



# Würzburger Quantenphysik-Konzept

WQPK:

# Würzburger Quantenphysik- Konzept

[www.forphys.de](http://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“). ]

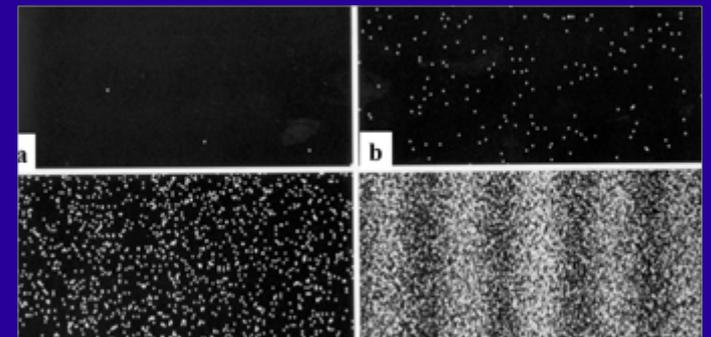
# B Komplementarität

- 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

**Einzig**e 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://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

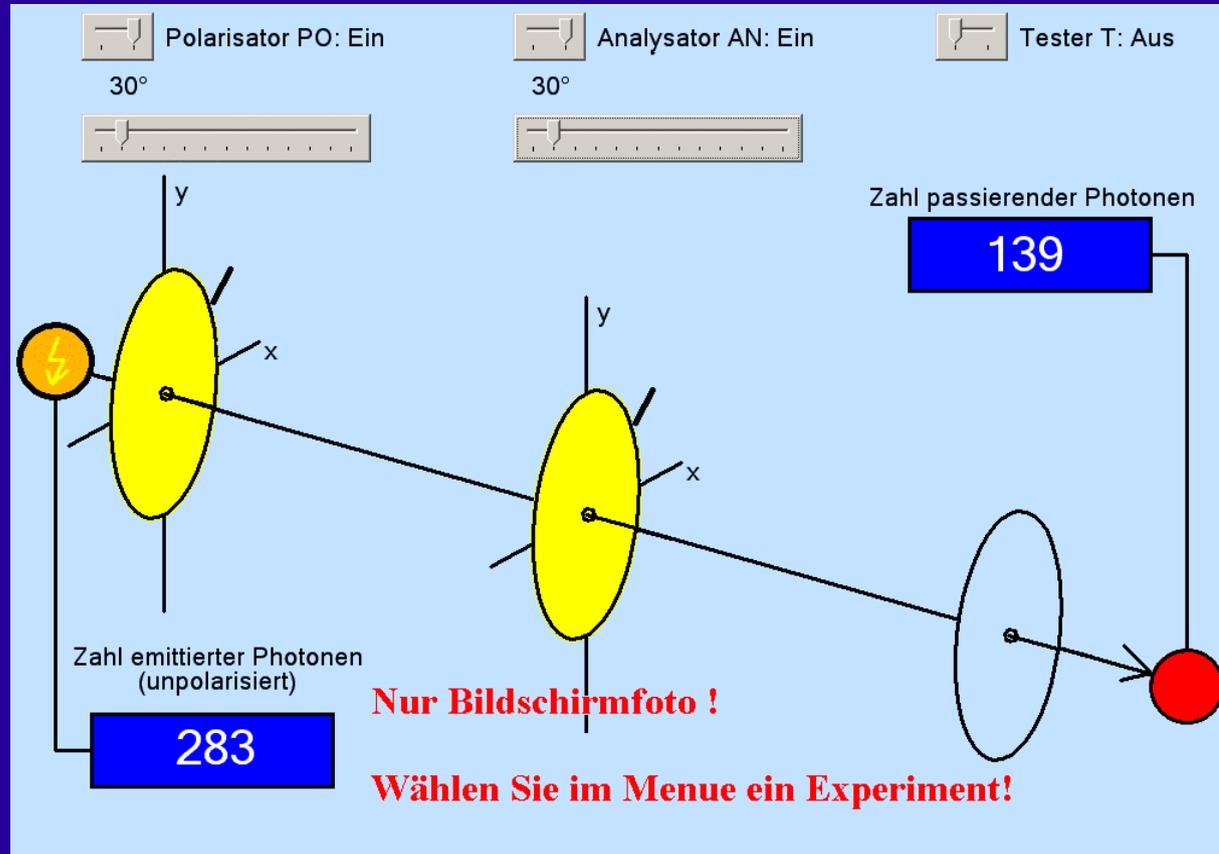
[www.forphys.de](http://www.forphys.de)

Vielen Dank!

