

Thorlabs-Experimente in der Seminarausbildung

Tagung der Heisenberg-Gesellschaft in Lautrach, 13.07.2024

Andreas Schneider

Seminarlehrer für Physik

am Oskar-von-Miller-Gymnasium München

Alter Lehrplan QM (G8, Q12, Bayern)

Ph 12.1 Eigenschaften von Quantenobjekten (ca. 12 Std.)

Nachdem die Schüler in der Jahrgangsstufe 10 einen Einblick in grundlegende Inhalte und Denkweisen der Quantenphysik gewonnen haben, untersuchen sie nun exemplarisch Eigenschaften von Quantenobjekten genauer. Mit der quantitativen Auswertung und Deutung des Photoeffekts erlangen sie ein weitergehendes Verständnis für den Teilchencharakter von Photonen. Der Wellencharakter von Elektronen lässt sich anhand eines Experiments zur Elektronenbeugung zeigen und unter Einbeziehung der De-Broglie-Wellenlänge auch plausibel machen. Die Schüler lernen, dass im mikroskopischen Bereich der strenge Determinismus durch Wahrscheinlichkeitsaussagen ersetzt werden muss, und erfahren die Bedeutung der Unbestimmtheitsrelation von Heisenberg. So erkennen sie, dass das klassische Teilchenbild zur Beschreibung des Mikrokosmos ungeeignet ist und durch ein neues Teilchenkonzept ersetzt werden muss.

- Teilchencharakter von Photonen
 - [quantitative Behandlung des Photoeffekts, Deutung nach Einstein](#)
 - Energie und Impuls des Photons
- [Wellencharakter von Elektronen](#)
 - Zusammenhang zwischen Impuls und Wellenlänge nach de Broglie
 - qualitative Experimente mit der Elektronenbeugungsröhre, quantitative Datenauswertung von Doppelspalt- oder Gitterversuchen, z. B. auch mithilfe geeigneter [Simulationsprogramme](#)
 - technische Anwendung, z. B. Prinzip des Elektronenmikroskops
- [Beschreibung des Verhaltens von Quantenobjekten](#)
 - Wahrscheinlichkeitsaussagen zu Interferenzversuchen mit einzelnen Quantenobjekten
 - [Unbestimmtheitsrelation von Heisenberg](#)

Quantenphysik
bis 1930

Alter Lehrplan QM (G8, Q12, Bayern)

- ▶ Historisch-genetischer Ansatz:
- ▶ Zuerst Quantenobjekt Photon
 - ▶ Einsteins Deutung des Fotoeffekts
 - ▶ Energie und Impuls des Photons
- ▶ Dann Quantenobjekte mit Ruhemasse (v.a. Elektronen)
 - ▶ Wellennatur von Elektronen, de-Broglie-Wellenlänge
 - ▶ Interferenz- und Beugungserscheinungen
 - ▶ Born'sche Deutung der Wellenfunktion
 - ▶ Dualismus Welle-Teilchen
- ▶ **Einzelphotoneneffekte und moderne Fragestellungen nur am Rande**

QM-Konzept im LehrplanPlus, Q13, eA

▼ Ph13 1.1 Eigenschaften von Quantenobjekten (ca. 14 Std.)

- Quantitative Experimente mit der **Elektronenbeugungsröhre**, Bragg-Reflexion, *Experimentelles Arbeiten: Elektronenbeugung*
 - de Broglie-Beziehung für das Elektron
 - **Simulation des Doppelspaltexperiments**: wellenartiges, teilchenartiges und stochastisches Verhalten des Quantenobjekts Elektron, Interpretation mithilfe einer Wellenfunktion
 - **Präparation einzelner Photonen, Mach-Zehnder-Interferometer**; wellenartiges, teilchenartiges und stochastisches Verhalten des Quantenobjekts Photon
 - Hallwachs-Experiment, Lichtquantenhypothese, Einstein-Gleichung zur Deutung des **Photoeffekts**; Energie und Impuls des Photons; *Experimentelles Arbeiten: Bestimmung des Planck'schen Wirkungsquantums mit der Gegenfeldmethode*
- **Elektronen vor Photonen**
 - **Präzisere Begrifflichkeiten**
 - **Vermeidung von „false friends“**
 - **Einzelphotonen als zentrale Untersuchungsobjekte**

QM-Konzept im LehrplanPlus, Q13, eA

▼ Ph13 1.2 Einblick in das Weltbild der Quantenphysik (ca. 13 Std.)

