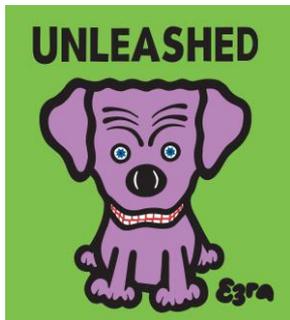


# Eine experimentelle Annäherung an den Begriff „einzelne Photonen“



Dr. Jens Küchenmeister, [jkuechenmeister@thorlabs.com](mailto:jkuechenmeister@thorlabs.com)

Lehrerfortbildung, KIT

2024-06-19

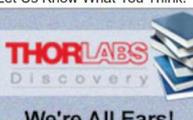
Serving the Intellectually Curious

THORLABS

# Intro

- ◆ Wer bin ich => leite das Educational-Kit-Team bei Thorlabs (+Lehramtshintergrund am KIT)
- ◆ Einige Quanten-Kits, Analogie-Experimente & „echte“ Quantenoptik
- ◆ Deutsche Handbücher, frei runterladbar



<p>Quantum Optics Kit</p>  <p>View New</p>	<p>Quantum Cryptography Kit</p> 	<p>Quantum Eraser Demonstration</p> 	<p>Bomb Tester Demonstration</p> 	
<p>Optical Microscopy Course Kit</p>  <p>Full Course</p>	<p>Portable Optical Tweezers Kit</p> 	<p>Educational Atomic Force Microscope</p> 	<p>Time-Resolved Absorption Spectroscopy Kit</p> 	
<p>Spectrometer Kits</p> 	<p>Michelson Interferometer Kit</p> 	<p>Fourier Optics Kit</p> 	<p>Polarization and 3D Cinema Technology Kit</p> 	<p>Let Us Know What You Think!</p> 

# Ziele des Vortrags

---

- ◆ Besser verstehen, was mit „Einzelphotonen“ gemeint ist
- ◆ Konkrete Experimente sehen

# Warum „Photonen“

## ◆ Bildungsplan

### – 3.6.5 Wellenoptik

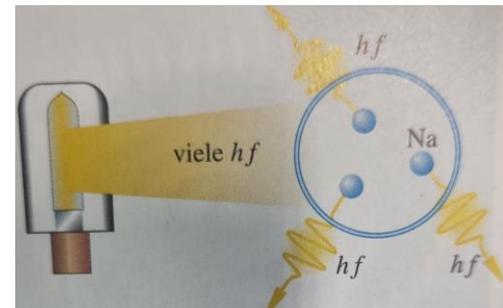
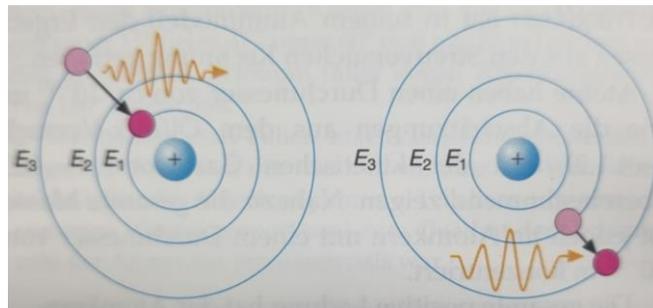
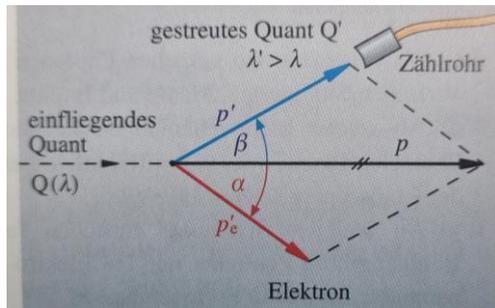
- „[Die SuS können] die geschichtliche Entwicklung von Modellvorstellungen des Lichts beschreiben (zum Beispiel Lichtstrahlen, Lichtteilchen, Lichtwellen, elektromagnetische Wellen, **Photonen**)

