

Kapitel 3

Das Mach-Zehnder-Interferometer

*Aber die Gesetze der Physik
kann ich nicht ändern, Capitan!
(L. M. Krauss; Die Physik der Star Treck)*

Das Thema Interferometer kommt im Schulkontext selten vor, und wenn dieses Thema im Unterricht erscheint, wird es am häufigsten im Zusammenhang mit dem Michelson-Interferometer als Test der Relativitätstheorie Einsteins betrachtet. Das Funktionieren und die Justierung eines Interferometers werden normalerweise nicht im Physik-Unterricht thematisiert.

Im Rahmen der Unterrichtskonzeption, die im vorangehenden Kapitel vorgestellt wurde, ist es jedoch wichtig, die Funktionsweise und die Justierung eines Mach-Zehnder-Interferometers im Unterricht zu erörtern. Daher ist es das Hauptziel dieses Kapitels, das Mach-Zehnder-Interferometer näher zu beschreiben, einige Alternativen zur Betrachtung der Lichtausbreitung im Mach-Zehnder-Interferometer zu präsentieren und zu kommentieren, sowie fachliche Informationen zum Thema Interferometer mit normaler bzw. reduzierter Lichtintensität und zum Thema Interpretationen der Quantentheorie vorzustellen. Der nachstehende Text soll die Vorbereitung des Unterrichts unterstützen, jedoch ist nicht beabsichtigt, hiermit einen für die Schüler fertigen Text zu liefern.

3.1 Entstehung des Mach-Zehnder-Interferometers

Ganz allgemein ist ein Interferometer eine Vorrichtung, die es gestattet, sehr genau Interferenzen, also Überlagerungen (Superpositionen), von Wellen auszumessen. In der großartigen Entwicklung, die die optischen Wissenschaften im 19. Jahrhundert erlebten, wurden gegen Ende des Jahrhunderts auch eine große Zahl verschie-

dener Interferometer für Licht entwickelt. [...] Solche Interferometer sind für sich allein schon faszinierend, sie haben aber auch eine sehr große Anzahl von wichtigen Anwendungen gefunden, wovon die technisch wichtigste wohl die ist, dass sich in fast allen modernen Verkehrsflugzeugen ein solches Lichtinterferometer befindet, mit dem die Bewegungen des Flugzeugs sehr genau gemessen werden können. Dies ist unerlässlich für eine präzise Navigation und verhindert Zusammenstöße oder Irrflüge. Auch diese Interferometer sind in ihrer Grundkonzeption Erweiterungen des Mach-Zehnder-Interferometers [...]. [Zeilinger 2003], S. 182

Das in der Fachliteratur beschriebene Mach-Zehnder-Interferometer wurde erstmalig am Ende des 19. Jahrhunderts von dem Züricher Physiker L. Zehnder [Zehnder 1891] und von dem Prager Physiker L. Mach [Mach 1892], dem Sohn des Physikers Ernst Mach, unabhängig voneinander der Öffentlichkeit vorgestellt. Damals haben sich die beiden Forscher das Ziel gesetzt, ein Interferometer zur Untersuchung der Änderungen der Brechzahlen von verschiedenen Körpern in verschiedenen Aggregatzuständen zu bauen. Ausgehend vom Jamin-Interferometer [Jamin 1856] (s. Abb. 3.1, S. 43) haben sie ein neues Interferometer entwickelt, mit dessen Hilfe einige der damals vorhandenen experimentellen Schwierigkeiten vermindert werden sollten.

3.1.1 Das Interferometer nach Zehnder

In seiner Veröffentlichung deutete Zehnder an, dass er sein Interferometer nach dem Vorbild des Jamin-Interferometers erschaffen hat. Zehnder schrieb:

Durch eigene zweijährige Beobachtungen mit dem Jamin'schen Interferenzrefraktor habe ich die Vorzüglichkeit dieses Apparates [s. Schema in der Abbildung 3.1] selber kennen gelernt. Um aber die interferierenden Strahlen a und b eines solchen Apparates beliebig weit auseinanderrücken zu können, gab ich vor einigen Jahren auf dem von Herrn Jamin benutzten Prinzip basierend die Konstruktion eines neuen Interferenzrefraktors an, und als es sich später um die Anschaffung eines solchen Refraktors für das physikalische Institut der Universität Würzburg handelte, war es meine Aufgabe, durch Vorversuche den Nachweis zu leisten, dass mit dem Apparate meiner Konstruktion wirklich Interferenzstreifen von gleicher Schärfe, wie mit dem Jamin'schen erhalten werden, was mir mit leichter Mühe gelang. [Zehnder 1891], S. 276

Das Interferometer nach Jamin, wie es in der Abbildung 3.1, S. 43 skizziert ist, besteht aus zwei identischen, dicken und planparallelen Glasplatten A und B mit gleichen Brechzahlen und jeweils einseitig beschichtet. Wenn Licht einer Lichtquelle schräg auf eine der beiden Glasplatten fällt und nur die stärkste Reflexion an jeder von beiden Glasflächen berücksichtigt wird, erhalten wir auf diese Weise zwei parallele die Platte

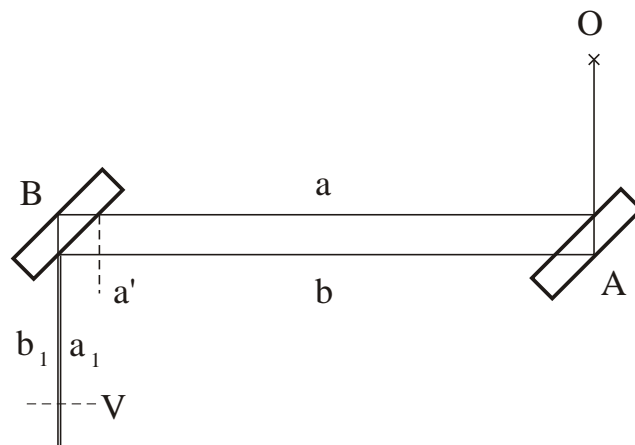


Abbildung 3.1: Skizze des Jamin-Interferometers. Nach: [Zehnder 1891], S. 275

A verlassende Strahlen a und b , deren Abstand der Plattendicke proportional ist. Diese fallen dann auf die zweite Glasplatte B und interferieren. Stellen wir die beiden Glasplatten A und B zueinander parallel auf, so läuft das Licht auf beiden Wegen von O bis zur gemeinsamen Normalebene V genau die gleiche Strecke. Wird aber die optische Weglänge eines der beiden Strahlen a oder b durch eine geringe Drehung einer der beiden Glasplatten geändert, erhalten die Strahlen zueinander einen Phasenunterschied und erzeugen deswegen Interferenzfiguren auf einem Schirm in V .

Wollen wir mit Hilfe eines Jamin-Interferometers die Brechzahl eines Mediums untersuchen, bringen wir das zu untersuchende Medium in einen Teilstrahl des Interferometers, das heißt auf den Weg a oder auf den Weg b . Dies führt zur Änderung des Gangunterschieds zwischen den zwei Strahlen und damit zur Änderung des zu beobachtenden Interferenzmusters auf dem Schirm in V . Wollen wir aber Untersuchungen durchführen, bei denen beispielsweise die Temperatur einer Testsubstanz in einer Messzelle in einem der optischen Wege geändert wird, ohne die Temperatur auf dem anderen optischen Weg zu beeinflussen, so müssen wir den Abstand zwischen den beiden Teilstrahlen a und b in Betracht ziehen.

Im Gegensatz zum Jamin-Interferometer lassen sich die Teilstrahlen a und b im Gerät von Zehnder beliebig weit auseinander legen, und zwar durch den Ersatz der zwei Glasplatten A und B durch zwei Spiegel B_1 und A_2 bzw. zwei halbdurchlässige Spiegel A_1 und B_2 , wie es in der Abbildung 3.2, S. 44 dargestellt ist.

Zehnder hat, wie er selbst in seiner Veröffentlichung mitgeteilt hatte, das Prinzip des Jamin-Interferometers in folgender Weise abgewandelt:

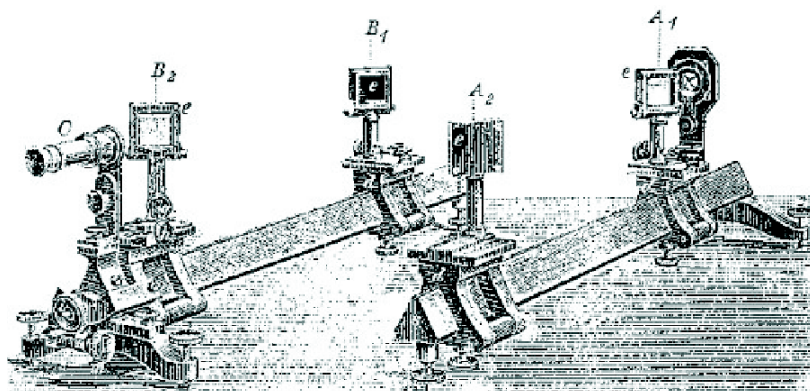


Abbildung 3.2: Interferometer nach Zehnder. In: [Zehnder 1891], S. 278

Mein Interferenzrefraktor unterscheidet sich von den Jamin'schen prinzipiell dadurch, dass die reflektierenden Flächen nicht zu Paaren fest miteinander verbunden, sondern alle gegen einander beweglich sind, so dass man die interferierenden Strahlen a und b [s. Abb. 3.1] nach Bedarf beliebig auseinander- oder zusammenrücken kann; indessen wird bei einem übermäßig großen Abstand derselben der Sichtbarkeit der Interferenzstreifen durch die Unvollkommenheit der Glasplatten eine Grenze gesetzt. [Zehnder 1891], S. 277

Das Prinzip seines Gerätes, das in der Abbildung 3.3, S. 45 skizziert ist, erklärte Zehnder dann weiter wie folgt:

A_1 und B_2 sind unbelegte Glasplatten und bilden das eine Spiegelpaar, A_2 und B_1 sind auf der Rückseite belegt, versilbert, und stellen das andere zusammengehörige Spiegelpaar dar. Tritt nun in der Richtung einer Rechteckseite, z. B. von O her, ein Lichtstrahl in das System ein, so wird derselbe zum Theil von dem Spiegel A_1 um 90° aus seiner Richtung abgelenkt, nach a, zum Theil durchsetzt er diese unbelegte Spiegelplatte und tritt in seiner ursprünglichen Richtung wieder aus derselben aus. Der abgelenkte Strahl a trifft den Spiegel B_1 , wird von ihm noch einmal abgelenkt in seine frühere Richtung $B_1B_2 \parallel OA_1$, und verlässt nach dem Durchsetzen des unbelegten Spiegels B_2 das System; der von A_1 nicht abgelenkte Strahl trifft den Spiegel A_2 , wird dort in die Richtung A_2B_2 nach b abgelenkt, und ein Theil desselben verlässt, nach nochmaliger Reflexion an der Spiegelplatte B_2 , das System ebenfalls in der Richtung B_1B_2 . Dieser Strahl b interferiert mit dem eben betrachteten Strahle a und es können Interferenzstreifen zum Vorschein kommen. [Zehnder 1891], S. 277

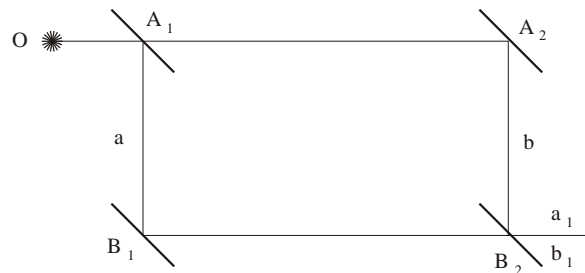


Abbildung 3.3: Skizze des Interferometers nach Zehnder. Nach: [Zehnder 1891], S. 277

3.1.2 Das Interferometer nach Mach

Der Beitrag von Mach über sein Interferometer erscheint in der gleichen Zeitschrift, in der Zehnder seine Arbeit veröffentlicht hatte, nämlich in der Zeitschrift für Instrumentenkunde, jedoch sieben Monate später als die Veröffentlichung von Zehnder. In seiner Mitteilung schrieb Mach:

Einen auf demselben Prinzip beruhenden Apparat hat Herr Dr. Zehnder in dieser Zeitschrift 1891, S. 275 beschrieben, wobei jedoch zu bemerken ist, dass mein Apparat anderen Untersuchungen angepasst wurde, als sie Herr Dr. Zehnder im Auge hatte, weshalb auch meine Konstruktion von der seinigen verschieden ist. Dieser Umstand veranlasste die nachfolgende kleine Mitteilung, die ich lieber einer späteren Zeit vorbehalten hätte. [Mach 1892], S. 89

Mach hatte noch darauf hingewiesen, dass er den beschriebenen Apparat bereits Ende Juli 1891 in seinen Teilen fertiggestellt hatte, jedoch konnte er denselben “wegen verspäteter Lieferung einer Werkzeugmaschine erst Anfang November 1891 ganz vollenden.” [Mach 1892], S. 89

Mach, so wie Zehnder, ging vom Jamin-Interferometer aus, um ein neues Interferometer zu entwickeln und damit experimentelle Schwierigkeiten zu lösen. So besteht das Gerät von Mach auch aus zwei Spiegeln und zwei Strahlteilern, die jeweils auf die Ecken eines gedachten Vierecks positioniert werden. Die grundlegende Struktur des Gerätes von Mach ist im Grunde dieselbe wie diejenige von Zehnder. Das Interferometer nach Mach unterscheidet sich jedoch von dem nach Zehnder, da es auf einem Metallring aufgebaut wurde, so wie es in der Abbildung 3.4 auf Seite 46 dargestellt wird. Über praktische Anwendungen und Vorteile des Ringes teilte Mach in seiner Veröffentlichung von 1892 nichts mit.