- Wellenfunktion: Zusammenhang von Wellenfunktion und Nachweiswahrscheinlichkeit, Superposition, Determiniertheit
- Komplementarität, Wellenpaket, Heisenberg'sche Unbestimmtheitsrelation
- quantenphysikalischer Messprozess, Kausalität, Realität, Komplementarität von Weginformation und Interferenzfähigkeit
- Quantenradierer
- Nicht-Lokalität, Delayed-Choice-Experiment
- Dekohärenz quantenphysikalischer Zustände
- Quantenphysik in Technik und Gesellschaft, z. B. Quantencomputer, Quantenkryptographie, Beispiele für missbräuchliche Argumentation mit der Quantenphysik: Scharlatanerie

- Moderne Begrifflichkeiten
- Aktuelle Fragestellungen
- Aktuelle und zukünftige Anwendungen

Konsequenzen für die Seminausbildung

- ▶ **Fachliche** Auseinandersetzung mit der Quantenphysik
 - ▶ Klassische vs. neue Fragestellungen
 - ▶ Präzise Begrifflichkeiten („Präparation“, „Komplementarität“, ...)
 - ▶ Ausräumen von Fehlkonzepten (z. B. „Schwache Lampe emittiert Einzelphotonen.“)
 - ▶ Moderne und zukünftige Anwendungen
- ▶ **Didaktische** Auseinandersetzung mit der Quantenphysik
 - ▶ Geeignete Simulationen
 - ▶ Geeignete Reihenfolge
 - ▶ Schülergemäße Veranschaulichungen, Argumentationen und Formulierungen
 - ▶ Geeignete Experimente (**Analogieexperimente mit vielen Photonen** als Veranschaulichung der Einzelphotoneneffekte)

Der „Knallertest“

Gedankenexperiment: Messung ohne Wechselwirkung?
(Originalartikel: Elitzur/Vaidman: „Bomb-Test“, 1993)