### – 3.6.6 Quantenphysik und Materie

- „Die SuS erkennen, dass jegliche klassische Modellvorstellung zur [...] Beschreibung [...] von Quantenobjekten wie **Photonen** [...] versagen.
- „Sie verwenden den **Photonen**begriff zur Erklärung von Emissions- und Absorptionsspektren von Atomen“
- „Gemeinsamkeiten und Unterschiede des Verhaltens von [...] Quantenobjekten am Doppelspalt beschreiben.“
- „[Die Sus können] erläutern, dass messbare Eigenschaften von Objekten der klassischen Physik bereits vor ihrer Messung real vorliegen [...]. Sie können beschreiben, dass diese Aussage für Quantenobjekte i. A. nicht gilt (Realität, zum Beispiel bei **verschränkten Photon**en)“

# Intro – Was ist ein Photon?

- ◆ „Eine Portion Licht“
- ◆ Lehrbuch: „Eine elementare Anregung des elektromagnetischen Feldes“



- ◆ Theoretischer Physiker:

$$\hat{H}_R = \sum_{\mathbf{k}} \sum_{\lambda=1,2} \hat{H}_{\mathbf{k}\lambda}$$

$$\hat{a}_{\mathbf{k}\lambda} |n_{\mathbf{k}\lambda}\rangle = \sqrt{n_{\mathbf{k}\lambda}} |n_{\mathbf{k}\lambda} - 1\rangle$$

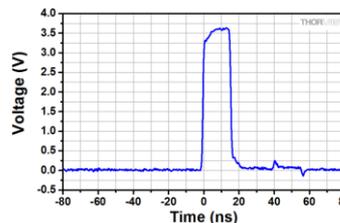
with

and

$$\hat{H}_{\mathbf{k}\lambda} = \frac{1}{2} \hbar \omega_{\mathbf{k}} \left( \hat{a}_{\mathbf{k}\lambda} \hat{a}_{\mathbf{k}\lambda}^\dagger + \hat{a}_{\mathbf{k}\lambda}^\dagger \hat{a}_{\mathbf{k}\lambda} \right)$$

$$\hat{a}_{\mathbf{k}\lambda}^\dagger |n_{\mathbf{k}\lambda}\rangle = \sqrt{n_{\mathbf{k}\lambda} + 1} |n_{\mathbf{k}\lambda} + 1\rangle$$

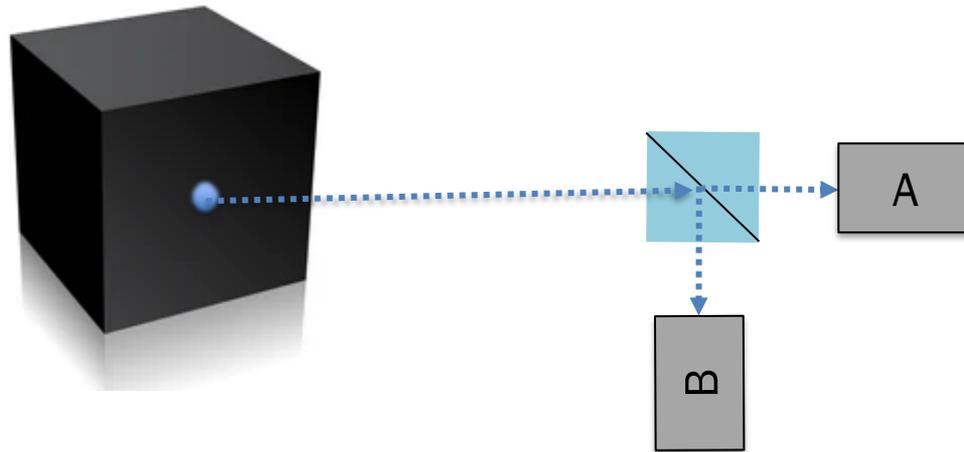
- ◆ Experimentalphysiker:



Einzelphotonendetektor => macht Piep, wenn das kleinste bisschen Licht absorbiert wird  
 Name missverständlich! => der ist so gebaut ... Sonnenlicht gibt gleiches Signal

# Unterscheidung klassische vs. nicht-klassische Lichtquelle

- ◆ Wir nehmen an, dass wir eine Blackbox haben, aus der Licht kommt.
- ◆ Wie finde ich raus, ob das Licht klassisch oder nicht-klassisch ist (d.h. einzelne Photonen)?
- ◆ *Einzelne Photonen können nur bei A oder B detektiert werden, nicht bei beiden!*



