

Photonenstatistik und Quantenradierer

Antje Bergmann¹ und Günter Quast²

photonics
group

EKP



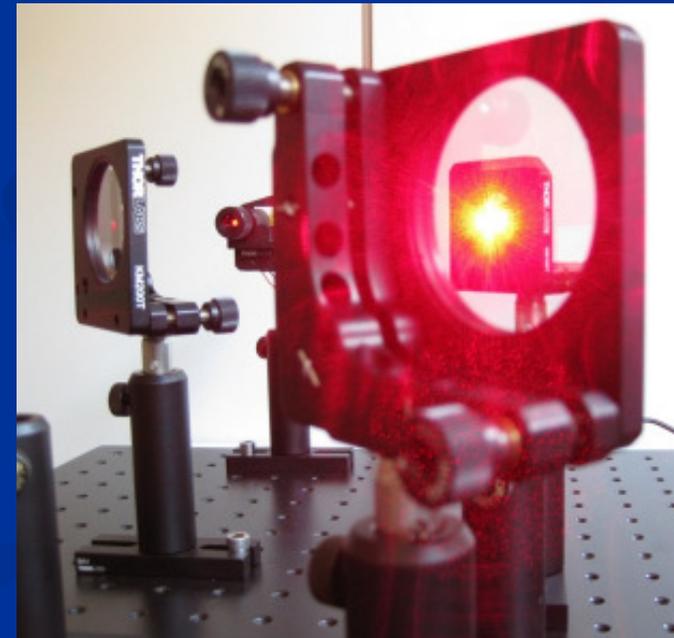
¹Institut für Theoretische Festkörperphysik, Photonics Group

²Institut für Experimentelle Kernphysik

Universität Karlsruhe (TH)

bergmann@tfp.uni-karlsruhe.de

[http:// psi.physik.kit.edu](http://psi.physik.kit.edu)



Quantenradierer - Hintergründe

- Doppelspaltexperiment
- Mach-Zehnder-Interferometer

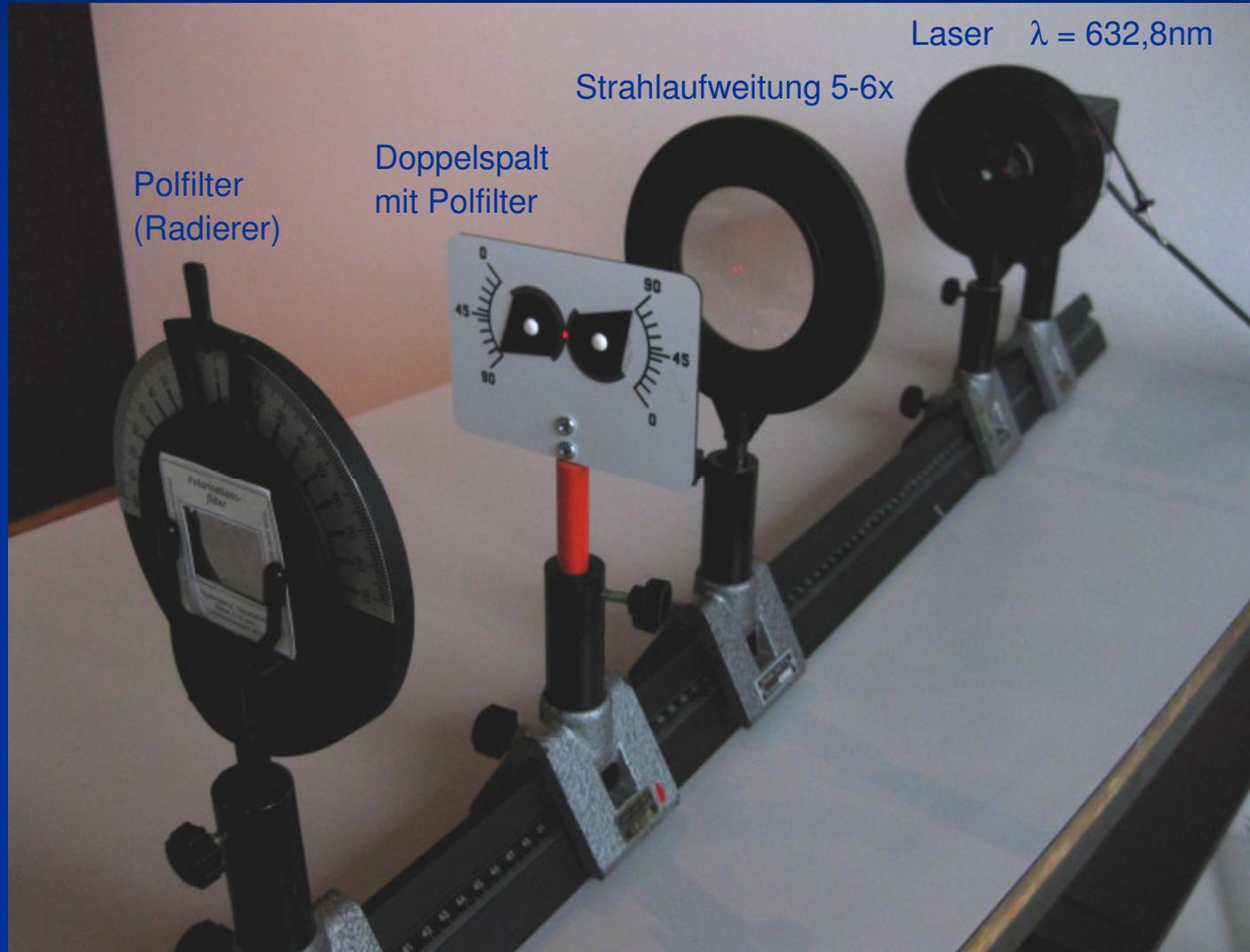
Einzelphotonmessung

- Detektoren (APD)
- Aufbau eines einfachen Experiments

Experimente mit Schülern am MZI mit APDs

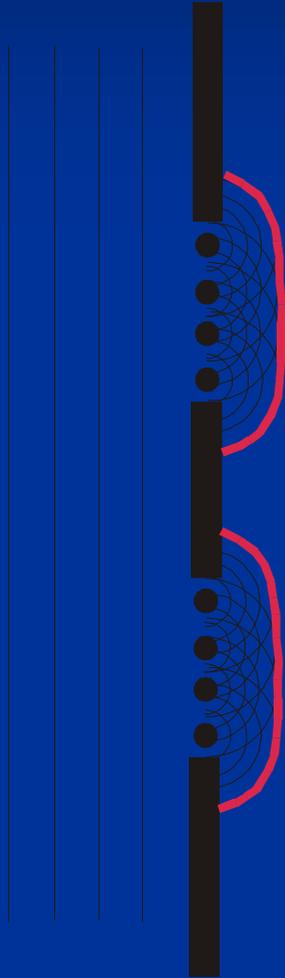
- Abschätzung der Photonenzahlen
- Messung per Hand mit einem Detektor
- Auswertung: Poisson-Statistik
- Messung mit 2 Detektoren im MZI

Analogieversuch zum Quantenradierer - Doppelspaltexperiment



Analogieversuch zum Quantenradierer - Doppelspaltexperiment

Rein klassische, elektrodynamische Beschreibung

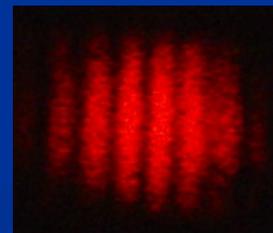


Elektrisches Feld an einem Ort P auf dem
Schirm:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$$

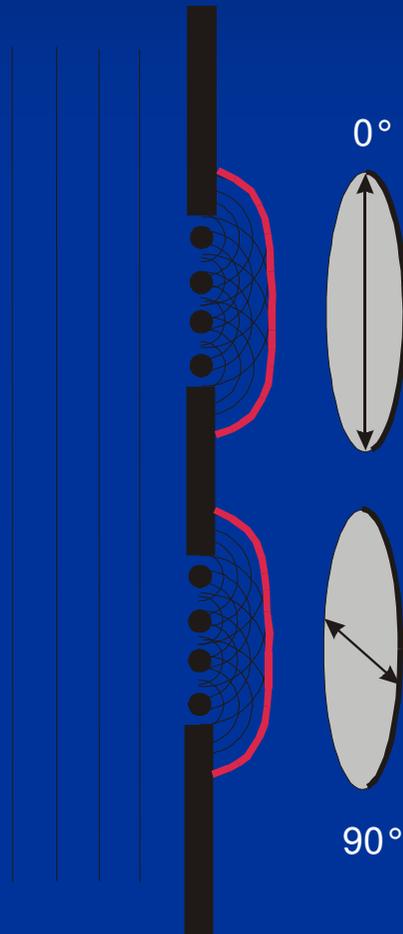
Intensität an diesem Punkt P:

$$I = |\vec{E}|^2 = |\vec{E}_1|^2 + |\vec{E}_2|^2 + \underbrace{2|\vec{E}_1||\vec{E}_2|\cos\delta}_{\text{Interferenzterm}}$$



