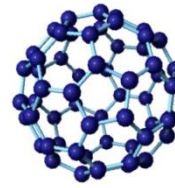
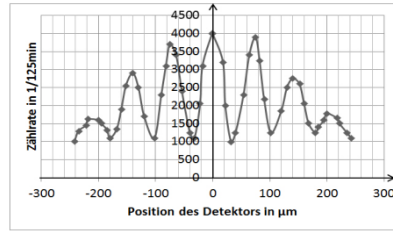
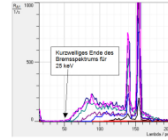


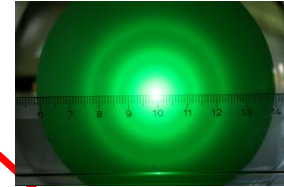
Objekte mit Ruhemasse zuerst: z.B. Interferenz einzelner Neutronen und Fullerene

Kurzwelliges Ende im Röntgen-Spektrum



de-Broglie-Gleichung

Interferenz von Elektronen



optische Analogieversuche an Transmissionsgittern

h -Bestimmung mit LED: Messung der Energie von Photonen

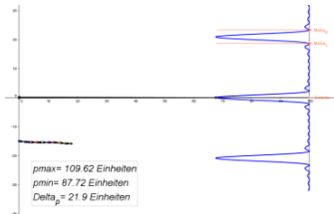


Fotoeffekt

zur Messung der Energie des Lichts



Unbestimmtheit



Anwendungen in der QP



Mach-Zehnder-Interferometer

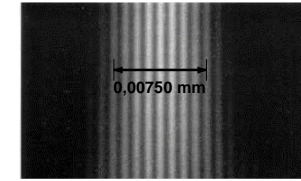


„Welcher-Weg“-Experimente
delayed-choice-Experimente
Anwendung der Quantenphysik

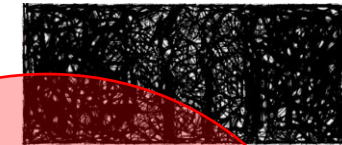
„Zustand, Präparation, Superposition“

Unterrichtsvorschlag für Kurse auf eA

Interferenz einzelner Elektronen: JÖNSSON ODER TONOMURA



Nachweis einzelner Photonen



Koinzidenzmethode



Koinzidenzmethode

Ziele aus dem KC

Die Lernenden (eA) ...

- ... erläutern die Koinzidenzmethode zum Nachweis einzelner Photonen.

Bezüge aus dem KC

Die Lernenden ...

- ... beschreiben ein Doppelspaltexperiment zur Interferenz von Quantenobjekten mit Ruhemasse (z. B. kalte Neutronen, Fullerene); inkl. stochastischer Deutung.
- ... übertragen die stochastische Deutung von Interferenzmustern auf Doppelspaltexperimente mit einzelnen Photonen und Elektronen.

Überlegungen

- Möglichst eine Doppelstunde
- Kein Schüler-/Demoexperiment möglich; ggf. Analogexperiment -> Zusatzmaterial
- Aktivität durch Simulation
- Möglicher Besuch im foeXlab in Hannover?
- Einsatz als Kennenlernen von Photonen oder später möglich

