



Würzburger Quantenphysik-Konzept

WQPK:

Würzburger Quantenphysik- Konzept

www.forphys.de

Didaktisches Konzept zur Quantenphysik an der Schule

Bild

Grundfakten

A1 Un-be-stimmtheit

- Ein Q-Obj. ist Träger („hat“) einiger weniger unveränderlicher Eigenschaften, wie z.B. Ladung, Ruhemasse, Spin
- Die meisten „klassisch denkbaren Eigenschaften“ eines QO sind ohne eine Messung **un-be-stimmt**.
- Ein QO „hat“ dann diese Eigenschaften nicht.
 - **Beispiel:** Polarisation bzgl. einer bestimmten Richtung

A2 Be-stimmtheit

- Eine Messung liefert einen **be-stimmten** Messwert.
 - a) Wenn zuvor Eigenschaft **un-be-stimmt** war => streuende Messwerte.
=> **Objektiver Zufall** => **Statistische Deutung (Ensemble)**
 - b) In jedem Fall „hat“ das QO nach der Messung diese Eigenschaft.
- Die Messung ist **reproduzierbar**.
- [Evtl. diskrete Messwerte („Eigenwerte“).]

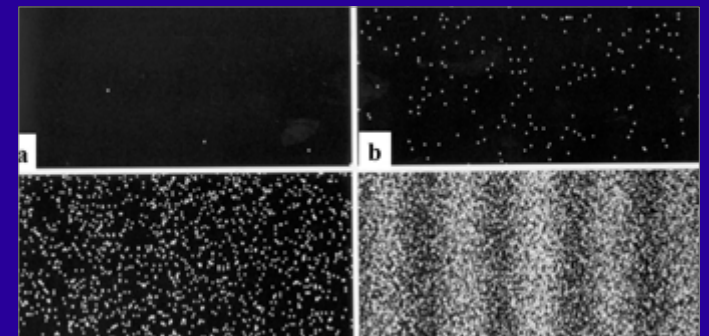
B Komplementarität

- Es gibt Paare von klassisch denkbaren Eigenschaften, die nicht gleichzeitig bestimmt sein können.
- Empirische Beispiele:
 - Ort – Impuls / Gesamtenergie – kin. Energie / kin. - pot. Energie /
 $E_x - E_y / E_x - B_x$ / Teilchenzahl – Phase bei elm. Welle
- => Heisenberg'sche Unbestimmtheitsrelation für Streuungen in einem bestimmten Zustand
- Messung macht Vorgänger ungültig
- „Störung durch Messung“: vor allem wegen Übergang unbestimmt => bestimmt

C Interferenz

„Interferenz findet statt, wenn zwischen zwei oder mehr Eigenschaften/Möglichkeiten **nicht entschieden** wird“ (Küblbeck/Müller)

- **Beispiele: (Doppelspalt, Potenzialkasten, Ramsay-Interferometer, ...)**
- **Einteilchen-Interferenz im Unterschied zur Wellen-Interferenz**
- **„Interferenz der Möglichkeiten“**



D1 WWI und Interferenz

- **Auch Ort/Weg und Interferenzfähigkeit sind komplementär zueinander.**
- **Welcher-Weg-Information und Interferenz schließen sich gegenseitig aus.**
- **Beispiele: Doppelspalt-Versuch**
 - „mit Störung“ („Elektronenbeleuchtung“)
 - „ohne Störung“ (Scully und Englert)

Es liegt an der „Quantennatur“ !

(D2 WWI und Interferenz)

- **Gibt es einen „Mechanismus“ für die Einteilchen-Interferenz - wie bei der Wellen-Interferenz?**
Geschieht „etwas“ dabei am Ort des Doppelspalts? Oder Folge der „Quantennatur“?
- **Wheeler: Exp. mit „verzögerter Entscheidung“ (delayed choice) zeigen:**
 - **Entscheidung kann lange nach dem Durchtritt, sogar nach Registrierung der Messwerte, getroffen werden.**
 - **= > Folge der Fragestellung / „Quantennatur“**
 - **Obwohl man Einteilchen-Interferenz durch Wellen-(funktionen) beschreiben kann, sind diese nicht die Ursache der Interferenz.**

F1 Revision des Teilchen-Begriffs

- **Auch die Teilchen-Zahl ist eine klassisch denkbare Eigenschaft, die bestimmt oder un-bestimmt sein kann!**
- **QTh:** „Teilchen = Eigenzustand des Teilchenzahl-Operators mit Eigenwert 1, ...“
- **Schule:** „(Quanten-)Teilchen, -Zwillinge, ... sind abzählbare Q-Objekte“

Einzig definierende Eigenschaft: Teilchenzahl

F1a Revision des Teilchen-Begriffs

Einzige definierende Eigenschaft: Teilchenzahl

Nicht – wie bei klassischen Teilchen:

- Ort und/oder Geschwindigkeit
- Lokalisierung („Kompaktheit“)
- (ohne Messung kein Ort !)