Analogieversuch zum Quantenradierer - Doppelspaltexperiment

Rein klassische, elektrodynamische Beschreibung



Elektrisches Feld an einem Ort P auf dem
Schirm:

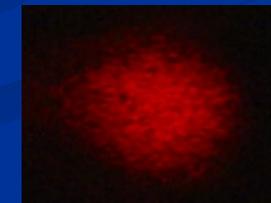
$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$$

ABER: $\vec{E}_1 \perp \vec{E}_2$

Intensität an diesem Punkt:

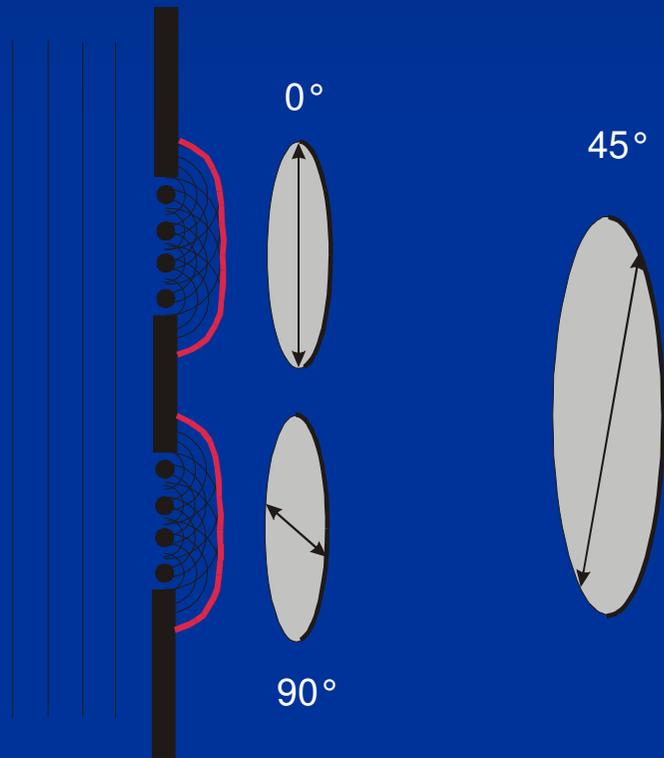
$$I = |\vec{E}|^2 = |\vec{E}_1|^2 + |\vec{E}_2|^2 + \underbrace{2|\vec{E}_1||\vec{E}_2|\cos\delta}_{=0}$$

Keine Interferenz



Analogieversuch zum Quantenradierer - Doppelspaltexperiment

Rein klassische, elektrodynamische Beschreibung



Elektrisches Feld an einem Ort P auf dem Schirm:

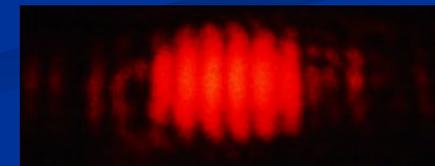
$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$$

ABER: $\vec{E}_1 \perp \vec{E}_2$

Intensität an diesem Punkt:

$$I = |\vec{E}|^2 = |\vec{E}_1|^2 + |\vec{E}_2|^2 + \underbrace{2|\vec{E}_1||\vec{E}_2|\cos\delta}_{\neq 0}$$

Interferenz



Analogieversuch zum Quantenradierer - Doppelspaltexperiment

Quantenmechanische Beschreibung

Aufenthaltswahrscheinlichkeit eines Photons beschrieben durch $|\Psi|^2$

Unterscheidbarer Fall: $I = |\Psi|^2 = |\Psi_1 + \Psi_2|^2 = |\Psi'_1|^2 + |\Psi'_2|^2$

Ununterscheidbarer Fall:

$$I = |\Psi|^2 = |\Psi_1 + \Psi_2|^2 = |\Psi'_1|^2 + |\Psi'_2|^2 + \underbrace{2\text{Re}(\Psi_1'^* \Psi_2' e^{i\delta})}_{\text{Interferenzterm}}$$

Interferenzterm

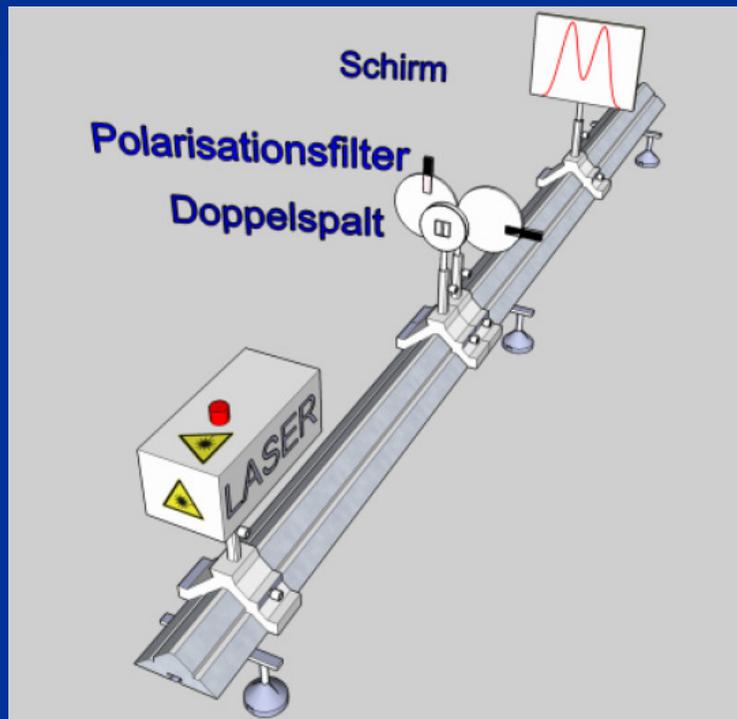
Mit $\Psi_{1,2}(\vec{r}) = \Psi'_{1,2} e^{i\vec{k}_{1,2} \cdot \vec{r}}$ Wellenfunktionen bzgl. Spalt 1 bzw. 2

und δ Phase, $\Psi'_{1,2}$ Amplituden

Analogieversuch zum Quantenradierer - Doppelspaltexperiment

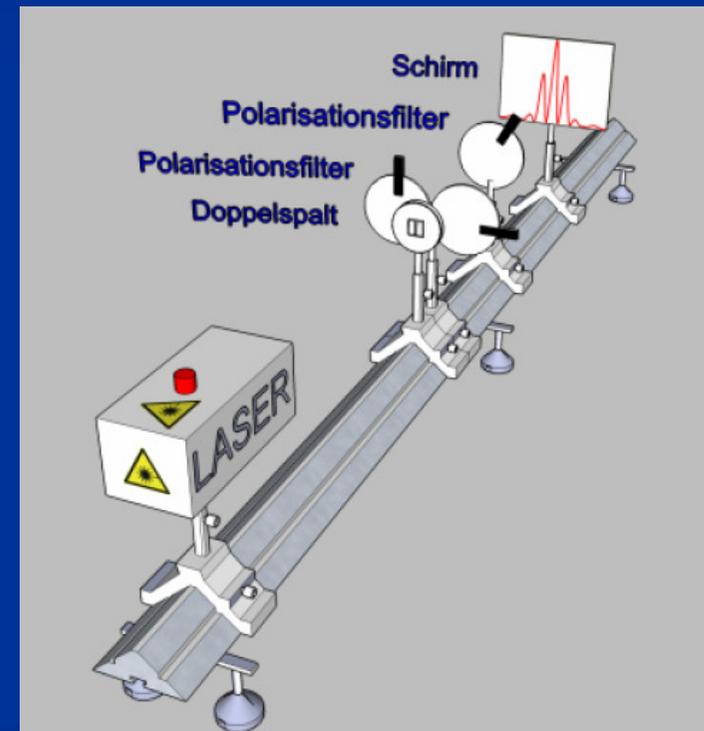
Welcher-Weg-Information
zerstört die Interferenz

