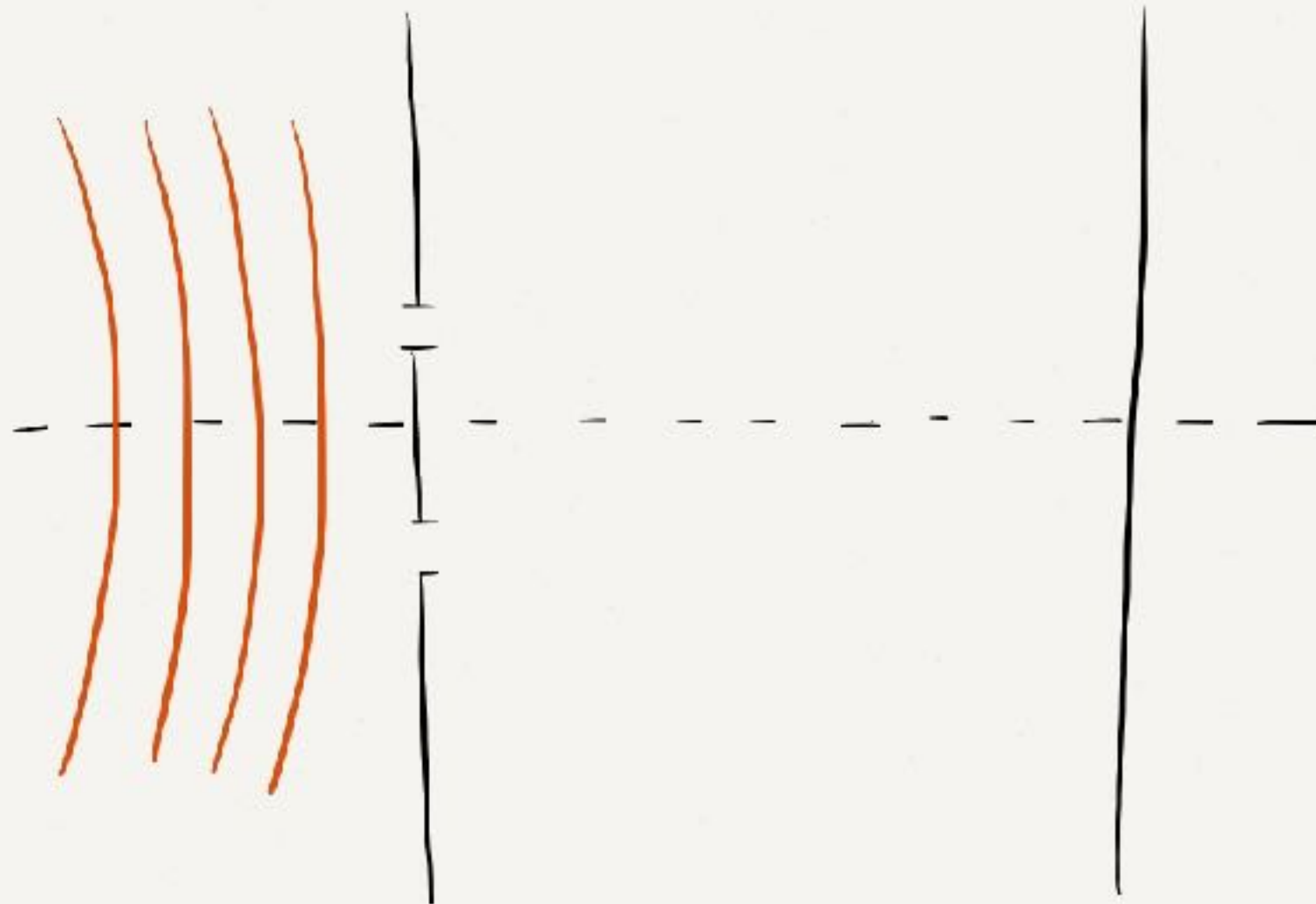
Welle-Teilchen-Dualismus

Alles ist gleichzeitig Welle **und** Teilchen.

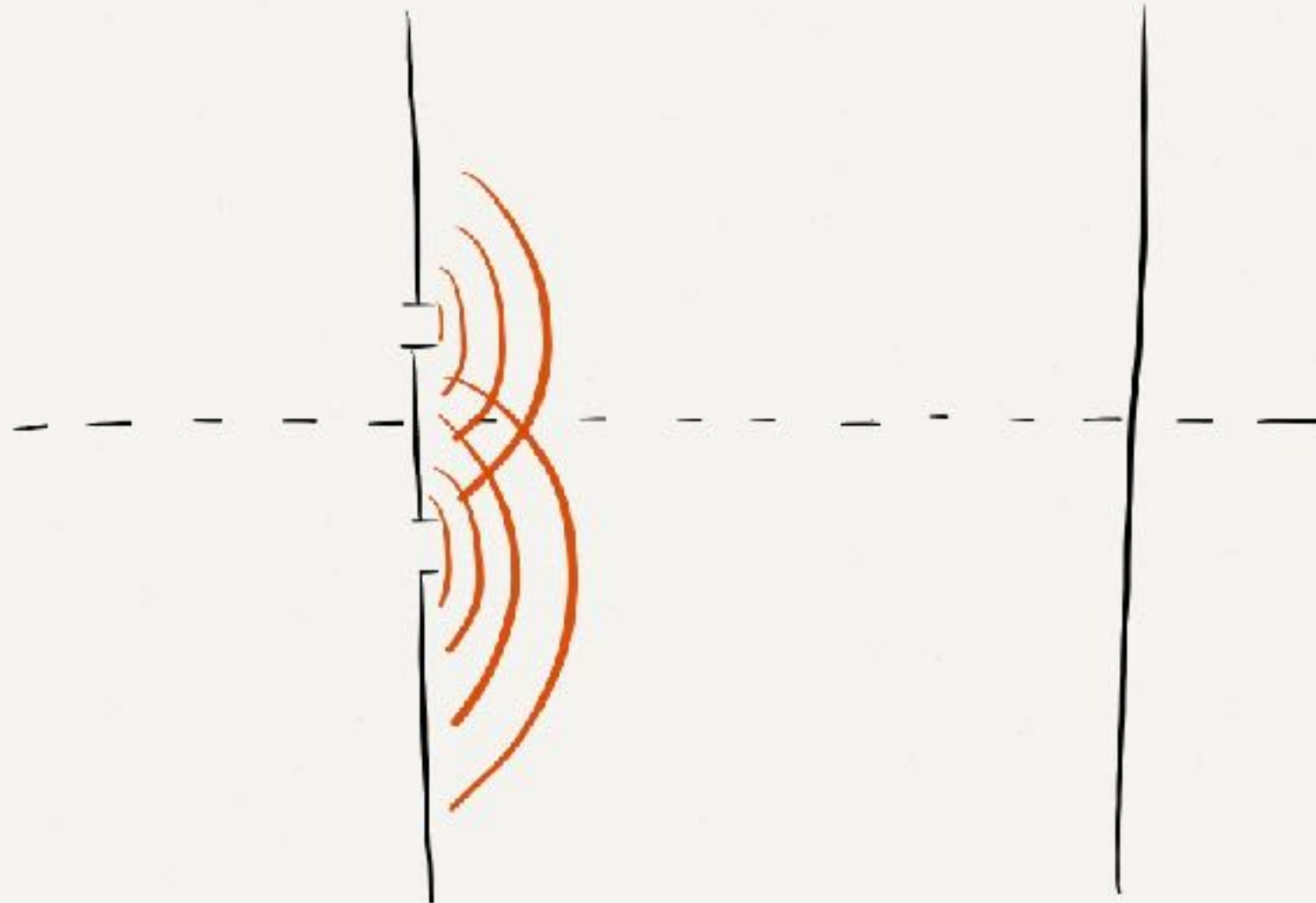
Das Doppelspalt-Experiment nach *Thomas Young*, 1802