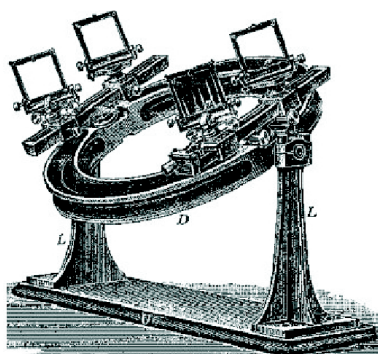


Abbildung 3.4: Darstellung des Interferometers nach Mach: “Ein grosser Metallring *D* trägt an seinen Durchmesserenden zwei konaxial gedrehte Axenzylinder, die in den auf der Marmorplatte *U* montierten und durch Rippen versteiften Lagerträgern *LL* liegen. Der in jeder durch seine Drehungsachse gehenden Ebene äquilibrirte Ring kann in irgend einer derselben durch Anziehen der Lagerschrauben fixiert werden.” In: [Mach 1892], S. 89 – 90

3.2 Funktionsweise des MZ-Interferometers

Interferometer zählen zu den wichtigsten optischen Systemen, die Interferenz erzeugen. Es gibt Interferometer mit Wellenfrontaufspaltung (d.h. primäre Wellenfronten erzeugen sekundäre Wellenfronten) und Interferometer mit Amplitudenaufspaltung. Zu einem in der Physik sehr bekannten Interferometer mit Amplitudenaufspaltung zählt das Michelson-Interferometer [Michelson 1881] (s. das Schema dieses Interferometers in der Abbildung 3.5, S. 47). Mit Hilfe dieses Interferometers versuchte Michelson die Geschwindigkeit des Lichts in einem Bezugssystem, das sich relativ zum Äther bewegt, zu messen. Er hatte sich vorgestellt, die Änderung eines bestehenden Interferenzmusters als Beweis für die Existenz des Äthers zu benutzen. Durch das negative Ergebnis dieses Experiments (Michelson-Morley-Experiment) war die Ätherhypothese widerlegt. 1905 hat Einstein postuliert, dass die Lichtgeschwindigkeit in allen Inertialsystemen denselben Wert hat. Dieses Postulat wird durch das Null-Resultat des Michelson-Morley-Experiments gerechtfertigt.

Interferometer nach Mach-Zehnder gehören ebenfalls zur Klasse der Interferometer mit Amplitudenaufspaltung. Im Vergleich zum Michelson-Interferometer lässt sich jedoch das Mach-Zehnder-Interferometer nicht so leicht justieren. Für viele Experimente ist die Anwendung eines Interferometers nach Mach-Zehnder geeigneter als die des Michelson-Interferometers, da das Mach-Zehnder-Interferometer im Gegensatz zum

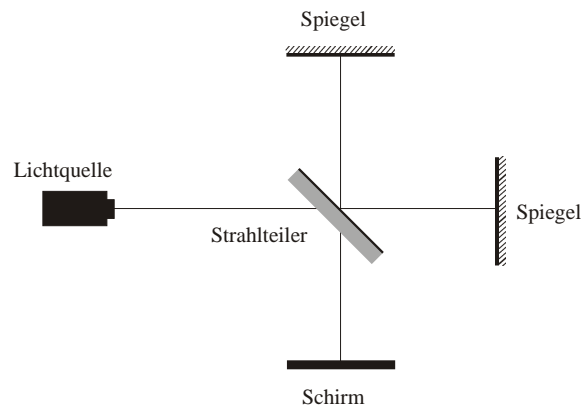


Abbildung 3.5: Skizze des Michelson-Interferometers

Michelson-Interferometer zwei Ausgänge (wie D_1 und D_2 in der Abbildung 3.11 auf Seite 55) besitzt, wodurch die Möglichkeit besteht, zwei ausgehende und dann wieder zusammentreffende Teilstrahlen gleichzeitig zu beobachten und miteinander zu vergleichen.

3.2.1 Interferenzbild in einem Ausgang des Interferometers

Um die Interferenzerscheinung in einem Mach-Zehnder-Interferometer zu verstehen, betrachten wir zuerst nur einen Ausgang des Interferometers. Das grundsätzliche Funktionieren des Mach-Zehnder-Interferometers lässt sich auf diese Weise nach Born und Wolf [Born et al. 1959], S. 312 folgendermaßen erklären:

Licht aus einer punktförmigen und einfarbigen Lichtquelle Q (s. Abb. 3.6, S. 48), die im Brennpunkt einer Linse L_1 steht, wird durch die halbdurchlässige Oberfläche A_1 einer Glasplatte HS_1 in zwei Teilstrahlen aufgeteilt. Die Teilstrahlen laufen über getrennte Wege und werden jeweils an dem Spiegel S_1 bzw. dem Spiegel S_2 reflektiert. Nach der Reflexion treffen die Teilstrahlen durch die halbdurchlässige Oberfläche A_2 einer zweiten Glasplatte HS_2 (identisch zu HS_1) zusammen und werden im Brennpunkt einer zweiten Linse L_2 gesammelt. Die vier Platten HS_1 , HS_2 , S_1 und S_2 seien zueinander parallel und werden an den vier Ecken eines gedachten Vierecks aufgestellt.

Sei nun W_1 eine plane Wellenfront, die sich zwischen S_1 und HS_2 befindet, und sei W_2 die entsprechende plane Wellenfront, die sich zwischen S_2 und HS_2 befindet.

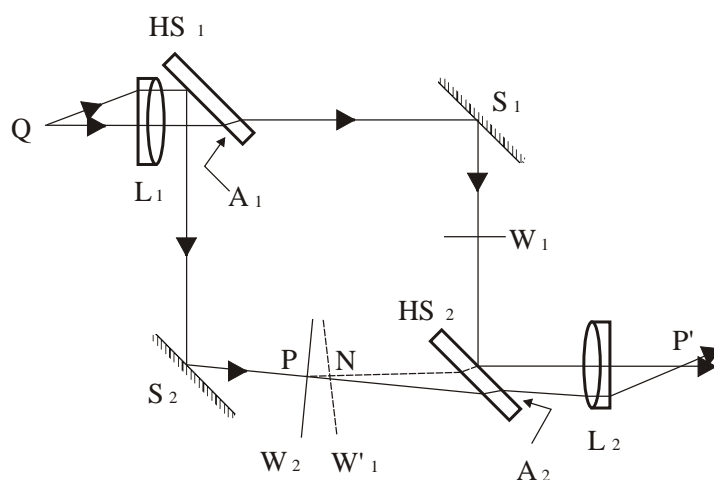


Abbildung 3.6: Skizze eines Mach-Zehnder-Interferometers. Nach: [Born et al. 1959], S. 312

Sei noch W'_1 eine virtuelle plane Wellenfront, die sich zwischen S_2 und HS_2 befindet und die aus HS_2 mit derselben Phase wie W_1 austrete, so dass im Punkt P auf W_2 der virtuelle Phasenunterschied zwischen ausgetretenen Strahlen $\delta = 2\frac{\pi}{\lambda_0}nh$ ist, wobei $h = PN$ der senkrechte Abstand zwischen P und W'_1 und n der Brechungsindex des Mediums zwischen W_2 und W'_1 ist.

Für den Punkt P' an der Kreuzung der beiden ausgetretenen Strahlen gilt:

- Beobachtung eines hellen Streifens, wenn: $nh = m\lambda_0$ wobei $|m| = 0, 1, 2, \dots$
- Beobachtung eines dunklen Streifens, wenn: $nh = m\lambda_0$ wobei $|m| = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \dots$

Mit anderen Worten: Bei völliger Symmetrie der Aufstellung – d. h. wenn die vier Spiegel zueinander parallel an den vier Ecken eines gedachten Vierecks positioniert werden – treffen die beiden Teilstrahlen nach Durchlaufen der Anordnung mit dem Gangunterschied Null zusammen. Erst wenn die Symmetrie gestört wird, indem man eine der Teilerplatten oder einen der beiden Spiegel aus der Symmetrie ein wenig herausdreht, entsteht ein dunkler Streifen.

In realen Situationen sind bei Störung der Symmetrie des Systems jedoch nicht nur Streifensysteme zu beobachten, sondern auch, je nach der relativen Position zwischen den optischen Komponenten des Interferometers, Ringesysteme oder Kombinationen beider Systeme.

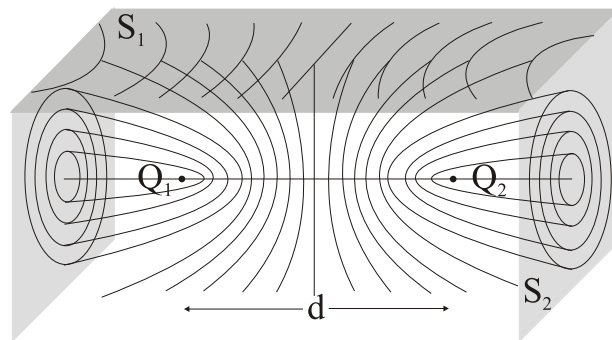


Abbildung 3.7: Die dargestellten Oberflächen sind rotierende Hyperboloiden um die Achse des Brennpunktes der virtuellen Quelle Q_1 bzw. Q_2 . Diese Oberflächen stellen Oberflächen dar, die mit Hilfe der Gleichung $d = \overline{Q_2P} - \overline{Q_1P}$ konstruiert werden können. Nach: [Chamier 2004]

Die Erscheinung unterschiedlicher Interferenzmuster im Ausgang des Interferometers kann mit Hilfe der Darstellung in der Abbildung 3.7, S. 49 geklärt werden.

Seien Q_1 und Q_2 virtuelle Abbildungen einer Lichtquelle Q , sodass ein System von zwei kohärenten Quellen dargestellt wird (die nebeneinander durch einen Abstand d wie in der Abbildung 3.7 getrennt sind). In einem beliebigen Punkt P auf einem Beobachtungsfeld auf S_1 oder auf S_2 ist der Gangunterschied zwischen zwei Strahlen, die von Q_1 bzw. Q_2 ausgehen, gleich: $d = \overline{Q_2P} - \overline{Q_1P}$.

Das bedeutet, dass auf einem Schirm S_2 , der senkrecht zur Quellen-Achse positioniert ist (s. Abb. 3.7), Interferenzfiguren in Form von Ringen beobachtet werden. Auf einem Schirm S_1 , der parallel zur Quellen-Achse positioniert ist, werden Interferenzfiguren in Form von Streifen beobachtet, und schließlich auf einem Schirm, der schräg zur Quellen-Achse zwischen S_1 und S_2 positioniert ist, werden Interferenzfiguren in Form von Hyperbeln beobachtet (Für detaillierte Diskussion s. [Chamier 2004]).

Die Beobachtung eines Interferenzmusters mit Hilfe eines Mach-Zehnder-Interferometers, wie es zum Beispiel in der Abbildung 3.8, S. 50 dargestellt wird, ist allerdings keine Selbstverständlichkeit.

In der Praxis ist dieses Ergebnis nur mit etwas Geduld zu erreichen, da die Interferenzfiguren hinsichtlich der Justierung empfindlich sind. Den interessierenden großflächig ausgebildeten Interferenzen ist meist noch ein weiteres, sehr schwach ausgebildetes Interferenzmuster überlagert, das durch zusätzliche Reflexionen des Laserlichts an Eintritts- und Austrittsflächen der halbdurchlässigen Spiegel (und eventuell verwendeten Aufweitungs-Linsen) entsteht. [Brachner et al. 1977], S. 94

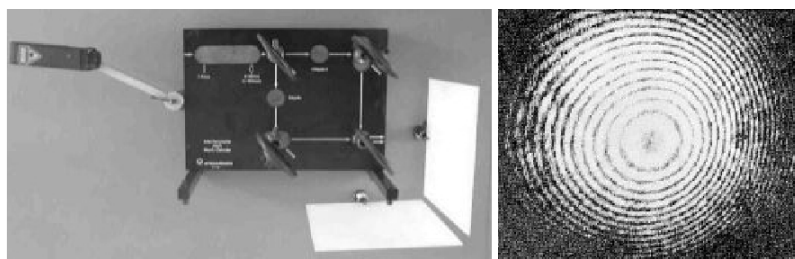


Abbildung 3.8: a) Bild des Mach-Zehnder-Interferometers der Fa. Leybold. b) Beispiel eines Interferenzmusters im Mach-Zehnder-Interferometer, das auf der Interferometer-Grundplatte der Fa. Leybold aufgebaut wurde.

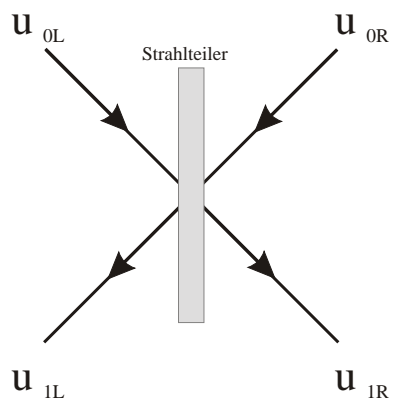


Abbildung 3.9: Skizze eines Strahlteilers. Nach: [Zeilinger 1981], S. 882

Auch die mathematische Modellierung des Lichts im Mach-Zehnder-Interferometer ist nicht elementar. Hierbei wird das reale Interferometer in ein idealisiertes Interferometer umgewandelt.

Die Idealisierung des Phänomens, wie es in der Abbildung 3.11, S. 55 skizziert wird, bedeutet vor allem folgendes:

- Perfekte Justierung des Interferometers.
- Vernachlässigung experimenteller Störungen und optischer Fehler auf den optischen Komponenten des Interferometers.
- Betrachtung von Lichtstrahlen nur auf den optischen Achsen des Interferometers.

3.2.2 Interferenzbild an zwei Ausgängen des Interferometers

In der idealisierten Situation erscheinen zwei komplementäre Interferenzbilder¹ an den zwei Ausgängen des Interferometers. Um die Erscheinung der Interferenz im Interferometer zu verstehen, werden wir an dieser Stelle einen Blick auf die allgemeinen Eigenschaften der Strahlteiler werfen.

Allgemeine Eigenschaften der Strahlteiler

Zeilinger [Zeilinger 1981] betrachtet beispielsweise einen halbdurchlässigen Spiegel (ohne Energieverlust) mit Hilfe zweier ankommender und zweier abgehender Strahlen wie folgt:

In der Abbildung 3.9, S. 50 seien u_{0L} und u_{0R} die ankommenden Amplituden auf der linken bzw. auf der rechten Seite des Strahlteilers und u_{1L} und u_{1R} die abgehenden Amplituden auf der linken bzw. auf der rechten Seite.

Mit Hilfe der Reflexionsamplituden r_{RR} und r_{LL} und der Transmissionsamplituden t_{LR} bzw. t_{RL} werden die ankommenden und abgehenden Strahlen durch die folgenden Gleichungen dargestellt:

$$u_{1L} = r_{LL}u_{0L} + t_{LR}u_{0R},$$

$$u_{1R} = t_{RL}u_{0L} + r_{RR}u_{0R}.$$

¹d.h. die Teilstrahlen, die den Weg zum Detektor D1 in der Abb. 3.11 genommen haben, verstärken einander durch konstruktive Interferenz und die Teilstrahlen, die den Weg zum Detektor D2 genommen haben, löschen sich gegenseitig aus.