(Feynman)



$$I = |\Psi|^2 = |\Psi_1 + \Psi_2|^2 = |\Psi_1'|^2 + |\Psi_2'|^2$$

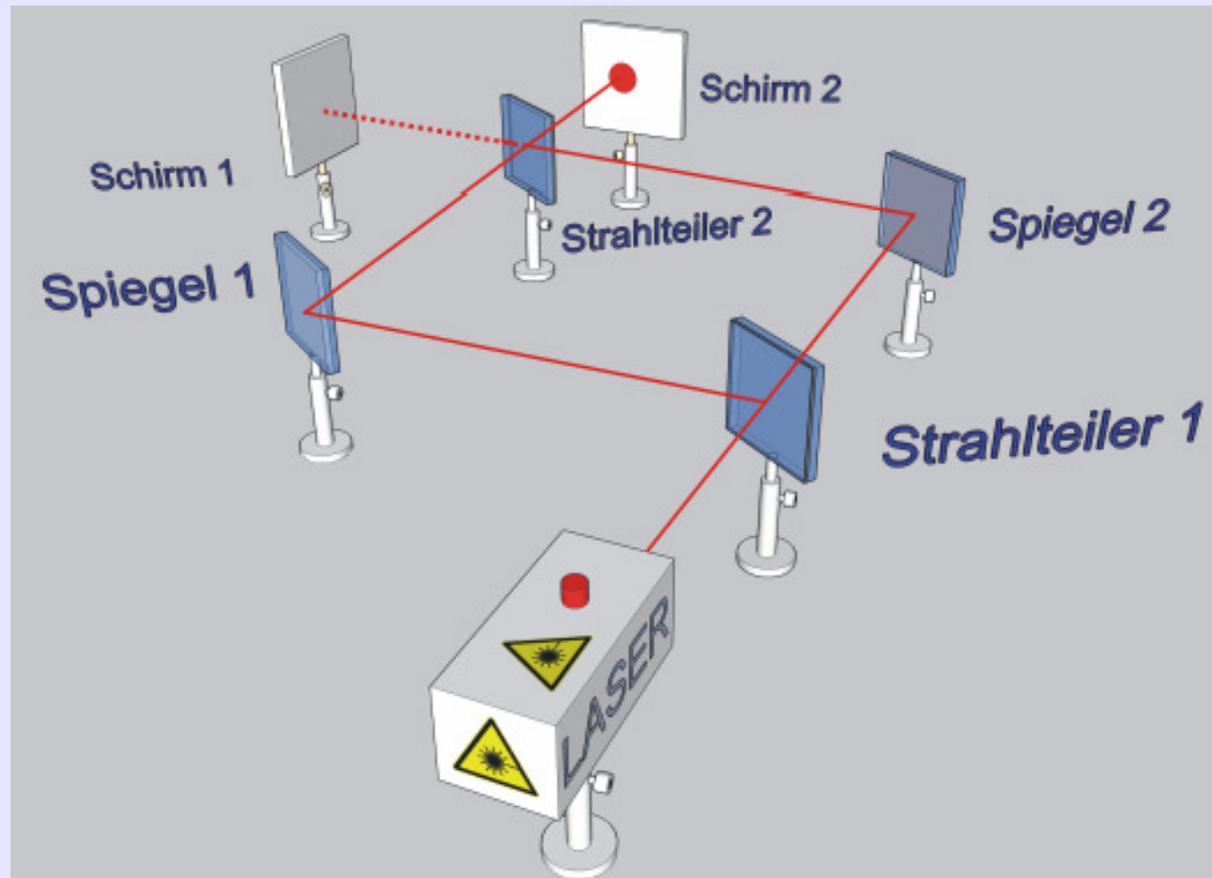
Ununterscheidbare
Möglichkeiten interferieren



$$I = |\Psi|^2 = |\Psi_1'|^2 + |\Psi_2'|^2 + \underbrace{2\text{Re}(\Psi_1'^* \Psi_2' e^{i\delta})}$$

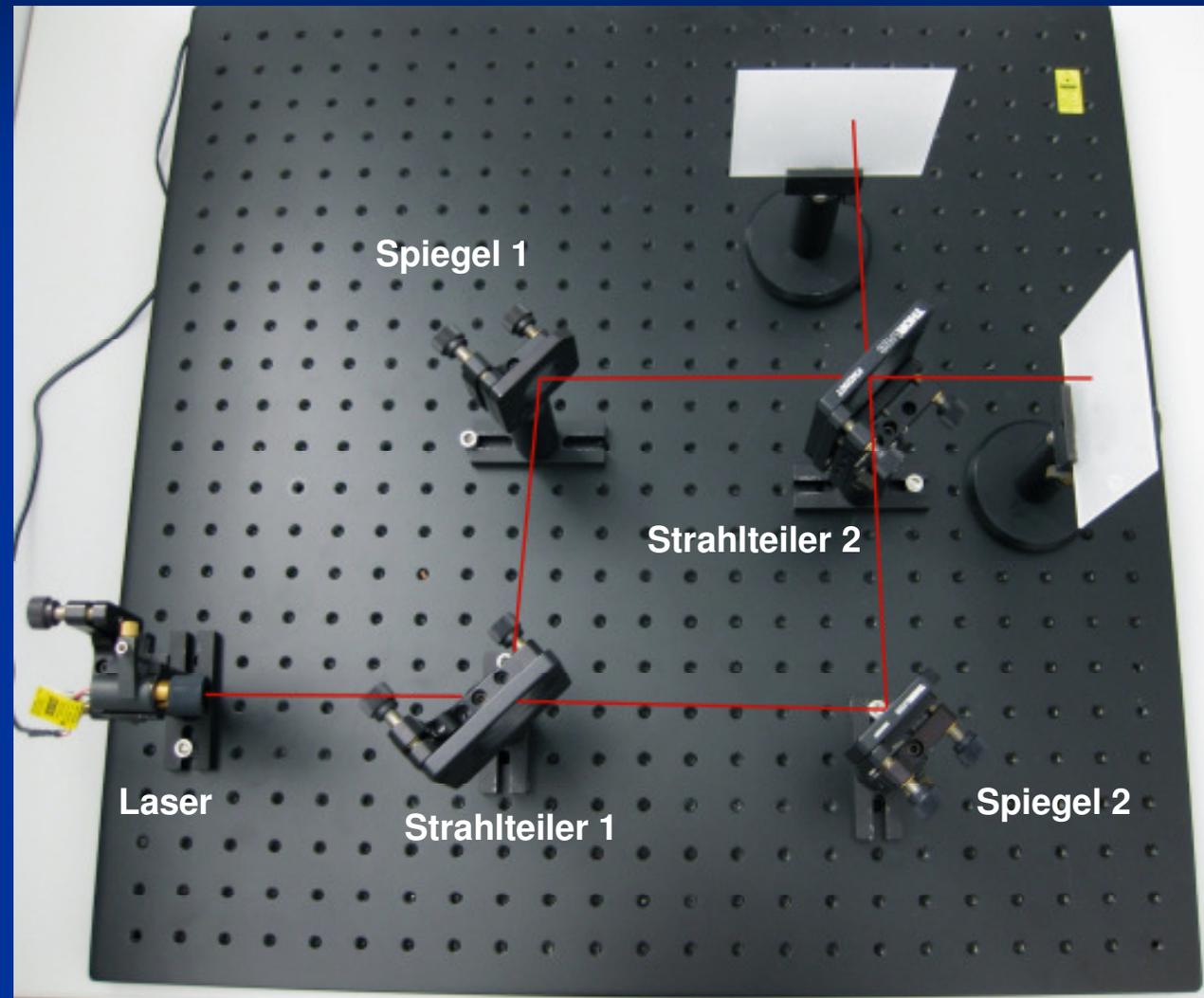
Mach-Zehnder-Interferometer

Aufbau:



Mach-Zehnder-Interferometer

Aufbau



Mach-Zehnder-Interferometer

Zur klassischen Erklärung der Interferenz: Vorgänge am Strahlteiler

Strahlteiler: Glas (n_G) mit einseitiger dielektrischer Beschichtung ($n_S < n_G$)