Dort auch Text dieses Vortrags !

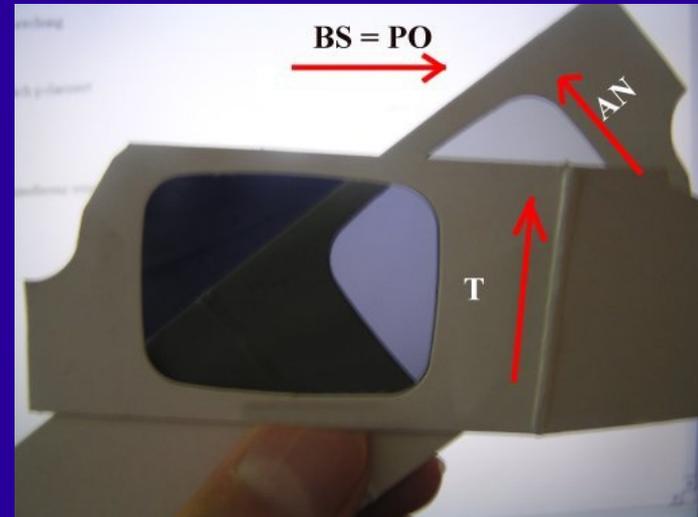
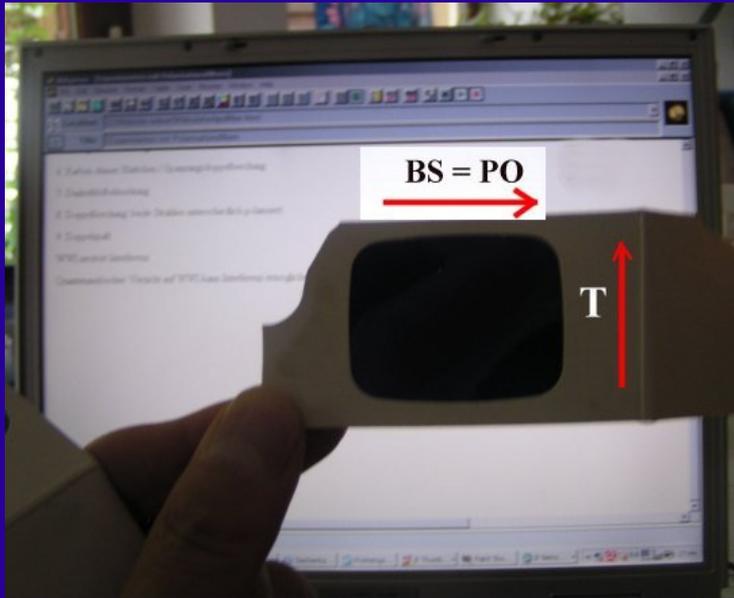
# Würzburger Quantenphysik-Konzept