F1b Revision des Teilchen-Begriffs

- a) Teilchenzahl **be-stimmt**: „Teilchen-Zustände“ (Fock-Zustände)
 - Teilchen-Zahl = 1 : (Quanten-)Teilchen
 - Elektron, Photon, Atom, ... ist in diesem Sinn **eindeutig Teilchen**, aber kein klass. T.
 - (Quanten-)Teilchen ist Träger einiger weniger unveränderlicher Eigenschaften, z.B.
- Teilchen-Zahl = 2 : Teilchen-Zwilling (Biphoton, ...), wenn „verschränkt“:
 - Komponenten von Teilchen-Zwillingen haben ohne Messung keine Individualität
 - => EPR-Paradoxon löst sich in Nichts auf („Fernwirkungslosigkeit“)

F2 Revision des Teilchen-Begriffs

- **b) Teilchenzahl un-be-stimmt:** „kohärente Zustände“ (Glauber-Zustände)
 - Enger Zusammenhang mit klassischen elm. Wellen im Anschauungsraum!
 - Übergang zur makroskopischen Physik ist hier verstanden.
 - Teilchenzahl mit Poisson-Verteilung: Keine Einzel-Photonen durch Abschwächung eines Laserstrahls !

Entscheidender Gegensatz nicht Welle/Teilchen, sondern be-stimmt/un-be-stimmt!
Schrödingers Wellen – eine reine Teilchen-Theorie?

F3 Revision des Teilchen-Begriffs

- **Teilchen,**
- **Teilchenzwillinge,**
- **...**
- **Vielteilchen-Zustände,**
- **...**
- **Zustände mit un-be-stimmter Teilchenzahl**

Oberbegriff “Quantenobjekte“

- **Besteht alle Materie immer aus individuellen Teilchen (z.B. Atomen) ?**
- **Holismus / Reduktionismus ?**

G Übergang zur klassischen Physik

Jetzt teilweise verstanden!

- **Große Masse** => kleine deBroglie-Wellenlänge
- **Hohe Quantenzahlen** (Korrespondenz-Prinzip)
- **Ehrenfest-Theorem** („Erwartungswerte verhalten sich häufig klassisch“)
- **Glauber-Zustände** (Zustände mit un-be-stimmter Teilchenzahl bei Bosonen, z.B. Lasermode): Streuung von Teilchenzahl, Amplitude u. Phase
 - a) **haben klassische Erwartungswerte**, z.B. für $E(x,t)$ und $B(x,t)$.
 - b) **Bei sehr hoher mittlerer Teilchenzahl** machen sich Abweichungen vom Erwartungswert (Streuungen) kaum bemerkbar
=> **klassische elm. Welle im Anschauungsraum**
- **Dekohärenz**

Weitere Charakteristika:

- **WTD nicht diskutiert**
- **Einteilchen-Interferenz / Wellen-Interferenz: Wellen in QP d. Schule weitgehend „überflüssig“**
- **Wellen nicht notwendig zur Erklärung von „Unschärfen“ (Komplementarität!)**
- **Statistische Deutung und HUR ganz natürlich**
- **SG erscheint für Schule weitgehend „überflüssig“.**
- **Wenig Rechentechniken notwendig, dennoch sogar Experimente der modernen Forschung mit den „Grundfakten“ qualitativ erklärbar**

Einfacher !

Das Lernsystem des WQPK

**Vorwiegend für
Lehrer:**

Unterrichtsmaterialien:

**Vorwiegend für Schülerinnen und
Schüler:**

Online-Lehrtext

Was Sie schon immer
über Quanten wissen
wollten

(Druckversion des Lehrtexts)

ISBN 978-3-8370-8714-7

Schulversuche zur Quantenphysik

(noch unvollständig)

Grundfakten der Quantenphysik

Weitere Online-Materialien
zur Quantenphysik

Schüleraktivierende Unterrichtsmaterialien zur Quantenphysik - Teil 1:

Auf dem Weg zur Quantenphysik

ISBN 978-3-8370-1320-7

Schüleraktivierende Unterrichtsmaterialien zur Quantenphysik - Teil 2:

Grundfakten der Quantenphysik
und Heuristische Methoden

ISBN 978-3-8370-0630-8

Schüleraktivierende Unterrichtsmaterialien zur Quantenphysik - Teil 3:

Grundlagen der Atomphysik

ISBN 978-3-8370-1321-4

Quantenphysik - Erstkontakt

ISBN 978-3-7347-5992-5

Grundlagen der Quantenphysik - Das Schülerbuch

ISBN 978-3-8423-4748-9

Online-Glossar zur Quantenphysik

Online: Wissenschaftliche Experimente zur Quantenphysik

Online: Texte für Schüler

- Ungewiss - Un-be-stimmt
- Wellen-Interferenz und Einteilchen-Interferenz
- Müssen wir die klassische Physik ganz vergessen?

Würzburger Quantenphysik-Konzept

A objektive Un-be-stimmtheit: Eine Messgröße erhält i.A. erst durch eine Messung einen physikalischen Sinn. Sonst ist die Messgröße un-be-stimmt.=> „Wahrscheinlichkeitsdeutung“

B Komplementarität (Nicht-Gleichzeitige-Messbarkeit): Nicht alle klassisch denkbaren Eigenschaften eines Systems sind *gleichzeitig* realisiert / haben *gleichzeitig* einen physikalischen Sinn / sind *gleichzeitig* messbar.

C Einteilchen-Interferenz ist die Interferenz von nicht unterschiedenen klassisch denkbaren Möglichkeiten.