Reflexion „Luft auf Schicht“:
Phasensprung 180° ($n_L < n_S$)

Transmission: kein Phasensprung



Reflexion „Glas auf Schicht“:
Kein Phasensprung ($n_G > n_S$)

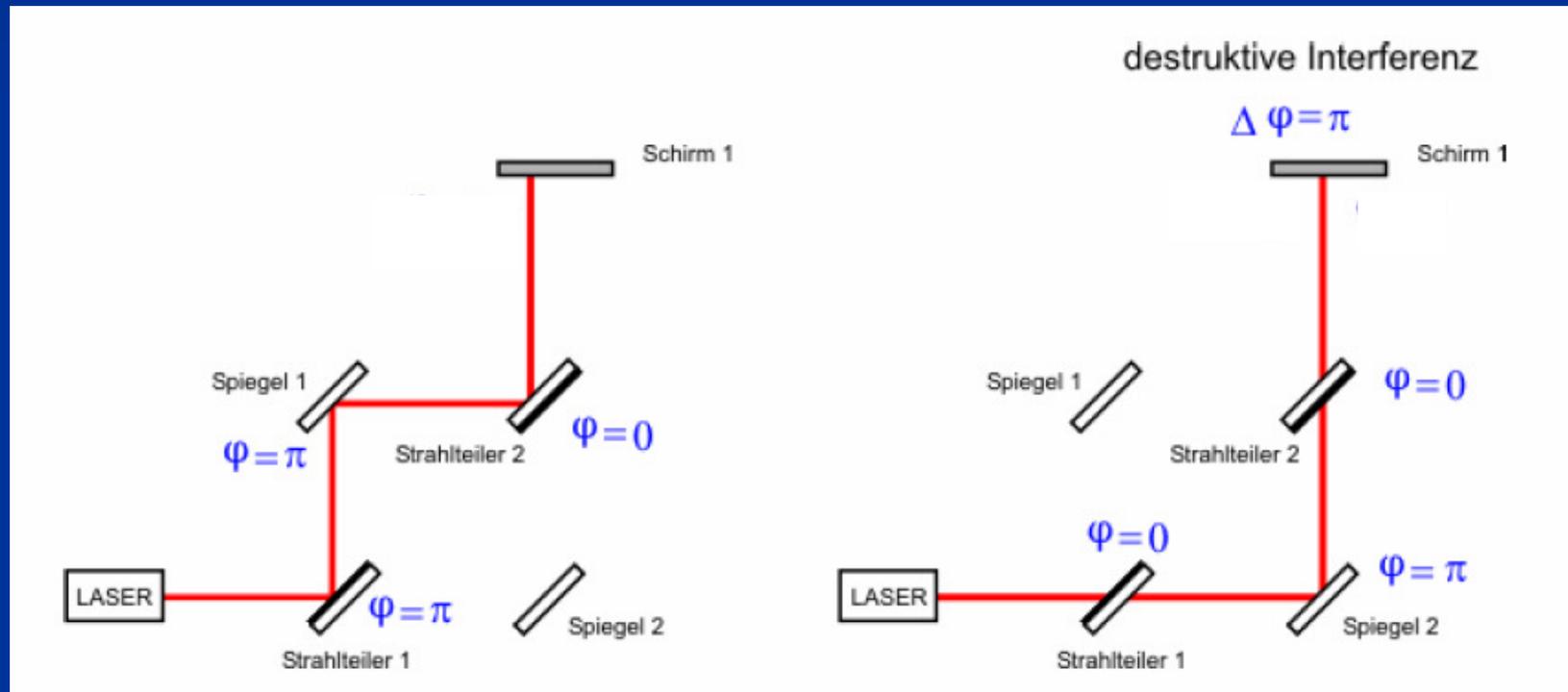
Transmission: kein Phasensprung

Mach-Zehnder-Interferometer

Zur klassischen Erklärung der Interferenz

$$\Delta\varphi = \pi$$

Destruktive Interferenz der beiden Strahlen an Schirm 1

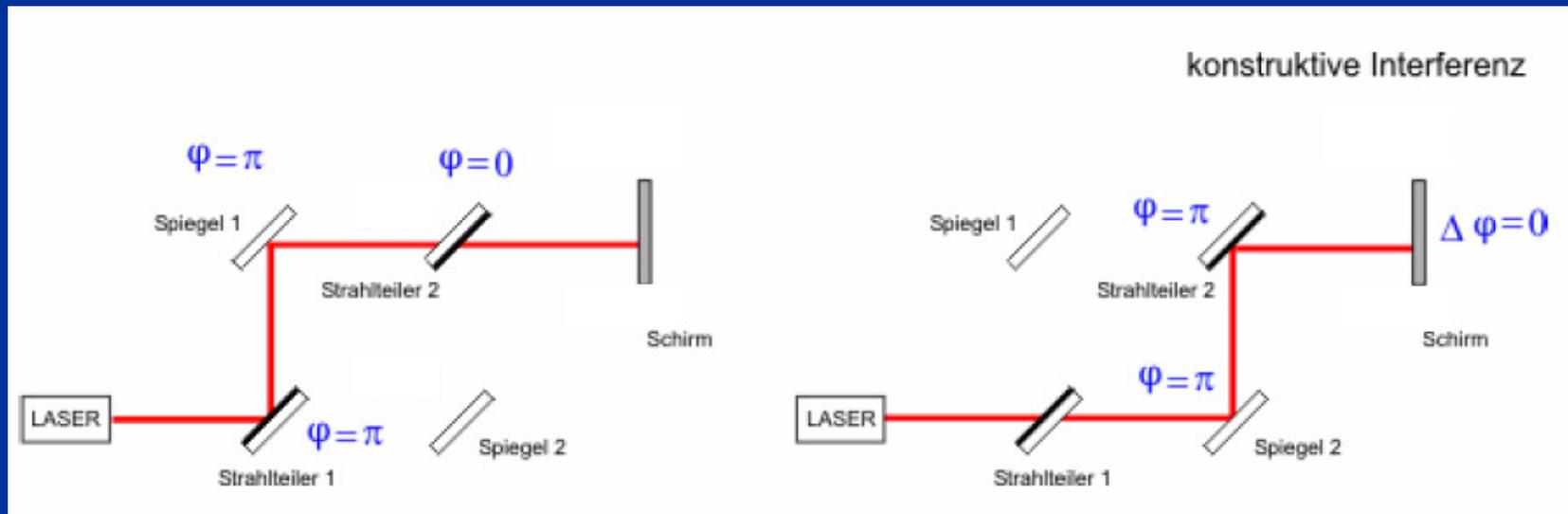


Mach-Zehnder-Interferometer

Zur klassischen Erklärung der Interferenz