Diese beiden Gleichungen lassen sich auch in Form von Matrizen folgendermaßen schreiben:

$$\vec{u}_1 = \vec{R}\vec{u}_0,$$

wobei

$$\vec{u}_1 \equiv \begin{pmatrix} u_{1L} \\ u_{1R} \end{pmatrix}; \vec{u}_0 \equiv \begin{pmatrix} u_{0L} \\ u_{0R} \end{pmatrix}; R = \begin{pmatrix} r_{LL} & t_{LR} \\ t_{RL} & r_{RR} \end{pmatrix}. \quad (3.1)$$

Die Matrix R ist eine Unitäre Matrix und kann mit Hilfe der Pauli-Matrizen folgendermaßen geschrieben werden:

$$\vec{R} = \gamma_0 \sigma_0 + i(\gamma_1 \sigma_1 + \gamma_2 \sigma_2 + \gamma_3 \sigma_3) \quad (3.2)$$

wobei

$$\gamma_0^2 + \gamma_1^2 + \gamma_2^2 + \gamma_3^2 = 1 \text{ und } \det |\vec{R}| = 1 \text{ (Energieerhaltung);}$$

und die Pauli-Matrizen:

$$\sigma_0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}; \sigma_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}; \sigma_2 = \begin{pmatrix} 0 & i \\ -i & 0 \end{pmatrix}; \sigma_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}.$$

Daraus können wir die Gleichung (3.2) folgendermaßen schreiben:

$$\vec{R} = \begin{pmatrix} \gamma_0 & 0 \\ 0 & \gamma_0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & i\gamma_1 \\ i\gamma_1 & 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & \gamma_2 \\ -\gamma_2 & 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} i\gamma_3 & 0 \\ 0 & -i\gamma_3 \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

und aus den Gleichungen (3.1) und (3.3) ergibt sich:

$$\vec{R} = \begin{pmatrix} \gamma_0 + i\gamma_3 & \gamma_2 + i\gamma_1 \\ -\gamma_2 + i\gamma_1 & \gamma_0 - i\gamma_3 \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} r_{LL} & t_{RL} \\ t_{LR} & r_{RR} \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

woraus die beiden folgenden Gleichungen entstehen:

$$r_{LL} = \gamma_0 + i\gamma_3 = r_{RR}^c,$$

$$t_{LR} = \gamma_2 + i\gamma_1 = -t_{RL}^c$$

wobei r_{RR}^c die konjugierte komplexe Zahl von r_{LL} und die t_{RL}^c konjugierte komplexe Zahl von t_{RL} darstellt.

Für die komplexen Zahlen in Exponentialform gilt: $z = |e^{i\phi}|$, sodass die Reflexions- bzw. die Transmissionsamplituden folgendermaßen geschrieben werden können:

$$r_{LL} = \gamma_0 + i\gamma_3 \equiv \sqrt{\gamma_0^2 + \gamma_3^2} + e^{i\phi_{rR}},$$

$$r_{RR} = \gamma_0 - i\gamma_3 \equiv \sqrt{\gamma_0^2 + \gamma_3^2} + e^{i\phi_{rL}},$$

$$t_{LR} = \gamma_2 + i\gamma_1 \equiv \sqrt{\gamma_2^2 + \gamma_1^2} + e^{i\phi_{tR}},$$

$$t_{RL} = -\gamma_2 + i\gamma_1 \equiv \sqrt{\gamma_2^2 + \gamma_1^2} + e^{i\phi_{tL}}.$$

Seien nun ϕ die Argumente der Reflexions- bzw. Transmissionsamplituden, so können wir diese Argumente wie in der Abbildung 3.10 auf Seite 54 graphisch darstellen:

Aus den graphischen Darstellungen der Argumente ergibt sich:

$$\phi_{rL} = 2\pi - \phi_{rR} \Rightarrow \phi_{rR} + \phi_{rL} = 2\pi, \quad (3.5)$$

$$\phi_{tL} = \pi - \phi_{tR} \Rightarrow \phi_{tR} + \phi_{tL} = \pi \quad (3.6)$$

und aus den Gleichungen (3.5) und (3.6) erhalten wir die folgenden Relationen zwischen den Argumenten:

$$\phi_{rL} - \phi_{tL} = 2\pi - \pi - \phi_{rR} + \phi_{tR} \Rightarrow (\phi_{rL} - \phi_{tL}) + (\phi_{rR} + \phi_{tR}) = \pi. \quad (3.7)$$

Die Phasendifferenz zwischen reflektierenden und transmittierenden Strahlen auf der linken Seite des halbdurchlässigen Spiegels ist nun gleich:

$$\delta_L = \phi_{rL} + \phi_{tL} \quad (3.8)$$

und für die Phasendifferenz zwischen reflektierenden und transmittierenden Strahlen auf der rechten Seite des halbdurchlässigen Spiegels gilt:

$$\delta_R = \phi_{rR} + \phi_{tR}. \quad (3.9)$$

Aus den Gleichungen (3.7), (3.8) und (3.9) folgt dann die allgemeine Relation:

$$\delta_R + \delta_L = \pi. \quad (3.10)$$

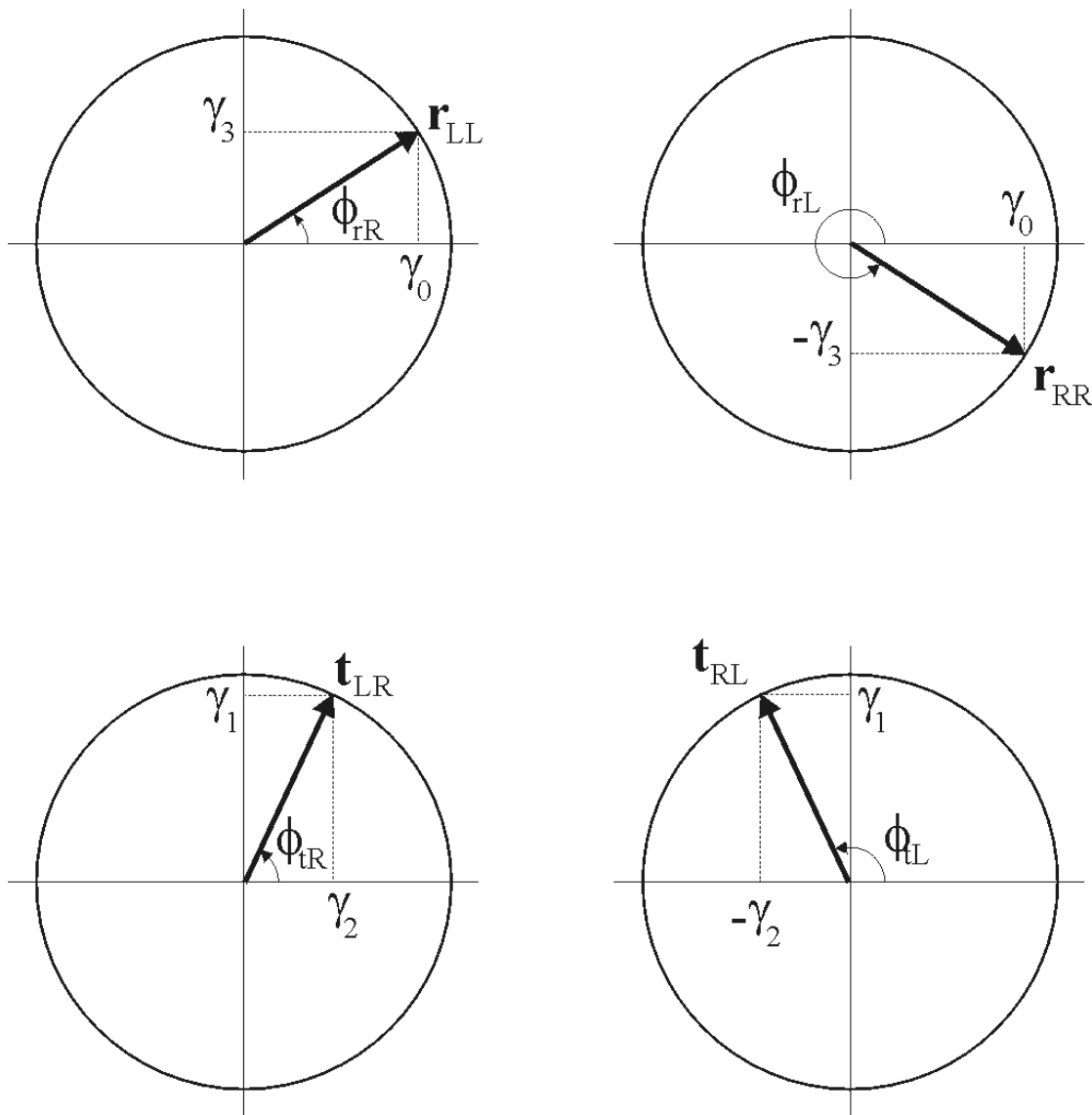


Abbildung 3.10: Argumente

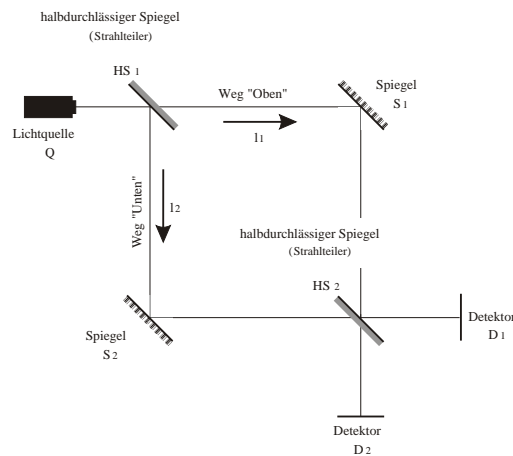


Abbildung 3.11: Das idealisierte Mach-Zehnder-Interferometer: Im Idealfall werden die Spiegel bzw. die halbdurchlässigen Spiegel des Interferometers parallel zueinander an den vier Ecken eines gedachten Vierecks positioniert und es wird nur der Lichtstrahl auf der optischen Achse des Interferometers betrachtet.

Zusammenfassend bedeutet dies, dass die Summe der Phasenverschiebungen für den abgehenden Strahl auf der linken Seite des halbdurchlässigen Spiegels mit dem abgehenden Strahl auf der rechten Seite des halbdurchlässigen Spiegels gleich π ist². Wir bezeichnen dann die Interferenzbilder, die aus den abgehenden Teilstrahlen gebildet werden, als komplementäre Interferenzbilder. Dieses Ergebnis werden wir in folgenden Abschnitten für die Überlegungen zur Lichtausbreitung im idealisierten Mach-Zehnder-Interferometer verwenden.

Das idealisierte Mach-Zehnder-Interferometer

Betrachten wir zuerst die Transmissions- bzw. Reflexionsamplituden für die Teilstrahlen in den halbdurchlässigen Spiegeln des Mach-Zehnder-Interferometers. Die Reflexionsamplituden in den Spiegeln im Mach-Zehnder-Interferometer werden an dieser Stelle vernachlässigt, da sie wegen der Symmetrie der Anordnung für beide Ausgänge des Interferometers gleich sind. Für den Detektor 1 folgt (s. Abbildung 3.11, S. 55):

²Eine detaillierte Arbeit über die allgemeinen Eigenschaften der halbdurchlässigen Spiegel "Phase shifts in multilayer dielectric beam splitter" von M. W. Hamilton findet man in: Am. J. Phys. Vol. 68, 2000(2). In dieser Arbeit werden die Transmission- und Reflexionskoeffizienten mit Hilfe verschiedener Strahlteiler diskutiert, wobei die Energieerhaltung und Zeitreversibilität angenommen werden. Dies wird am Beispiel eines Michelson-Interferometers erläutert.

auf dem Weg “Oben”: $t_{RL} + r_{RR}$ und

auf dem Weg “Unten”: $r_{LL} + t_{RL}$.

Und für dem Detektor 2 folgt:

auf dem Weg “Oben”: $t_{RL} + t_{LR}$ und

auf dem Weg “Unten”: $r_{LL} + r_{LL}$.

Da die Transmissions- bzw. Reflexionsamplituden mit den Argumenten ϕ (so wie dargestellt in der Abb. 3.10, S. 54) verbunden sind und für die Argumente die Gleichung 3.10 auf Seite 53 gilt, können wir die Komplementaritätsbedingung für die Teilstrahlen an dem Detektor 1 und an dem Detektor 2 annehmen.

Zeilinger [Zeilinger 1981] behauptet, dass für die Studierenden die Betrachtung der halbdurchlässigen Spiegel mit Hilfe der Pauli-Matrizen geeignet ist. In Schulkontexten kommt jedoch die Betrachtung der Pauli-Matrizen bzw. komplexe Zahlen normalerweise nicht vor.

Eine für die Schule geeignete Alternative zur Betrachtung der Erscheinung von komplementären Interferenzmustern in den zwei Ausgängen des Mach-Zehnder-Interferometers stellt Zetie [Zetie 2000] vor. Der Nachteil seiner Argumentation im Vergleich zu der von Zeilinger liegt darin, dass besondere Rahmenbedingungen bezüglich der Herstellung und der relativen Position der Strahlteiler im Interferometer angenommen werden müssen, wie zum Beispiel:

- Die reflektierende Schicht eines halbdurchlässigen Spiegels liegt auf einer Seite der Glasplatte.
- Die beiden halbdurchlässigen Spiegel werden im Interferometer zueinander antisymmetrisch positioniert, wie es in der Abbildung 3.11, S. 55 zu sehen ist.

Werden diese Bedingungen erfüllt und das Interferometer genau justiert, so folgen die Phasenunterschiede zwischen den Teilstrahlen und die daraus resultierende konstruktive bzw. destruktive Interferenz an den Detektoren D_1 und D_2 entsprechend der nachfolgenden Beschreibung aus der Geometrie des Interferometers.

Relative Positionen der Strahlteiler im Mach-Zehnder-Interferometer

In der Abbildung 3.11, S. 55 nehmen wir l_1 und l_2 als die gesamten Weglängen für das Licht an, das sich von der Lichtquelle bis zu den Detektoren auf dem oberen bzw. dem unteren Weg ausbreitet. Nehmen wir an, dass der Durchgang des Lichts durch das Glas des halbdurchlässigen Spiegels einer Phasenverschiebung $\frac{2\pi s}{\lambda}$ entspricht, wobei s die optische Weglänge durch den halbdurchlässigen Spiegel darstellt (die vom Licht in gleichen Zeiten zurückgelegten geometrischen Weglängen in verschiedenen Medien sind verschieden, während die optischen Weglängen in gleichen Zeiten für alle Medien gleich groß sind).