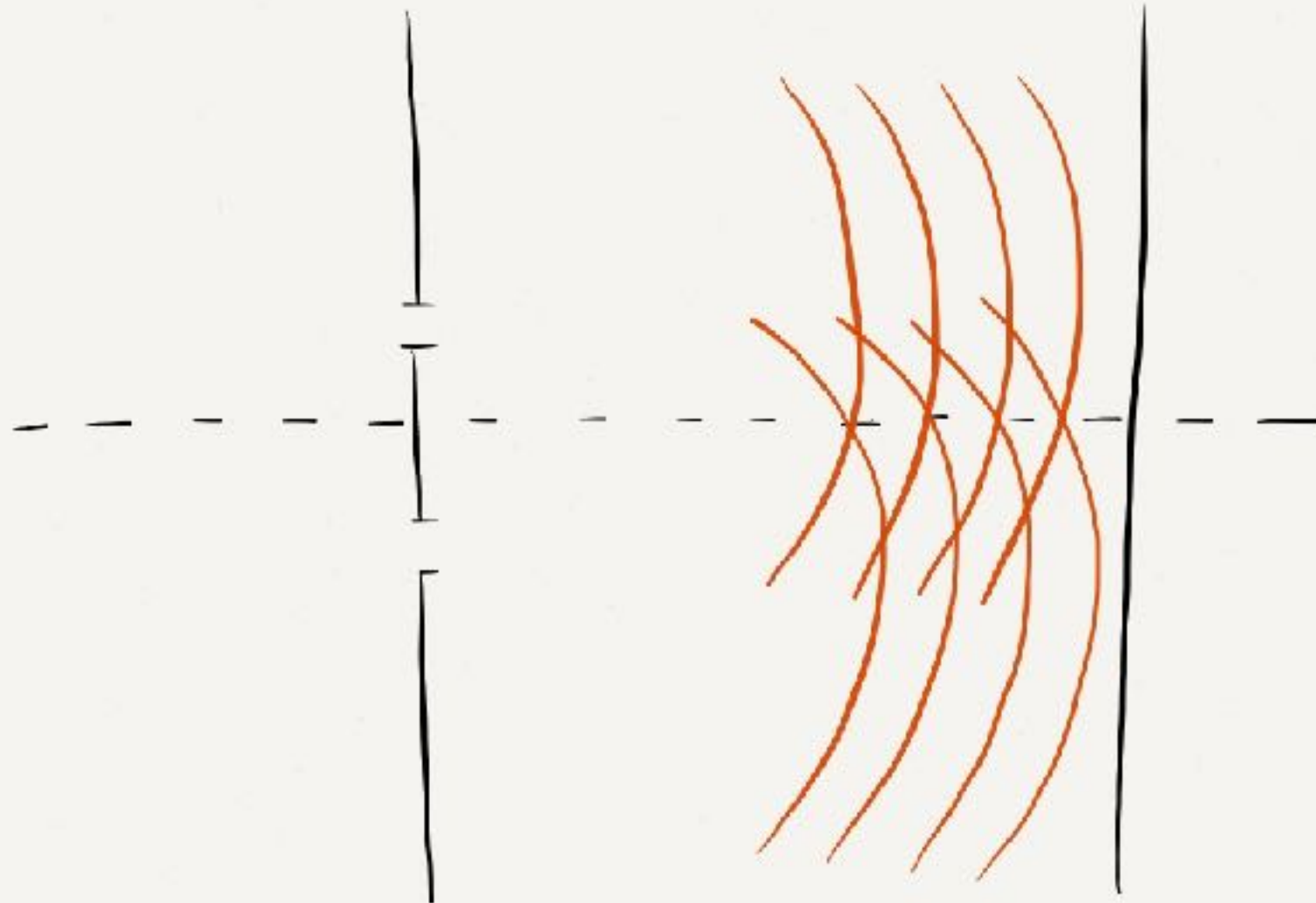
Das Doppelspalt-Experiment nach *Thomas Young*, 1802



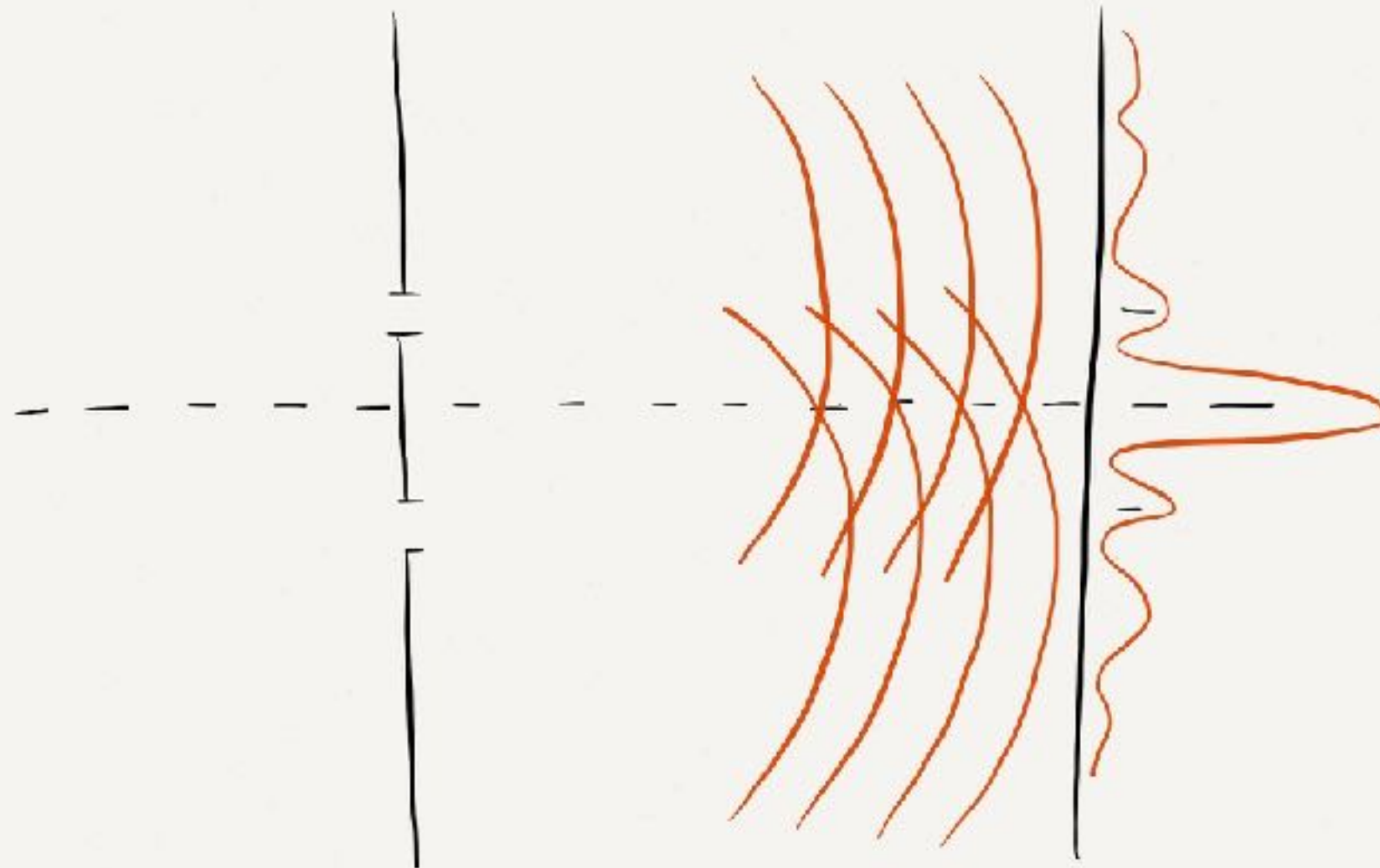
Das Doppelspalt-Experiment nach *Thomas Young*, 1802