Bilder und Grafiken sind den Anleitung zu den Thorlabs-Experimenten entnommen

Knallertest

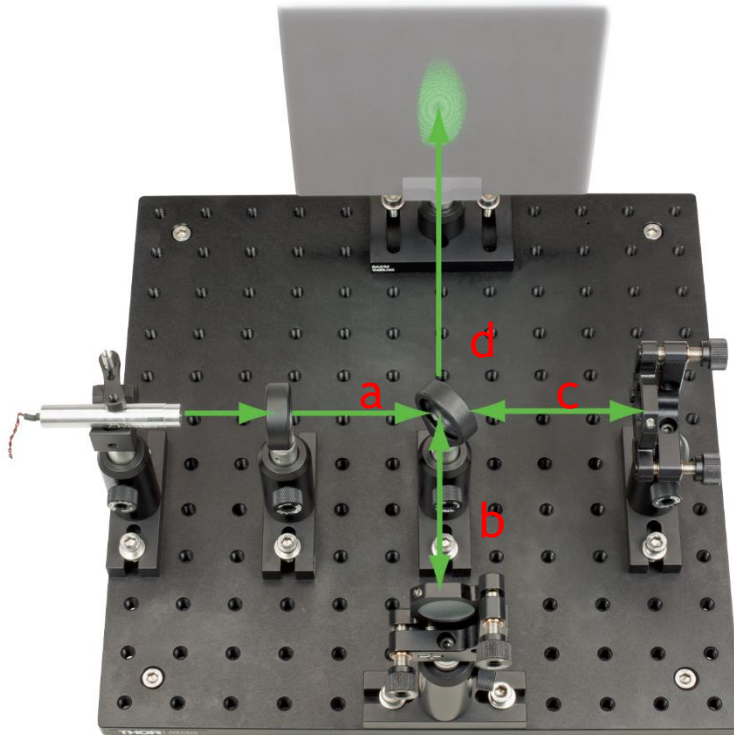
Stichworte/Konzepte

- ▶ Michelson-Interferometer
- ▶ Messprozess
- ▶ Unbestimmtheit
- ▶ Welcher-Weg-Information
- ▶ Nichtlokalität
- ▶ Komplementarität

Problemstellung

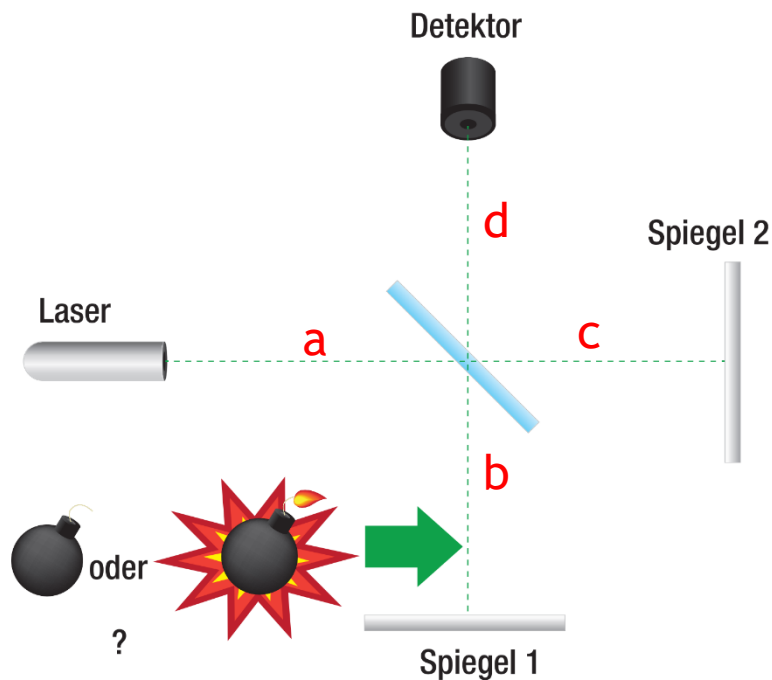
- ▶ Es stehen N Knaller („Quantenbomben“) zur Verfügung, die bei Wechselwirkung mit einem einzigen Photon explodieren.
- ▶ Mehrere sind Knaller defekt, nur A Knaller funktionieren.
- ▶ Fragestellung: Gibt es eine Möglichkeit, wenigstens einen Teil der intakten Knaller zu eindeutig zu identifizieren, ohne sie zur Explosion zu bringen? Wie groß ist der Anteil der Knaller, die voraussichtlich gerettet werden können?
- ▶ Erstaunlicherweise ermöglicht die Quantenphysik eine **wechselwirkungsfreie Identifizierung** eines Teil der A intakten Knaller.

Michelson-Interferometer: QM- Betrachtung



- Die möglichen **Wege** eines Photons (alle gleichwahrscheinlich):
 - Zum Detektor: a-b-b-d (Weg 1)
 - Zum Detektor: a-c-c-d (Weg 2)
 - Zum Laser: a-b-b-a (Weg 3)
 - Zum Laser: a-c-c-a (Weg 4)
- **Interferenz** nur, wenn **Weg** des Photons vom Laser zum Detektor **nicht bekannt** bzw. wenn **Wege 1 und 2 nicht unterscheidbar**