D WWI und Interferenz sind komplementär

E HUR als Folge der Nicht-Gleichzeitigen-Messbarkeit **F Teilchenbegriff**

Würzburger Quantenphysik-Konzept

J. Küblbeck, R. Müller, Die Wesenszüge der Quantenphysik, Aulis Verlag Deubner, Köln, 2003/2006

E. Fick, Einführung in die Grundlagen der Quantentheorie, Akademische Verlagsgesellschaft, Frankfurt am Main, 1972

J.J. Sakurai, Modern quantum mechanics, Addison-Wesley, Redwood City, 1985

M. Le Bellac, Quantum Physics, Cambridge University Press, Cambridge, 2006

A. Zeilinger, Einsteins Schleier, Die neue Welt der Quantenphysik, Beck, München, 2003

R. Loudon, The quantum theory of light, Clarendon Press, Oxford, 2000

Münchener Internetprojekt zur Lehrerfortbildung in Quantenmechanik

(Milq) http://homepages.physik.uni-muenchen.de/~milq/milq_basiskursp01.html

<http://www.muthsam.de/doppelspalt.htm>

<http://milq.tu-bs.de/index.php/hinweise/downloads/118-simulationsprogramme-download.html>



Würzburger Quantenphysik-Konzept

Mehr unter

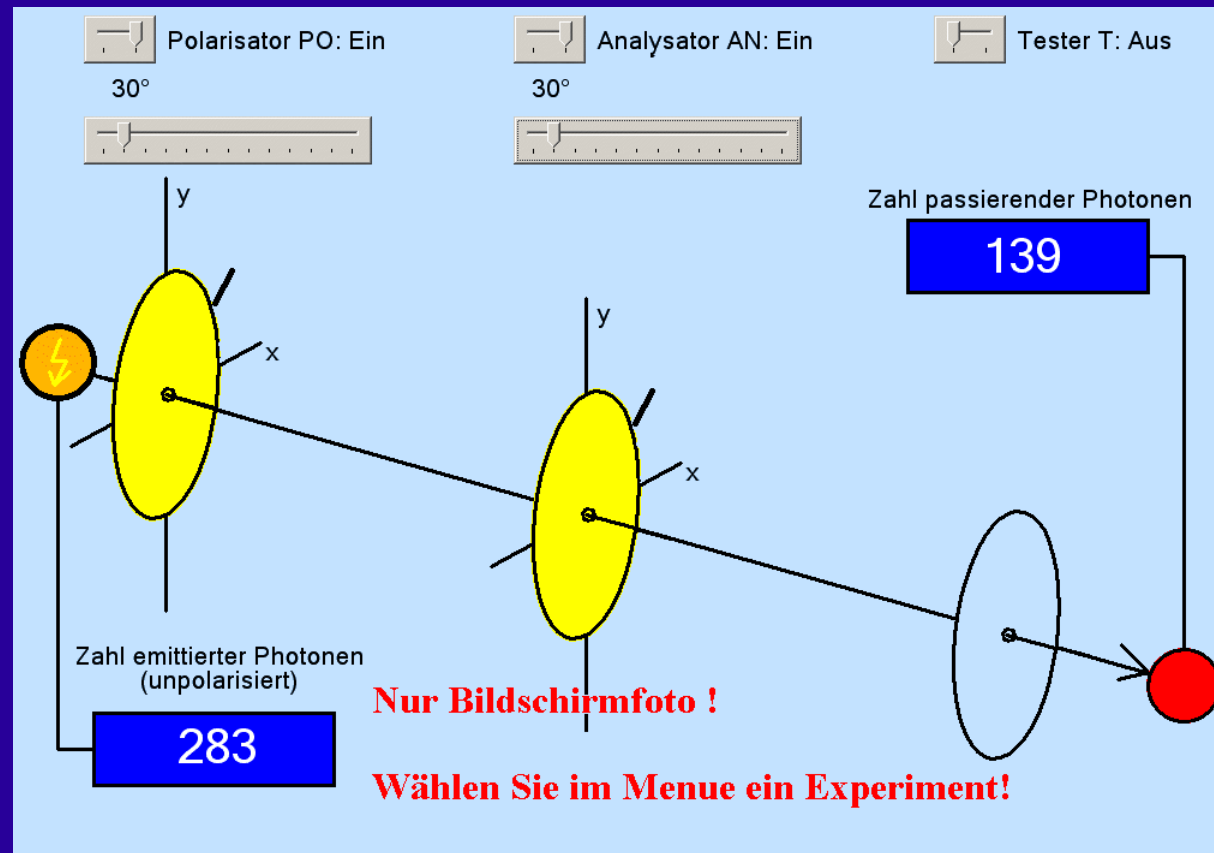
www.forphys.de

Vielen Dank!

Dort auch Text dieses Vortrags !