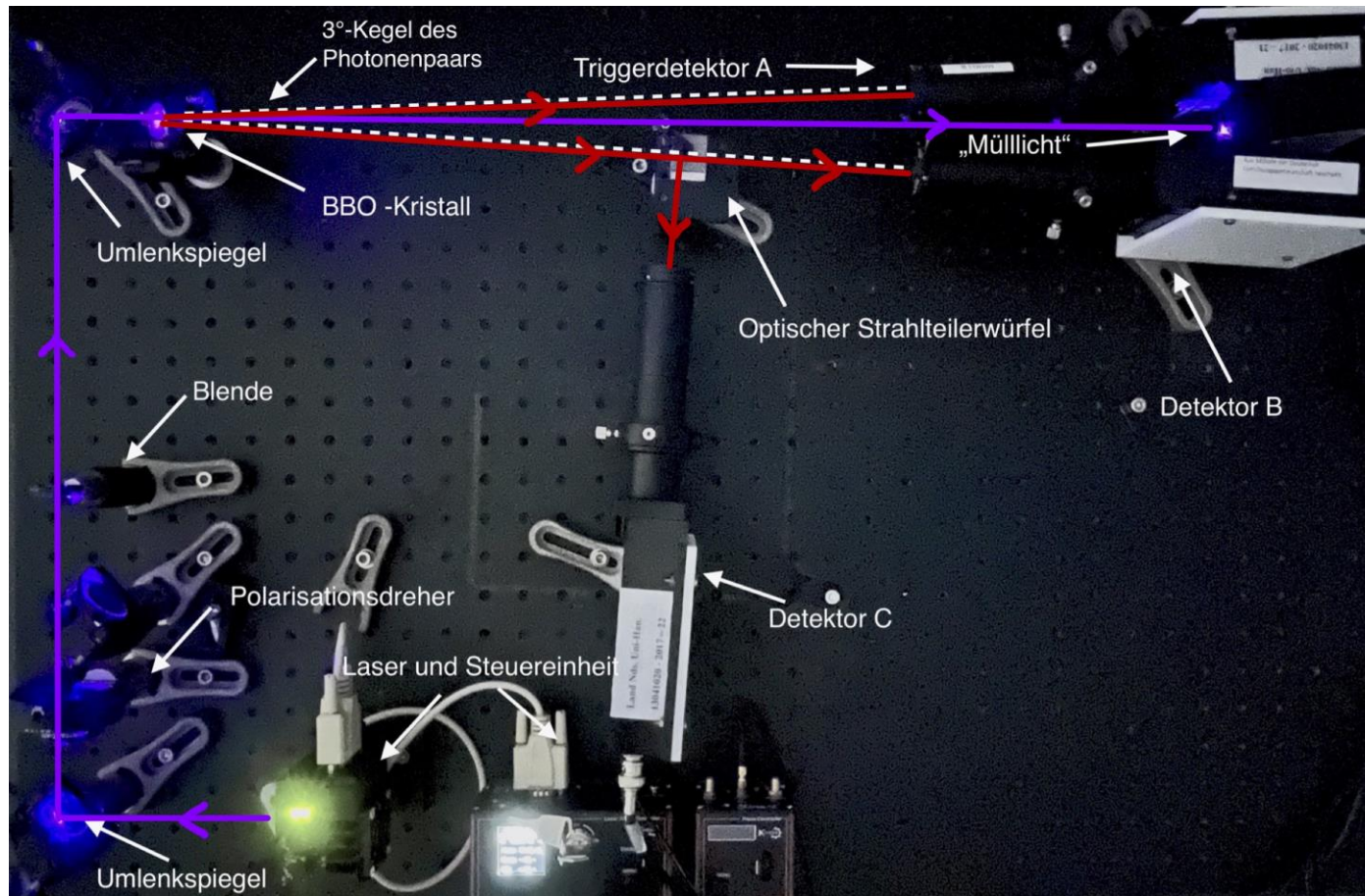
Idee:

Elektronen, Fullerene ... sind Quantenobjekte und zeigen Phänomene, die aus der Wellenoptik bekannt sind.