„Hanbury-Brown-Twiss  
Experiment“

=> Man misst, was bei Detektoren  
A&B ankommt (und wann)

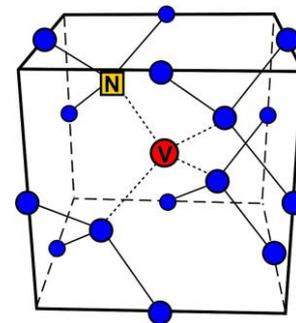
# Was gibt es für Einzelphotonquellen?

◆ Einzelne Emittor (Atome/Moleküle an Oberflächen) 

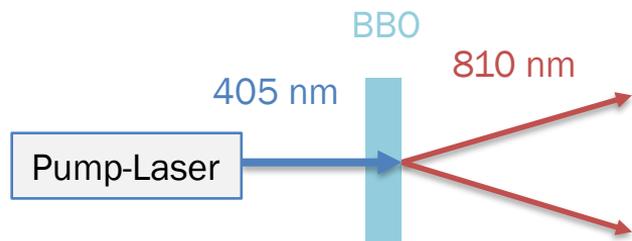
◆ NV-Zentren in Diamant 

◆ Quanten-Punkte 

◆ Nicht-lineare Kristalle => Erzeugung von Photonen-Paaren 



Quelle: Wikipedia



- (1) „Angekündigte Einzelphoton-Quelle“
- (2) Mit dem richtigen Kristall sind die Paare sogar polarisations-verschränkt

 Raumtemperatur, hohe Zählraten, leicht handhabbar, robust gegen Streulicht

 Raumtemperatur, mittel bis geringe Zählrate, eher komplex (Objektiv, Fehlstelle finden!)

 Z.T. Kryo, mittel bis geringe Zählrate, komplex (Objektiv, erstmal finden!)