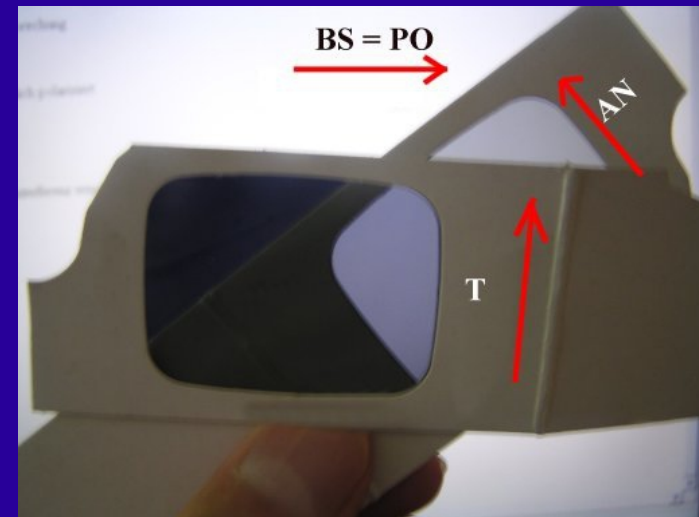
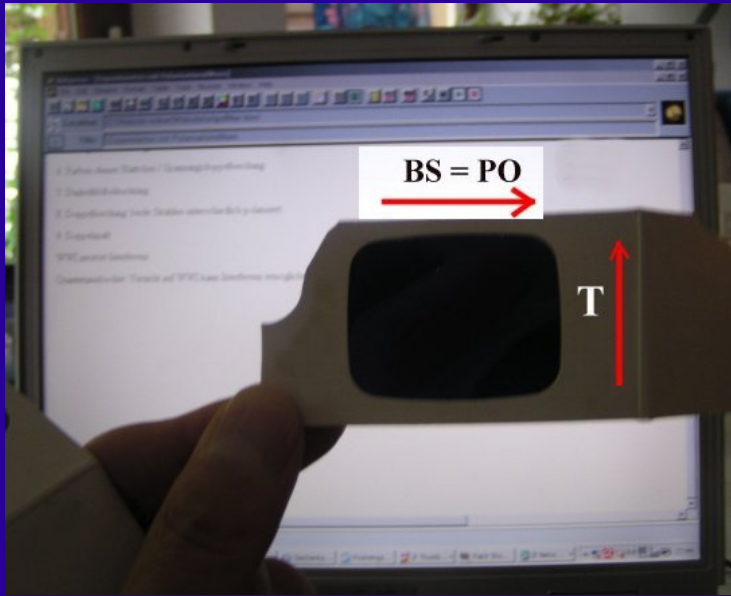
Würzburger Quantenphysik-Konzept

Simulierte Photonen-Experimente zu polarisierten Photonen



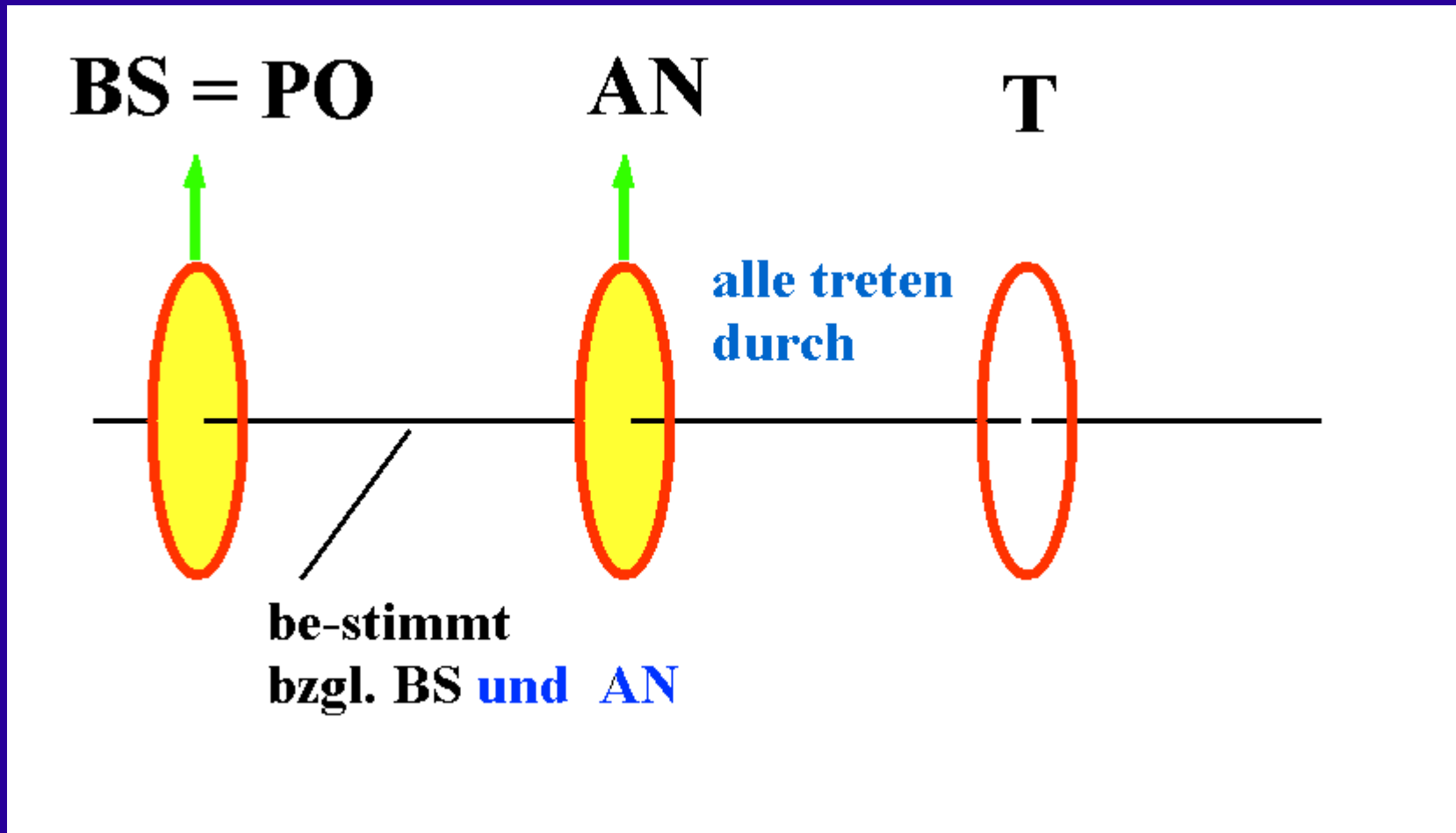
Würzburger Quantenphysik-Konzept

Ein Schülerversuch zu Un-be-stimmtheit, Reproduzierbarkeit einer quantenphysikalischen Messung, Komplementarität