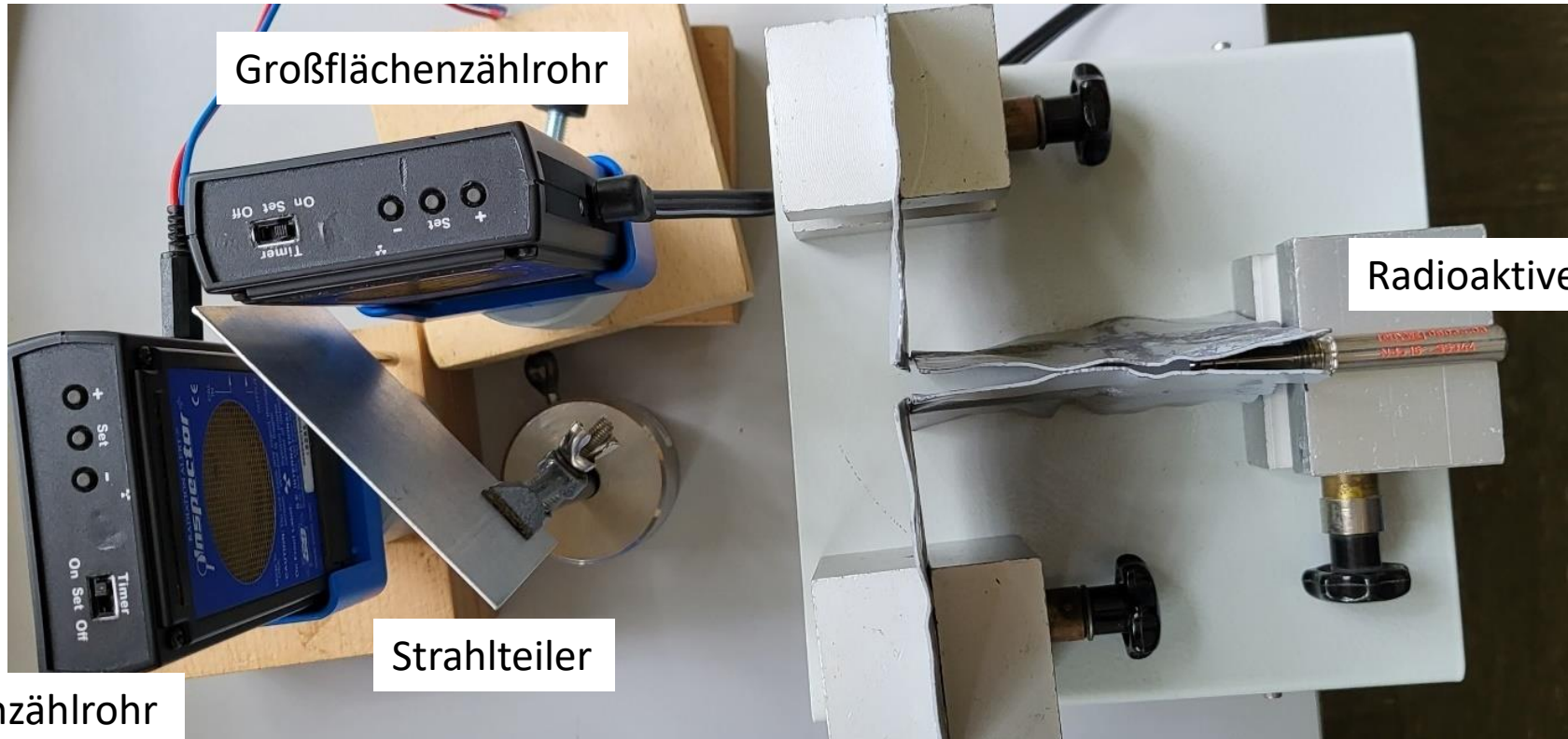
→ „Haben wir beim Licht etwas übersehen?“

Realexperiment – für Lehrende

- foeXlab Leibniz Universität Hannover ([Video](#))



Analogexperiment (Zusatzmaterial)



Großflächenzählrohr

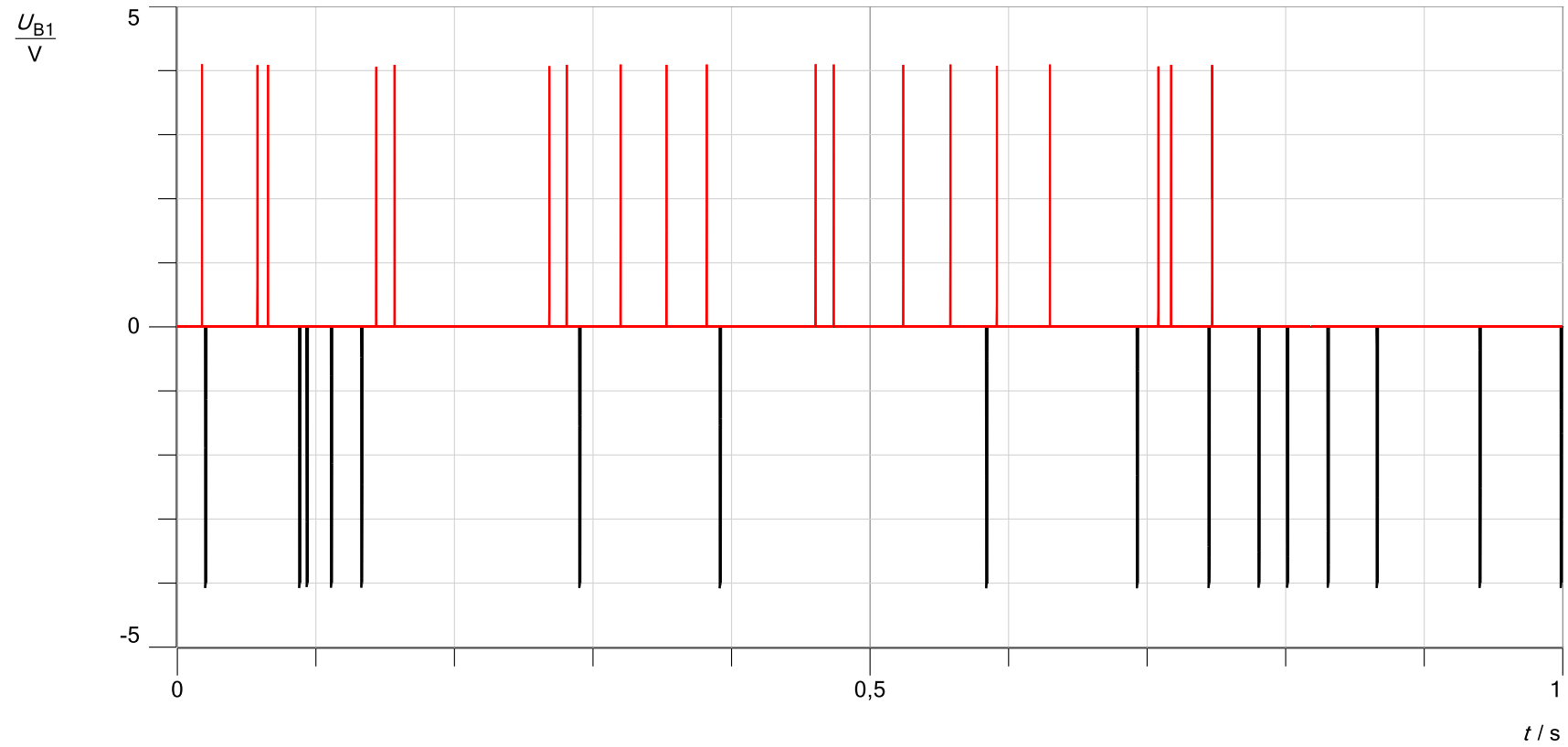
Großflächenzählrohr

Strahlteiler