Die Phasenverschiebungen im Hinblick auf den von der Quelle ausgesendeten Strahl für den unteren Weg l_2 zum Detektor D_1 sind:

π für die erste Reflexion an HS_1 ,

π für die zweite Reflexion an S_2 ,

$\frac{2\pi s}{\lambda}$ für den Lichtdurchgang durch HS_2 und

$\frac{2\pi l_2}{\lambda}$ für den gesamten durchlaufenen Weg l_2 .

So lautet die gesamte Phasenverschiebung für den unteren Weg zum Detektor D_1 :

$$2\pi + 2\pi \left(\frac{l_2 + s}{\lambda} \right).$$

Wird nun in Analogie zum unteren Weg der obere Weg l_1 zum Detektor D_1 betrachtet, erhalten wir die folgenden Phasenverschiebungen:

$\frac{2\pi s}{\lambda}$ für den Lichtdurchgang durch HS_1 ,

π für die erste Reflexion an S_1 ,

π für die zweite Reflexion an HS_2 und

$\frac{2\pi l_1}{\lambda}$ für den gesamten durchlaufenden Weg l_1 .

Also gilt für den oberen Weg zum Detektor D_1 :

$$2\pi + 2\pi \left(\frac{l_1 + s}{\lambda} \right).$$

Daher ergibt sich als Phasendifferenz δ zwischen den beiden Wegen l_1 und l_2 zum Detektor D_1 :

$$2\pi + 2\pi \left(\frac{l_1 + s}{\lambda} \right) - 2\pi - 2\pi \left(\frac{l_2 + s}{\lambda} \right) = 2\pi \left(\frac{l_1 - l_2}{\lambda} \right) = \delta.$$

Wird in Analogie zu den Teilwellen zum Detektor D_1 der Phasenunterschied zwischen den beiden Teilwellen auf den Wegen l_1 und l_2 zum Detektor D_2 betrachtet, so gilt:

$$2\pi + 2\pi \left(\frac{l_1 + 2s}{\lambda} \right) - \pi - 2\pi \left(\frac{l_2 + 2s}{\lambda} \right) = \pi + 2\pi \left(\frac{l_1 - l_2}{\lambda} \right) = \pi + \delta.$$

Setzen wir nun $\delta = 0$ für die Phasenverschiebung entsprechend dem Wegunterschied zwischen l_1 und l_2 , d. h. nehmen wir l_1 gleich l_2 , so erhalten wir konstruktive Interferenz im Detektor D_1 und destruktive im Detektor D_2 . Der Detektor D_1 empfängt deswegen Licht derselben Intensität wie sie der in das Interferometer einfallende Strahl hatte. Daher bleibt für den Detektor D_2 nichts mehr übrig, denn die gesamte Intensität kann nicht größer werden. Die beiden in den Detektor D_2 fallenden Strahlen müssen sich auslöschen.

Mit anderen Worten, auf den Detektor D_2 fällt kein Licht.

Erscheinung komplementärer Interferenzbilder: Energieerhaltung

Eine Alternative für die Betrachtung der komplementären Interferenzbilder an den zwei Ausgängen des Mach-Zehnder-Interferometers stellt Embacher [Embacher 2004] vor, wobei er in seinem Unterrichtskonzept zur Quantenphysik den Ansatz der Energieerhaltung verwendet. Embacher argumentiert in folgender Weise:

Für die beiden auf den Detektor D_1 fallenden Teilstrahlen (s. Abb. 3.11, S. 55) herrschen jeweils identische Bedingungen. Beide werden einmal durch einen Strahlteiler transmittiert, einmal am Spiegel und einmal am Strahlteiler reflektiert. Also sind sie nach Durchtritt des zweiten halbdurchlässigen Spiegels in Phase. Sie interferieren konstruktiv. Der Detektor D_1 empfängt somit Licht derselben Intensität wie sie von der Quelle ausgesendet wird. Daher bleibt für den Detektor D_2 nichts mehr übrig, denn die gesamte Intensität kann sich nicht vergrößert haben. Daher müssen sich die beiden in dem Detektor D_2 einfallenden Strahlen einander auslöschen.

Die Anwendung dieser praktisch ohne Rechnung durchgeführten Betrachtung des Interferometers in der Schule ist prinzipiell sinnvoll, besonders wenn es das Hauptziel der Unterrichtsreihe ist, auf die Grundlagen der Quantentheorie einzugehen. Von diesem Standpunkt aus gesehen, lässt sich die von Embacher dargestellte Alternative gut in der Schule verwenden. Mit dieser Alternative bekommen wir jedoch Schwierigkeiten, den Schülern die verschiedenen Phasensprünge bei der Reflexion am Spiegel bzw. bei der Reflexion am halbdurchlässigen Spiegel verständlich zu machen.

Nach Embacher [Embacher 2004] bewirkt jede Reflexion an einem der halbdurchlässigen Spiegel einen Phasensprung von $\frac{\lambda}{4}$ "als Netto-Effekt der Überlagerung mehre-

rer durch innere Reflexion zustandegekommender Strahlen". Der Phasensprung an einem Spiegel ist gleich $\frac{\lambda}{2}$. Also hat für den Detektor D_2 der Strahl entlang des Weges "Oben" einen Phasensprung von $\frac{\lambda}{2}$ erhalten, während sich die drei Reflexionen des Strahls entlang des Weges "Unten" mit dem Netto-Phasensprung von λ auswirken. Insgesamt haben daher die beiden Teilstrahlen eine Phasendifferenz von $\frac{\lambda}{2}$ zueinander, was destruktive Interferenz bewirkt.

Auf diese Weise gelingt es Embacher, die komplementären Interferenzbilder auf den beiden Schirmen des Interferometers zu erklären, ohne die relative Position der Strahlteiler im Interferometer zu berücksichtigen. Der kritische Punkt seiner Argumentation liegt jedoch darin, den Schülern die verschiedenen Phasensprünge von $\frac{\lambda}{4}$ und von $\frac{\lambda}{2}$ am Strahlteiler bzw. am Spiegel ohne mathematische Rechnung zu verdeutlichen.

3.3 Das MZ-Interferometer für einzelne Photonen

Bei normaler Lichtintensität, das heißt bei Emission sehr vieler Photonen pro Zeiteinheit, lässt sich die Interferenzerscheinung aus zwei Teilwellen im Mach-Zehnder-Interferometer allgemein mit dem Bild der elektromagnetischen Welle begründen. Wird jedoch die Leistung der Lichtquelle so stark reduziert, dass nur ein einzelnes Photon das Interferometer passiert, benötigen wir eine Revision der klassischen Theorie des Lichts durch die Quantentheorie. In dem Fall, in dem jeweils nur ein Photon im Interferometer ist, wird das Photon immer in einem der beiden Detektoren registriert, der andere Detektor registriert wegen der destruktiven Interferenz kein Photon. Hier kann man die folgenden Fragen stellen:

Woher weiß das Photon, dass es das Interferometer nur in der Position des Detektors 1 verlassen darf (s. Abb. 3.11) und nicht des Detektors 2? Welche Art von Wellen führen zu dieser Interferenzerscheinung? Oder mit anderen Worten ausgedrückt:

Wählt das Photon einen bestimmten Weg, wird es also vom Strahlteiler entweder durchgelassen oder reflektiert, und zeigt es so seine Teilcheneigenschaft, oder wird es sozusagen gleichzeitig durchgelassen und reflektiert, so dass es mit sich selbst interferiert und seine Wellennatur zeigt? [Schimony 1996], S. 75

Über diese Thematik haben Einstein und Bohr bereits in den 30er Jahren intensiv diskutiert, und im Rahmen ihrer Diskussion haben sie interessante Gedankenexperimente vorgeschlagen. Gedankenexperimente spielen in der Physik eine wichtige Rolle. Man überlegt sich ein Experiment

[...] und argumentiert aufgrund der bekannten physikalischen Gesetze, wie dieses Experiment ablaufen sollte. Zum Beispiel kann man ein Gedankenexperiment dazu

benutzen, um neue, verblüffende Vorhersagen einer physikalischen Theorie zum ersten Mal zu diskutieren und sich konkret vorzustellen. [Zeilinger 2003], S. 162

Vor einigen Jahren gelang es, viele Gedankenexperimente aus der Gründerzeit der Quantentheorie durch verfeinerte Technik experimentell zugänglich zu machen.

Das betrifft zunächst die große Anzahl von Zwei-Löcher-Interferenzexperimenten, die mit scharfen und unscharfen Observablen oder als Delayed-Choice-Experimente durchgeführt wurden. Konkret wurden bereits solche Experimente mit Mach-Zehnder-Interferometern für Photonen, Neutronen und Silizium-Einkristallen durchgeführt. [Mittelstaedt 2000], S. 66

3.3.1 Welleneigenschaft: Interferenzbild

Betrachten wir an dieser Stelle das Mach-Zehnder-Interferometer für einzelne Photonen. Als zentrales Problem wird das Superpositionsprinzip angesehen.

Das Superpositionsprinzip besagt, dass Dinge in einer eigenartigen Überlagerung von verschiedenen Möglichkeiten existieren können. [Zeilinger 2003], S. 149

Für das Mach-Zehnder-Interferometer heißt es beispielsweise, dass das Photon im Interferometer in einer Überlagerung zweier Möglichkeiten existiert, nämlich dass es einen Weg des Interferometers durchläuft und im Detektor D_1 registriert wird, und der Möglichkeit, dass es anderen Weg geht und vom Detektor D_2 nachgewiesen wird.

Nehmen wir an, dass sich das Photon beim Eintritt in das Interferometer in einem beliebigen Zustand $|a\rangle$ befindet und dass für jeden Ausgang des Interferometers, entsprechend den Detektoren D_1 und D_2 , zwei mögliche Wege für das Photon bestehen, und zwar der Weg “Oben” und der Weg “Unten”, wie in der Abbildung 3.11, S. 55 dargestellt wird.

Betrachten wir zuerst den Ausgang zum Detektor D_1 . Auf dem Weg “Unten” zum Detektor D_1 wird das Photon zunächst am halbdurchlässigen Spiegel HS_1 reflektiert. Dies bedeutet einen Phasensprung von π . Der neue Zustand des Photons nach HS_1 kann durch die folgende Gleichung beschrieben werden:

$$\frac{1}{\sqrt{2}} e^{i\pi} |a\rangle.$$

Der Faktor $\frac{1}{\sqrt{2}}$ deutet an, dass das Photon am halbdurchlässigen Spiegel mit einer Wahrscheinlichkeit $\frac{1}{2}$ reflektiert wird.

Die dann folgende Reflexion am Spiegel S_2 sorgt für einen weiteren Phasensprung um π . So wird der Zustand des Photons jetzt durch

$$\frac{1}{\sqrt{2}}e^{i\pi}e^{i\pi}|a\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}e^{i2\pi}|a\rangle$$

beschrieben.

Für den Durchgang des Photons durch den zweiten halbdurchlässigen Spiegel HS_2 ergibt sich noch ein Phasensprung von φ , der von den optischen Eigenschaften dieses Strahlteilers abhängig ist.

Der Zustand des Photons wird nun daher durch

$$\frac{1}{\sqrt{2}}e^{i2\pi}|a\rangle \frac{1}{\sqrt{2}}e^{i\varphi}|a\rangle = \frac{1}{2}e^{i(2\pi+\varphi)}|a\rangle = \frac{1}{2}e^{i\varphi}|a\rangle$$

beschrieben.

Für den insgesamt durchlaufenen Weg “Unten” bzw. “Oben” des Photons im Interferometer wird keine weitere Phasenverschiebung berücksichtigt, da angenommen wird, dass diese beiden Wege gleich lang sind. Wählt das Photon den oberen Weg zum Detektor D_1 , so herrschen jeweils dieselben Bedingungen wie bei der Ausbreitung auf dem Weg “Unten”. Das bedeutet, dass das Photon sich auch in diesem Fall in einem Zustand

$$\frac{1}{2}e^{i\varphi}|a\rangle$$

befindet.

Hat das Photon mehrere Wege zur Verfügung, wobei es den Weg “Unten” oder den Weg “Oben” zum Detektor D_1 auswählen kann, kommt es zur Interferenz. Der resultierende Zustand des Photons ergibt sich nun durch:

$$\frac{1}{2}e^{i\varphi}|a\rangle + \frac{1}{2}e^{i\varphi}|a\rangle = e^{i\varphi}|a\rangle$$

und es wird am Detektor D_1 mit der Wahrscheinlichkeit $|e^{i\varphi}|^2 = 1$ im Zustand $|a\rangle$ angetroffen.

Zum Detektor D_2 existieren für das Photon ebenfalls zwei mögliche Wege. Wählt das Photon den Weg “Unten” zum Detektor D_2 , erkennt man durch entsprechende Überlegungen, dass das Photon sich im Zustand

$$\frac{1}{2}e^{i(\pi+2\varphi)}|a\rangle = \frac{1}{2}e^{i2\varphi}|a\rangle$$

befindet. Wählt das Photon den Weg “Oben” zum Detektor D_2 , so befindet es sich nach dem zweiten halbdurchlässigen Spiegel im Zustand

$$\frac{1}{2}e^{i(\pi+2\varphi)}|a\rangle = -\frac{1}{2}e^{i2\varphi}|a\rangle.$$

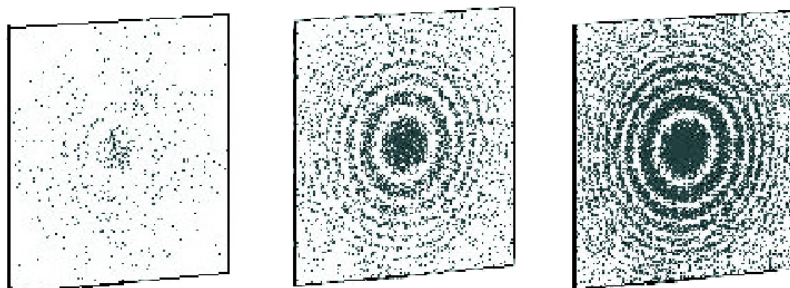


Abbildung 3.12: Entstehung des Interferenzmusters im Mach-Zehnder-Interferometer mit einzelnen Photonen. In: [Müller et al. 2000a]

Für den Detektor D_2 erhalten wir somit für den gesamten Zustand des Photons:

$$\frac{1}{2}e^{i2\varphi} |a\rangle + \left(-\frac{1}{2}e^{i2\varphi} |a\rangle\right) = 0 |a\rangle .$$

Dies bedeutet, dass die Wahrscheinlichkeit, ein Photon am Detektor D_2 anzutreffen, gleich Null ist. Mit anderen Worten, das Photon wird mit 100%iger Wahrscheinlichkeit das Interferometer am Detektor D_1 verlassen. Dafür haben wir keine Informationen über den von dem Photon im Interferometer durchlaufenen Weg.

Betrachten wir statt des Lichtstrahls auf der optischen Achse des Interferometers ein Lichtbündel und nehmen wir an, dass das Interferometer genau justiert wird, dann sind (komplementäre) Interferenzfiguren auf Schirmen des Interferometers zu beobachten. Diese bestehen jeweils aus konzentrischen Ringen, die schrittweise aus einzelnen Punkten gebildet werden (s. beispielsweise Abbildung 3.12, S. 62). In anderen Worten heißt es, dass es verbotene Regionen für die Registrierung der Photonen gibt.

Man spricht in diesem Zusammenhang von einer Wellennatur des Photons.

3.3.2 Teilcheneigenschaft: Welcher-Weg-Information

Wie bereits am Anfang dieses Kapitels erwähnt wurde, ist die didaktische Verwendung eines Mach-Zehnder-Interferometers im Vergleich beispielsweise zum Michelson-Interferometer vorteilhaft, denn im Mach-Zehnder-Interferometer können sowohl die Teilstrahlen im Interferometer als auch die ausgehenden Strahlen unabhängig voneinander untersucht werden. Das ist zum Beispiel wertvoll, wenn man die Information über

“den Weg eines Photons im Interferometer”³ erhalten will.

Wollen wir den Weg eines Photons im Interferometer bestimmen, dann können wir zum Beispiel zwischen dem Spiegel S_2 und dem Strahlteiler HS_2 einen Detektor einbauen, der den Zustand des Photons auf diesem Weg nachweisen kann (s. Abbildung 3.11, S. 55). Nehmen wir beispielsweise ein Polarisationsfilter an, das den Zustand eines Photons um 90° dreht. Dies bedeutet, dass der Zustand $|a\rangle$ des Photons nach dem Durchgang durch den Polarisatorfilm in einen Zustand $|b\rangle$ verändert wird. Die Phasensprünge aufgrund der Reflexion am Spiegel und der Durchgänge am halbdurchlässigen Spiegel werden nicht verändert.

Auf dem Weg “Unten” zum Detektor D_1 beschreiben wir nun den Zustand des Photons daher mit

$$\frac{1}{2}e^{i\varphi}|b\rangle.$$

Der Zustand des Photons auf dem Weg “Oben” zum Detektor D_1 ändert sich bei der Einführung des Polarisationsfilters nicht. So erhalten wir insgesamt den Zustand des Photons mit

$$\frac{1}{2}e^{i\varphi}|b\rangle + \frac{1}{2}e^{i\varphi}|a\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}e^{i\varphi}\left(\frac{1}{\sqrt{2}}|b\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|a\rangle\right),$$

wobei der Vektor in der Klammer ein Einheitsvektor ist. In diesem Fall wird das Photon mit der Wahrscheinlichkeit $\left|\frac{1}{\sqrt{2}}e^{i\varphi}\right|^2 = \frac{1}{2}$ am Detektor D_1 eintreffen.

Durch entsprechende Überlegungen erhalten wir für den gesamten Zustand des Photons auf dem Weg “Unten” und auf dem Weg “Oben” zum Detektor D_2 :

$$\frac{1}{2}e^{i\varphi}|b\rangle + \left(-\frac{1}{2}e^{i2\varphi}|a\rangle\right) = \frac{1}{\sqrt{2}}e^{i2\varphi}\left(\frac{1}{\sqrt{2}}|b\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}}|a\rangle\right).$$

Das Photon wird in diesem Fall auch mit der Wahrscheinlichkeit $\left|\frac{1}{\sqrt{2}}e^{i2\varphi}\right|^2 = \frac{1}{2}$ am Detektor D_2 eintreffen.

³An dieser Stelle ist anzumerken, dass man nicht “von dem Weg eines Photons” sprechen sollte, wenn man sich ganz korrekt ausdrücken will. Wie Zeilinger ([Zeilinger 2003], S. 149) erwähnt, haben wir hier offenkundig ein Sprachproblem, denn es macht keinen Sinn, über den Weg eines Photons vor seiner Registrierung zu sprechen. “Zugegebenermaßen hat es natürlich einen gewissen Beruhigungswert, wenn man zumindest einige anschauliche Bilder weiter verwenden könnte. Wenn man also weiter davon ausgehen könnte, dass [...] [Photonen] einen bestimmten Weg im Raum und Zeit verfolgen [...]. Aber abgesehen von dem Beruhigungswert, den solche Vorstellungen hätten, haben sie ansonsten keinerlei Bedeutung. Im Gegenteil – solche Vorstellungen führen zu klaren konzeptionellen Problemen.” [Zeilinger 2003], S. 195. Da wir hier nicht primär an der Interpretation des Phänomens interessiert sind, sondern die Funktionsweise des Mach-Zehnder-Interferometers im Rahmen der Quantenphysik analysieren wollen, werden wir in diesem Zusammenhang aus praktischen Gründen weiter über “den Weg des Photons im Interferometer” sprechen.

In dieser Situation, in der es “prinzipiell” möglich ist, die Weg-Information für ein Photon im Interferometer zu erhalten, lässt sich kein Interferenzbild beobachten. In diesem Zusammenhang spricht man von dem Teilchencharakter des Photons.

3.3.3 Komplementarität: Interferenzbild / Weginformation

Die in den Abschnitten 3.3.1 und 3.3.2 geschilderten Situationen stellen ein interessantes Beispiel der Komplementarität zwischen Interferenzbild und Weginformation in quantenmechanischen Systemen dar. Um beispielsweise den Weg eines Photons im Interferometer zu kennen, benötigt man eine Variante des Interferometers, zum Beispiel durch das Einsetzen eines Polarisators, mit dessen Hilfe der Übergang des Photons bestimmt werden kann. Dafür lässt sich kein Interferenzbild beobachten. Um dagegen das Interferenzbild zu sehen, ist eine “wesentliche Voraussetzung, dass der Weg des Photons prinzipiell unbekannt bleibt.” [Zeilinger 2003], S. 179

Die Tatsache, dass wir zwei komplementäre Größen wie beispielsweise Weg und Interferenzbild nicht beide genau kennen können, ist eine Signatur der Quantentheorie⁴.

Es gibt [...] sehr viele andere Beispiele von Komplementarität in der Quantenphysik, und es scheint eine Grundannahme zu sein, dass es zu jedem physikalischen Begriff zumindest einen gibt, der mit ihm komplementär verbunden ist. [Zeilinger 2003], S. 172

Das Komplementaritätsprinzip in der Quantenphysik

[...] übt offenbar eine sehr große Faszination auf viele Menschen aus, keineswegs nur auf Physiker. Es gibt immer wieder Vorschläge von Gedankenexperimenten, die behaupten, durch irgendeine clevere Anordnung doch gleichzeitig Weginformation über das Interferenzbild zu erhalten oder in anderen Fällen zwei komplementäre Variablen gleichzeitig zu messen. Mit diesem Vorschlägen verhält es sich genauso wie mit den Vorschlägen für den Bau von Perpetuummobile-Maschinen, also von Maschinen, die sich ohne äußere Energiezufuhr ewig bewegen sollen. Es

⁴Der im Rahmen dieser Arbeit diskutierte Fall ist ein Extremfall, in dem die beiden komplementären Größen genau festgelegt werden. Die Komplementarität ist jedoch “keine Ja-Nein-Situation”. Interessanterweise gibt es auch Zwischenstufen. Im konkreten Fall können wir “eine Situation erreichen, in der wir sagen können, mit 70%iger Chance hat das einzelne Teilchen den oberen Weg genommen. Es könnte aber auch mit 30%iger Chance den unteren Weg genommen haben. Für ein anderes Teilchen wäre dies dann vielleicht umgekehrt und so weiter. In diesem Fall erhalten wir dann ein Interferenzbild, das nicht mehr ganz scharf ist, sondern etwas ausgewaschen. Generell gilt, je weniger wir über den Weg kennen, desto schärfer wird das Interferenzbild. Je schärfer das Interferenzbild ist, desto mehr können wir über den Weg aussagen.” [Zeilinger 2003], S.171

gibt hier auch sehr ingeniose Vorschläge, die jedoch bei ihrer genaueren Betrachtung nicht haltbar sind. Bei einer sorgfältigen Analyse eines jeden Experiments stellt sich heraus, dass es einfach generell unmöglich ist, zwei komplementäre Größen gleichzeitig genau zu bestimmen. [Zeilinger 2003], S. 180

Im Folgenden werden wir noch einige Varianten des Mach-Zehnder-Interferometers vorstellen, mit deren Hilfe das Komplementaritätsprinzip zwischen Weginformation und Interferenzbild weiter diskutiert wird.

Das MZ-Interferometer mit verzögerter Entscheidung

Es wird eine Änderung in der experimentellen Anordnung des Mach-Zehnder-Interferometers eingebracht, nachdem sich das Photon bereits im Interferometer befindet. Diese Art von Experimenten werden in der Fachliteratur als “Delayed-Choice” (Experimente mit verzögerter Entscheidung) bezeichnet.

1978 schlug John Wheeler [Wheeler 1978] zum ersten Mal ein solches Experiment vor, welches eine Variante des Mach-Zehnder-Interferometers darstellt und zu den in der Physik bekanntesten Experimenten mit verzögerter Entscheidung gehört. Die experimentelle Anordnung wird folgendermaßen beschrieben (s. Schema in der Abbildung 3.13): Die Photonendetektoren schwingen nach unserer Entscheidung zwischen den Positionen D_1/D'_1 und D_2/D'_2 . Damit ist gemeint, dass die Entscheidung für die Positionen D_1 und D_2 oder D'_1 und D'_2 zu einem Zeitpunkt stattfindet, zu dem das Photon den ersten halbdurchlässigen Spiegel HS_1 passiert hat, jedoch noch nicht bei dem zweiten halbdurchlässigen Spiegel HS_2 eingetroffen ist. Das bedeutet, befinden sich die Detektoren in D_1 bzw. D_2 , erscheint die Interferenz, d.h. das Photon wird mit 100%iger Wahrscheinlichkeit im Detektor D_1 registriert. Befinden sich die Detektoren in D'_1 bzw. D'_2 , erhalten wir dagegen Information über den Weg des Photons und daher keine Interferenzerscheinung, d.h. das Photon wird mit 50%iger Wahrscheinlichkeit im Detektor D_1 bzw. mit 50%iger Wahrscheinlichkeit im Detektor D_2 registriert.

Ein anderes Experiment mit verzögerter Entscheidung mit Hilfe des Mach-Zehnder-Interferometers lässt sich folgendermaßen darstellen: Man kann sich entscheiden, ob der zweite halbdurchlässige Spiegel HS_2 eingesetzt wird oder nicht, und dies nachdem sich das Photon im Interferometer befindet. Man hat also die Wahl zwischen den beiden komplementären Größen Weginformation oder Interferenzbild. In dem Fall ohne Einsetzen des halbdurchlässigen Spiegels lässt sich der Weg des Photons nachweisen, je nachdem es im Detektor D_1 oder im Detektor D_2 registriert wird, und das bedeutet keine Interferenzerscheinung.

Die Ergebnisse des tatsächlich durchgeführten Experiments zeigen, dass auch in diesem Fall das Komplementaritätsprinzip gewahrt bleibt. So läßt sich bei solch

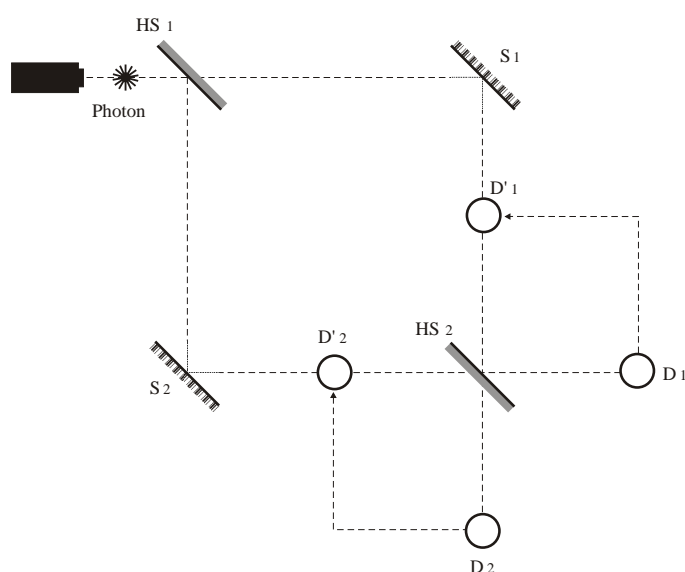


Abbildung 3.13: Skizze eines Mach-Zehnder-Interferometers mit verzögerter Entscheidung

einer Versuchsanordnung entweder ein Interferenzmuster oder die “Welcher-Weg-Information” erhalten. [Gruebel 2002]

Anzumerken ist an dieser Stelle noch, dass diese Art von Experimenten

[...] mit einer seltsamen Umkehr der Zeitordnung zu tun [haben]. Durch Einsetzen oder Weglassen des [zweiten halbdurchlässigen] Spiegels können wir in die Vergangenheit des Photons eingreifen. (J. Wheeler in: [Gruebel 2002])

Wheeler hat die Frage nach dem Delayed-Choice-Experiment noch weiter verfeinert, indem er das Licht eines Quasars, das durch eine Galaxie abgelenkt wird, mit Hilfe eines gedachten Interferometers, das so groß wie unser Universum ist, zur Untersuchung gebracht hat. Das Interessante an diesem Fall ist, dass Quasare viele Milliarden Lichtjahre von uns entfernt sind, so dass das Licht von Quasaren viele Milliarden Jahren benötigt, um uns zu erreichen (s. Abb. 3.14).