Simulierte Photonen-Experimente zu polarisierten Photonen



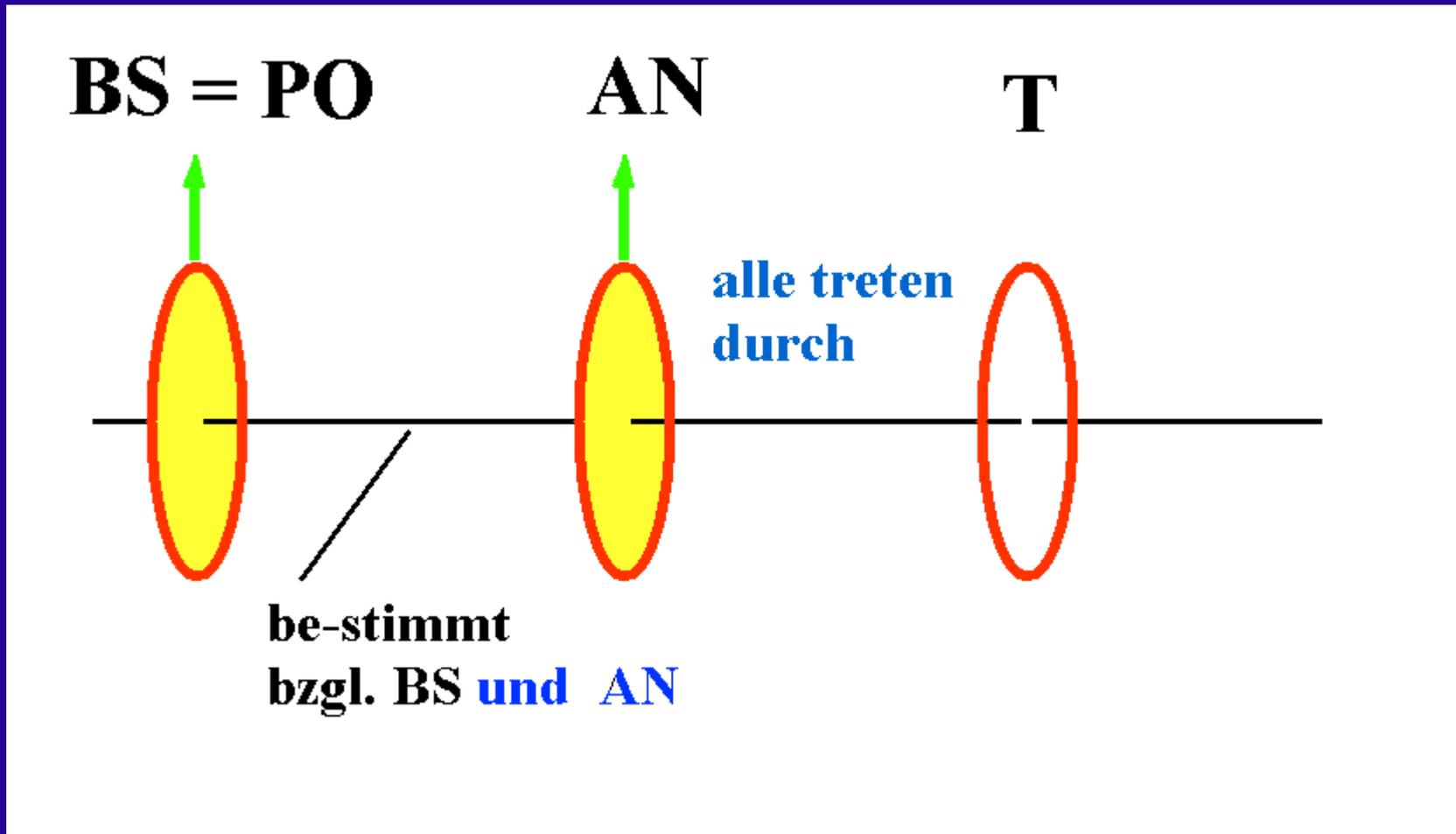
# Würzburger Quantenphysik-Konzept