Konstruktive Interferenz der beiden Strahlen an Schirm 2

$$\Delta\varphi = 0$$



Mach-Zehnder-Interferometer

Übergang zur Quantenradierer – Analogie:
Hinzufügen der Polarisatoren

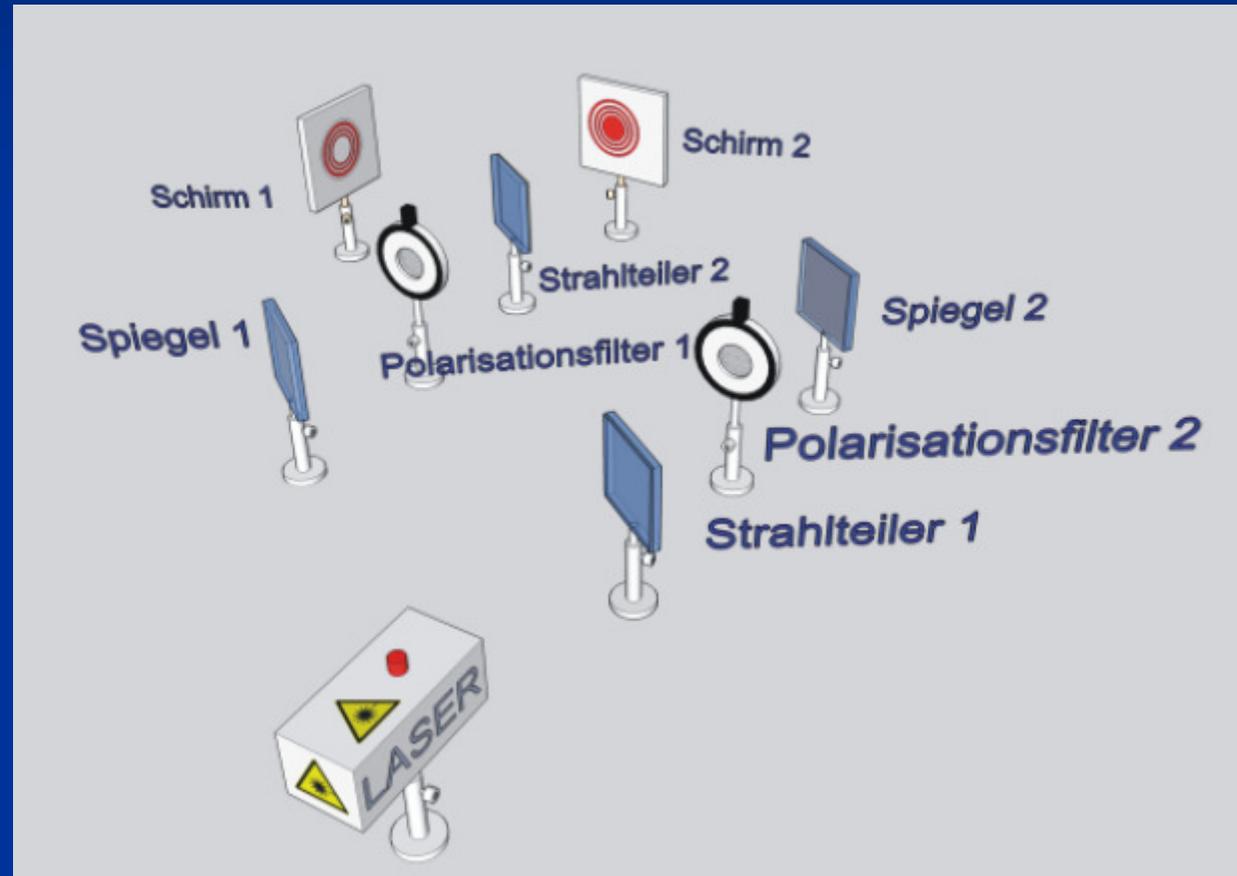


Mach-Zehnder-Interferometer

Orientierung der Polarisatoren zueinander: 0°

Interferenz

(QM: Keine
Wegmarkierung)

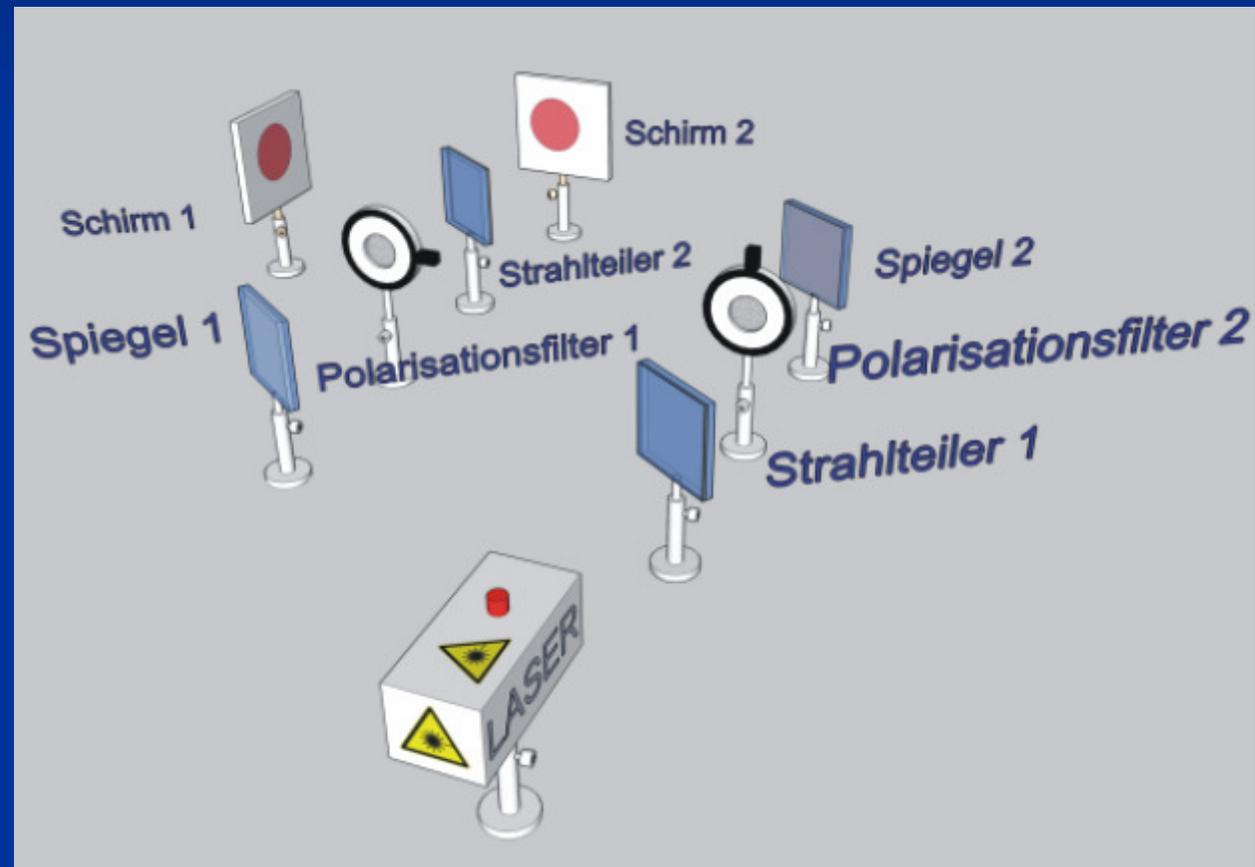


Mach-Zehnder-Interferometer

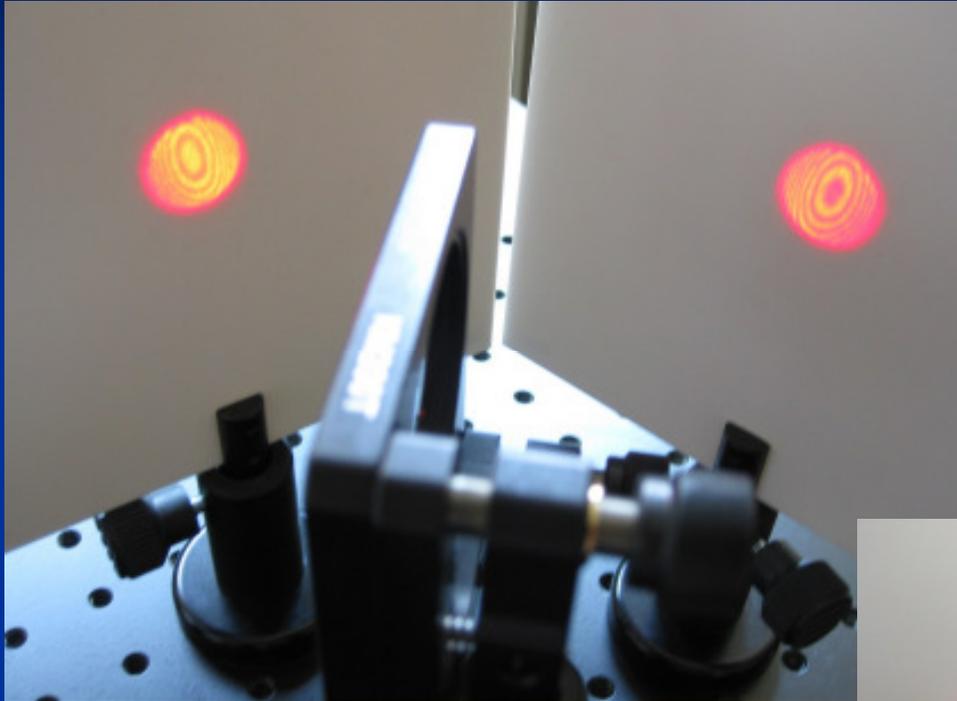
Orientierung der Polarisatoren zueinander: 90°