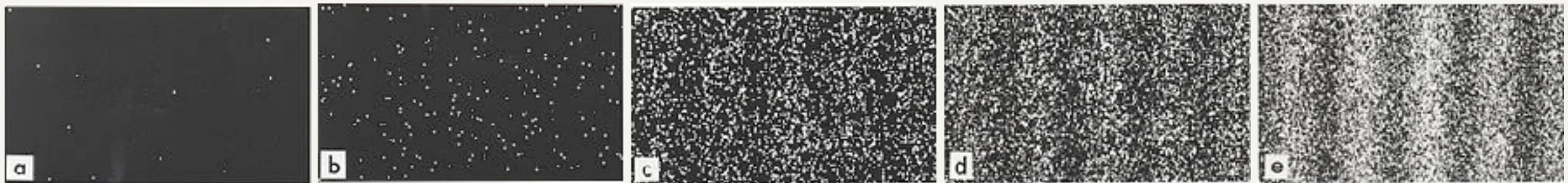
Das Doppelspalt-Experiment nach *Thomas Young*, 1802



Das Doppelspalt-Experiment nach *Thomas Young*, 1802



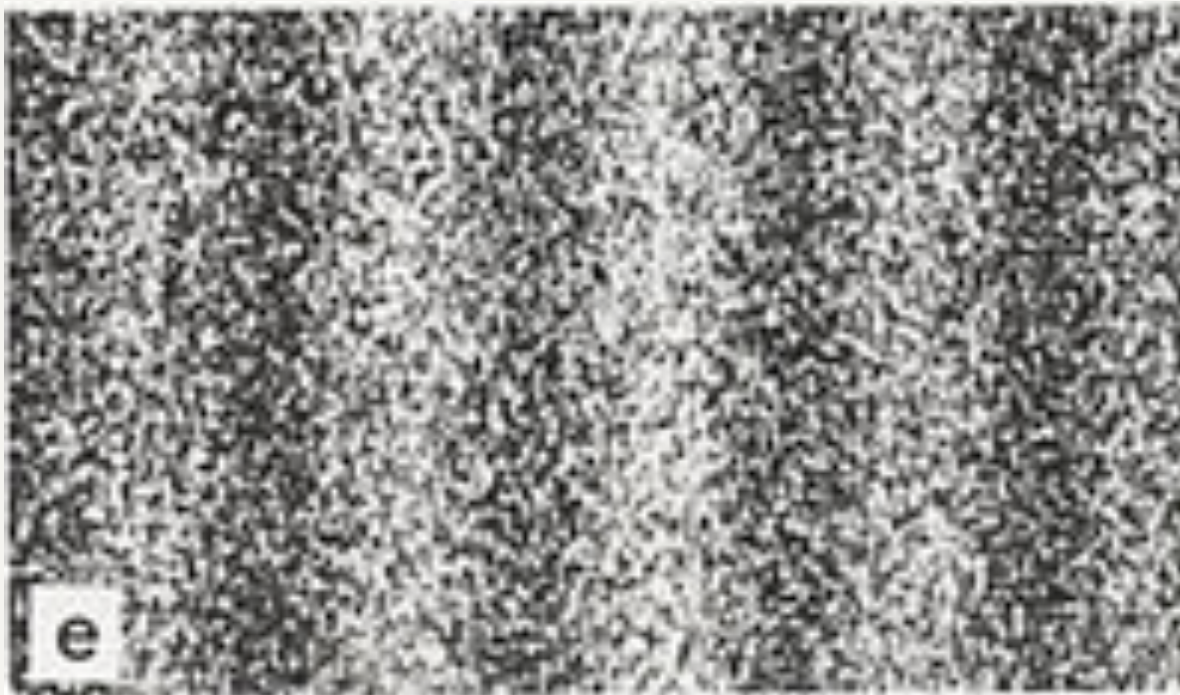
Das Doppelspalt-Experiment quantenmechanisch



Das Doppelspalt-Experiment quantenmechanisch



Welle-Teilchen-Dualismus



Welle



Teilchen



Feynmans Doppelspalt-Experiment

http://www.feynmanlectures.caltech.edu/III_01.html

<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1367-2630/15/3/033018>

Welle-Teilchen-Dualismus

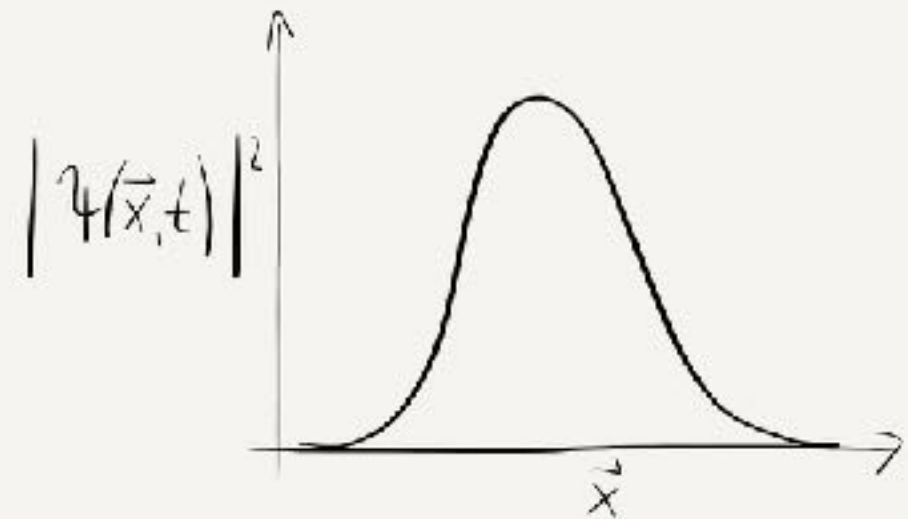
Alles **ist** gleichzeitig Welle und Teilchen.

Kopenhagener Deutung Wellenfunktion

- Das quantenmechanische System wird durch die **Wellenfunktion** beschrieben.
- Sie ist nicht direkt messbar und ist kein „Objekt“ (Welle oder Teilchen) in normalen Sinn.

Wellenfunktion

$$\psi(\mathbf{x}, t)$$



Kopenhagener Deutung Entwicklung

- Die Quantenmechanik liefert die mathematischen Werkzeuge um zu berechnen, wie sich die Wellenfunktion in einem Experiment „bewegt“, d.h. zeitlich entwickelt.



Schrödinger-Gleichung*

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(\mathbf{x}, t) = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \psi(\mathbf{x}, t)$$

* Für ein freies Teilchen mit Masse in der Ortsdarstellung

Kopenhagener Deutung

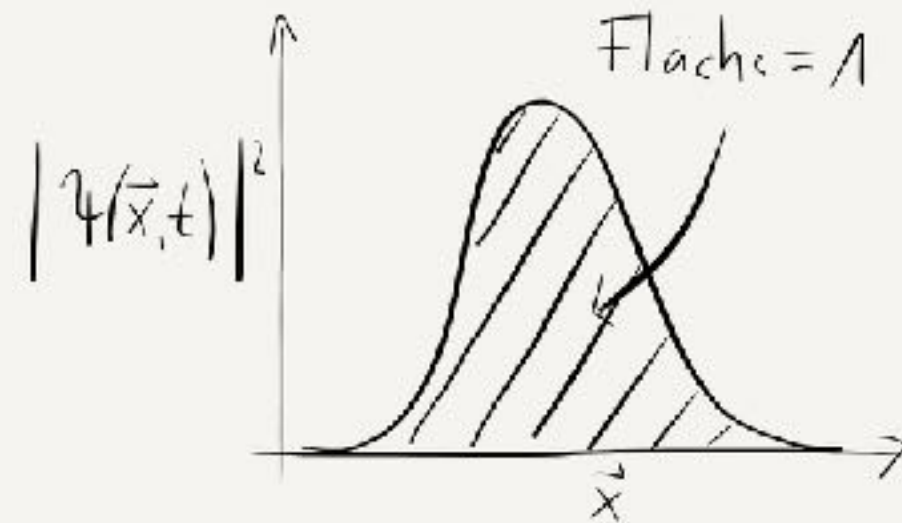
Born'sche Wahrscheinlichkeit

$$|\psi(\mathbf{x}, t)|^2$$

- Das Betragsquadrat der Wellenfunktion liefert die **Wahrscheinlichkeit**, bei einem Experiment ein Ergebnis zu messen, z.B. den Ort eines Lichtteilchens.