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

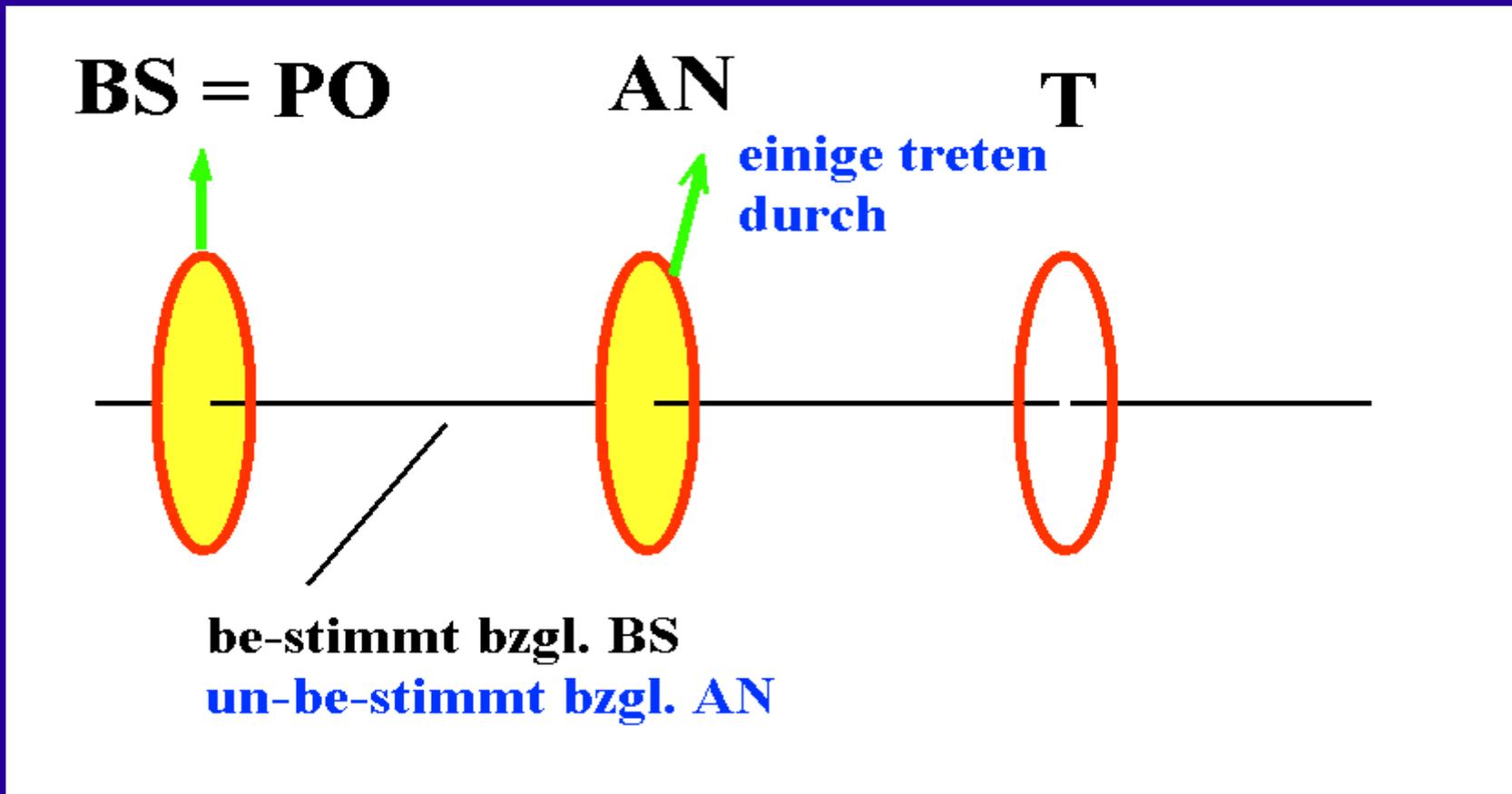


Kein Beweis! Nur Veranschaulichung!