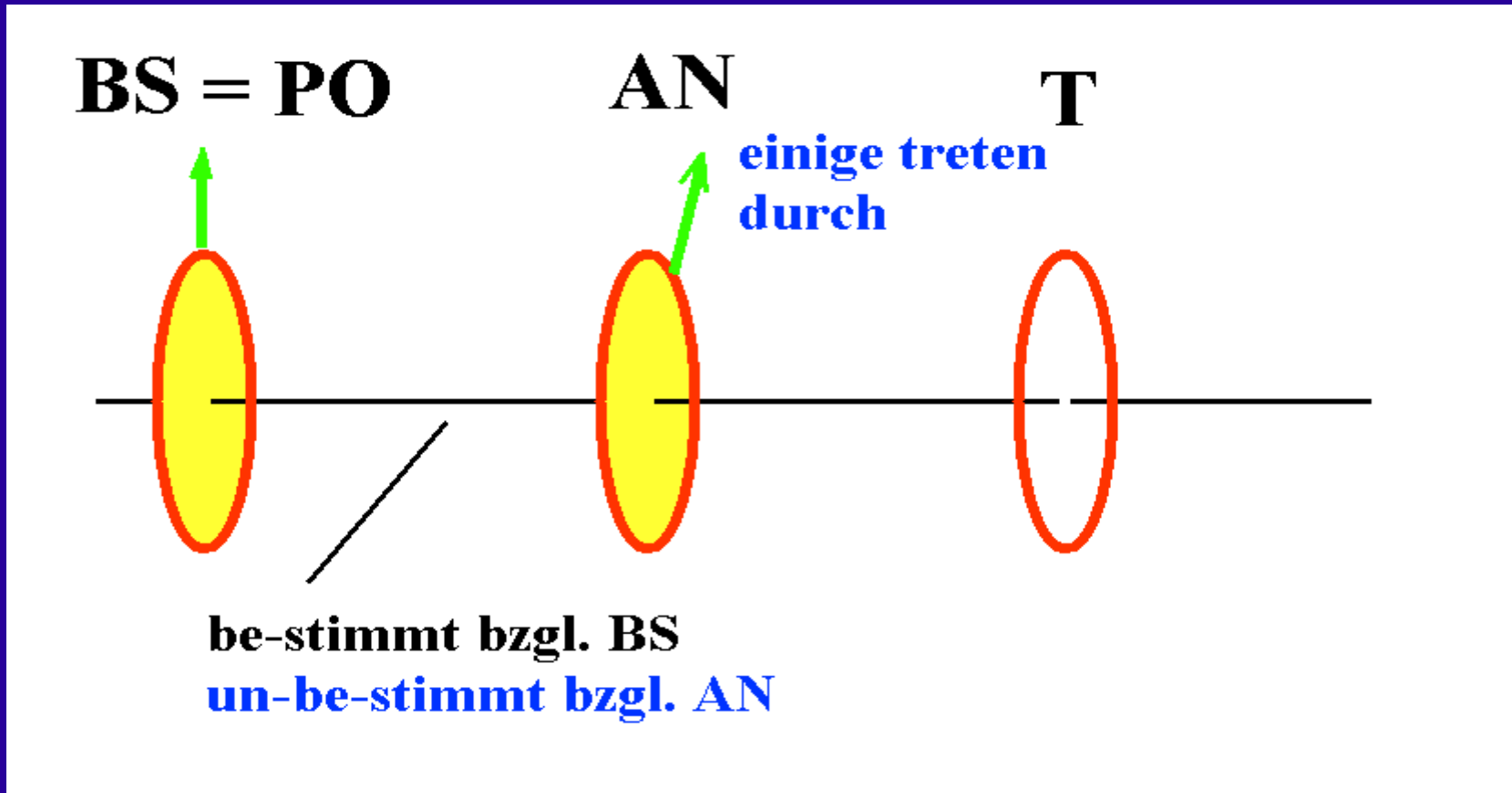


Kein Beweis! Nur Veranschaulichung!

Würzburger Quantenphysik-Konzept

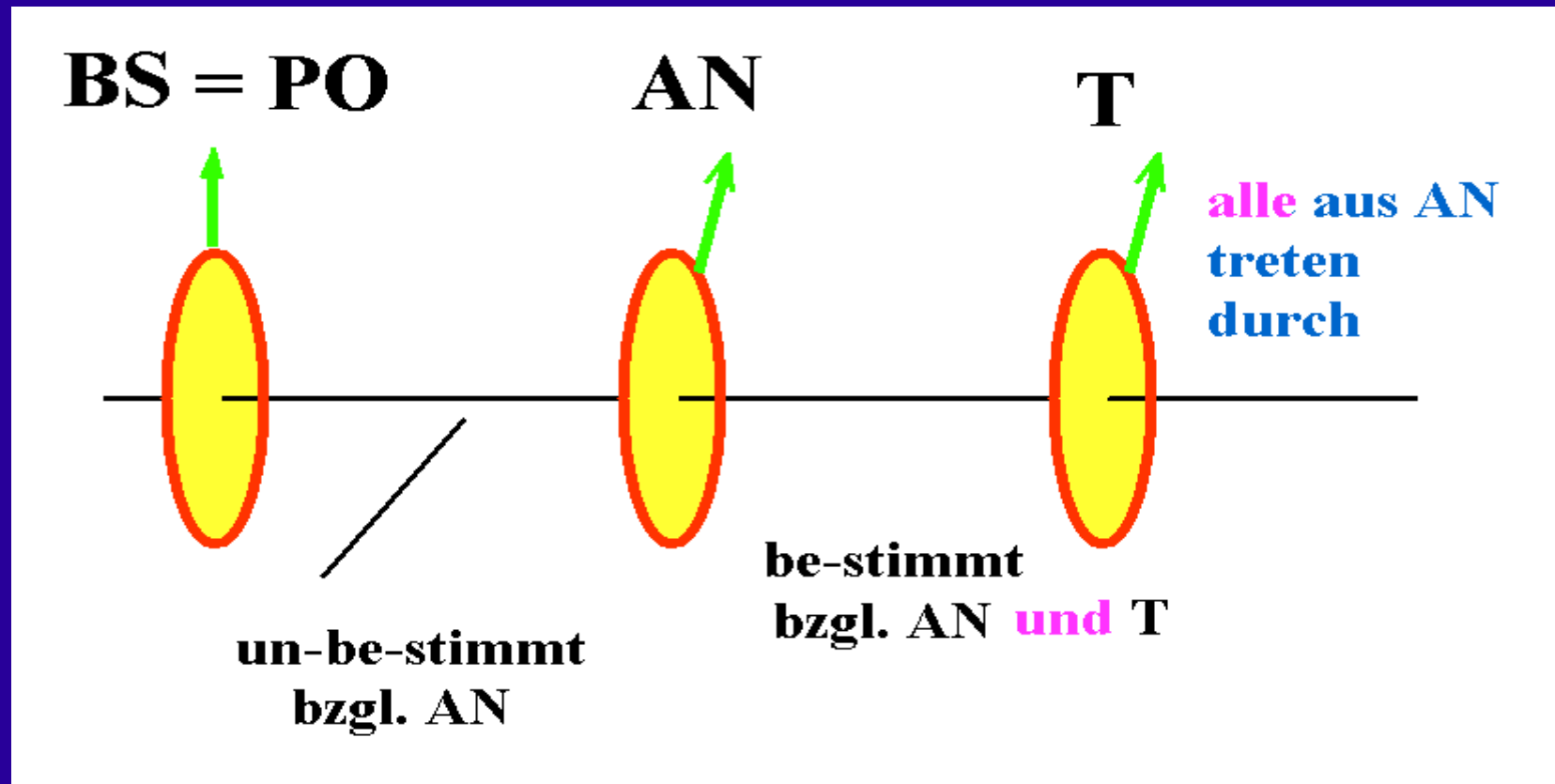


Würzburger Quantenphysik-Konzept



zurück

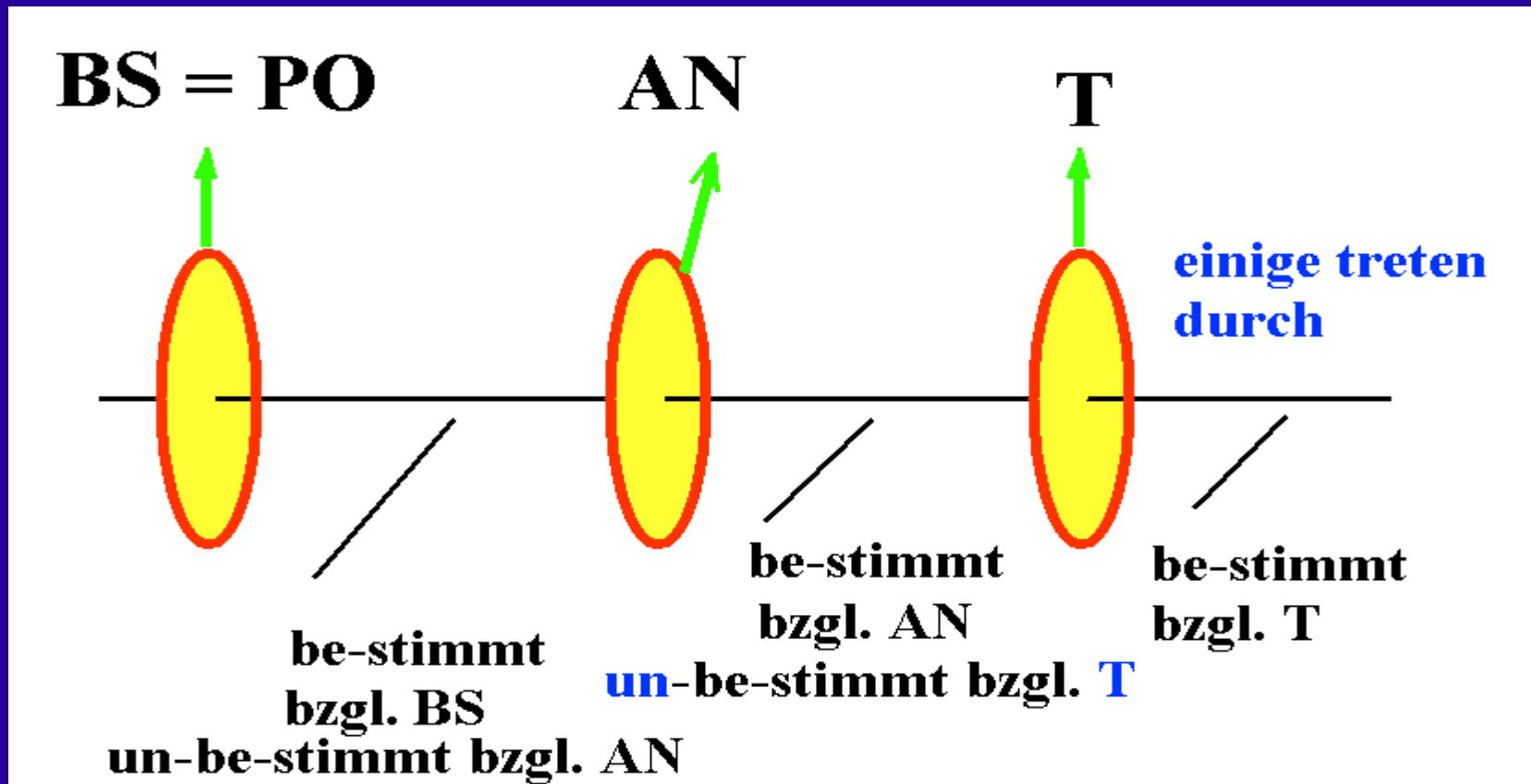
Würzburger Quantenphysik-Konzept



Messung reproduzierbar /

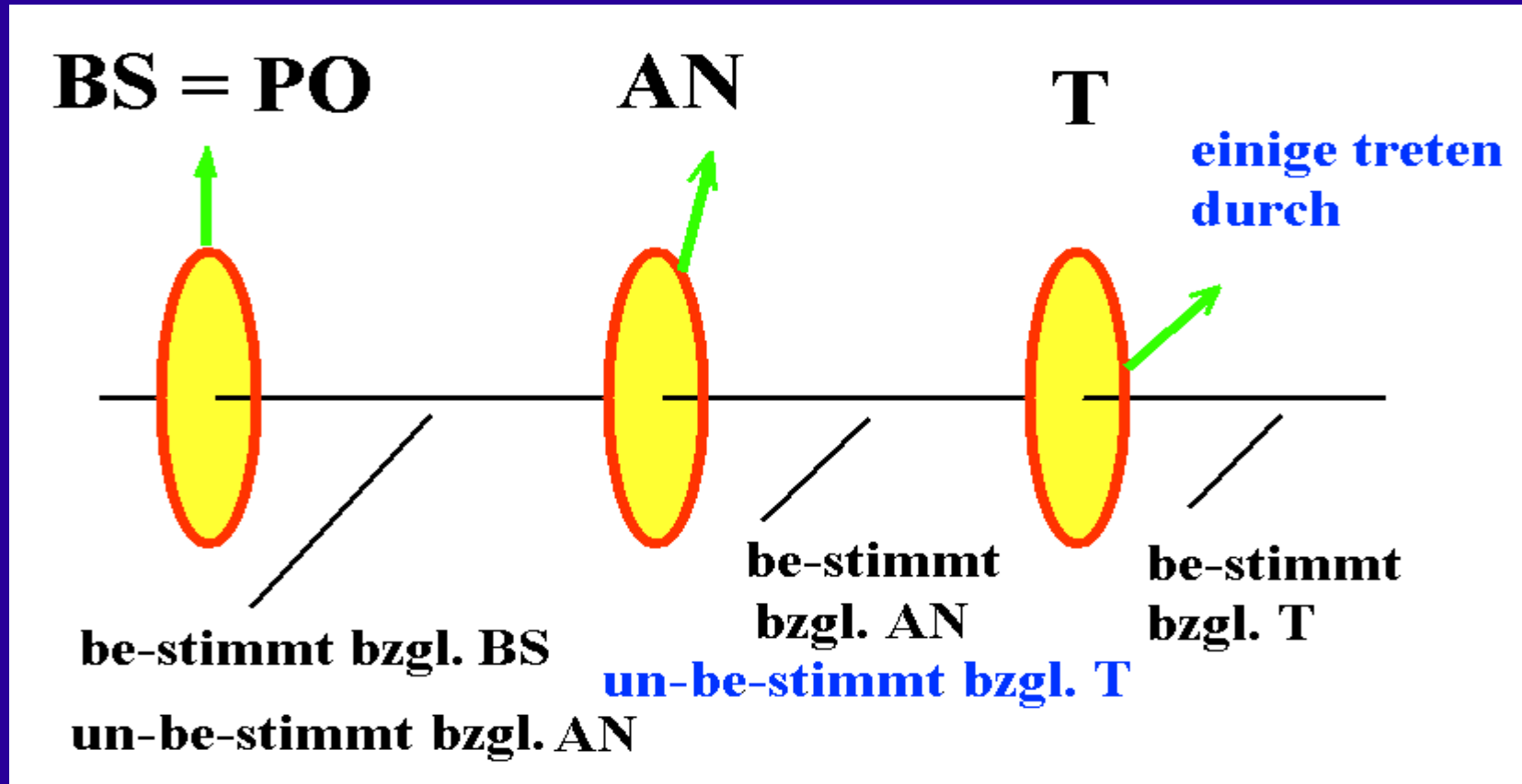