# Unser Quantenoptik-Kit

Justier-  
spiegel

BBO, Typ 1

Einzelphoton-  
detektoren

Iris +  
Strahlfalle

$\lambda/2$

Laser  
405 nm

Michelson-  
Interferometer

EDU Time  
Tagger

THORLABS



Justier-Hilfen

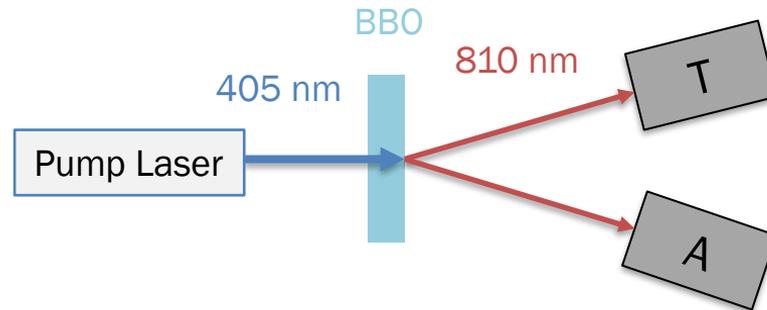


Kim Weber & Rüdiger Scholz

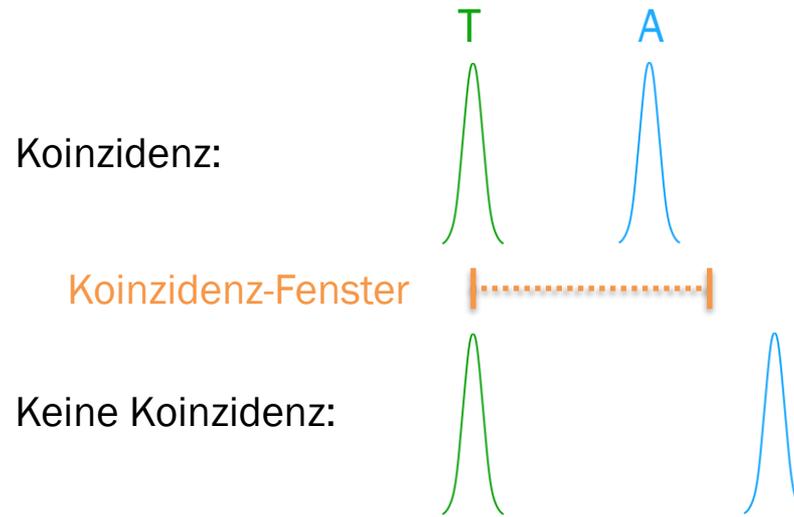
1 1  
1 0 2  
1 0 0 4

Leibniz  
Universität  
Hannover

# Wie vermisst man die Paare?

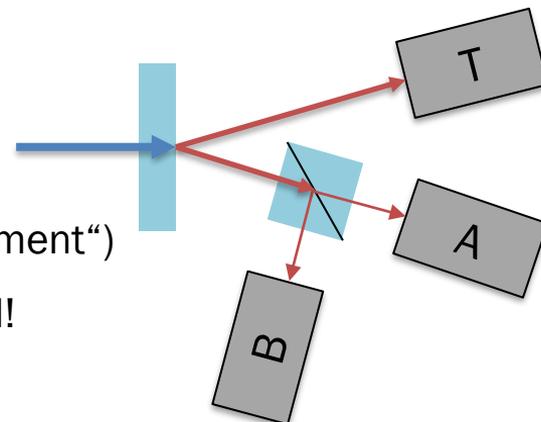


- ◆ Paare werden als solche gezählt, wenn sie in einem gewissen Koinzidenzfenster gemessen werden:



# Nachweis: nicht-klassische Lichtquelle

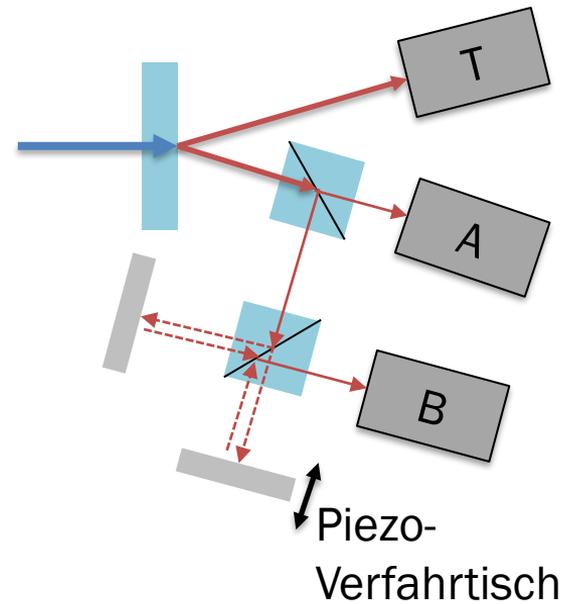
- ◆ Wieder Strahlteiler (heißt bei Paaren dann “Grangier Experiment“)
- ◆ Piep bei Detektor A oder B, wenn es einzelne Photonen sind!



- ◆  $g^{(2)}(0) = \frac{N_{TAB} \cdot N_T}{N_{TA} \cdot N_{TB}}$ 
  - = 1 Kohärentes Licht (= Laser)
  - > 1 Klassisches Licht
  - < 1 Nicht-klassisches Licht

Unter 0.1

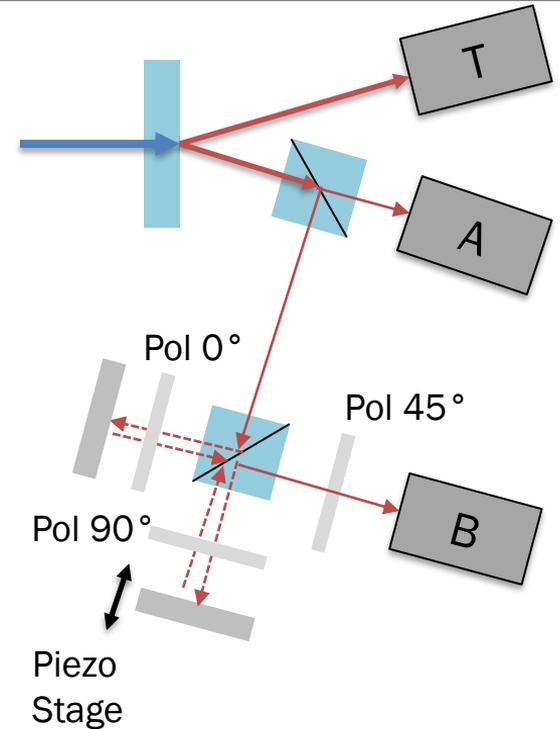
# Einzelphoton-Michelson-Interferometer



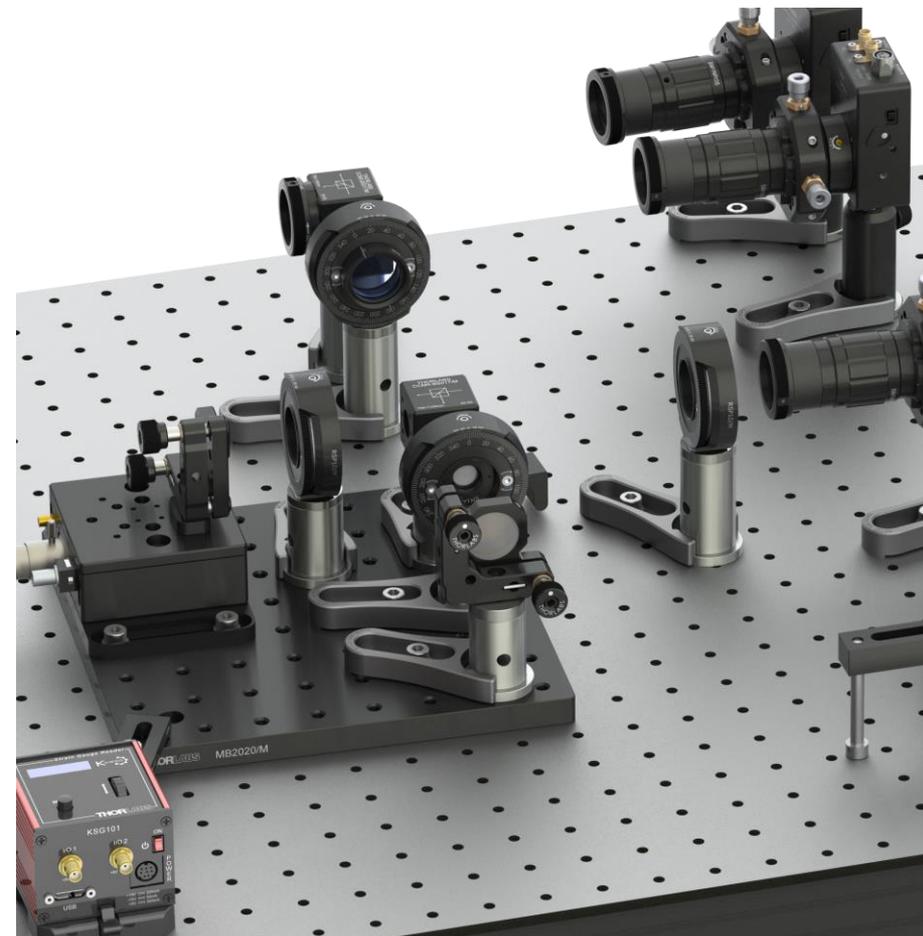
Einzelne Photonen zeigen Interferenz

# Quantenradierer

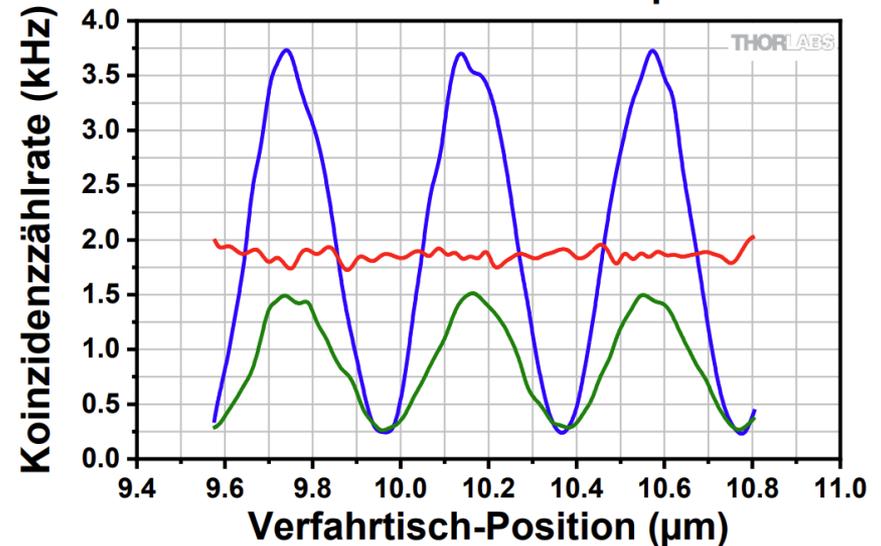
- ◆ Elektronen auf Doppelspalt => Interferenz
- ◆ Senkrechte Polarisatoren in Interferometer-Arme
  - Erzeugt „Weg-Information“
  - Keine Interferenz messbar
- ◆  $45^\circ$  Polarisator radiert Weginformation aus  
=> Interferenz wieder da



# Quantenradierer



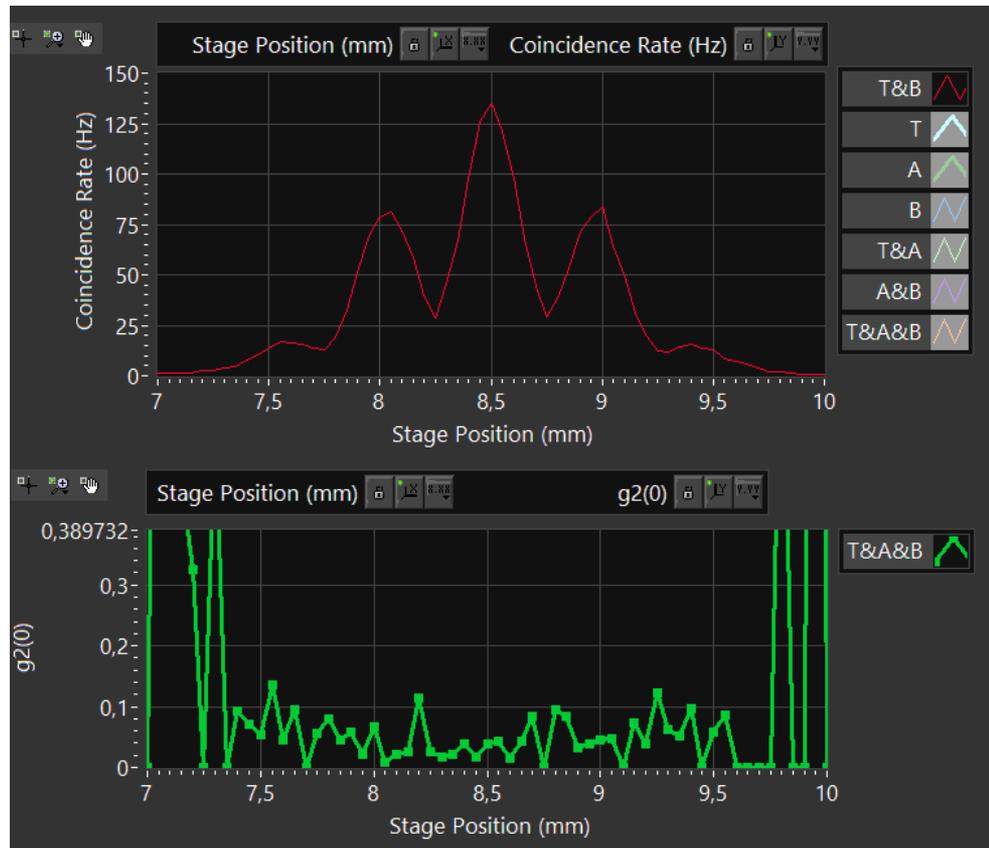
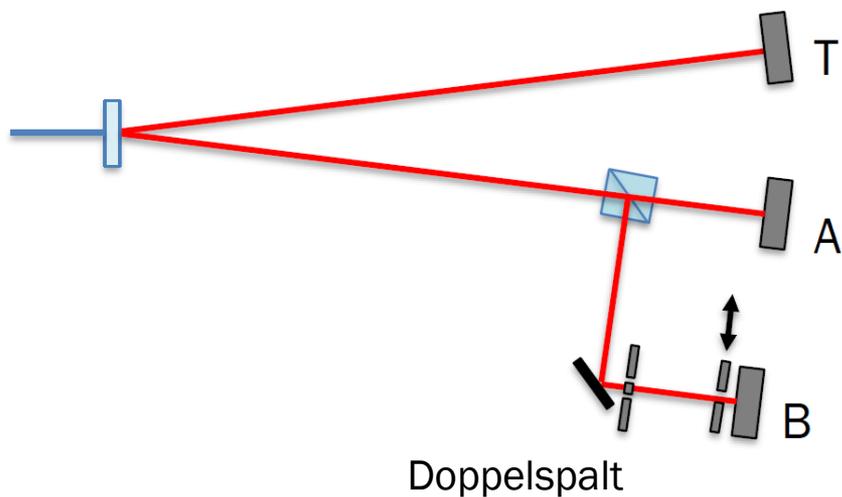
## Quantenradierer Beispiel