# Würzburger Quantenphysik-Konzept



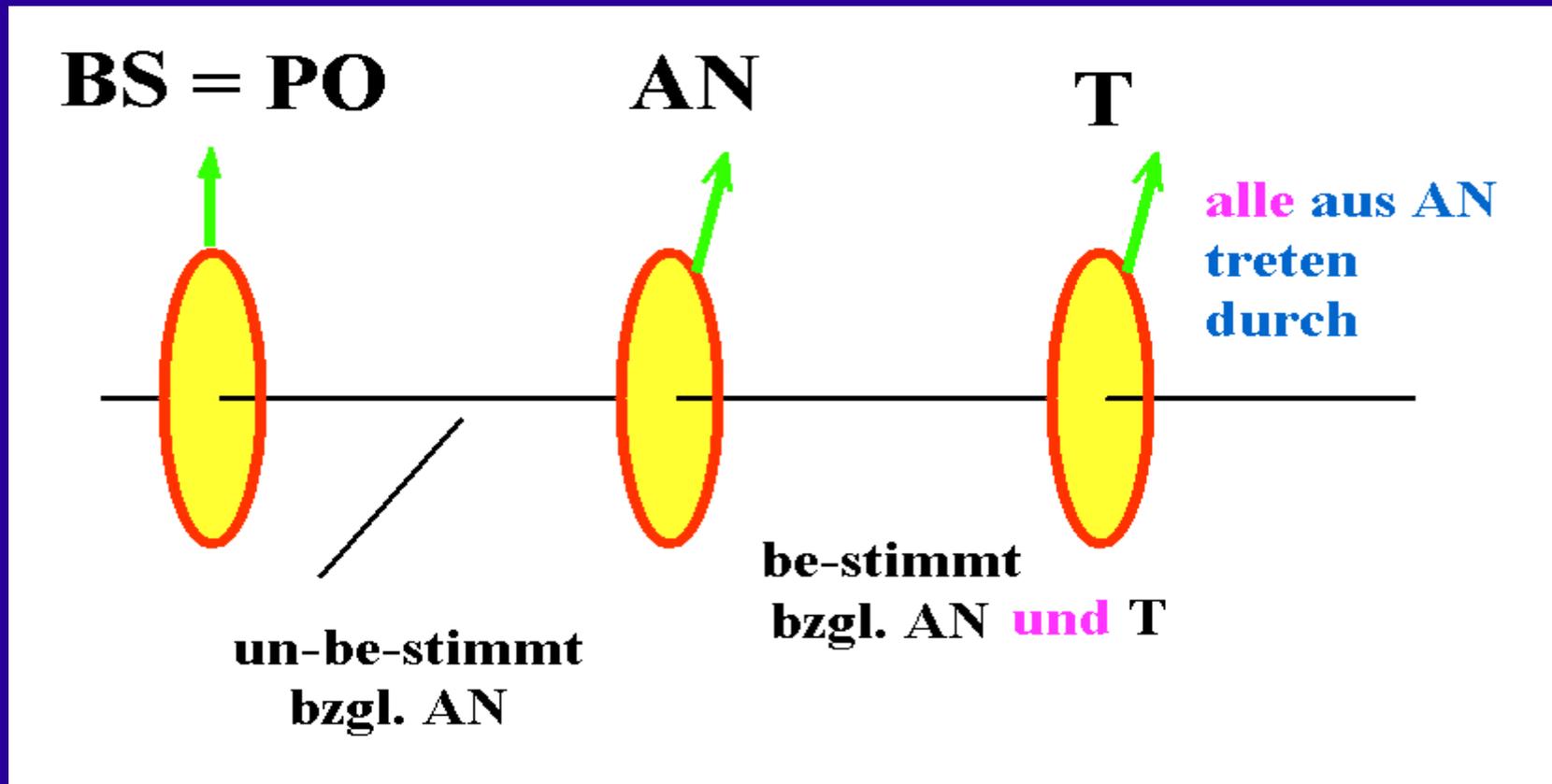
# Würzburger Quantenphysik-Konzept



zurück