Die Experimentatorin würde auch hier im allerletzten Moment entscheiden können, ob sie messen will, welchen Weg das Licht gegangen ist, oder ob sie die Superposition beider Teilwellen sehen möchte. Und dies immerhin im nachhinein

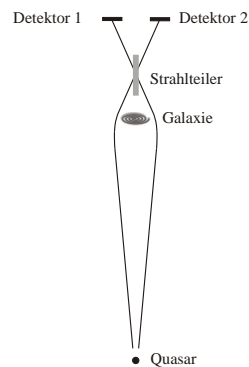


Abbildung 3.14: *Delayed-Choice-Experiment nach John Archibald Wheeler.*
 Nach:[Zeilinger 2003], S. 204

für ein Phänomen, das bereits vor Milliarden von Jahren seinen Anfang genommen hat. Eine Experimentatorin kann also heute entscheiden, ob das Licht einen wohldefinierten Weg genommen hat oder nicht. Wenn wir den halbdurchlässigen Spiegel nicht einsetzen, so wird das Licht einen der beiden Detektoren auslösen, und dies wird uns sagen, ob das Licht rechts oder links an der Galaxie vorbeigegangen ist. Auf der anderen Seite können wir, wenn der halbreflektierende Spiegel eingesetzt wird, von einer Welle sprechen, die beide Wege genommen hat. In einem gewissen Sinn wird somit die Entscheidung darüber, ob das Photon einen wohldefinierten Weg genommen hat oder nicht, zu einem Zeitpunkt gefällt, als es diese Reise bereits längst hinter sich gebracht hat. [Zeilinger 2003], S. 203 – 204

Die Quantenphysik stellt uns also ein interessantes philosophisches Rätsel vor, das John Wheeler selbst in dem folgenden Zitat zum Ausdruck gebracht hat,

"... das Photon ... nimmt nur einen Weg, aber es nimmt beide Wege, es nimmt beide Wege, aber es nimmt nur einen Weg. Was für ein Unsinn! Wie offenkundig ist es, dass die Quantentheorie widersprüchlich ist!" (J. Wheeler in: [Zeilinger 2003], S. 201)

In seinem Buch "Einsteins Schleier" ([Zeilinger 2003], S. 195) zeigt Zeilinger seine "Faszination an der Quantenphysik", indem er unter anderem das Mach-Zehnder-Interferometer für einzelne Photonen und eine "minimalistische Interpretation" für das seltsame Verhalten des Photons diskutiert. Aus seiner Sicht spricht Zeilinger jedoch nicht "von Wellen, die sich im Raum ausbreiten und auch nicht von Teilchen, die einen bestimmten Weg verfolgen", sondern "von den einzelnen Phänomenen, die tatsächlich

beobachtet werden.” Ein solches Phänomen ist zum Beispiel “die Tatsache, dass wir ein Teilchen am Eingang des Interferometers beobachten.” Der “Nachweis des Teilchens auf einem bestimmten Weg” ist ein anderes Phänomen. Aus dieser Sichtweise macht es keinen Sinn, ohne Auswahl des Experiments einem Quantenobjekt wohldefinierte Eigenschaften zuzuweisen.

Für Zeilinger bleibt daher die Auffassung der Kopenhagener Interpretation von Niels Bohr, in der er unter anderem behauptete: “Kein Phänomen ist ein Phänomen, außer es ist ein beobachtetes Phänomen” (Bohr in: [Zeilinger 2003], S. 205), eine plausible Aussage der Quantenphysik. Viele Physiker sind jedoch mit der Bohr’schen Interpretation nicht einverstanden. Einstein konnte beispielsweise die Sichtweise nicht akzeptieren,

dass es physikalische Größen geben soll – also Eigenschaften von Systemen, von Teilchen –, die uns nicht nur unbekannt sind, sondern grundsätzlich nicht festgelegt sind [...]. [Zeilinger 2003], S. 173

Dass das Deutungsproblem der Quantentheorie nicht unbedeutend ist, war schon seit der Begründung dieser Theorie klar, denn die Probleme sind nicht einfach eine Frage des persönlichen Weltbilds, sondern der Grunderscheinungen der Quantenmechanik. Daher mangelt es der Quantentheorie nicht an Interpretationen.

Ganz im Gegenteil, viele Physiker haben offenbar besonderen Ehrgeiz daran gesetzt, ihre Phantasie unter Beweis zu stellen, und haben eine ganze Menge verschiedener Interpretationen der Quantenphysik geliefert. [Zeilinger 2003], S. 148

Einige der zentralen Interpretationsfragen der Quantenphysik hängen mit der Superposition von Wellenfunktion zusammen, denn in quantenmechanischen Systemen wird von Überlagerung oder Superposition, aber nicht von Wellen, sondern von Wellenfunktionen bzw. von Wahrscheinlichkeitswellen gesprochen.

In einigen Interpretationen wird die Wellenfunktion als etwas Realistisches betrachtet, in anderen hingegen als eine mathematische Konstruktion, die sich nicht draußen in der Welt, sondern nur in unserem Kopf befindet. In diesem Zusammenhang wird über die Interpretation der Wellenfunktion und das Problem der Reduktion des quantenphysikalischen Zustandes intensiv diskutiert. Die Frage lautet: Wie wird die Überlagerung von Wellenfunktionen durch die Beobachtung eines Systems verringert? Oder im konkreten Fall des Mach-Zehnder-Interferometers: Wie geschieht es, dass in dem Moment, wo wir das Photon an einem bestimmten Weg im Interferometer nachweisen, die Wellenfunktion in dem anderen Weg auf Null sinkt?

Die Superposition von Wellenfunktion

[...] ist auch der Grund dafür, dass Quantensysteme – ganz im Gegensatz zur klassischen Physik – miteinander “verschränkt” sind. Dadurch entsteht die Nichtlokalität und das Messproblem, das der Physik-Nobelpreisträger Erwin Schrödinger mit seiner bedauernswerten Katze illustriert hat, die aufgrund der quantenmechanischen Verschränkungen lebendig und tot zugleich sein müsste. [Vaas 2004a], S. 42

Einige Interpretationen der Quantentheorie gehen davon aus, dass die Superposition von Wellenfunktionen aufgrund des Nachweises eines Teilchens überall und vorübergehend zusammenbricht und sprechen über den Kollaps der Wellenfunktion. In anderen Interpretationen wird behauptet, dass die Superposition von Wellenfunktionen “immer und überall verwirklicht ist und bei einer Messung auch nicht verschwindet” und in anderen wird vertreten, dass “kein System jemals in einer Superposition existiert.” [Zeilinger 2003], S. 152.

Im Folgenden werden wir uns den Interpretationen der Quantentheorie näher zuwenden.

3.4 Interpretationen der Quantenphysik

Zeilinger ([Zeilinger 2003], S. 143) fasst zwei grundsätzliche Ebenen der Interpretation einer physikalischen Theorie folgendermaßen zusammen:

In der ersten Ebene geht es darum, den Zusammenhang zwischen physikalischen Theorien und physikalischen Experimenten durch mathematische Formeln zu interpretieren. Diese Ebene der Interpretation ist notwendig, damit die physikalischen Theorien ihre experimentelle Überprüfung finden können. An dieser Stelle geht es also um die Interpretation der Symbole in einer Theorie und um die Frage, was diesen Symbolen in den Experimenten entspricht.

In einer zweiten Ebene der Interpretation werden philosophische Fragen gestellt, wie zum Beispiel:

Welche fundamentalen grundlegenden Konzepte über unsere Welt stecken [...] [hinter der Theorie]? Wie können wir diese Theorie philosophisch verstehen? [...] Es geht also hierbei um eine Interpretation auf einer höheren Ebene, gewissermaßen um eine metaphysische Interpretation, die zu beantworten sucht, welchen Sinn, welche Bedeutung eine Theorie hat, was daraus für unser Weltbild folgt. [Zeilinger 2003], S. 143

Gerade in der metaphysischen Ebene unterscheiden sich die Interpretationen der Quantentheorie extrem; und deswegen ist es interessant, einen Blick auf einige Interpretationen der Quantentheorie aus dieser Perspektive zu werfen.

Eine ausführliche Diskussion über das Thema Interpretationen der Quantentheorie stellt beispielsweise Max Jammer in seinem Buch “The Philosophy of Quantum Mechanics” vor [Jammer 1974]. Jammer fasst die Grundinterpretationen der Quantentheorie in fünf Kategorien zusammen. Diese sind im einzelnen:

1. Kategorie: “Early Semiclassical Interpretations”

Innerhalb dieser Kategorie werden die vier im Folgenden vorgestellten Interpretationen zusammengefasst, in denen die Quantensysteme bzw. -Phänomene mit Hilfe klassischer Analogien betrachtet werden.

- Die “Electromagnetic interpretation” von E. Schrödinger ⁵:
Die Quantenphänomene werden mit Hilfe von Analogien zu Wellen-Phänomenen betrachtet.
- Die “Hydrodynamic interpretation” von E. Madelung ⁶:
Die Schrödinger’sche Gleichung für das Ein-Elektron-Problem wird mit Hilfe hydrodynamischer Gleichungen betrachtet.
- Die “Original probabilistic interpretation” von M. Born ⁷:
Die Quantenphänomene werden mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitstheorie betrachtet.
- Die “double solution” von L. de Broglie ⁸:
Die Quantenobjekte werden im Hinblick auf optische Phänomene in einem Wellenfeld betrachtet.

2. Kategorie: “Early und Later Versions of the Complementarity”

1927 hat Bohr⁹ zum ersten Mal seine Ideen über das Komplementaritätsprinzip vorgestellt. Bohr behauptete, dass die Wellenfunktion die Erkenntnisgewinnung über das physikalische Phänomen – und nicht das Phänomen selbst – darstellt. In anderen Worten: Das Phänomen befindet sich vor der Beobachtung in einem potentiellen Zustand. Erst

⁵E. Schrödinger, *Quantisierung als Eigenwertproblem*, Annalen der Physik, 1926(79), S. 361 – 376.

⁶E. Madelung, *Quantentheorie in hydrodynamischer Form*, Zeitschrift für Physik, 1926(40), S. 322 – 326.

⁷M. Born, *Zur Quantenmechanik der Stoßvorgänge*, Zeitschrift für Physik, 1926(37), S. 863 – 867.

⁸L. de Broglie, *Sur la possibilité de relier les phénomènes de diffraction et de diffraction à la théorie des quanta de lumière*, Comptes Rendus, 1926(183), S. 447 – 448.

⁹N. Bohr, *Atomic Theory and the Description of Nature*, Cambridge University Press, Cambridge London, 1934, S. 52 – 91.

nach der Beobachtung wird das Phänomen verwirklicht. Dies entspricht dem Wesen der frühesten Version der Interpretation der Komplementarität, die auch als Kopenhagener Interpretation der Quantenmechanik bezeichnet wird.

Für Niels Bohr war die Komplementarität eines der tiefsten Konzepte, die wir in unserer Naturbeschreibung haben. Er hat versucht, diese Komplementarität auch auf Begriffe außerhalb der Physik anzuwenden. Eine besonders nette Anwendung ist sein Satz, dass “Wahrheit” und “Klarheit” eines Ausdrucks zueinander komplementär seien. Auch hat er versucht, den Begriff Komplementarität auf lebende Systeme auszudehnen. [Zeilinger 2003], S. 172

Zusammen mit Bohr gehören Heisenberg und Pauli zu den Hauptvertretern der Kopenhagener Interpretation, jedoch soll angemerkt werden, dass die Ansichten der Vertreter dieser Interpretation in Details zu unterscheiden sind und dass Bohr selbst seine Position im Laufe seines Lebens mehrfach geändert hat.

3. Kategorie: “Hidden-Variable Theories”

In Bohms¹⁰ Modell sind die Wellenfunktionen nicht nur mathematische, sondern physikalisch reale Objekte; Bohm behandelt sie wie klassische Gravitations- oder Magnetfelder. Die Wellenfunktionen führen demnach wie klassische Kraftfelder die Teilchen auf ihren Bahnen. [Im diesem Zusammenhang wird auch von einem “Quantenpotential” gesprochen]. [Albert 1996], S. 155

Ein Problem der Bohm’schen Interpretation liegt in der Nichtüberprüfbarkeit des Quantenpotentials, denn um beispielsweise zu verfolgen, welche Bahn ein Teilchen nimmt, muss man Detektoren entlang der Teilchenbahnen aufbauen. Damit verändert man das Quantenpotential und daher das Verhalten des Teilchens.

Ein ganz wichtiges weiteres Problem der Bohmschen Interpretation tritt für den Fall von verschränkten Teilchen auf. Hier mussten wir ja die Tatsache zur Kenntnis nehmen, dass die Beobachtung an einem Teilchen sofort und in unmittelbarer Weise die möglichen Beobachtungsergebnisse an einem anderen Teilchen beeinflusst. [...] Das Bohmsche Quantenpotential erreicht dies auf die Weise, dass es sich aufgrund einer einzigen Beobachtung im ganzen Raum, ja im ganzen Weltall sofort ändert. Dieses Potential, von dem man annimmt, dass es durchaus real existiert, ist also nicht den Beschränkungen der Lichtgeschwindigkeit unterworfen [...]. [Zeilinger 2003], S. 153

¹⁰D. Bohm, *A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of “Hidden” Variables, I and II*, Physical Review, Vol. 85, 1952(2), S. 166 – 179 / 180 – 193.

4. Kategorie: “Stochastic Interpretations”

F. Bopp¹¹ stellt beispielsweise quantenmechanische Systeme als ein statistisches Ensemble von Teilchen in einem Phasenraum dar. Quantenmechanische Phänomene entsprechen Bewegungen dieses Ensembles im Phasenraum.

5. Kategorie: “Statistical Interpretationen”

Interpretationen, in denen die Wellenfunktion keine Beschreibung individueller Systeme, sondern eine Beschreibung von Ensembles identischer Systeme bereitstellt, werden als statistische Interpretationen bezeichnet. J. C. Slater (1929) war der erste, der sich intensiv mit dieser Interpretation beschäftigt hat. E. Kemble, Blokhintsev, K. Popper, H. Margenau, A. Lande und L. Ballentine waren weitere Vertreter der “Statistical Interpretationen”.

Weitere Interpretationen der Quantentheorie

Zu den zahlreichen Interpretationen der Quantentheorie gehören auch interessante Interpretationen, in denen die Möglichkeit, eine Information über das quantenphysikalische System zu erhalten, die Entwicklung dieses Systems beeinflusst. Einige Beispiele dieser Interpretationen werden im Folgenden präsentiert.

“Human consciousness”

Eugene Wigner¹² vertritt die Ansicht, dass das menschliche Bewusstsein den Kollaps der Wellenfunktion in einem bestimmte Zustand verursacht.

“The Participatory Universe”

John Wheeler¹³ behauptet, dass das Universum erst existiert, wenn es beobachtet wird. Das Universum sei jedoch ein selbst-beobachtendes System und seine früheren Phasen werden zur Wirklichkeit durch die späteren Beobachtungen.

¹¹F. Bopp, *Korpuskularstatistische Begründung der Quantenmechanik*, *Zeitschrift für Naturforschung*, 1954(9a), S. 579 – 600.

¹²E. P. Wigner, *Remarks on the Mind-Body Question*, Wheeler J. & Zurek, W. H. (orgs.) *Quantum Theory and Measurement*, Princeton University Press.

¹³J. A. Wheeler, *Assessment of Everett’s “relative state” formulation of quantum theory*, *Reviews of Modern Physics* 1957(29), S. 463 – 465.