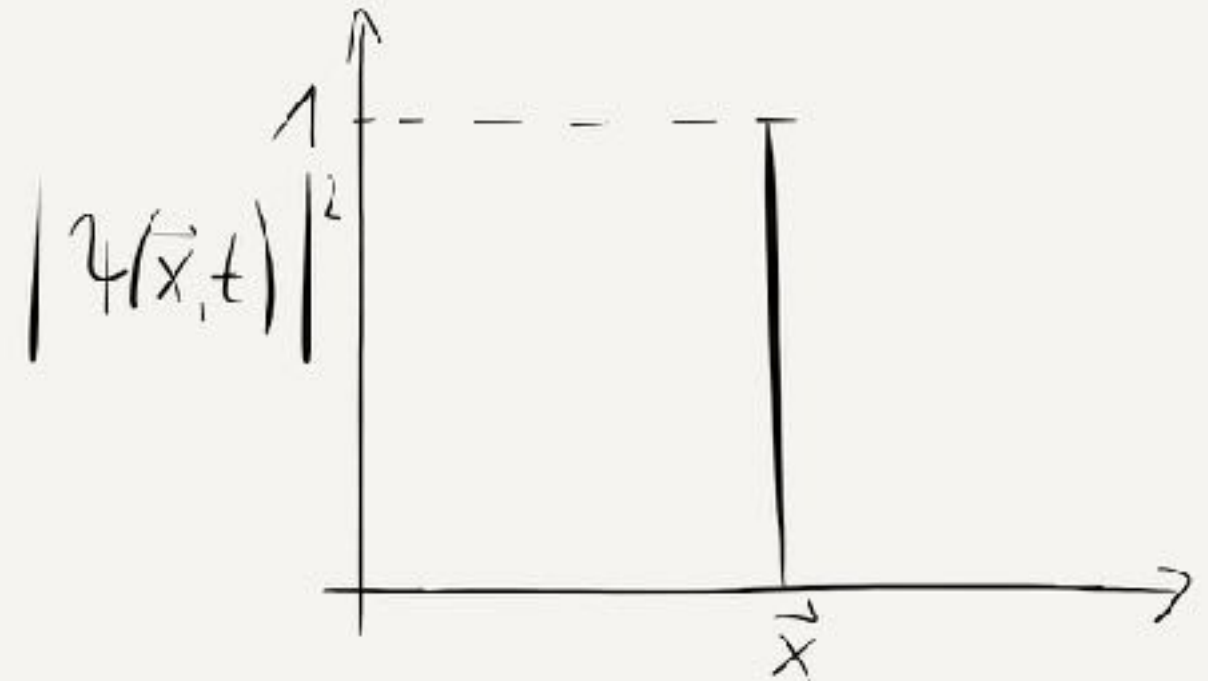
Normierung

$$\int d^3x |\psi(\mathbf{x}, t)|^2 = 1$$



Kopenhagener Deutung Kollaps der Wellenfunktion

- Die **Messung** führt zum **Kollaps der Wellenfunktion** und es bleibt nur ein einzelnes, Teilchen-ähnliches Ergebnis übrig.



Kopenhagener Deutung der Quantenmechanik

- Das quantenmechanische System wird durch die **Wellenfunktion** beschrieben.
- Sie ist nicht direkt messbar und ist kein „Objekt“ (Welle oder Teilchen) in normalen Sinn.
- Die Quantenmechanik liefert die mathematischen Werkzeuge um zu berechnen, wie sich die Wellenfunktion in einem Experiment „bewegt“, d.h. zeitlich entwickelt: **Schrödinger-Gleichung**

Wellenfunktion

$$\psi(\mathbf{x}, t)$$

Schrödinger-Gleichung

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(\mathbf{x}, t) = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \psi(\mathbf{x}, t)$$

- Das Betragsquadrat der Wellenfunktion liefert die **Wahrscheinlichkeit**, bei einem Experiment ein Ergebnis zu messen, z.B. den Ort eines Lichtteilchens.
- Die **Messung** führt zum Kollaps der Wellenfunktion und es bleibt nur ein einzelnes, Teilchen-ähnliches Ergebnis übrig.