Radioaktives Präparat

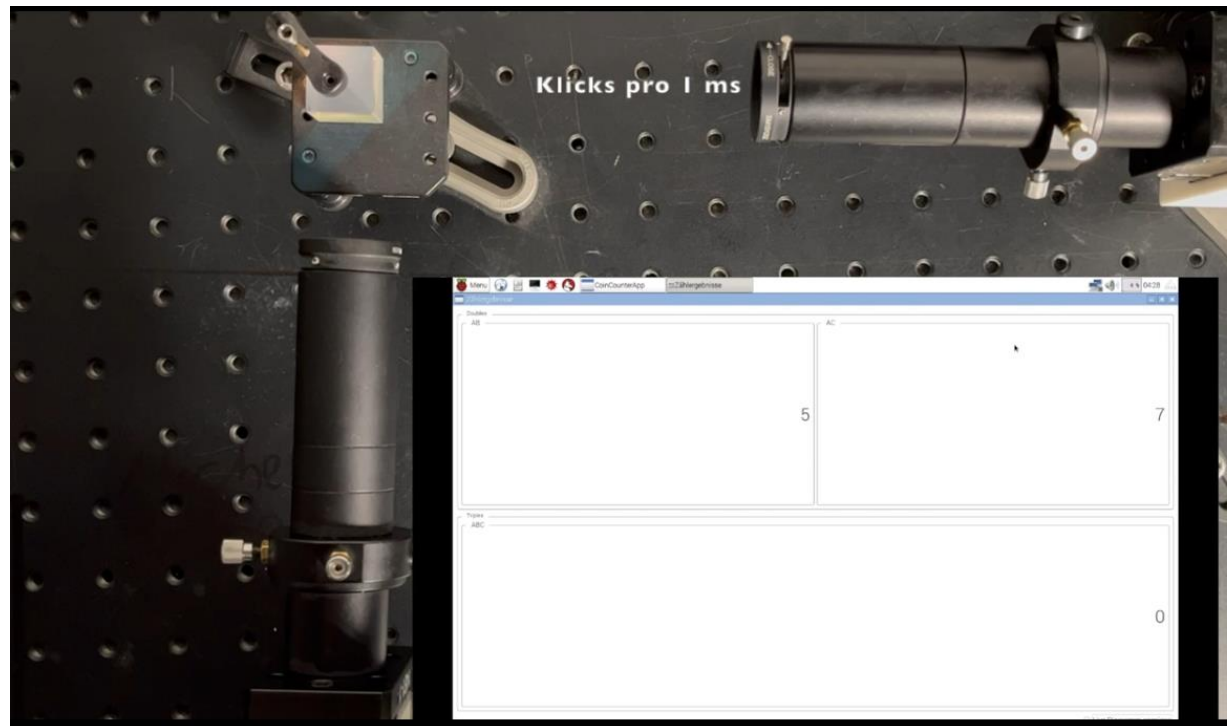
Nicht im Bild: Koinzidenzschaltung mit Cassy