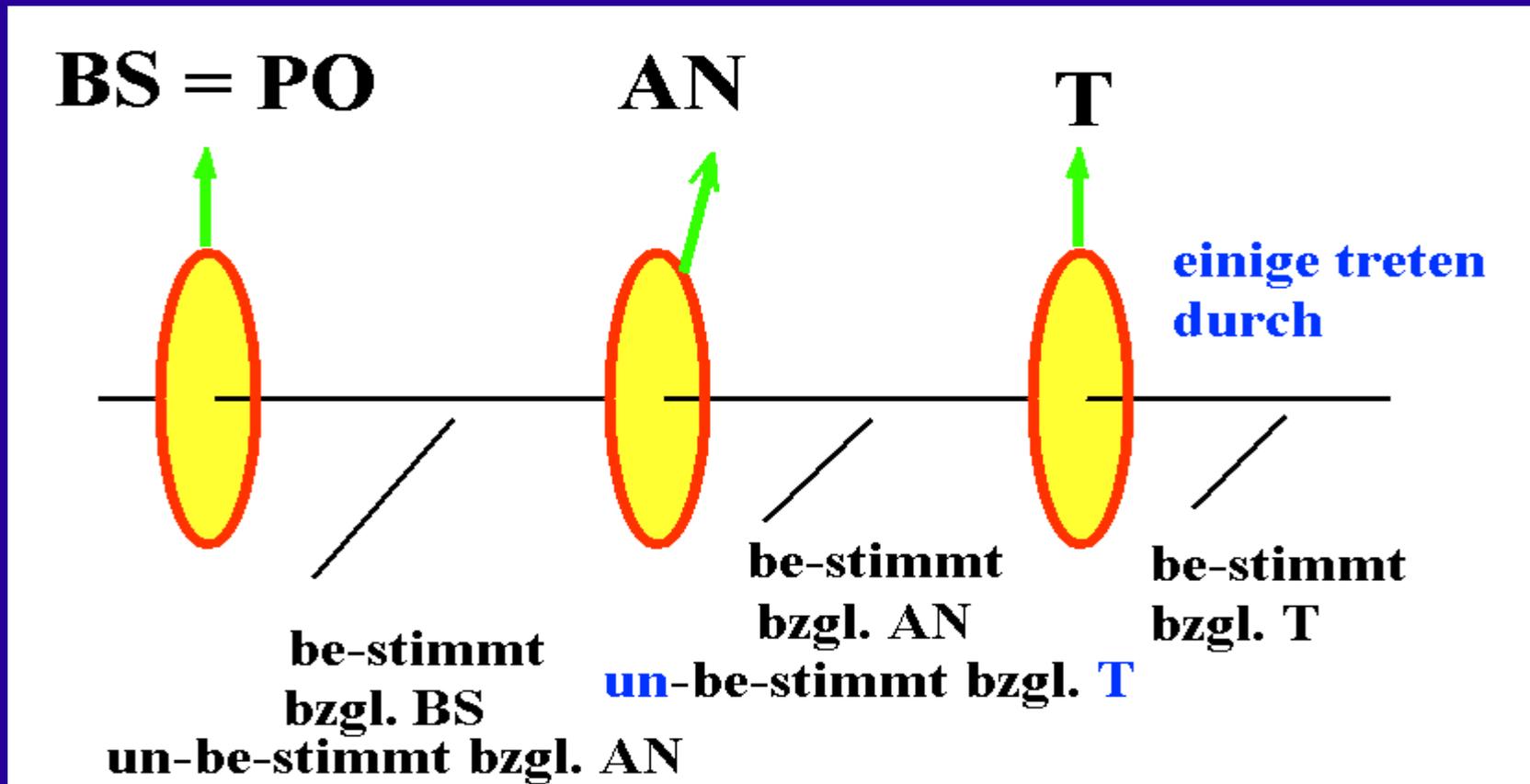
# Würzburger Quantenphysik-Konzept



Messung reproduzierbar /

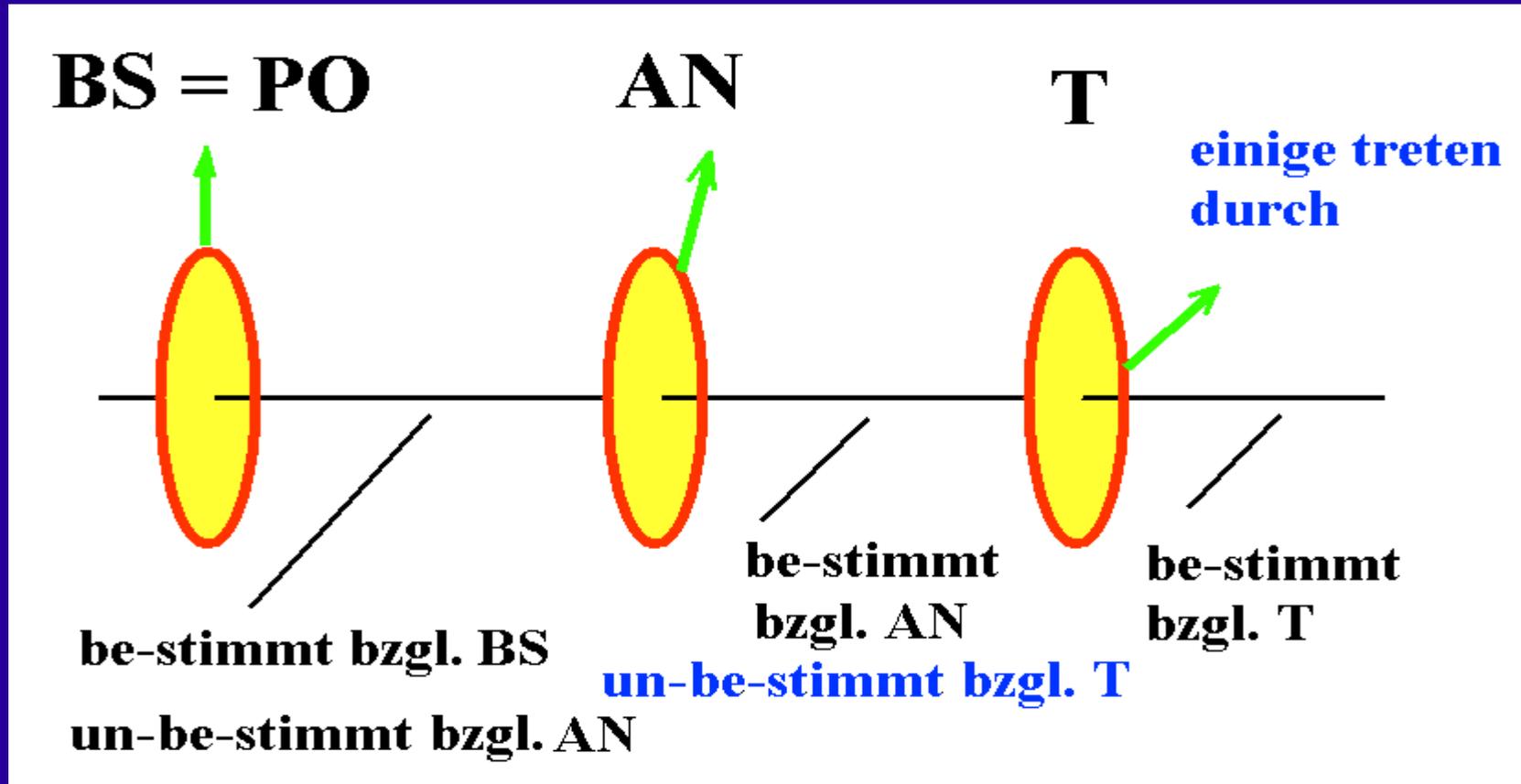