Knaller im Strahlengang



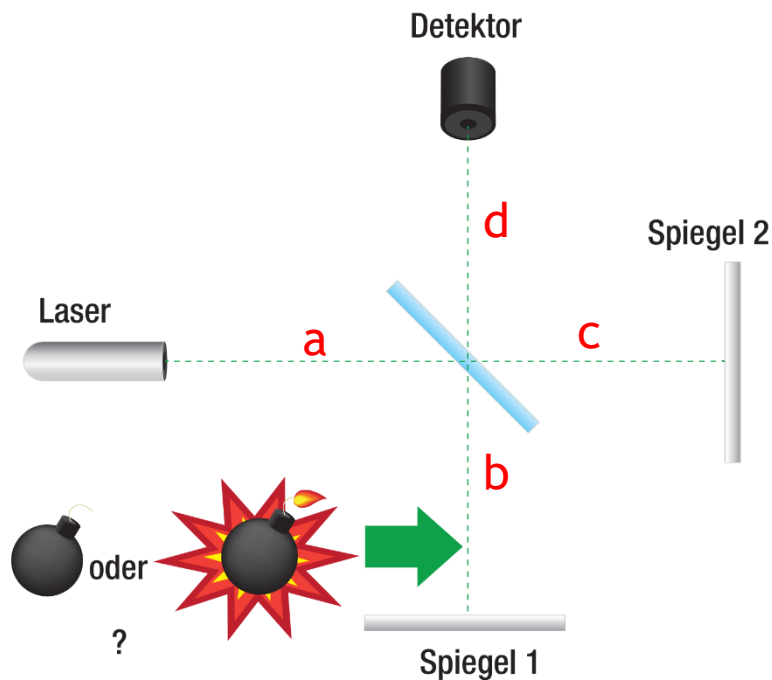
Voreinstellung:

Destruktive Interferenz am
Detektor

Ein **Knaller** befindet sich im
Strahlengang (Teilweg b)

Frage: Knaller defekt oder
intakt?

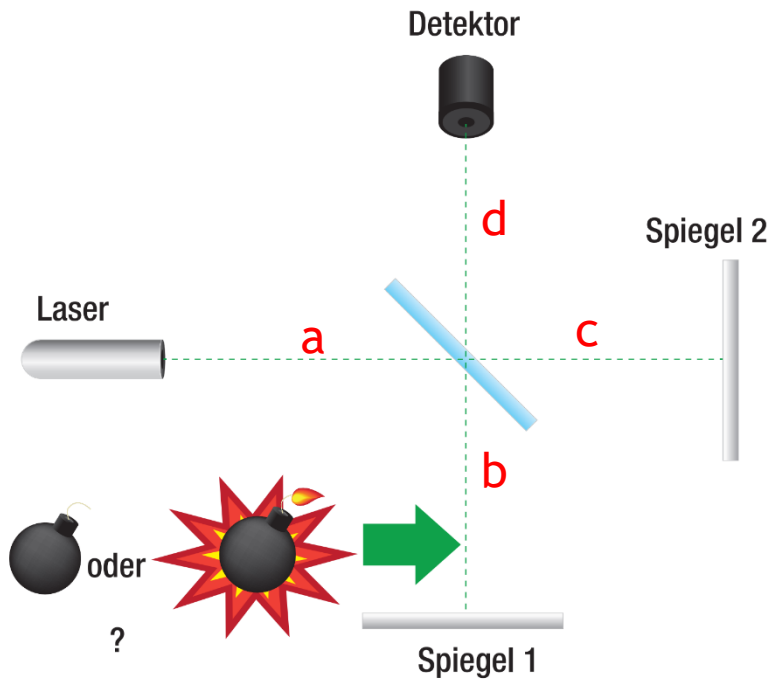
Defekter Knaller im Strahlengang



Defekter Knaller im Strahlengang (Teilweg b)

- **Teilwege b und c nicht unterscheidbar**
- **Destruktive Interferenz bleibt in jedem Fall erhalten.**
- Detektor bleibt dunkel.
- Kein Erkenntnisgewinn