Keine Interferenz

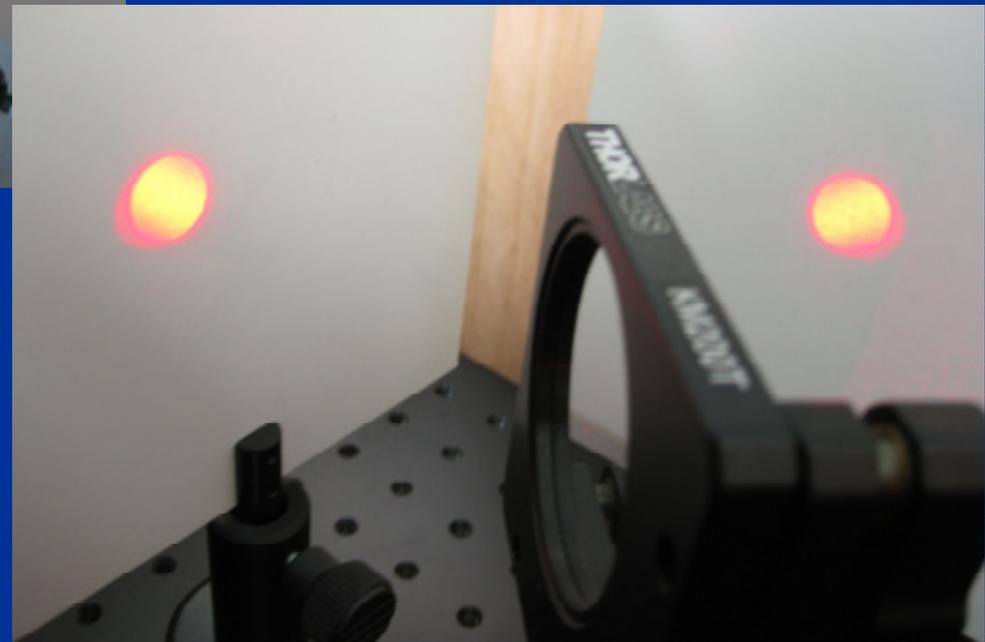
(QM: Wegmarkierung)



Mach-Zehnder-Interferometer



Interferenz



Keine Interferenz

Übergang zur Photonstatistik: Einzelphoton-Detektoren

- **Auge**

Mit Schülern nicht durchführbar

- **Photomultiplier (PMT)**

Nachteile:

- geringe Quanteneffizienz (meist $< 5\%$ im roten Bereich)
- Hochspannung zum Betrieb erforderlich, extra Netzteil

- **Halbleiter: Avalanche-Photodiode (APD)**

Vorteile:

- bessere Quanteneffizienz im roten Bereich ($> 20\%$)
- keine Hochspannung, handliche Bedienung
- normierte Signale

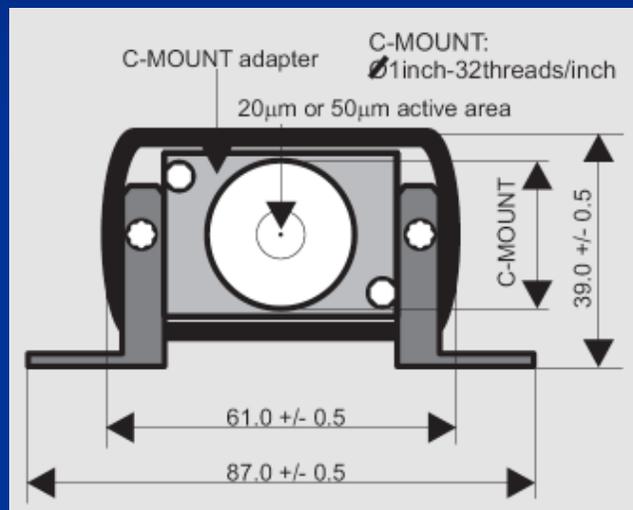
Nachteil:

Rauschrate bis 60 Hz

Avalanche Photodioden - Detektor

Der Detektor:

id100-20



- Betrieb im Geiger-Modus
- Detektorfläche $\varnothing 20 \mu\text{m}$
- Peltier gekühlt
- Kosten ca. 1,5 k€

Avalanche Photodioden - Detektor

Der Detektor: **id100-20**

Kenngroßen:

Quantenausbeute:

bei 600nm: 20 – 25%
bei 700nm: 15 – 18%

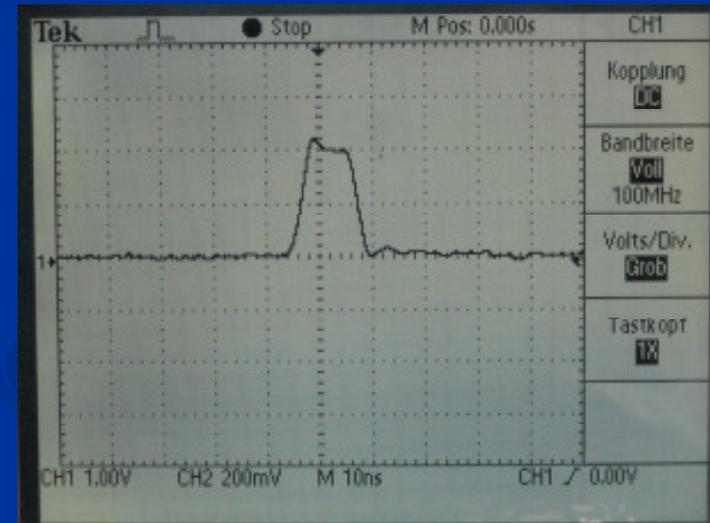
Dunkelzählrate: < 60Hz

Maximale Zählrate: 20MHz

Ausgabesignal:

Pulsbreite: 10ns
Pulshöhe: 2V

Totzeit: 45 ns
(Pulsdauer + hold-off)