- Pol1:  $0^\circ$  Pol2:  $0^\circ$  Ohne Detektor-Polarisator
- Pol1:  $0^\circ$  Pol2:  $90^\circ$  Ohne Detektor-Polarisator
- Pol1:  $0^\circ$  Pol2:  $90^\circ$  Detektor-Polarisator:  $45^\circ$

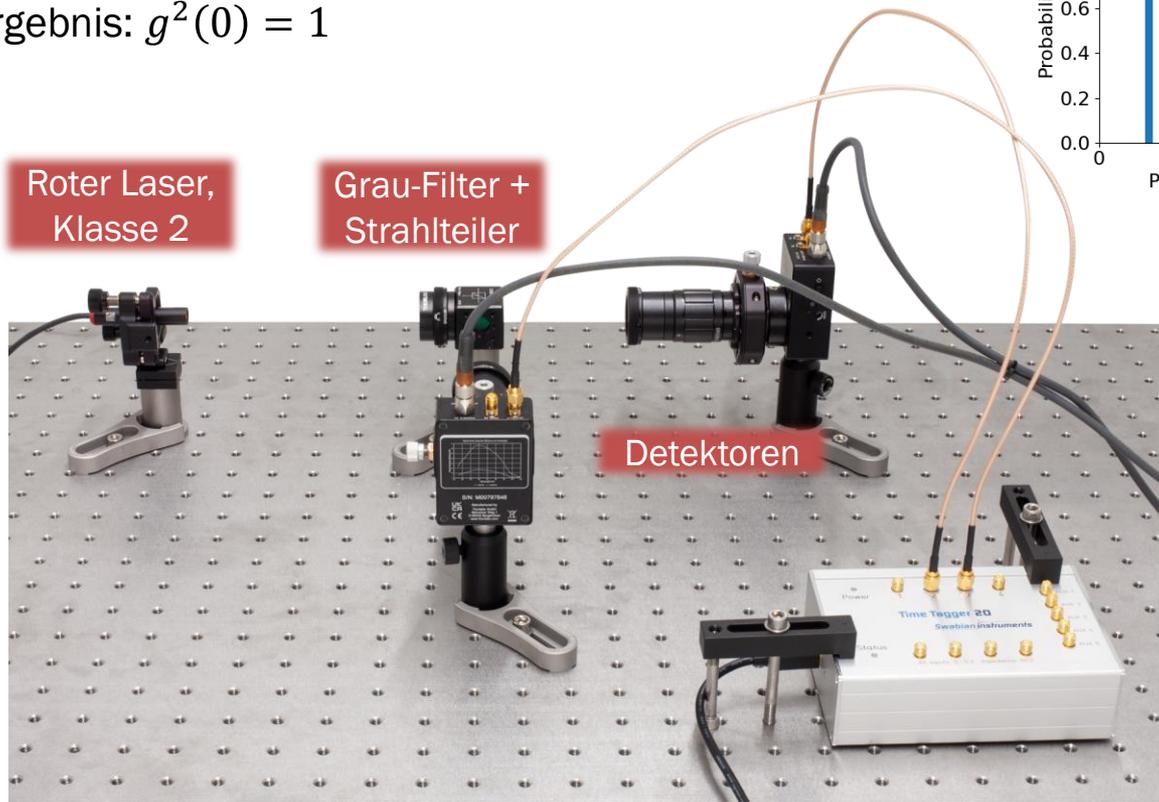
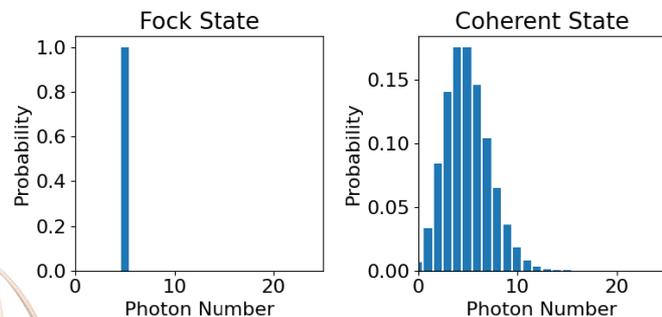
Keine besonderen „Quantenkomponenten“ nötig