zurück

# Würzburger Quantenphysik-Konzept



zurück

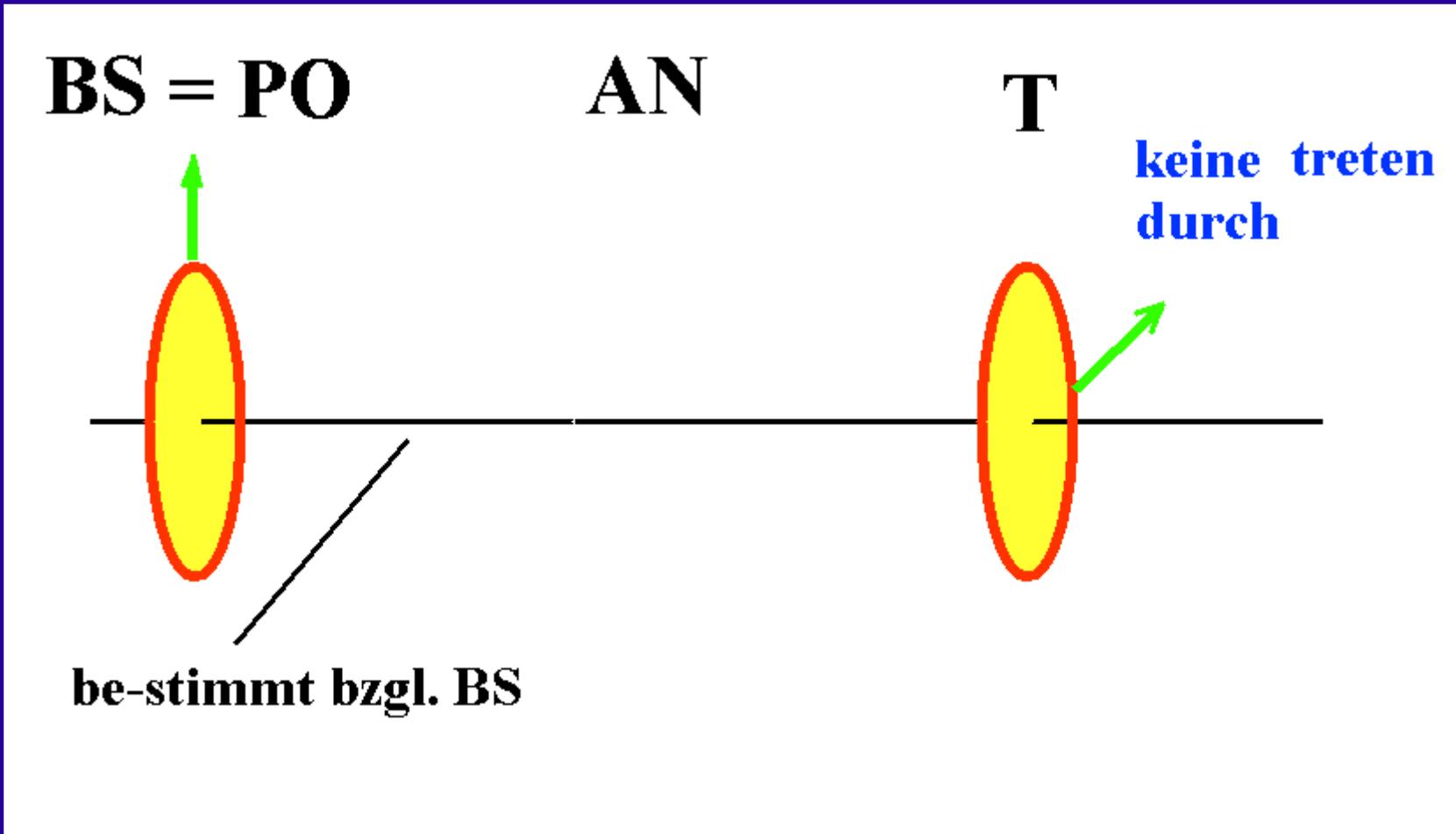
# Würzburger Quantenphysik-Konzept



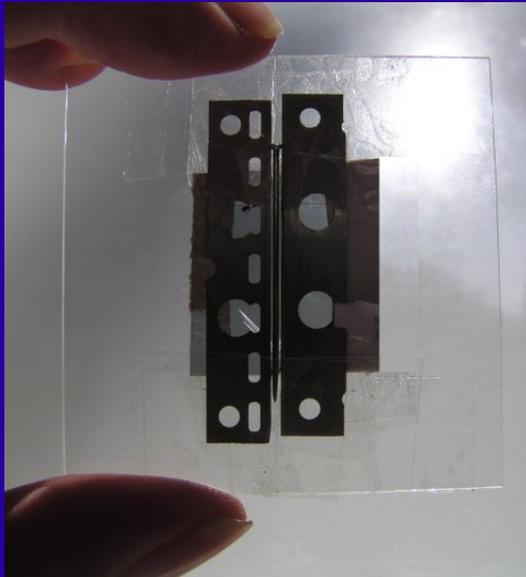
**Komplementarität**

**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“