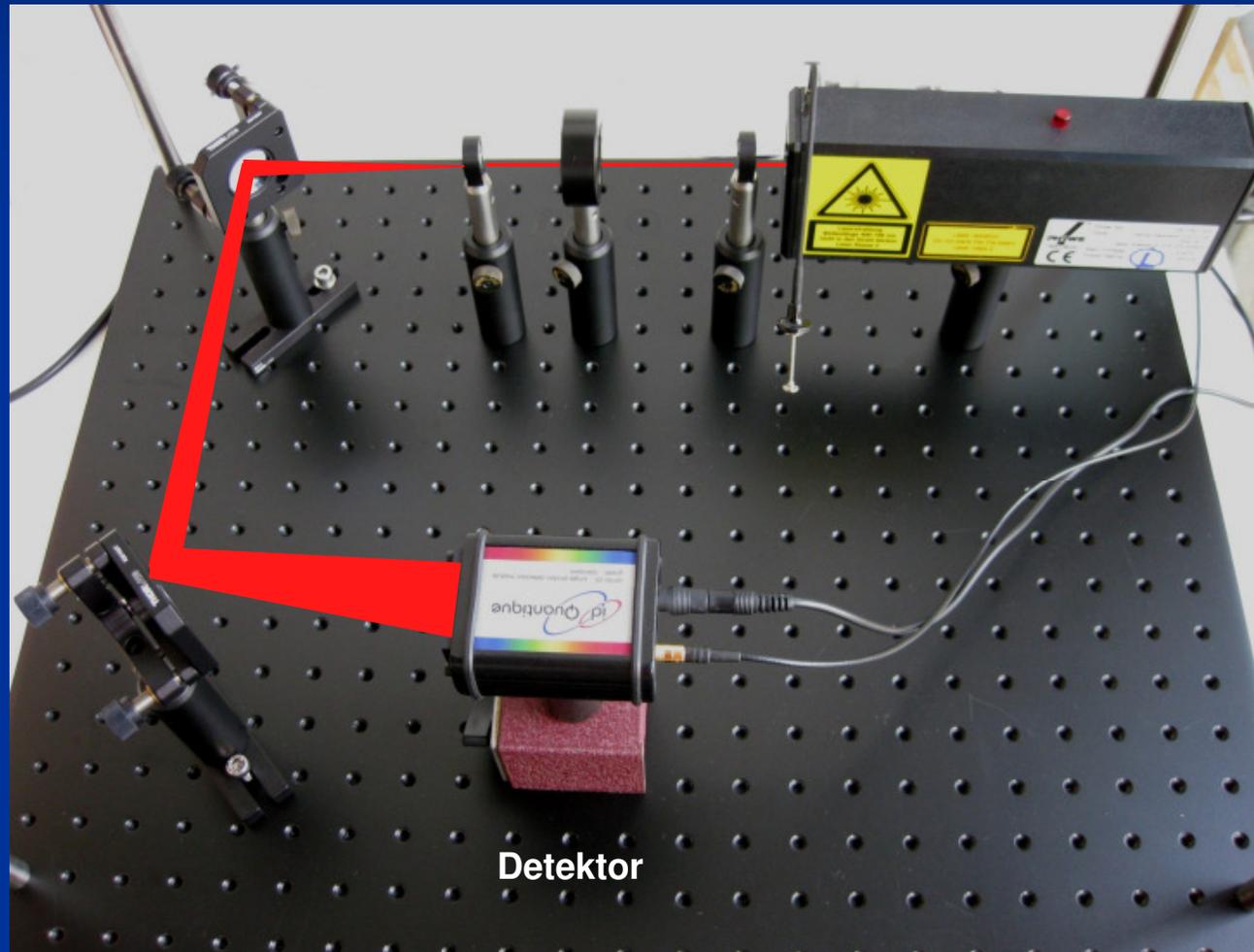


Einfaches Einzelphoton-Experiment

Spiegel

ND-Filter (Absorber),
Linse

Laser



Optional:
Spiegel
oder
Strahlteiler

Detektor

Kosten...

Mach-Zehnder-Aufbau (Phywe):

- Grundplatte und alle Komponenten

ca. **4300 Euro**

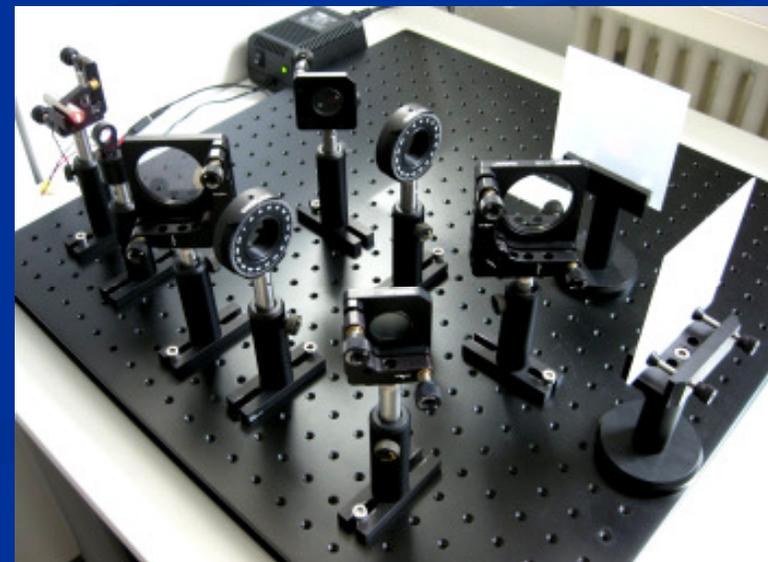
- außerdem: Qualität ...



Mach-Zehnder-Aufbau (Thorlabs)

Grundplatte und alle Komponenten

ca. **1600 Euro**



Experimente mit Schülern

1. Abschätzung, wie viele N Photonen am Detektor erwartet werden

$$N = \frac{P \cdot t \cdot \lambda}{h \cdot c} \cdot \frac{A_D}{A}$$

⇒ Erwartete Werte, z.B.:

2,5%-Absorber: 4,6 – 6,4 Photonen/10 μ s

1% - Absorber: 1,8 – 2,6 Photonen/10 μ s

P Laserleistung

λ Wellenlänge Laser

A Gesamtfläche

A_D Detektorfläche

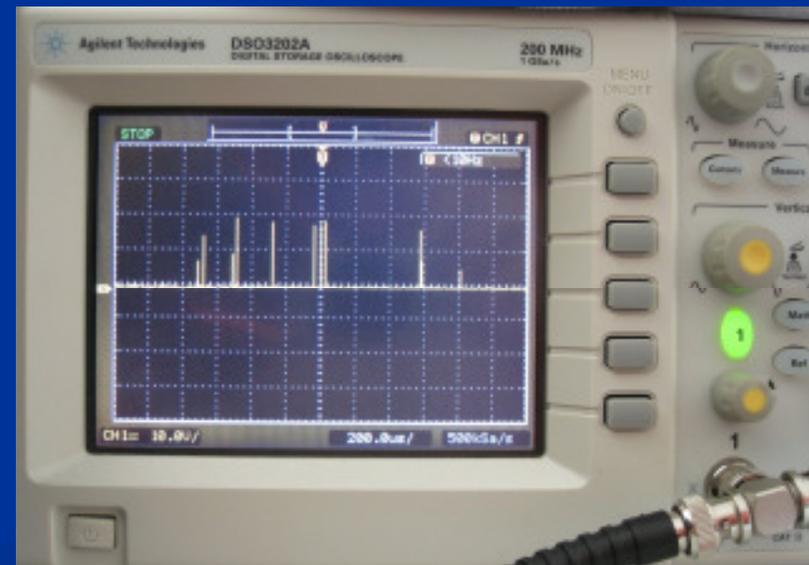
Experimente mit Schülern

2. Messung „per Hand“ mit dem Speicher-Oszilloskop, zunächst an nur einem Detektor

- Schnelles Speicheroszi mit hoher Sample-Rate erforderlich (hier: 200 MHz, 2 GSa/s)
- Triggern der „richtigen“ Signale

Dann: Zählen der Photonen in gestopptem Zeitfenster (single shot mode)

Brauchbare Ergebnisse schon nach relativ wenigen Messungen



Experimente mit Schülern

3. Auswertung am PC

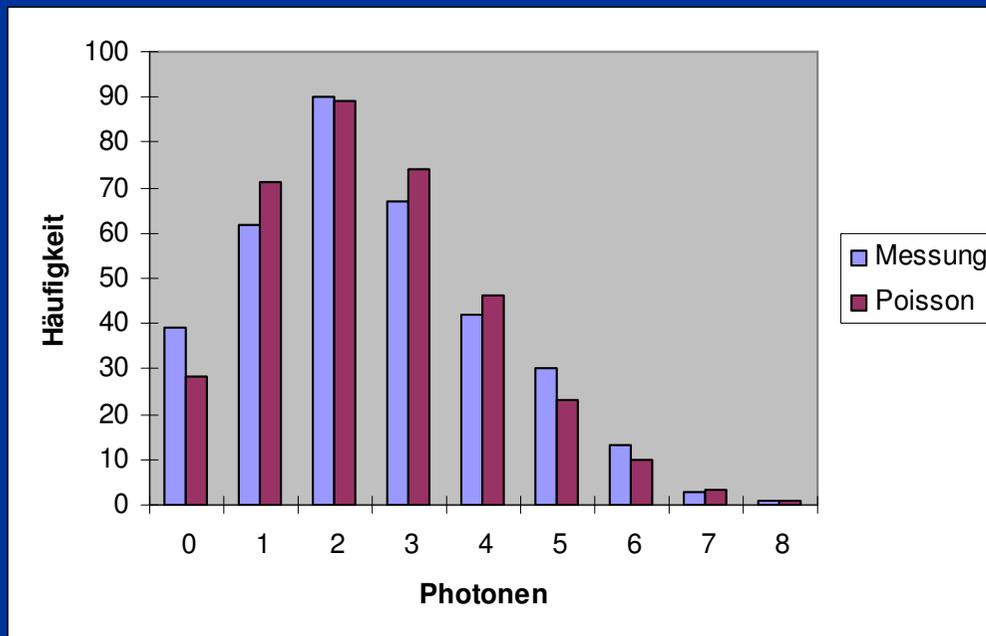
z.B. 1%-Graufilter:

Mittelwert:

2,5 Photonen/10 μ s

Erwartet:

1,8 – 2,6 Photonen/10 μ s



Auswertung der Poisson-Verteilung:

Bestimme Häufigkeit $H(k)$ der auftretenden Photonanzahlen

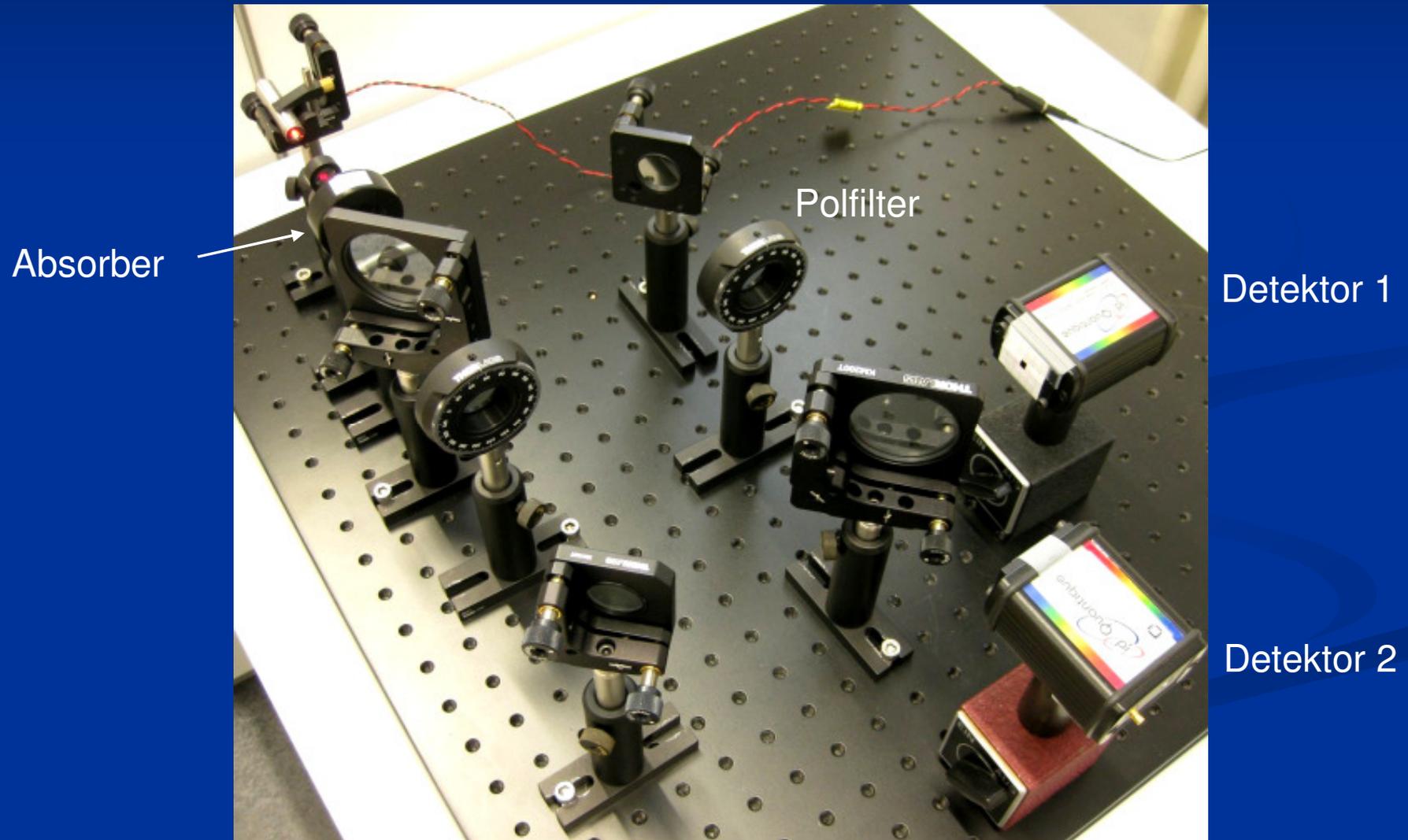
$$H(k) = n \cdot \frac{\lambda^k}{k!} \cdot e^{-\lambda}$$

Ermitteln der theoretisch erwarteten Verteilung anhand des Mittelwerts und Vergleich

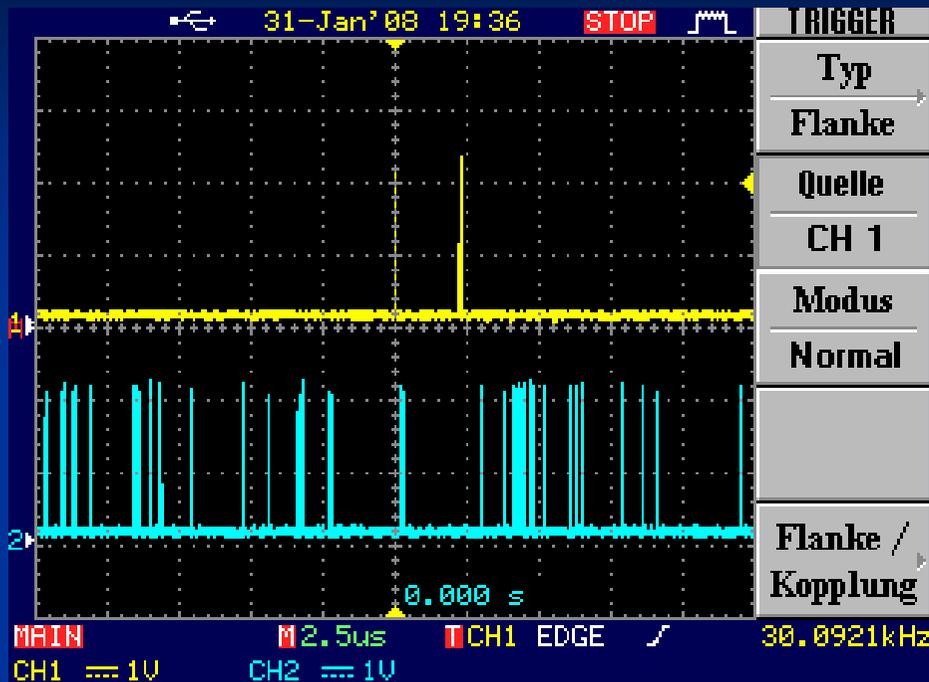
Experimente mit Schülern

4. Messung mit zwei Detektoren im MZI

Wir ersetzen die Schirme durch APDs und bauen einen Absorber ein



Experimente mit Schülern



Einstellung hier:

Polarisatoren parallel eingestellt

⇒ Interferenz:

Minimum an Kanal 1

Maximum an Kanal 2

Wieder zählen der Ereignisse,
diesmal mit elektronischem
Zähler oder Oszi mit Zählfunktion

„Interferenz des Photons mit sich selbst“ (Dirac, 1930), d.h.

Photon ist sozusagen gleichzeitig in beiden Teilstrahlen vorhanden
(Superposition der Zustände) ⇒ Wahrscheinlichkeitsinterpretation: gilt für
einzelnes Photon, ist aber nur im Kollektiv erkennbar

Experimente mit Schülern

Variation der Polarisator-Einstellungen

Tabellen: Photonenrate/[kHz] (2,5%-Absorber)

ohne
Wegmarkierung:

Detektor 1	Detektor 2
541	42
535	39
520	42
539	38

Mittelwerte:

564	41
-----	----

Maximum

Minimum

Wegmarkierung:

Detektor 1	Detektor 2
198	168
200	168
200	167
199	168

199	168
-----	-----

keine Interferenz

Experimente mit Schülern

4. Hinzufügen des „Radierers“

Anbringen weiterer Polarisatoren vor den Detektoren



Wegmarkierung
+ Radierer:

Detektor 1	Detektor 2
156	7
156	6
156	5
154	5

Mittelwerte:

156	6
-----	---

Maximum Minimum

⇒ Wegmarkierung
„ausradiert“

Delayed choice Experimente

Wheeler's Gedankenexperiment:

Verzögerte Entscheidung:

Hinzufügen des Radierers erst dann, wenn Photon den Spalt bzw. Strahlteiler schon passiert hat...

„The past has no existence except as it is recorded in the present.“

(J.A. Wheeler in *Mathematical Foundations of Quantum Theory* (ed. A.R. Marlow), 9-48 (Academic, New York, 1978))

Experimentelle Bestätigung, z.B.:

Hellmuth, Walther, Zajonc, Schleich, Phys. Rev. A **35**, 2532 (1987)

Dank

- Dr. Wolfgang Löffler (Institut für Angewandte Physik, Uni Karlsruhe)
- Carmen Kohler
- Sven Röhrauer

- Sponsoren:

