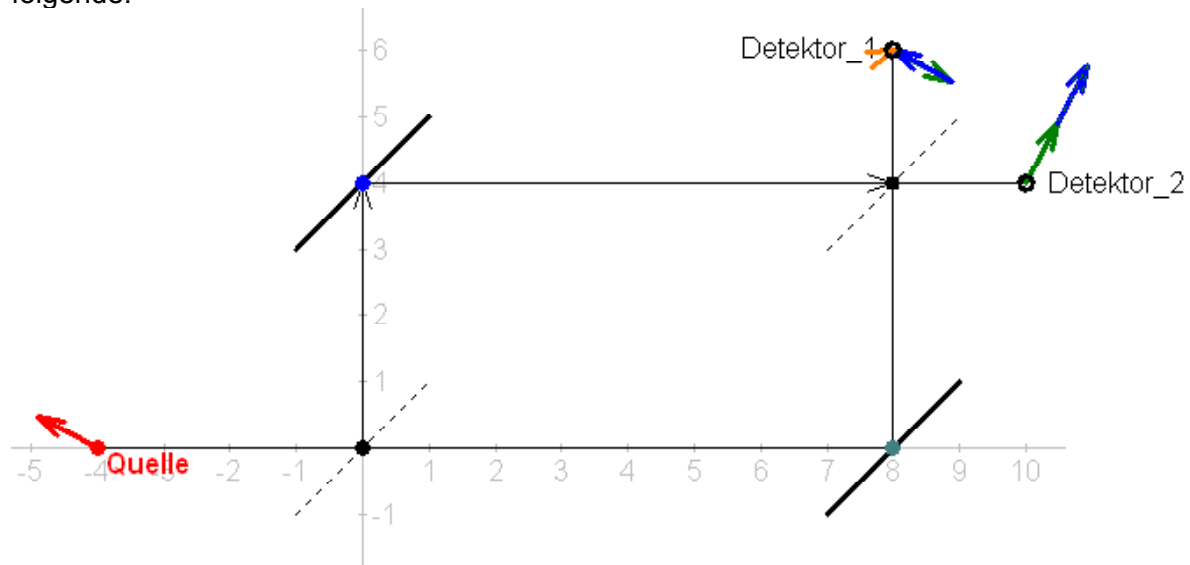


Zur Phasenverschiebung an den Strahlteilern im MACH- ZEHNDER- Interferometer

Oft wird ein MACH- ZEHNDER- Interferometer herangezogen, wenn man die Welcher- Weg- Information thematisieren möchte. Man verwendet dann meist eine Zeichnung wie die folgende:



In der Argumentation kommt es darauf an, dass im Detektor 1 niemals Photonen registriert werden, solange beide Verbindungen von der Quelle durch das Interferometer offen stehen. Das kann man nur erhalten, wenn jeder der beiden Halbspiegel eine zusätzliche Phase von 90° erzeugt. Diese Eigenschaft wird in allen Schulbüchern benutzt, aber falsch dargestellt. Die übliche Argumente mit optischer Weglänge, partiellen Reflexionen an Vorder- und Rückseite oder Viertelwellenlängen- Plättchen halten einer genauen Überlegung nicht stand. Wie PADE gezeigt hat, ist das entscheidende Argument für die Phasenverschiebung die Energieerhaltung.

Für eine Modellierung der von Pade angegebenen quantenmechanischen Rechnung mit Hilfe von Zeigern sind die folgenden Aspekte wesentlich:

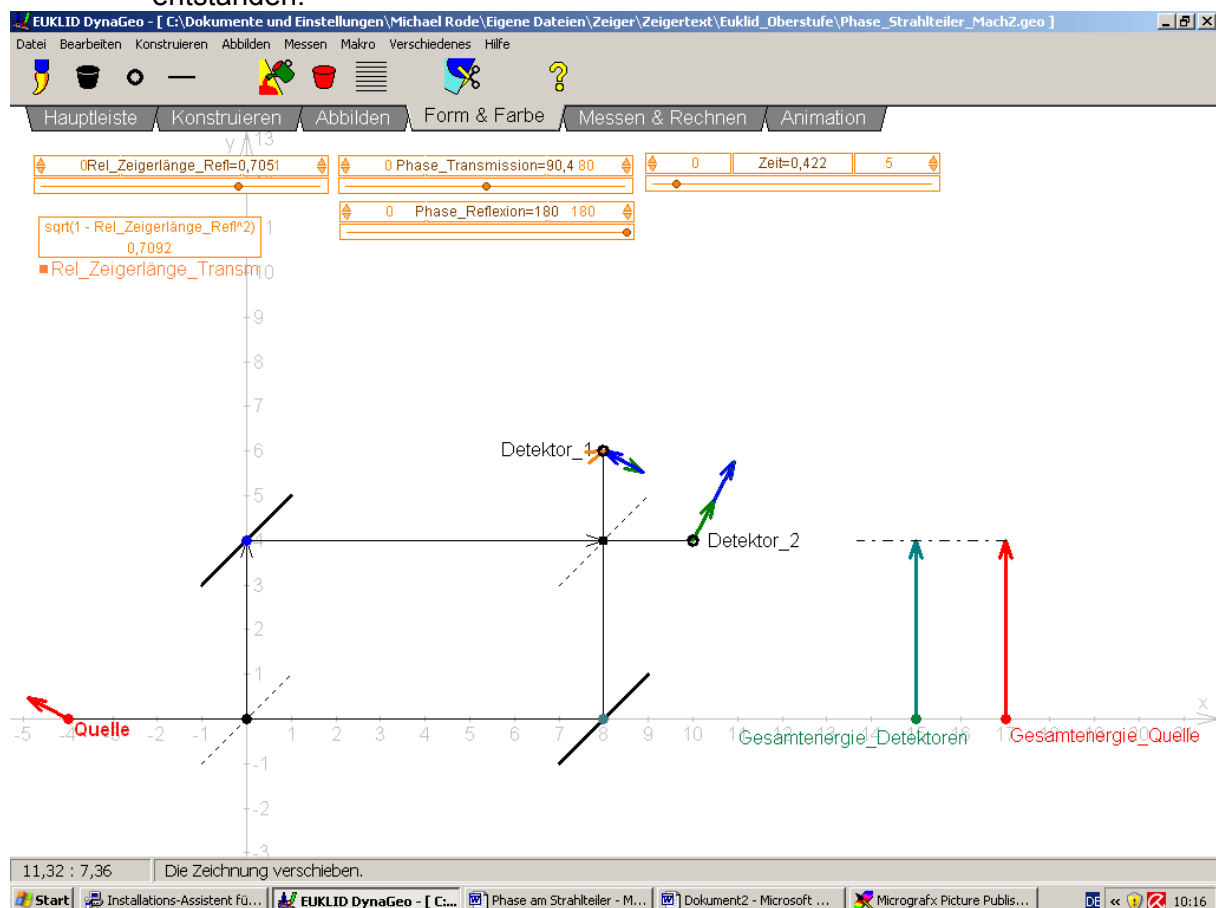
- $|\Psi|^2$ ist ein Maß für die Gesamtenergie
- Wenn ein Photonenbündel auf zwei ununterscheidbaren Wegen zu einem Detektor gelangen kann, ist in jedem davon die Zeigerlänge $\Psi = \sqrt{\frac{\Psi^2}{2}}$.

Diese Aussagen lassen sich im Unterricht aus den dort verwendeten Regeln für den Umgang mit Zeigern begründen: [..\Zeigertext\Quanten_Regeln.doc](#)

Für ein Euklid- Modell [Phase_Strahlteiler_MachZ.geo](#) [Phase_MZI.ggb](#) betrachten wir die dargestellte Situation.

- Die Gesamtenergie, die je Zeiteinheit aus der Quelle emittiert wird, wird willkürlich auf 1 Einheit festgesetzt. Jedes Photon kann an einem Spiegel reflektiert oder transmittiert werden. Die zugehörigen Wahrscheinlichkeiten werden mit einem Schieberegler oben links eingestellt. Grundeinstellung ist die Zeigerlänge 0,7, was einer 50%- Wahrscheinlichkeit für Reflexion entspricht. Die Transmissionswahrscheinlichkeit ist dann $1 - 0,7^2$, weil man annimmt, dass der Strahlteiler verlustlos arbeitet.
- Für jede Reflexion am Strahlteiler und an den Endspiegeln wird eine Zusatzphase eingesetzt, die man mit einem Schieberegler einstellen kann. Entsprechend üblichen Vorurteilen stellt man zunächst 180° ein..

- Wenn ein Photon an einem Detektor nachgewiesen wird, muss man die Nachweiswahrscheinlichkeit durch eine Summe von zwei Zeigern darstellen. Das geschieht im Modell für jeden der beiden Detektoren 1 und 2. Die dortigen Zeigerlängen sind zur besseren Erkennbarkeit in einem Maßstab dargestellt. Die Farben kennzeichnen die betrachteten Verbindungen Quelle- Detektor, die resultierenden Zeiger sind orange dargestellt.
- Die Summe der Quadrate beider Zeigersummen muss eins ergeben, weil jedes Photon in einem der beiden Detektoren nachgewiesen werden muss. Betrachtet man die „Massenveranstaltung“ eines kontinuierlichen Photonenstroms, so stellt diese Summe die je Zeiteinheit übertragene Gesamtenergie dar, weil die Strahlteiler als verlustlos angenommen werden. Folglich muss die Summe der Quadrate der Zeigersummen für beide Detektoren genau so groß sein wie das Quadrat der Zeigerlänge an der Quelle. Diese beiden Größen werden am rechten Bildrand durch zwei Anzeigen einander gegenüber gestellt. Die Bedingung: „gleiche Gesamtenergie“ wird nur erfüllt, man der Transmission eine zusätzliche Phase von 90° zuschreibt, wie sich durch Arbeit mit dem Schieberegler für die Phase_Transmission erkennen lässt. Anderenfalls wäre die Energie nicht erhalten, ggf. erhielte man sogar größere Energie als erlaubt. Hätte der resultierende Zeiger eine zu geringe Länge, so wäre der Strahlteiler nicht ideal, wäre die Zeigersumme länger, so wäre Energie aus dem Nichts entstanden.



Man kann zeigen, dass veränderte Annahmen über den Reflexionsgrad die einmal gefundene Erfüllung des Energiesatzes nicht zunichte machen.

Ebenso ergibt sich für andere Annahmen über die Phase bei Reflexion, dass zur Erfüllung der Energiebedingung die transmittierte Strahlung gegenüber der reflektierten weiter um 90° verschoben sein muss- die Richtung, in die geschoben wird, kann man so nicht ermitteln.

Literatur: PADE, J. und L. POLLEY: Phasenverschiebung am Strahlteiler. PhyDdid 1/3 (2004), S. 39/40