

Interferometrie im Schülerlabor - Eingangsvortrag

Zunächst kann als Motivation die historische Entwicklung des Experiments von Albert Michelson und Edward Morley und die Bedeutsamkeit des Experiments für die Gravitationswellendetektion im 21. Jahrhundert dargestellt werden. Anschließend muss auf die Sicherheitsaspekte beim Experimentieren und die richtige Handhabung der optischen Komponenten hingewiesen werden.

Das Michelson-Morley-Experiment

Nachdem die Wellentheorie des Lichts im 19. Jahrhundert durch Interferenzversuche von Thomas Young und Augustin Fresnel zunehmend an Bedeutung gewinnt, wird auch die Frage nach seinem Trägermedium lauter. So wie sich Schallwellen in Luft durch Vibration der Luftmoleküle ausbreiten, wird postuliert, dass sich Lichtwellen in einem Äther, einem hypothetischen den ganzen Raum ausfüllenden Stoff, ausbreiten. Fresnel beschreibt 1822 Licht als "nichts anderes als ein bestimmter Schwingungszustand einer universellen Flüssigkeit"[1]. Für diesen Weltäther gibt es im 18. Jahrhundert zwei verschiedene Hypothesen – die eines ruhenden Äthers, durch den sich die Erde mit der Geschwindigkeit v bewegt und die der teilweisen oder vollständigen Äthermitnahme. Beide Hypothesen können im Laufe der Zeit durch verschiedene Experimente widerlegt werden[1].

Ein entscheidender Versuch hierfür ist das Michelson-Morley-Experiment, das 1881 von Albert Michelson erstmals durchgeführt wurde[2]. Michelsons Ziel war es, die Relativgeschwindigkeit v zwischen Erde und dem ruhenden Weltäther zu bestimmen. Hierfür konstruierte er ein Präzisionsmessgerät, das eine weiterentwickelte Variante des ersten, von Fresnel und François Arago konstruierten Interferometers darstellt[1]. Michelsons Interferometer besteht aus einer Lichtquelle, einem Strahlteiler, zwei Spiegeln und einem Detektor, wie in Abbildung 1 dargestellt. Im Versuch wird Licht von der Lichtquelle ausgesandt und trifft auf den Strahlteiler. Am Strahlteiler wird ein Teil des Lichts transmittiert und der andere Teil reflektiert. Das transmittierte Licht trifft anschließend auf Spiegel 1 und wird zurück auf den Strahlteiler geworfen. Das reflektierte Licht trifft auf Spiegel 2 und wird ebenfalls auf den Strahlteiler zurückgeworfen. Nun wird das Licht am Strahlteiler erneut anteilig reflektiert bzw. transmittiert, sodass das von Spiegel 1 zurückgeworfene Licht hinter dem Strahlteiler mit dem von Spiegel 2 zurückgeworfenen Licht interferiert. Am Detektor wird dann die Intensität des eintreffenden Lichts gemessen.

Gibt es wie bei der Mitnahmehypothese keine relative Bewegung zwischen Erde und Äther, so beträgt die Laufzeit von Licht für eine Strecke der Länge l

$$t_0 = \frac{l}{c}, \quad (0.1)$$

wobei c die Lichtgeschwindigkeit ist. Gilt wie in Abbildung 1, dass die Strecken $\overline{AB} = \overline{AC} = l$ gleich lang sind, dann gibt es keine Laufzeitunterschiede zwischen den beiden Interferometerarmen. Sowohl die Durchquerung des ersten Interferometerarms des transmittierten Lichts vom Strahlteiler hin zu Spiegel 1 und wieder zurück als auch die Durchquerung des zweiten Interferometerarms vom Strahlteiler hin zu Spiegel 2 und wieder zurück dauert

$$t_1 = 2 \cdot \frac{l}{c}. \quad (0.2)$$

Die beiden Teilwellen erreichen den Detektor also in Phase und dieser registriert ein Interferenzmaximum.