Analogexperiment

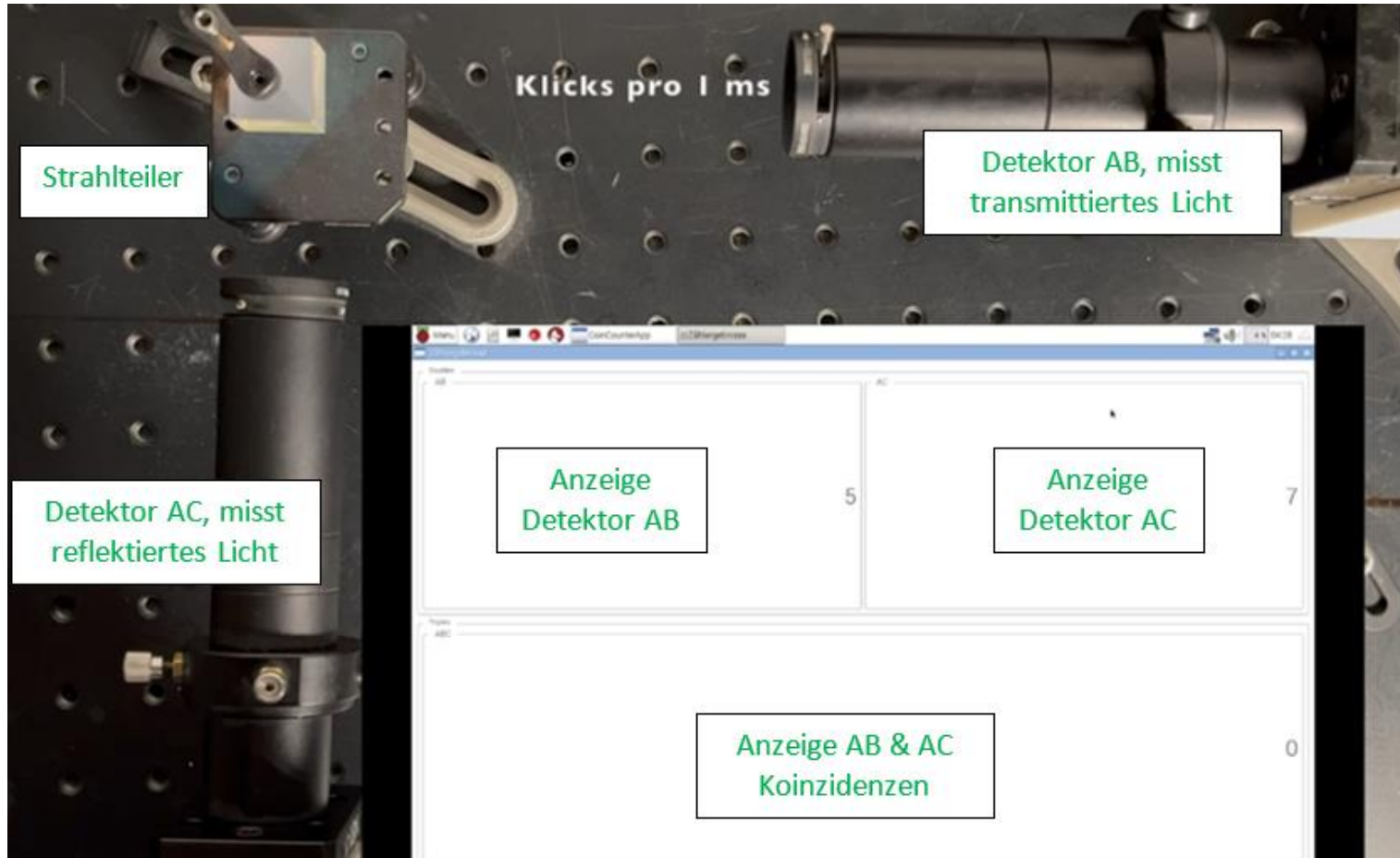


Realexperiment - Schülerversion

- foeXlab Leibniz Universität Hannover
- [Video](#), AB 01



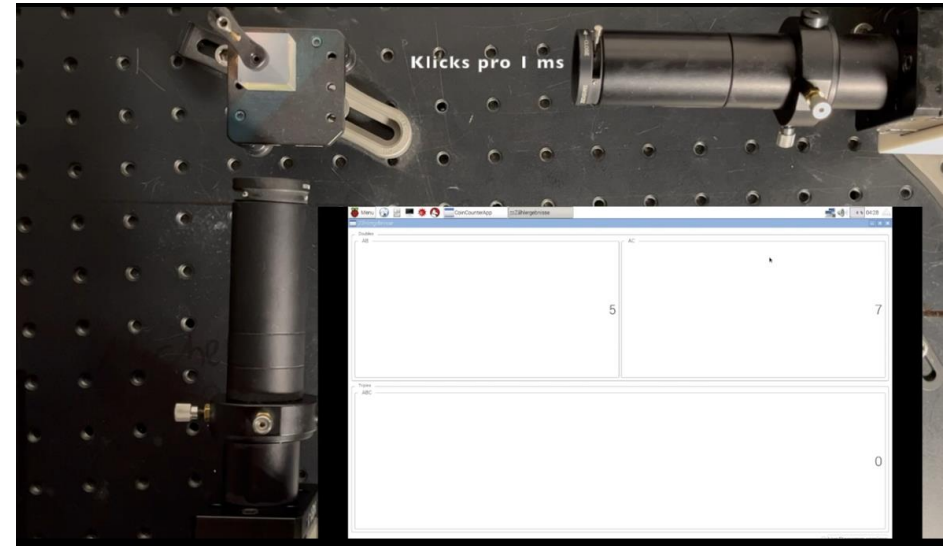
Realexperiment



Realexperiment

Beobachtungen:

- Ungefähre Gleichverteilung an den Detektoren
- Keine Koinzidenzen
(gleichzeitig = innerhalb von 5 ns)

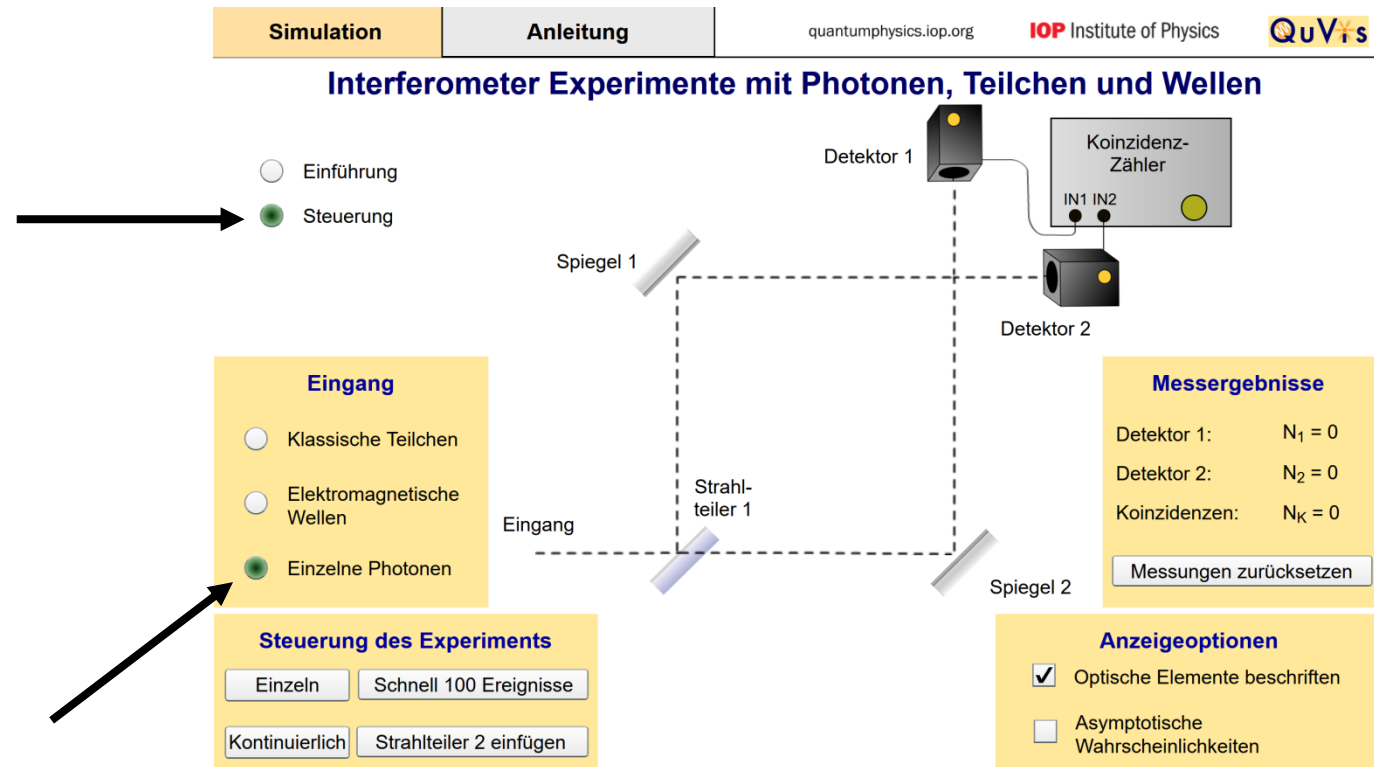


Schlussfolgerungen:

- Licht besteht aus einzelnen, unteilbaren Quantenobjekten

Simulation

- Quelle: [QuVis](https://www.quvis.org/)
- AB 02



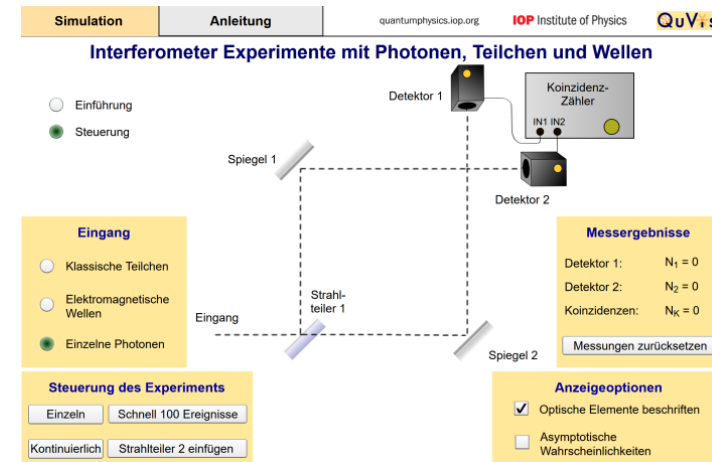
Simulation



[Quvis-Link](#)

Simulation

| n | N_1 | N_2 | N_K |
|------|-------|-------|-------|
| 200 | 89 | 111 | 0 |
| 400 | 194 | 206 | 0 |
| 600 | 302 | 298 | 0 |
| 800 | 407 | 393 | 0 |
| 1000 | 520 | 480 | 0 |

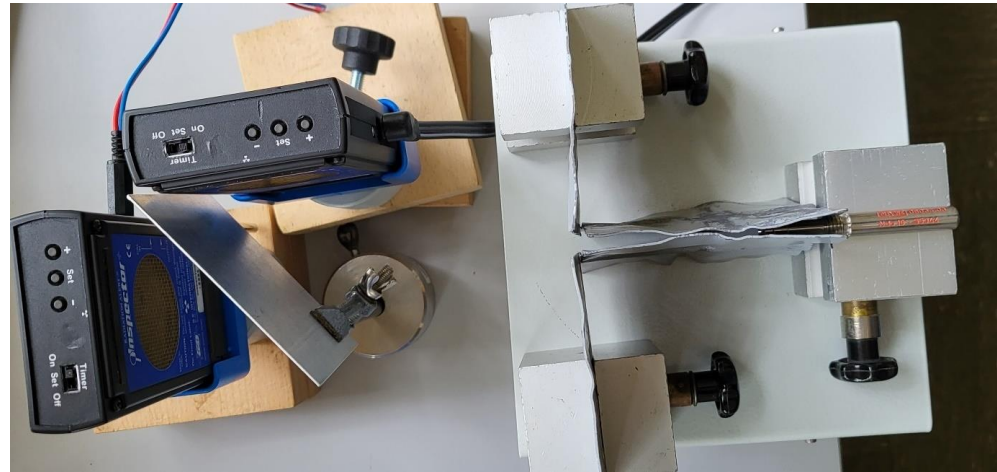


Ergebnisse:

- Ungefähre Gleichverteilung bei großen Anzahlen
- Keine Koinzidenzen wie im Realexperiment
- Darstellung des Photons kritisch zu betrachten
- Anknüpfung Mach-Zehnder-Interferometer

Zusatzmaterial

- I) Analogexperiment zur Koinzidenzmethode (Video)



- II) Stochastische Natur der Koinzidenzen
- III) Information zur Messmethode

Vorschlag Vorgehen im Unterricht

- 1) Haben wir bei Licht was übersehen? AB01
Video Strahlteiler
Begriff Koinzidenz kennenlernen
Aufbau verstehen
Daten aus Analogexperiment auswerten
- 2) Vertiefung mit der Simulation AB 02