Wahrscheinlichkeit

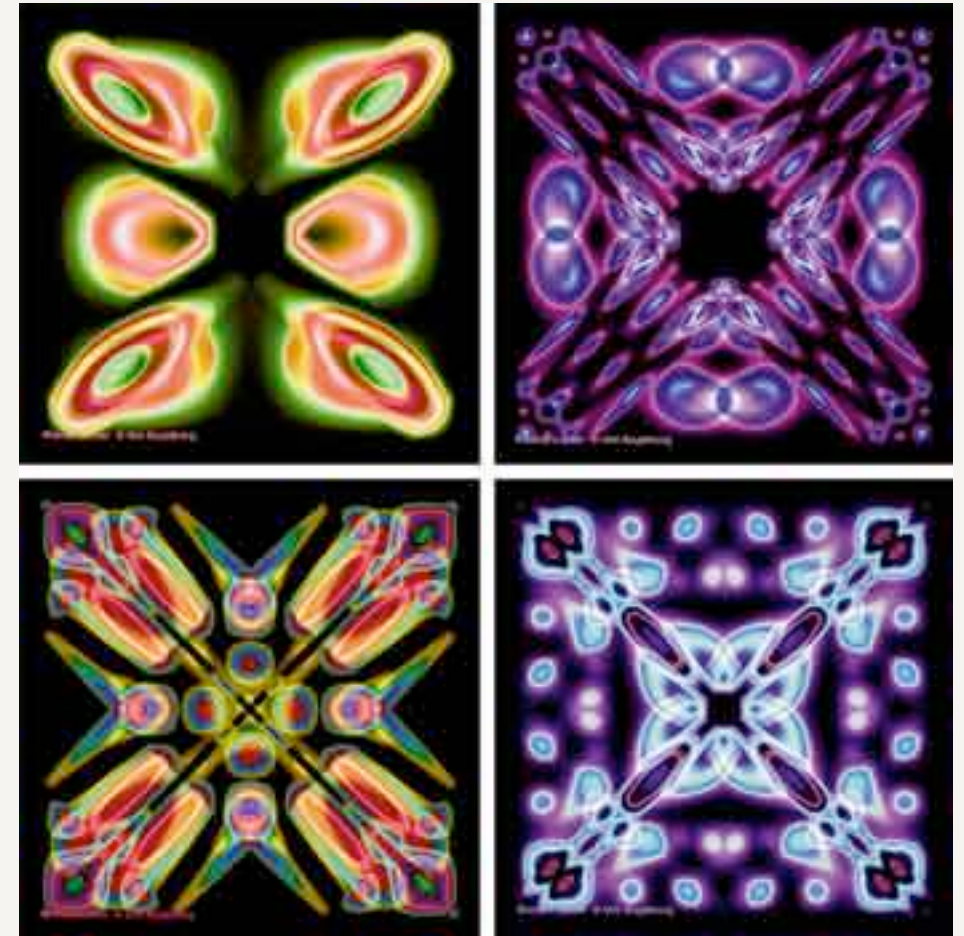
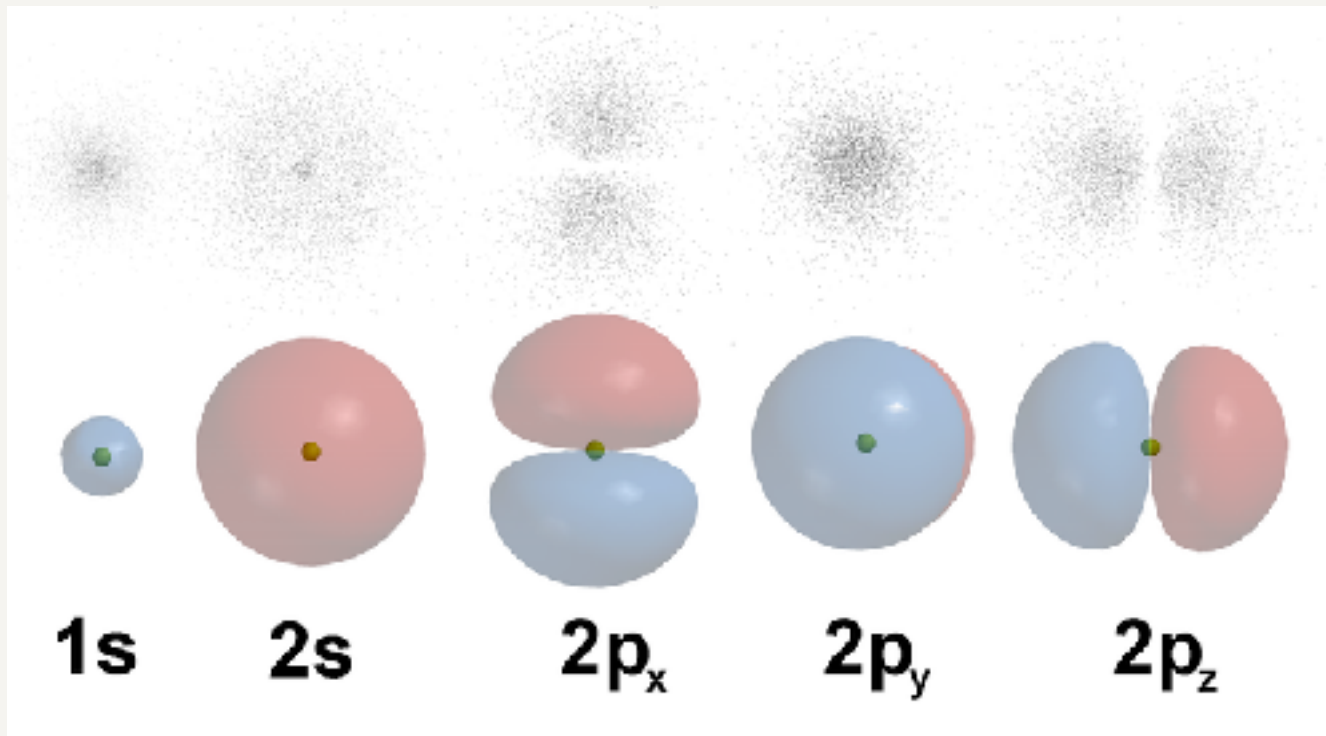
$$|\psi(\mathbf{x}, t)|^2$$

Kopenhagener Deutung der Quantenmechanik

Klassische Vorstellungen müssen aufgegeben werden:

- ▶ Teilchenbahn
- ▶ Keine Vorhersage für ein Einzelexperiment
- ▶ Nur statistische Aussagen für viele Wiederholungen
- ▶ Die Wellenfunktion ist eine Beschreibung der **Möglichkeiten**, nicht der Tatsachen.
- ▶ Der Beobachter wechselwirkt mit dem Ergebnis elementar, und das kann prinzipiell nicht vermieden werden.

Wellenfunktionen



<http://www.nature.com/nphys/journal/v4/n2/abs/nphys813.html>

Welle-Teilchen-Dualismus

Alles ist gleichzeitig Welle und Teilchen.

Alles

Materiewellen

$$\mathbf{p} = \hbar \mathbf{k} = \frac{h}{\lambda}$$

$$\Rightarrow \lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

- **de Broglie**, 1922: Wenn Wellen Teilchen sind, muss das auch umgekehrt gelten.
- Photonen, Elektronen, Elementarteilchen
- Aber auch daraus zusammengesetzte Teilchen: Atome und Moleküle
- Also: alles



Aussprache: http://de.forvo.com/word/louis-victor_de_broglie/

Alles

- **de Broglie**, 1922: Wenn Wellen Teilchen sind, muss das auch umgekehrt gelten.
- Photonen, Elektronen, Elementarteilchen
- Aber auch daraus zusammengesetzte Teilchen: Atome und Moleküle
- Also: alles

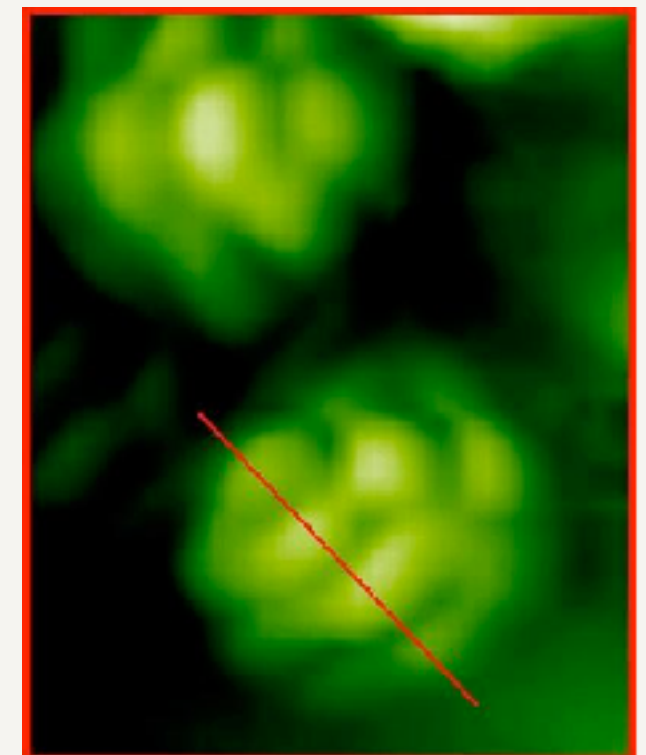
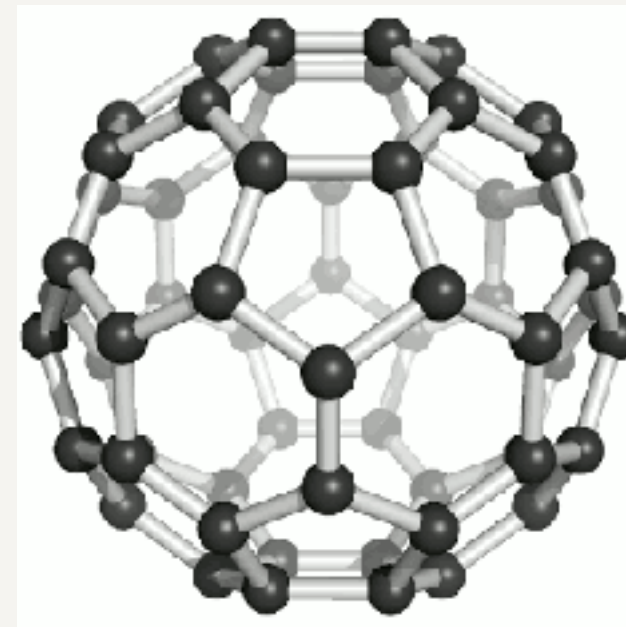


Aussprache: http://de.forvo.com/word/louis-victor_de_broglie/

Wo ist die Grenze?

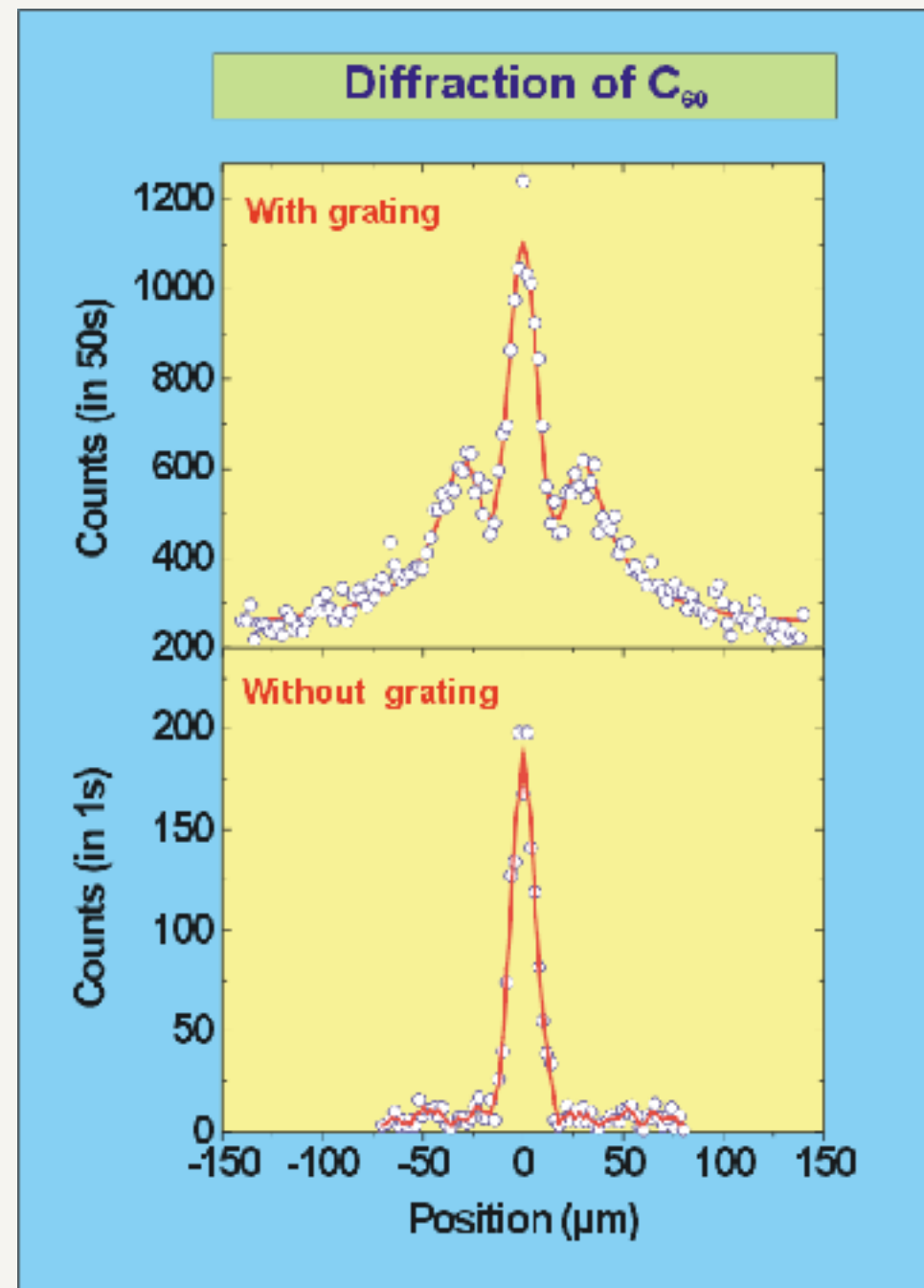
Molekül-Interferenz

- **Zeilinger** und **Arndt**, 1999:
Fullerene
- 60 Kohlenstoffatome mit
Masse 720 u.
- ca. 1 nm groß
- Erzeugt Wärmestrahlung
wie ein großer Körper



<http://www.quantenphysik-schule.de/fullerene.htm>

Molekül-Interferenz



<http://www.univie.ac.at/qfp/research/matterwave/c60/index.html>

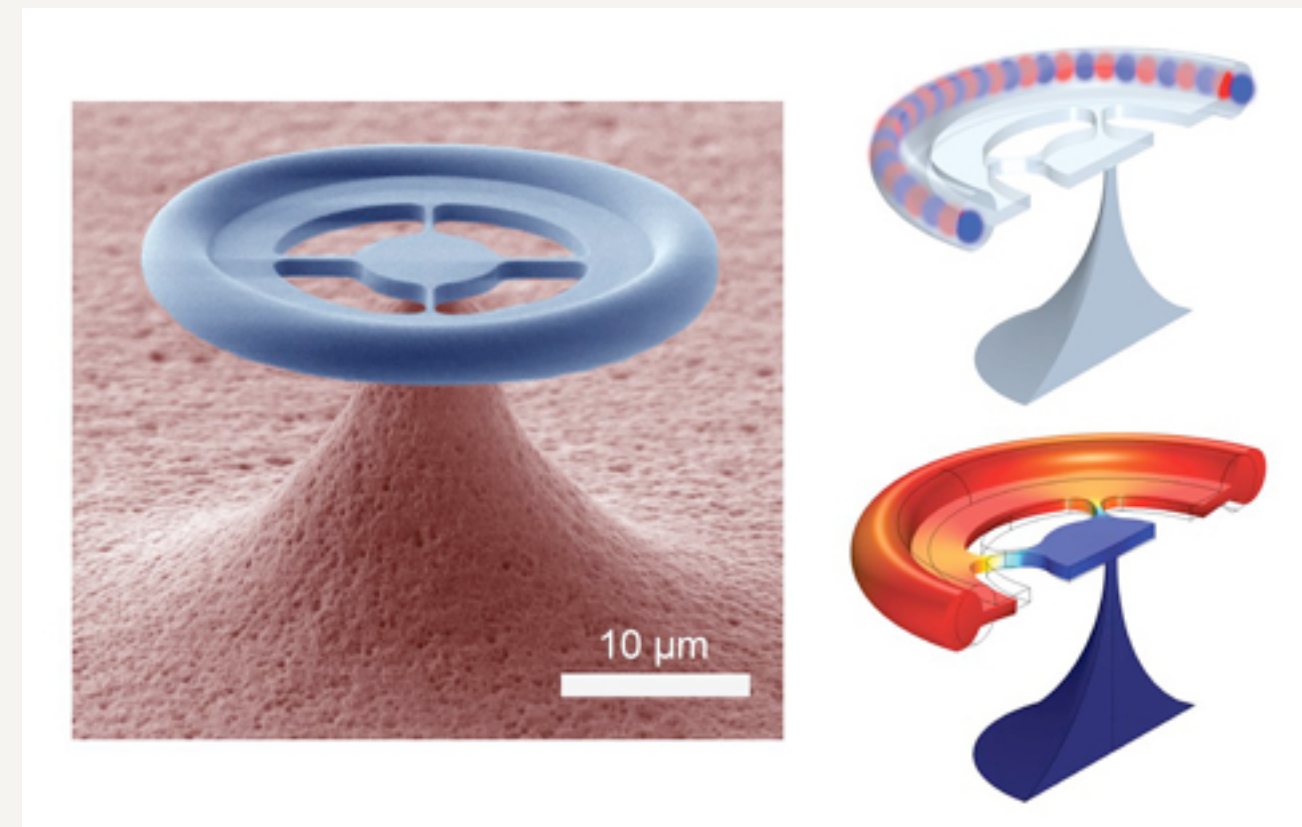
Wo ist die Grenze?



<http://homepage.univie.ac.at/Markus.Arndt/>

Wo ist die Grenze?

- Diese mit dem bloßen Auge sichtbare Objekt ist in einen quantenmechanischen Überlagerungszustand gebracht worden.