zurück

Würzburger Quantenphysik-Konzept



zurück

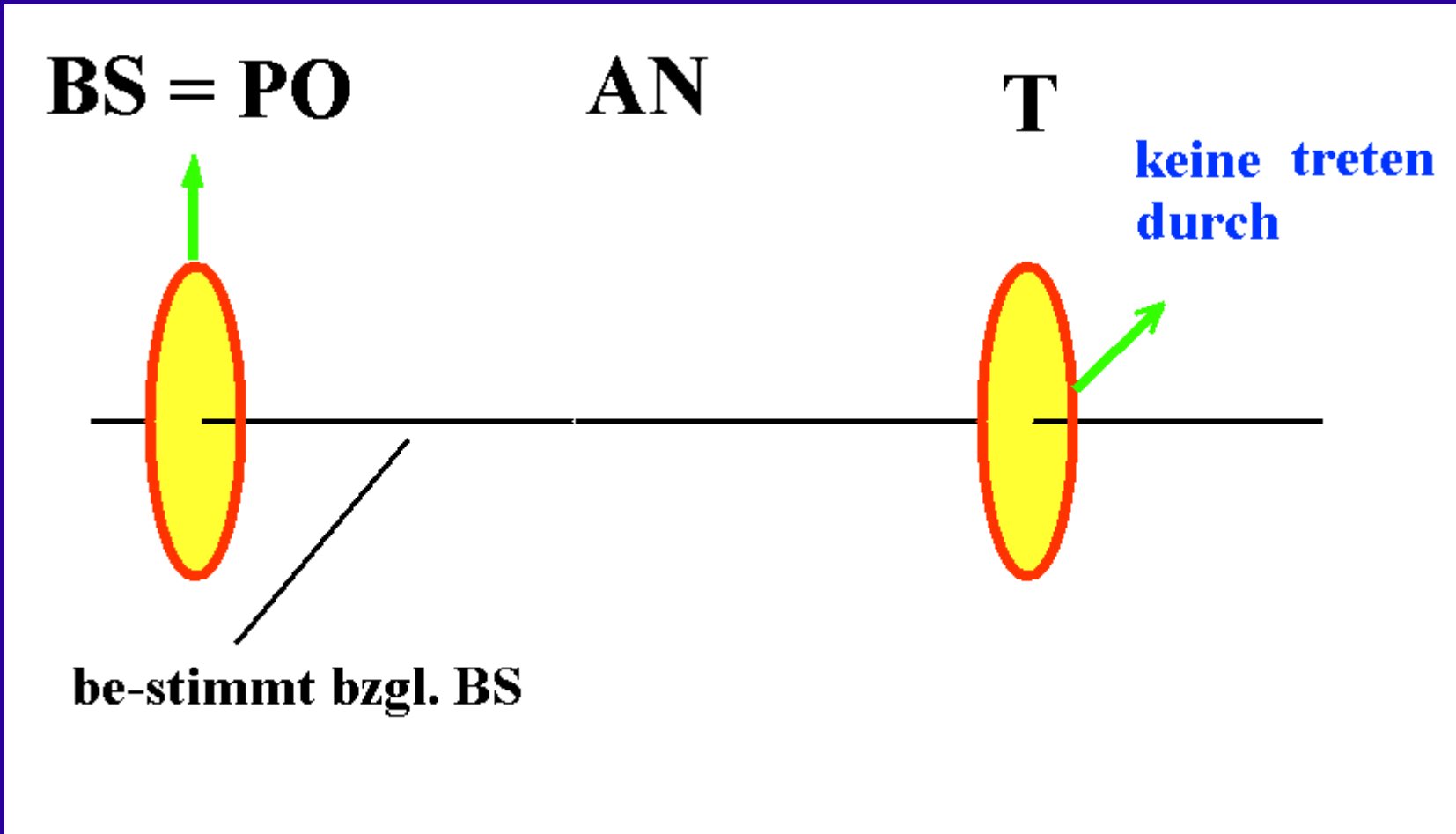
Würzburger Quantenphysik-Konzept



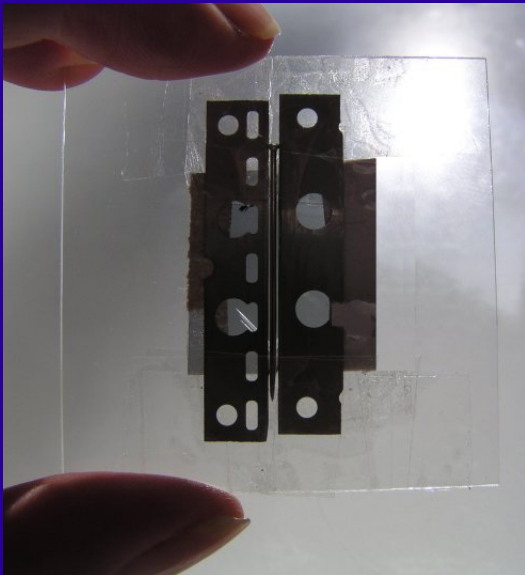
Komplementarität

Quantenradierer: Messung von AN macht Messung von PO ungültig

Würzburger Quantenphysik-Konzept



Der modifizierte Doppelspalt



- Je nach Einstellung eines nachfolgenden Polarisators: Entscheidung über Interferenzlänge nach Durchtritt durch Doppelspalt
- Kein Indiz für Wellen- oder Teilchen“charakter“