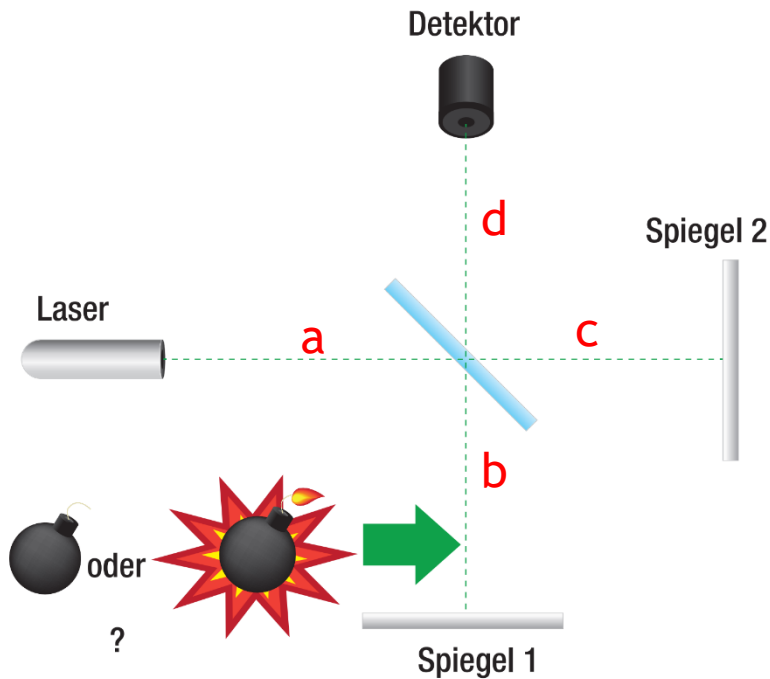
Intakter Knaller im Strahlengang



Fall 1: a-b-Bumm!

- Eigentlich 2 Fälle:
Weg 3: a-b-b-a und
Weg 1: a-b-b-d
- Intakter Knaller zerstört ☹️
- Kein Photon im Detektor registriert

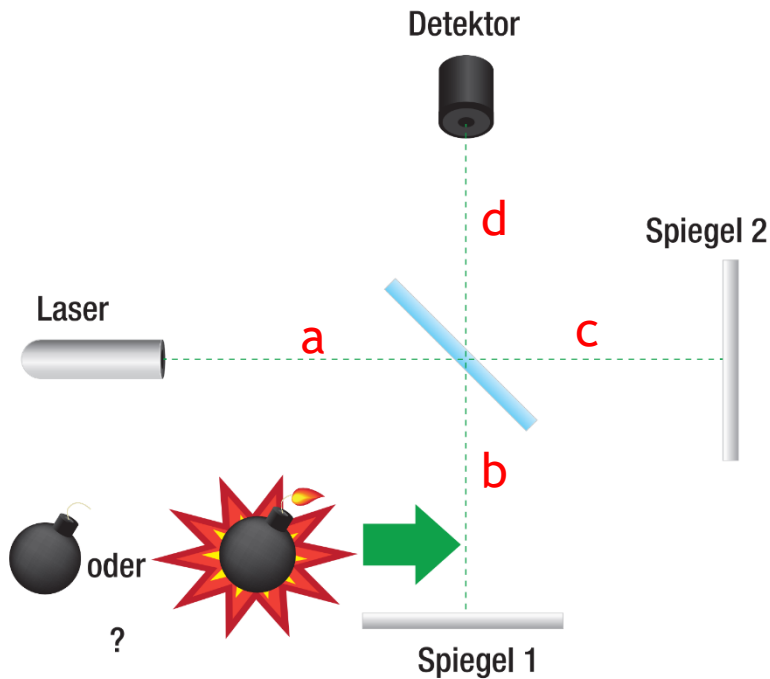
Intakter Knaller im Strahlengang



Fall 2:

- Weg 4: a-c-c-a
- Keine Explosion
- Kein Photon im Detektor
- Scharfer **Knaller** wird nicht identifiziert.