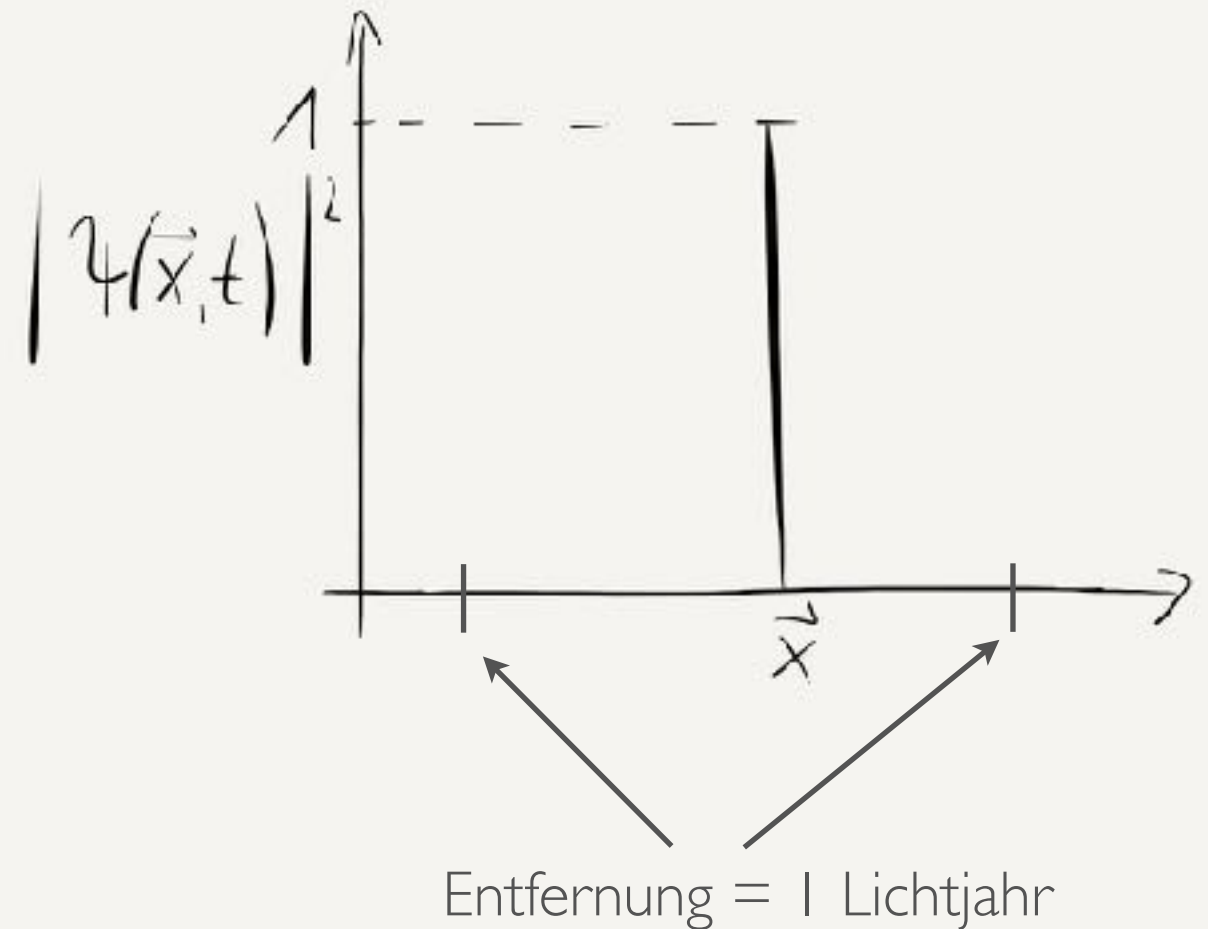
E.Verhagen*, S. Deléglise*, S. Weis*, A. Schliesser* and T.J. Kippenberg
"Quantum-coherent coupling of a mechanical oscillator to an optical cavity mode"
[Nature 482, 63-67](#)

Welle-Teilchen-Dualismus

Alles ist **gleichzeitig** Welle und Teilchen.

Kollaps der Wellenfunktion

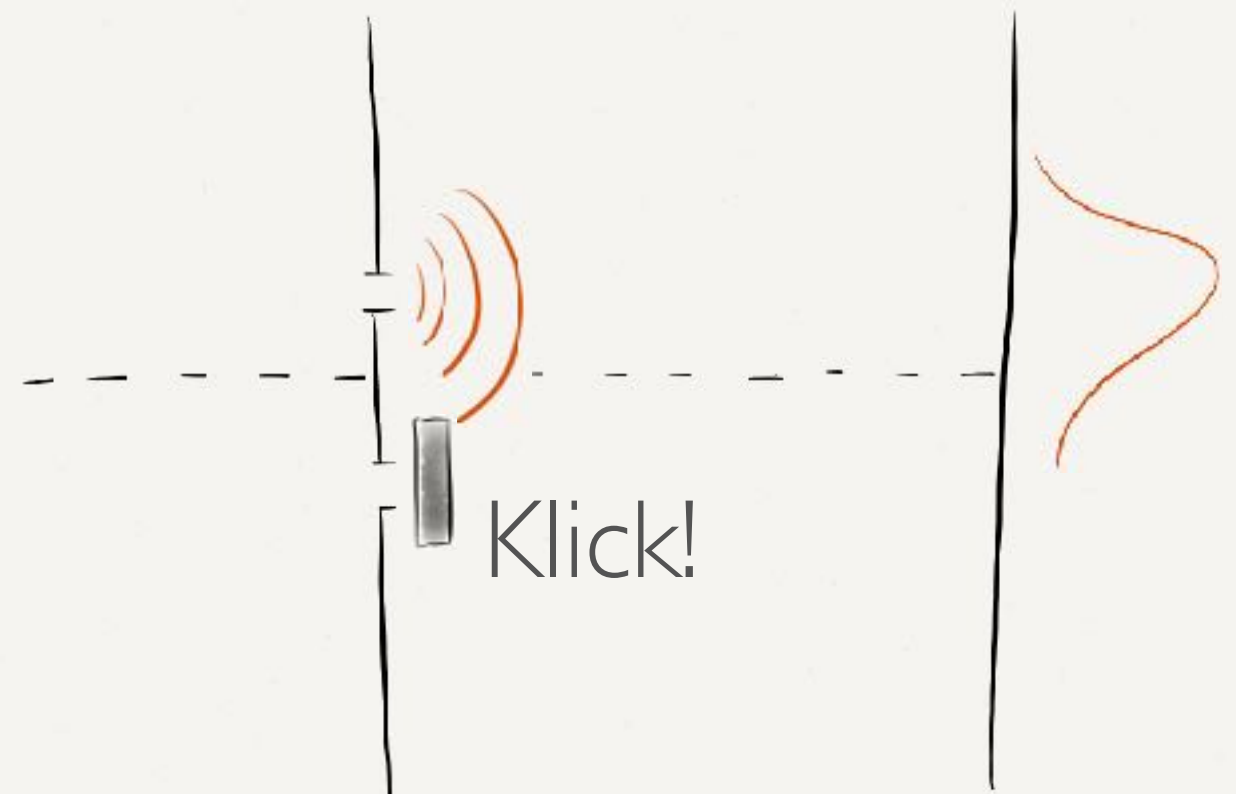
- Der Kollaps ist ohne zeitlichen Verlauf, d.h. instantan.
- Wie kann es sein, dass zwei ganz weit entfernte Orte gleichzeitig in Frage kommen, dass dort **ein** Teilchen auftaucht?
- Wie wird aus einer Möglichkeit eine Tatsache?



Welcher Weg?