“The Many Worlds Interpretation”

Nach Ansicht H. Everetts¹⁴ und B. de Witts besteht das Universum aus anderen Universen, die den verschiedenen Lösungen der Wellenfunktion eines Systems entsprechen. In dieser Interpretation spielt der Kollaps der Wellenfunktion keine Rolle.

Bei jeder Messung, bei jeder Beobachtung, spaltet sich [...] das Universum in mehrere Universen, und in jedem einzelnen dieser Universen ist eine der Möglichkeiten, wie sie von der Quantenphysik vorhergesagt wird, verwirklicht. [...] Der Preis ist [...] [jedoch], dass diese Interpretation sehr unökonomisch ist [...]. [Außerdem haben wir] [...] keinerlei Möglichkeit zu beweisen, dass es parallelen Universen tatsächlich gibt." [Zeilinger 2003], S. 150 – 151

Die “Parallelen-Universen” sind voneinander völlig getrennt und es besteht keine Kommunikationsmöglichkeit zwischen den verschiedenen Universen.

Auch die Entwicklung der experimentellen Technik reizt den heutigen Stand der Interpretationsdiskussion in der Quantenphysik. Neben Interferenzexperimenten mit einzelnen Photonen sind auch Interferenzexperimente mit massiven Objekten (große Moleküle) heutzutage durchzuführen. In diesem Zusammenhang stellt die Frage nach der Superposition von makroskopischen Systemen nicht nur eine Herausforderung an die Experimentatoren dar, sondern auch eine der zentralen Streitfragen in der Interpretationsdiskussion, wie im Folgenden am Beispiel einiger neuer Interpretationen veranschaulicht wird:

“Consistent Histories and Quantum Measurements”

von Robert B. Griffiths und Roland Omnès

Das Messproblem der Quantentheorie steht im Mittelpunkt dieser Interpretation mit probabilistischem Charakter. “Histories” sind Sequenzen von Ereignissen, die im Verlauf der Zeit stattfinden. Die Eigenschaften von Quantenobjekten, wie beispielsweise ihr Ort oder ihre Geschwindigkeit zu einem Zeitpunkt, lassen sich im Zusammenhang mit einer Sequenz bestimmen. Die Bedingungen zur Verwirklichung einer bestimmten Sequenz werden mathematisch berechnet, so dass jede Sequenz einer Wahrscheinlichkeit entspricht. Real sind die objektiven “Histories” und nicht die Wellenfunktionen. Die Superposition makroskopischer Objekte wird von der Interpretation nicht ausgeschlossen. Sie kann jedoch nicht beobachtet werden, denn durch die Wechselwirkung

¹⁴H. Everett, Ph. D. Thesis, Princeton University; reprinted in: *The Many Worlds Interpretation of Quantum Mechanics*, B. De Witt and N. Graham, eds., Princeton University Press, 1973.

mit der Umgebung verlieren die physikalischen Systeme die Kohärenz. Dadurch werden die festen Beziehungen zwischen den Zuständen eines Systems zerstört, sodass die Zustände nicht mehr miteinander interferieren. Man spricht in diesem Zusammenhang von “Dekohärenz-Mechanismen”.¹⁵

“Spontane Reduktion”

von G. Ghirardi, A. Rimini und T. Weber; und von P. Perle

Diese Autoren schlagen vor, die Quantenmechanik zu verändern, sodass die Superposition von makroskopischen Systemen “prinzipiell und für immer und ewig ausgeschlossen wird.” [Zeilinger 2003], S. 155

In dieser Interpretation wird behauptet, dass die Welle entsprechend dem Zustand eines Systems im Verlauf der Zeit und auch ohne Beobachtung reduziert werden kann, wenn sie sich ausbreitet. Die Grundidee ist, die Entwicklung der Wellenfunktion mit einem zufälligen Kollaps der Wellenfunktion zu verbinden, indem “spontane Reduktionen” postuliert werden.

3.4.1 Interpretationen für Photonen im MZ-Interferometer

Die Interpretationsdiskussion der Quantentheorie wird im Unterrichtskonzept “Die Lichtausbreitung im Mach-Zehnder-Interferometer” aus einer didaktischen Perspektive berücksichtigt [Pessoa Jr. 1997]. Daher werden vier Interpretationen für das Verhalten des Photons im Mach-Zehnder-Interferometer bearbeitet. Mit Hilfe dieser Interpretationen wollen wir einige zentrale Aspekte der Interpretationsfrage der Quantenphysik im Unterricht erörtern. Als zentrales Problem wird eine der wichtigsten Eigenschaften der Quantenphysik, nämlich die Komplementarität zwischen Weginformation und Interferenzerscheinung herausgestellt. Die vier im Unterricht diskutierten Interpretationen werden im Folgenden vorgestellt:

1. Interpretation mit Wellencharakter:

Photonen werden als Wellenpakete dargestellt. Ein Wellenpakete breitet sich durch den Raum aus und wird am halbdurchlässigen Spiegel aufgeteilt, so dass es hinter dem zweiten halbdurchlässigen Spiegel “mit sich selbst” konstruktiv bzw. destruktiv interferieren kann.

¹⁵Für eine detaillierte Diskussion über die Interpretation “Consistent-historie”, am Beispiel des Mach-Zehnder-Interferometers wird das Lesen der Arbeit von Griffiths und Omnès empfohlen in: [Griffiths et al. 1999].

Kritische Aspekte: Jedes registrierte Photon überträgt immer seine gesamte Energie auf eine einzige Stelle. Eine derartig lokalisierte Wechselwirkung ist typisch für das Teilchen.

2. Interpretation mit Korpuskularcharakter:

Das Photon wird als Teilchen dargestellt und es wird nie geteilt. Es überträgt immer seine ganze Energie. Es geht im Interferometer entweder entlang eines Weges oder entlang des anderen Weges.

Kritische Aspekte: Das Photon wird nicht mit gleicher Wahrscheinlichkeit in beiden Ausgängen des Interferometers registriert. Auf bestimmten Positionen landet das Photon nie. Ein derartiges Verhalten ist nicht typisch für das klassische Teilchen.

3. Dualistisch-Realistische Interpretation

Das Photon wird als Teilchen dargestellt und es wird nie geteilt. Es geht entweder einen oder den anderen Weg im Interferometer. Mit dem Photon werden immer "leere Wellen" assoziiert, so dass es sich nur auf solchen Wellen bewegen kann. Die "leeren Wellen" können miteinander konstruktiv bzw. destruktiv interferieren.

Kritische Aspekte: Die "leeren Wellen" transportieren keine Energie, deshalb können sie nicht registriert werden.

4. Dualistisch-Positivistische Interpretation

Photonen können entweder als Wellen oder als Teilchen erscheinen. Ihr Verhalten hängt von der experimentellen Anordnung ab – je nachdem man Weginformation oder Interferenzbild beobachtet.

Kritische Aspekte: Wie und wann wird das Verhalten des Photons entschieden? Wie kann man sich Photonen vor der Registrierung vorstellen?

3.4.2 Das Thema Interpretationen im Quantenphysik-Unterricht

Wie bereits im Kapitel 2 erwähnt wurde, wird das Thema Interpretationen in der Quantenphysik im Rahmen einiger didaktischer Vorschläge zum Quantenphysik-Unterricht behandelt. In der Physik-Didaktik gibt es jedoch Autoren, die behaupten, dass diese Thematik nicht immer lernfördernd für das Verständnis der Quantenphysik ist. Aus einer epistemologischen Perspektive behaupten wir jedoch, dass die Einbeziehung der Interpretationsthematik der Quantentheorie im Physik-Unterricht die Gelegenheit zu Diskus-

sionen über den physikalischen Erkenntnisprozess und den Einblick in unterschiedliche Facetten der Physik ermöglicht, wie zum Beispiel:

Physik und physikalische Erkenntnis

Wovon handelt die Quantentheorie? Ist sie eine Theorie über die Realität oder über unsere Erfahrung der Realität? Mit dieser Frage haben sich die Physiker bereits in den Gründerjahren der Quantentheorie intensiv beschäftigt. Sie ist jedoch immer noch eine Frage von großer Bedeutung. Wenn wir uns

[...] nicht [nur] mit einer rein instrumentalistischen Minimalinterpretation in dem Sinne einer Übereinstimmung von Messergebnissen mit Theorienvorhersagen zufrieden geben wollen, sondern uns auch die Frage der Referenz der Theorie zur Realität bzw. die Diskussion ihres Wahrheitsanspruchs im naturwissenschaftlichen Kontext ebenso wichtig erscheint, dann müssen wir eingestehen, daß die Interpretationsproblematik der Quantenmechanik keineswegs so abgeschlossen ist, wie uns die Vollendung des mathematischen Formalismus glauben machen könnte.

Dieses Faktum hat für die Didaktik der Quantenmechanik besondere Bedeutung. Ein Verweigern oder Verdrängen der offenen Fragen verhindert nämlich ein tieferes Verstehen von physikalischer Naturerkenntnis. Unsere historische, ideengeschichtliche Analyse der Quantenmechanik sollte daher gerade zeigen, daß Theorien niemals endgültig, sondern immer nur vorläufig (*“provisorisch”*) sind. [Kuhn 1992], S. 56

Ein Blick in die offenen Fragen der Physik ermöglicht auch einen Einblick in die sozialphilosophische Dimension der physikalischen Erkenntnis und in diesem Kontext können möglicherweise auch die Schüler, die wegen der mathematischen bzw. experimentellen Aspekte des naturwissenschaftlichen Unterrichts nicht zum Lernen der Physik motiviert sind, zum Lernen der Physik gewonnen werden.

Leisen [Leisen 2000] berichtet beispielsweise über seine Erfahrung als Lehrer, dass aus der Sicht der Schüler “die Realitätsfrage der Quantentheorie” bzw. die Interpretationen der Quantentheorie zum Interessantesten der Quantentheorie gehören. In einer kleinen Umfrage unter 13 Schülern eines Leistungskurses (13. Klasse) schreibt ein Schüler zum Beispiel: “Das Besondere, das ich in der Quantenphysik gelernt habe, ist [...], dass die Philosophie eine wichtige Komponente der Physik ist.”

Physik und Kultur

Zanetic hat in seiner Dissertation “Physik ist auch Kultur”¹⁶ (*Física também é cultura*) die zentrale Bedeutung der Quantenphysik als kulturellen Bestandteils unserer Zeit hervorgehoben und, daher die Betrachtung offener Fragen der Quantentheorie aus einer historischen bzw. sozialen Perspektive in didaktischen Vorschlägen zum Quantenphysik-Unterricht vertreten. Die Berücksichtigung grundlegender Ideen der modernen Physik und die Vermittlung eines Einblicks in das Weltbild der modernen Physik gehören, so Zanetic, zu zentralen Aufgaben des Physik-Unterrichts. [Zanetic 1989]

Auch Müller und Wiesner [Müller et al. 2000b] haben sich mit der Einbeziehung der Interpretationsthematik der Quantentheorie in didaktische Zusammenhänge befasst und antworten auf die Frage “Was sind die Gründe, sich in der Schule mit den Deutungsfragen der Quantenphysik zu beschäftigen?” folgendermaßen:

Es ist die Quantentheorie,

[...] die unsere Vorstellungen von der Beschaffenheit der Natur unter physikalischer Perspektive maßgeblich geprägt hat und demgemäß einen wichtigen Bestandteil unserer wissenschaftlichen Kultur darstellt. Unter diesem Gesichtspunkt erscheint es nicht vertretbar, dass die meisten der Schülerinnen und Schüler, die die Schule verlassen, niemals die Gelegenheit hatten, in ihrem naturwissenschaftlichen Weltbild über den Stand des 19. Jahrhunderts hinauszukommen. [Müller et al. 2000b], S. 90

Physik und Wirklichkeit

Sexl [Sexl 1978] geht von dem Interesse der Schüler an modernen Themen der Wissenschaft und von dem

[...] Erfolg populärwissenschaftlicher Literatur und Fernsehsendungen aus, die sich auf aktuelle physikalische Themen und Forschungsergebnisse beziehen. [Sexl 1978]

Daher spricht er sich für die Betrachtung des Deutungsproblems im Quantenphysik-Unterricht aus. Nach Sexl gehört dieses Thema nicht nur zu den interessantesten Teilen der heutigen Debatte über die Grundlage der Physik, es kann auch der Beginn intensiver philosophischer Diskussionen sein.

¹⁶“Física também é cultura” wurde 1989 von Zanetic zur Faculdade de Educação da Universidade de São Paulo, Brasilien veröffentlicht.

Physik und Physik-Unterricht

In der Praxis sind allerdings Lehrerinnen und Lehrer nicht einfach davon zu überzeugen, sich mit den Querverbindungen Physik und Philosophie im Physik-Unterricht zu beschäftigen.

Einerseits gehören die philosophischen Interpretationsfragen der Quantenphysik

[...] zu einer Thematik, die von den Lehrerinnen und Lehrern fachliches Hintergrundwissen erfordert, zu der es bis heute keine einheitliche Auffassung gibt, aber der Lehrer ist zur eigenen Stellungnahme aufgefordert. [Leisen 2000]

Andererseits ist das Thema

[...] weiterhin didaktisch wie methodisch unbearbeitet. So stellt sich die Frage: “Wie thematisiert man methodisch die Philosophie im Physikunterricht, ohne dabei weder in Geschwätzigkeit noch in Lehrermonologe zu verfallen?” [Leisen 2000]

Die Interpretationsthematik der Quantentheorie wird im Physik-Unterricht am häufigsten im Zusammenhang mit der Erörterung des Doppelspaltversuchs für einzelne Photonen berücksichtigt.

Leisen [Leisen 2000] berichtet aus seiner Erfahrung als Physik-Lehrer beispielsweise, dass der

[...] didaktische Dreh- und Angelpunkt seines Quantenphysikunterrichtes das Doppelspaltexperiment ist, denn im Doppelspaltexperiment “steckt”:

- das “Wellige”, das “Körnige” und das “Stochastische” der Quantenphysik,
- die Heisenberg’sche Unschärferelation,
- die Frage des Messprozesses,
- die Frage der Nichtlokalität,
- viele andere wichtige Experimente,
- die ganze Palette der Interpretationen.

Obwohl die wichtigsten Aspekte der Interpretationsthematik der Quantenphysik im Zusammenhang mit dem Doppelspaltexperiment behandelt werden können, ist das Mach-Zehnder-Interferometer eine experimentelle Anordnung, die unseres Erachtens für die Einbeziehung der Interpretationen der Quantentheorie im Physik-Unterricht geeigneter ist.