Intakter Knaller im Strahlengang



Fall 3:

- Weg 2: a-c-c-d
- Keine Explosion
- Photon wird im Detektor registriert.
- **Nachweis für scharfen Knaller ohne Wechselwirkung**, denn bei Registrierung des Photons im Detektor ist die **Interferenz zusammengebrochen**.
- Das Photon hat **nachweisbar nicht den Teilweg b** genommen.

Anteil der geretteten intakten Knaller

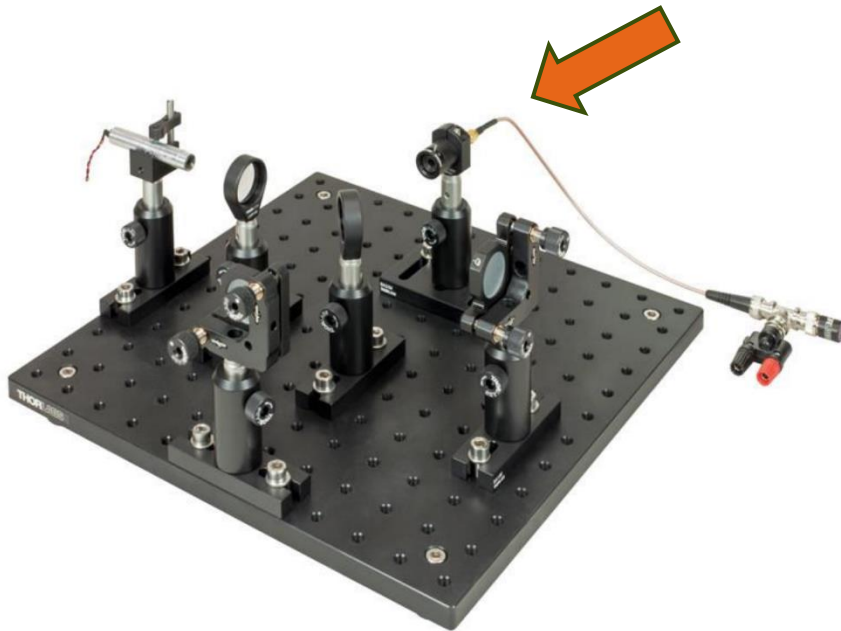
Pro Versuchsreihe:

- ▶ 50% der scharfen Knaller explodieren.
- ▶ 25% der scharfen Knaller werden nicht erkannt.
- ▶ **25% der scharfen Knaller werden ohne Wechselwirkung erkannt.**

- ▶ Bei systematischer Wiederholung mit den übrigen Knallern:

- ▶ ***Anzahl der geretteten scharfen Knaller*** = $\sum_{k=1}^{\infty} A \cdot \left(\frac{1}{4}\right)^k = \frac{1}{3}A$

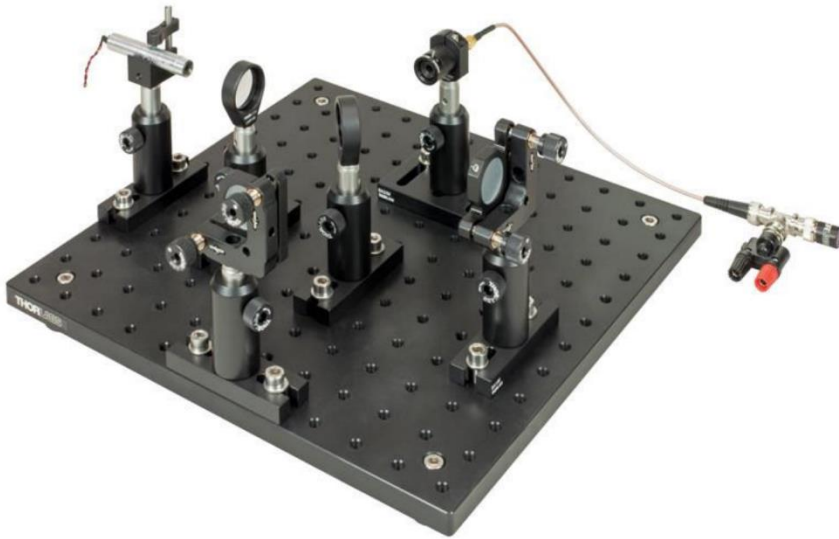
Messungen im Analogieexperiment



Vorbereitung:

- Laser statt Einzelphotonenquelle
- Schirm durch Intensitätsdetektor (Fotodiode) ersetzen
- Detektorblende auf das zentrale Minimum einstellen
- Im Idealfall misst man jetzt $U_{\text{Detektor}} = 0 \text{ mV}$

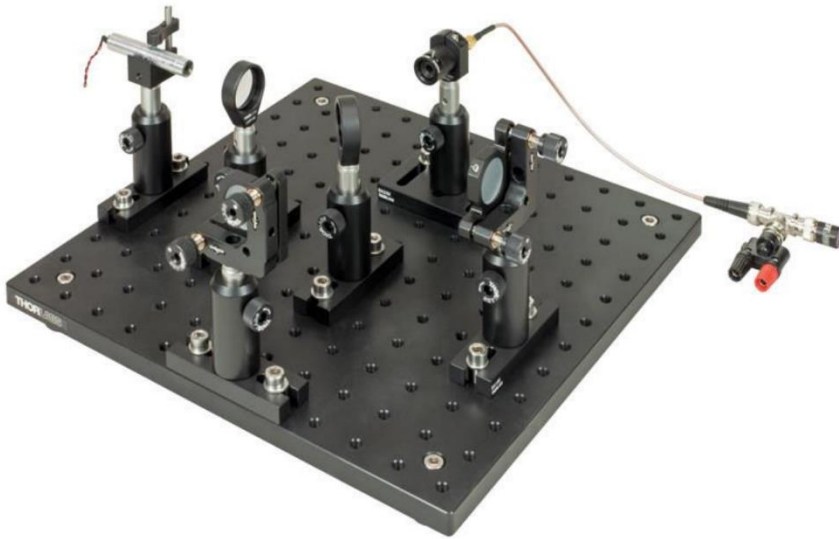
Messungen im Analogieexperiment



Messung der Gesamtintensität:

- Spiegel dejustieren, sodass Interferenz zusammenbricht.
- Die Intensitäten der Wege 1 und 2 addieren sich zu **50% der Gesamtintensität**.
- Beispiel: $U_{\text{Detektor}} \approx 50 \text{ mV}$
- 100 % der Intensität entspricht dann 100 mV.

Messungen im Analogieexperiment



Hindernis im Strahlengang;

- Spiegel neu justieren, sodass destruktive Interferenz wieder entsteht.
- Bei einem Hindernis im Strahlengang misst man $U_{\text{Detektor}} \approx 25 \text{ mV}$
- Diese 25 % der Gesamtintensität entsprechen den **25% der Photonen, die einen intakten Knaller ohne Wechselwirkung identifizieren.**

Erfahrungen und Tipps

- ▶ Experiment mit **hohem Erkenntnisgewinn**
- ▶ Obwohl nur am Rande im Lehrplan sehr empfehlenswert für das eA
- ▶ Michelson-Interferometer prinzipiell leicht zu montieren und einfach zu justieren
- ▶ Großes Problem: **Schwingender Untergrund macht stabile Intensitätsmessungen kritisch.**
- ▶ Deshalb Versuch unbedingt auf den fest verankerten Physikaalpulpen aufbauen und nicht auf Schülertischen.
- ▶ Weitere Fehlerquellen und Troubleshooting: Siehe Handbuch von Thorlabs

**Vielen Dank für die
Aufmerksamkeit!**

The background features abstract, overlapping geometric shapes in various shades of green, ranging from light lime to dark forest green. These shapes are primarily located on the right side of the slide, creating a modern, layered effect. The rest of the slide is a plain white background.