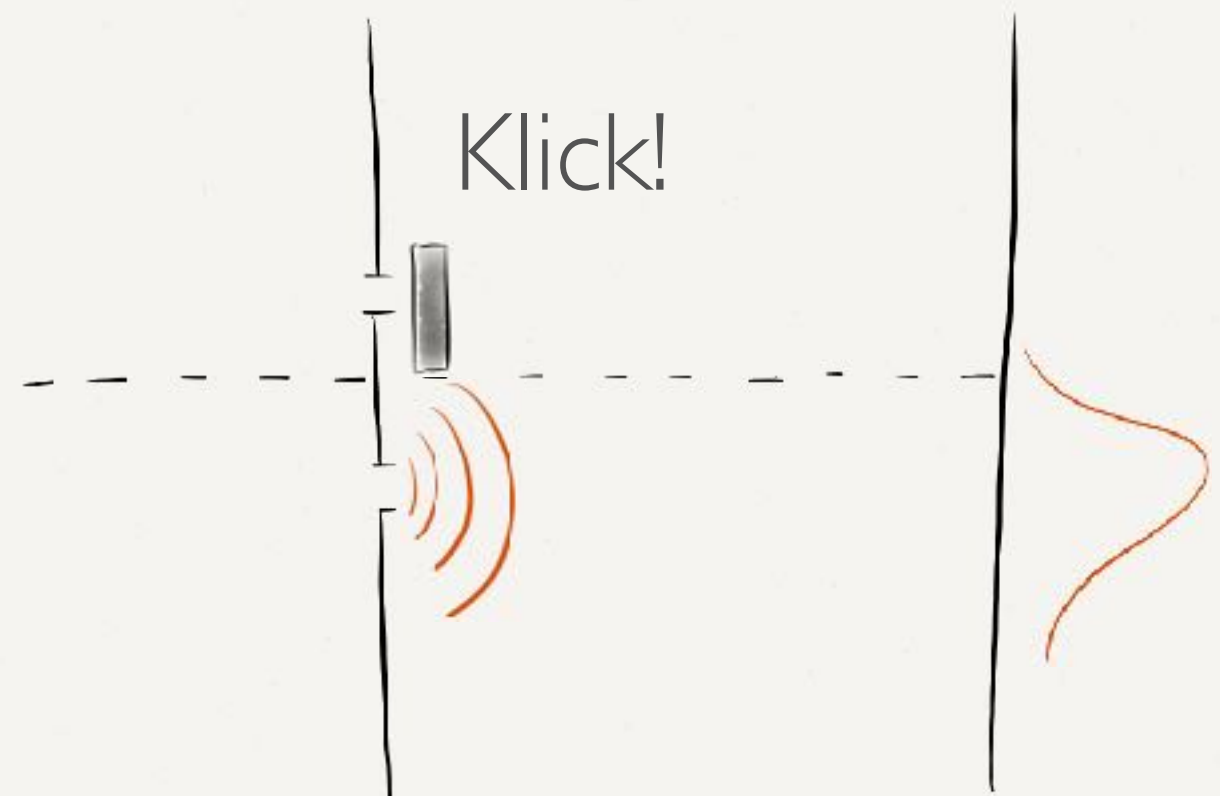
Einfluss der Beobachtung Welcher Weg?

- Messapparat beeinflusst zwingend das Messergebnis, ja sogar ob Welle- oder Teilcheneigenschaften beobachtet werden können.
- Teilchen teilt sich auf?

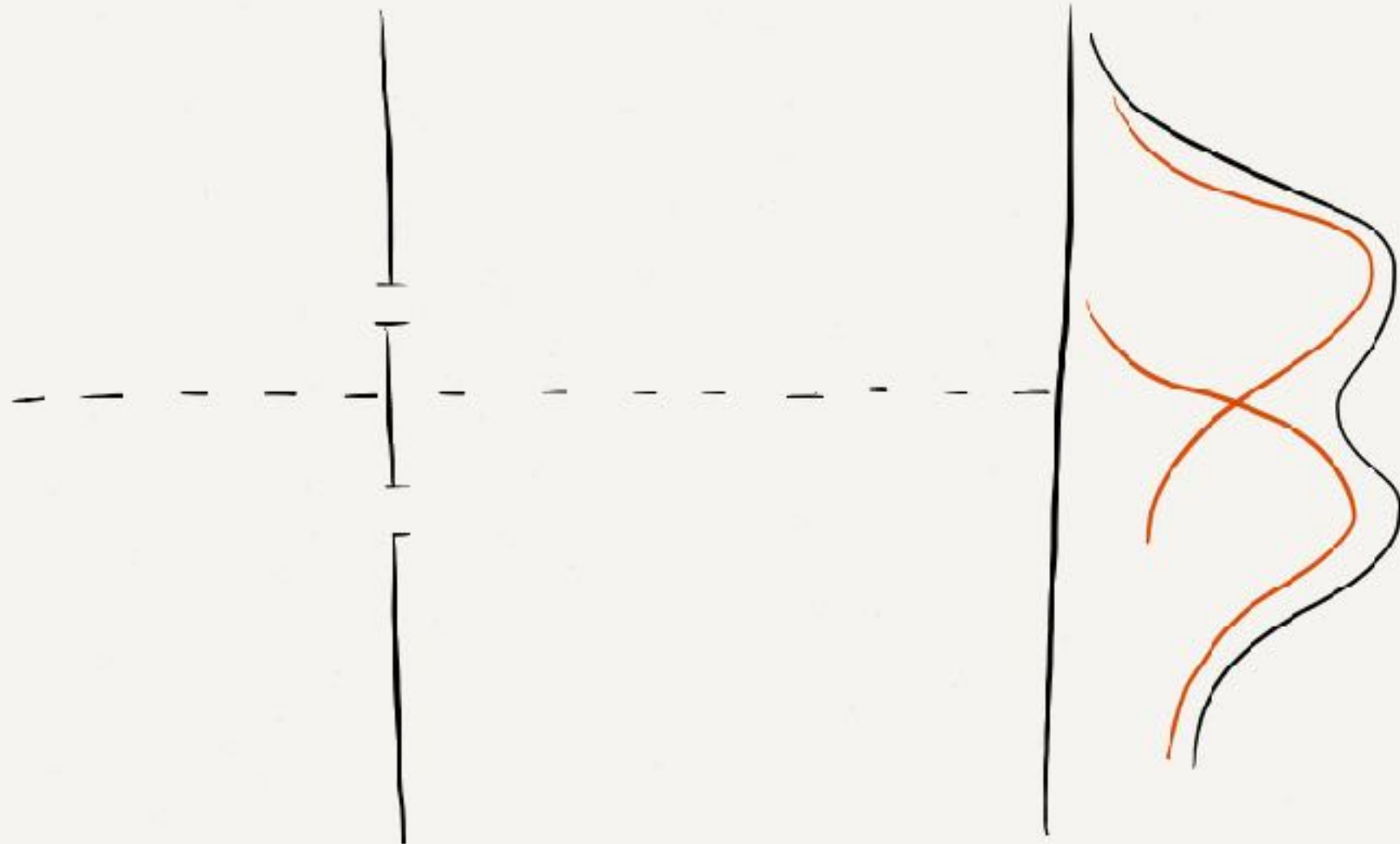


Einfluss der Beobachtung Welcher Weg?

- Messapparat beeinflusst zwingend das Messergebnis, ja sogar ob Welle- oder Teilcheneigenschaften beobachtet werden können.
- Teilchen teilt sich auf?



Einfluss der Beobachtung Welcher Weg?



Nacheinander geöffnet:
keine Interferenz!

Heisenberg'sche Unschärferelation

- Von einem Teilchen kann nicht gleichzeitig der Ort und Impuls mit beliebiger Genauigkeit bestimmt werden.
- Schärfer formuliert: es gibt keine und kann keine Wellenfunktion geben, die diese Relation verletzt.
- **Es ist also nicht die Unfähigkeit zu messen, sondern das System ist prinzipiell gar nicht bestimmt!**

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$