Das Mach-Zehnder-Interferometer für einzelne Photonen ist dem Doppelspaltversuch mit Photonen grundsätzlich analog. Die Wege Oben und Unten (s. Abb. 3.11, S. 55) nach dem zweiten halbdurchlässigen Spiegel im Interferometer entsprechen den beiden Spalten eines Doppelspaltexperiments, wobei die Photonen im idealen Interferometer immer in einem Detektor und nie in dem anderen Detektor registriert werden, analog der Maximum- bzw. Minimumintensität im Doppelspaltexperiment.

[Dennoch] während das Doppelspaltexperiment wie in einer Nusschale alles Notwendige für eine qualitative Aussage enthält, hat es für eine quantitative Analyse einen gewissen Nachteil, nämlich den, dass das Teilchen an vielen verschiedenen Punkten auf der Beobachtungsebene auftreten kann und die mathematische Beschreibung zwar klar und eindeutig ist, jedoch für unsere Darstellung [...] etwas zu kompliziert ist. [Zeilinger 2003], S. 182

Nach unserer Ansicht liegt der Hauptvorteil des Zuganges zur Quantenphysik in der Sekundarstufe II mit Hilfe des Mach-Zehnder-Interferometers gerade darin, dass die Justierung der experimentellen Anordnung, die bei der Behandlung eines Doppelspaltexperiments nicht erforderlich ist, eine wichtige didaktische Funktion besitzt. Die Justierungsphase des Interferometers ist für die Verwirklichung unserer Unterrichtskonzeption wichtig, wie bereits im Kap.2 gezeigt wurde. Im Rahmen anderer Unterrichtsvorschläge werden Aufbau und Justierung des Mach-Zehnder-Interferometers normalerweise nicht berücksichtigt.

Im Folgenden wird das Thema Mach-Zehnder-Interferometer aus der Perspektive anderer Vorschläge zum Quantenphysik-Unterricht kommentiert.

3.5 Das Thema MZ-Interferometer im Physik-Unterricht

Das Münchner Unterrichtskonzept zur Quantenmechanik [Müller et al. 2000b]

Zusammenhang: Das Verhalten von Photonen im Hinblick auf das Teilchenmodell (Welche-Weg-Information) bzw. das Wellenmodell (Interferenzerscheinung) wird im Rahmen dieser Unterrichtskonzeption am Beispiel des Mach-Zehnder-Interferometers für einzelne Photonen vorgestellt. Das Mach-Zehnder-Interferometer wird im Unterricht nur mit Hilfe einer Computersimulation betrachtet.

Anwendung: Mit Hilfe des Mach-Zehnder-Interferometers lässt sich die Herausbildung eines Interferenzmusters aus einzelnen Photonen auf einem Schirm des Interferometers beobachten.

Eine Variante des Mach-Zehnder-Interferometers mit Polarisationsfiltern zwischen

den Spiegeln und halbdurchlässigen Spiegeln wird vorgestellt, um den Teilchencharakter des Photons nachzuweisen (Welcher-Weg-Information).

Nach der Entfernung der Polarisationsfilter lässt sich nach der Registrierung vieler Photonen ein aus konzentrischen Ringen herausgebildetes Interferenzmuster wieder auf dem Schirm des Interferometers beobachten.

Problemstellung: Bei einer sehr geringen Lichtintensität, so dass in jeder Zeit ein einzelnes Photon das Interferometer durchläuft, beobachtet man, dass jedes Photon einen Punkt auf dem Schirm hinterlässt (Teilcheneigenschaft). Wenn die Zahl von registrierten Photonen ansteigt, lässt sich ein Interferenzmuster (Welleneigenschaft) auf dem Schirm des Interferometers nachweisen.

Interpretation: Das Verhalten von Photonen im Interferometer lässt sich nicht mit einem reinen Teilchen- oder Wellenmodell beschreiben. Eine zufrieden stellende Erklärung muss Elemente beider Modelle in sich vereinigen.

Unterrichtskonzept – ein ungewöhnlicher Einstieg [Embacher 2004]¹⁷

Zusammenhang: Wie in der Münchner Unterrichtskonzeption wird das Verhalten von Quantenobjekten im Hinblick auf das Teilchen- bzw. Wellenbild in diesem Unterrichtsvorschlag mit Hilfe eines Mach-Zehnder-Interferometers für einzelne Photonen vorgestellt. Das Mach-Zehnder-Interferometer wird nur mit Hilfe einer Computersimulation betrachtet.

Anwendung: Im Mach-Zehnder-Interferometer werden nur Lichtstrahlen auf den optischen Achsen des Interferometers berücksichtigt, wobei die Photonen mit 100%iger Wahrscheinlichkeit in einem von den beiden Ausgängen des Interferometers registriert werden (Interferenzerscheinung).

Eine Variante des Mach-Zehnder-Interferometers mit einer “Bombe” zwischen einem Spiegel und einem halbdurchlässigen Spiegel des Interferometers wird präsentiert, um den Teilchencharakter des Photons nachzuweisen, wobei die “Bombe” beim Vorübergehen eines Photons gezündet wird. Auf diese Weise werden die Photonen mit gleichen Wahrscheinlichkeiten in den zwei Ausgängen des Interferometers registriert.

Problemstellung: Jedes Photon wird nicht mit gleicher Wahrscheinlichkeit in beiden Detektoren (Ausgängen) des Interferometers registriert. Ein derartiges Verhalten ist nicht typisch für das klassische Teilchen. Wenn ein Hindernis im Interferometer das Vorübergehen des Photons hindert, werden die Photonen mit gleicher Wahrscheinlichkeit

¹⁷Das Bombenproblem wurde 1993 von den zwei israelischen Physikern Avshalom Elitzur und Lev Vaidman zum ersten Mal als Gedankenexperiment vorgeschlagen und 1995 von der Gruppe Zeilingers an der Universität Innsbruck durchgeführt. [Zeilinger 2003], S. 198

in beiden Detektoren registriert.

Interpretation

“Das Photon ist ein Teilchen” und tritt nie anders auf. Noch niemand hat ein wellenförmiges Photon gesehen. Eines der unglücklichsten Missverständnisse über die Quantentheorie ist der Dualismus von Welle und Teilchen. Dieses Schlagwort verdeckt, was es eigentlich ursprünglichen erhellen sollte, und wird am besten gar nicht verwendet. Es ist tatsächlich eine Welle im Spiel. Sie hat jedoch keine unmittelbare physikalische Wirkung, und sie läßt sich nicht messen, sondern sie beschreibt die Wahrscheinlichkeit, mit der ein einzelnes Photon die theoretisch vorhandenen Möglichkeiten wahrnimmt.[Embacher 2004]

Quantenphysik für Lehrer und Studenten [Brachner et al. 1977]

Zusammenhang: Das Mach-Zehnder-Interferometer wird als Ergänzung zum Doppelspaltexperiment mit Photonen vorgestellt.

Anwendung: Das Interferometer mit einzelnen Photonen wird mit Bezug auf ein reales Interferometer mit normaler Lichtintensität vorgestellt. Bei geringer Lichtintensität wird ein Interferenzmuster auf einem Schirm des Interferometers aus einzelnen Punkten herausgebildet (Wellencharakter).

Eine Variante des Mach-Zehnder-Interferometers mit Polarisationsfilter zwischen den Spiegeln und halbdurchlässigen Spiegeln (s. Abb. 2.4, S. 37) wird betrachtet, um den Teilchencharakter des Photons zu beobachten (Welcher-Weg-Information), wobei beim Einsatz der Polarisationsfilter das Interferenzmuster verschwindet.

Problemstellung: Die Herausbildung von Interferenzmustern mit normaler Lichtintensität läßt sich durch die Wellenoptik verstehen. Bei geringer Lichtintensität, wobei sich jedesmal nur ein einzelnes Photon im Interferometer befindet, wird ein Interferenzmuster aus einzelnen Punkten gebildet. Dies läßt sich weder mit dem Wellenmodell noch mit dem Teilchenmodell erklären.

Interpretation: Für verschiedene Wege des Photons im Interferometer werden Wahrscheinlichkeitsamplituden berechnet. Gibt es verschiedene Möglichkeiten für das Eintreten eines Ereignisses und wird durch die Versuchsanordnung nicht festgelegt, dass ausschließlich eine bestimmte Möglichkeit gewählt wurde, dann tritt Interferenz auf. Hinterläßt dagegen ein Ereignis an der Versuchsanordnung ein Merkmal, durch das entschieden werden kann, welche Möglichkeit gewählt wurde, dann tritt keine Interferenz auf.

Modellbildung in der Physik [Küblbeck 1997]

Zusammenhang: In diesem Vorschlag wird das Interferometer parallel zum Doppelspaltversuch als Gedankenexperiment betrachtet, um Feynmans Zeigerformalismus zu veranschaulichen.

Anwendung: Die Lichtstrahlen werden nur auf den optischen Achsen des Interferometers berücksichtigt und es wird nur ein Ausgang des Interferometers betrachtet.

Beim Einsatz eines nicht durchsichtigen Hindernisses zwischen einem Spiegel und einem Teilstrahler des Interferometers kann man Information über den Weg eines Photons gewinnen und daher lässt sich kein Interferenzmuster mehr beobachten.

Problemstellung: Die Wahrscheinlichkeit eines Photons, im Detektor nachgewiesen zu werden, ist von der Einstellung eines makroskopischen Hindernisses abhängig.

Interpretation: Das Verhalten von Photonen wird im Zusammenhang mit der Ort-Impuls-Unschärferelation betrachtet.

Quantenphysik in der Schule [Gruebel 2002]

Zusammenhang: Das Mach-Zehnder-Interferometer wird als Beispiel eines Experiments mit verzögerter Entscheidung nach dem Vorschlag von J. Wheeler vorgestellt.

Anwendung: Nur Lichtstrahlen auf den optischen Achsen des Interferometers werden betrachtet.

Die Welcher-Weg-Information eines Photons wird mit Hilfe einer Variante des Mach-Zehnder-Interferometers ohne Einsatz des zweiten halbdurchlässigen Spiegels vorgestellt. Auf diese Weise werden die Photonen mit gleichen Wahrscheinlichkeiten auf beiden Ausgängen des Interferometers registriert.

Beim Einsatz des zweiten halbdurchlässigen Spiegels werden die Photonen mit 100%iger Wahrscheinlichkeit auf einem von beiden Ausgängen des Interferometers registriert.

Problemstellung: Durch Einsetzen oder Weglassen des Spiegels wird entweder ein Interferenzmuster (Wellencharakter) oder eine Welcher-Weg-Information (Teilchencharakter) des Photons erhalten, auch wenn dies nach dem Eintritt des Photonen im Interferometer geschah (Experimente mit verzögerter Entscheidung).

Interpretation: Das Quantenphänomen ist nur im Augenblick der Messung (Registrierung) vollendet und interpretierbar.

Bemerkungen

In diesem Kapitel haben wir die Funktionsweise des Mach-Zehnder-Interferometers aus verschiedenen Perspektiven besprochen. Im Fall des Mach-Zehnder-Interferometers für einzelne Photonen haben wir beispielsweise gesehen, dass im Rahmen einiger Konzeptionen die Erscheinung eines Interferenzmusters aus einzelnen Photonen auf einem Schirm des Interferometers betrachtet wird. Im Rahmen anderer Konzeptionen werden hingegen nur Lichtstrahlen auf den optischen Achsen eines idealisierten Interferometers berücksichtigt und die Interferenzerscheinung – d.h. die konstruktive bzw. destruktive Überlagerung – wird auf den zwei Schirmen des Interferometers nur in Strahlrichtung betrachtet.

Aus didaktischer Sicht ist die Berücksichtigung eines idealisierten Interferometers im Quantenphysik-Unterricht vertretbar, denn mit diesem “wenig komplizierten experimentellen Aufbau” lassen sich wichtige konzeptuelle Probleme der Quantentheorie – wie beispielsweise: das Komplementaritätsprinzip, das Superpositions- bzw. das Messproblem und die Interpretationsproblematik – gut darstellen und analysieren.

Die Berücksichtigung des idealen Interferometers geht allerdings über die unmittelbare Realität hinaus. Daher gehen wir davon aus, dass der Justierungs- bzw. der Modellierungsprozess beim Mach-Zehnder-Interferometer im Unterricht eine wichtige didaktische Funktion besitzt und nicht vernachlässigt werden sollte.

Durch den Einblick in den Modellierungsprozess des Mach-Zehnder-Interferometers wird nicht nur das Quantenphänomen schrittweise mit zunehmender Abstraktion im Unterricht aufgebaut, sondern auch ein Bezug zur Realität garantiert, indem man “eine fundamentale Veränderung des klassischen Realitätsbegriffes” durch “den erzeugenden Charakter der modernen Technik” in den modernen Wissenschaften feststellen kann – wie es von Bachelard behauptet wurde (s. Abschnitt 2.2). Dies schafft nicht nur die Voraussetzung für die Einbeziehung epistemologischer Diskussionen im Physik-Unterricht, sondern auch die Voraussetzung für die zukünftige Betrachtung von Themen der modernen Physik, wie beispielsweise: neue Informationstechnologie, Quantencomputer und Teleportation, die beginnen in Unterrichtskontexten zu erscheinen.

Wir alle gehen davon aus, dass die Welt mit ihren Eigenschaften “da draußen” eben genau so existiert, wie sie unabhängig von uns existiert. [...] Im Sinn der klassischen Physik und auch in unserem Alltagsweltbild ist die Wirklichkeit zuerst, die Information über diese Wirklichkeit hingegen eben etwas Abgeleitetes, etwas Sekundäres. Aber vielleicht ist es auch umgekehrt. Alles, was wir haben, ist die Information, sind unsere Sinneseindrücke, sind Antworten auf Fragen, die wir stellen. Die Wirklichkeit kommt danach. Sie ist abgeleitet, abhängig von der Information, die wir erhalten. [Zeilinger 2003], S. 216 – 217

[...] Für den Fall der Quantenphysik haben wir schon gesehen, dass wir über unsere

Apparate letztlich nur Fragen an die Natur stellen und dass diese Fragen dann von der Natur in irgendeiner Form beantwortet werden [...]. [Zeilinger 2003], S. 213 – 214

Dass die Wirklichkeit nicht direkt zugänglich ist, heißt jedoch nicht, dass sie nicht existiert.

[...] als Hinweis auf die Existenz einer von uns unabhängigen Wirklichkeit [...] ist [...] zu erwähnen, dass wir offenbar alle in derselben Situation übereinstimmen können, dieselben Beobachtungen zu machen. Auch andere Beobachter kommen zum selben Schluss, welcher Detektor [im Interferometer] “Klick” gemacht hat, wie wir selbst. Das heißt, das Individuum, die individuelle Beobachtung, ist offenbar nicht wichtig. [Zeilinger 2003], S. 215