# Einzelphoton-Doppelspalt



# Abgeschwächte Laser?

- ◆ Häufigste Fehlvorstellung: Licht = Photonenstrom
- ◆ Test: Man misst einfach  $g^2(0)$  für abgeschwächten Laser!
- ◆ Ergebnis:  $g^2(0) = 1$



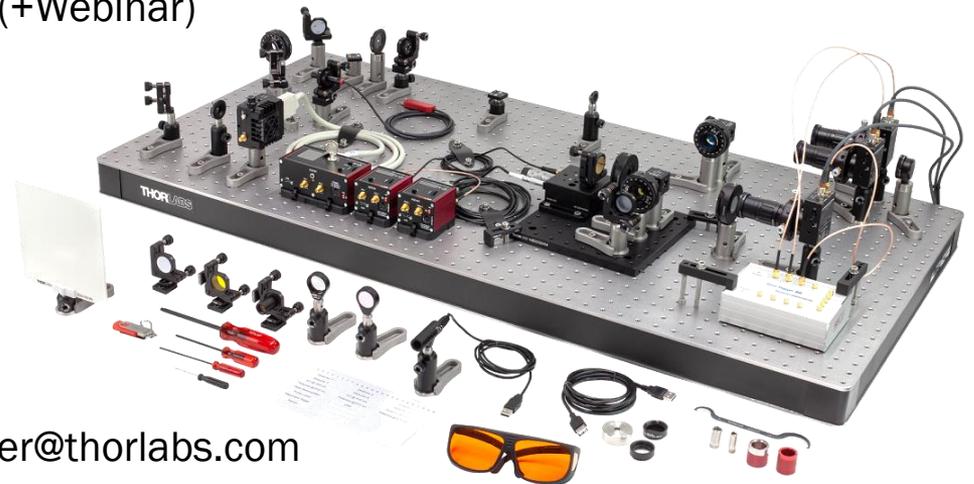
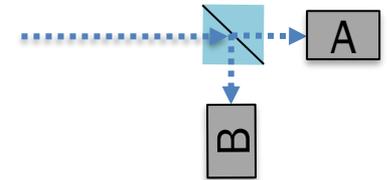
**Falsches Bild:**  
„Sonnenlicht besteht aus einer Quintillion Photonen.“

**Anschaung?**



# Zur Mitnahme nach Hause

- ◆ Vorstellung von klassischem Licht als Photonenstrom vermeiden
- ◆ Abgeschwächte Laser sind keine Einzelphotonenquellen
- ◆ Einzelphoton-Kriterium: Verhalten der Lichtquelle am Strahlteiler
- ◆ Experimente: EDU-QOP1 Handbuch (+Webinar)



- ◆ Feedback & Fragen: [jkuechenmeister@thorlabs.com](mailto:jkuechenmeister@thorlabs.com)