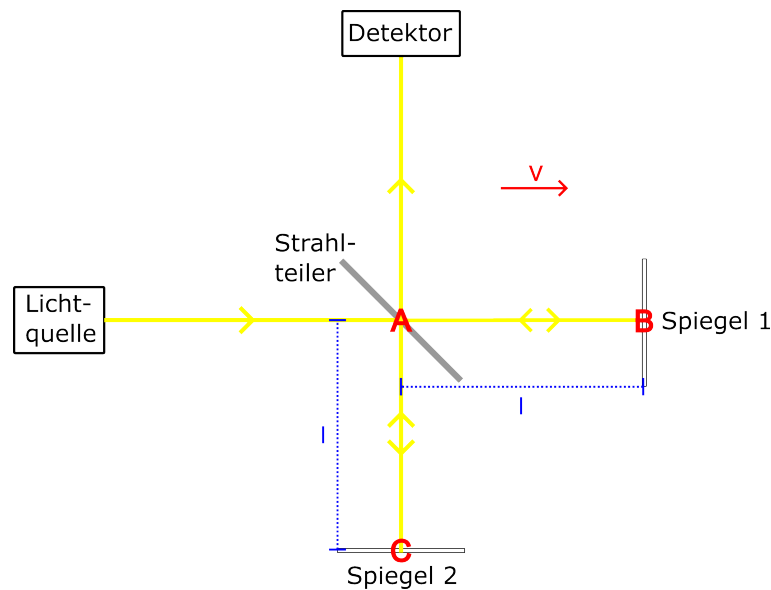


Abbildung 1: Abgebildet ist der Grundaufbau eines Michelson-Interferometers bestehend aus einer Lichtquelle, einem Strahlteiler, zwei Spiegeln und einem Detektor. Beide Interferometerarme haben die Länge l . Der Versuchsaufbau bewegt sich mit Geschwindigkeit v relativ zum Weltäther.

Michelson nahm jedoch an, dass die Erde sich relativ zum ruhenden Weltäther mit Geschwindigkeit v bewegt, sodass sich die Laufzeit, die das Licht für die Durch-

querung der beiden Interferometerarme benötigt verändert.

Die Laufzeitkorrektur für den Interferometerarm von Spiegel 1 ergibt sich wie folgt und ist in Abbildung 2a veranschaulicht. Ist nun die Strecke $\overline{AB}$ parallel und die Strecke $\overline{AC}$ senkrecht zur relativen Bewegungsrichtung, so ergeben sich unterschiedliche Laufzeiten des Lichts für die Wege durch die beiden Interferometerarme zwischen Strahlteiler und Spiegel 1 bzw. 2.

Da sich das Licht auf der Teilstrecke $\overline{AB}$ in dieselbe Richtung ausbreitet wie sich der Aufbau relativ zum Äther bewegt, verringert sich die Geschwindigkeit des Lichts relativ zum Versuchsaufbau zu $c - v$ und somit benötigt das Licht

$$t_{AB} = \frac{l}{c - v} \quad (0.3)$$

um vom Strahlteiler zu Spiegel 1 zu gelangen. Auf dem Rückweg von Spiegel 1 zum Strahlteiler breitet sich das Licht entgegengesetzt der Bewegungsrichtung des Aufbaus aus, sodass sich das Licht mit der Geschwindigkeit $c + v$ relativ zum Versuchsaufbau ausbreitet und diesen Weg somit in der Zeit

$$t_{BA} = \frac{l}{c + v} \quad (0.4)$$

zurücklegt. Insgesamt beträgt die Laufzeit durch den Interferometerarm von Spiegel 1 also

$$t_{ABA} = \frac{l}{c - v} + \frac{l}{c + v} = \frac{2lc}{c^2 - v^2}. \quad (0.5)$$

Für die Laufzeit durch den anderen Interferometerarm von Spiegel 2, der senkrecht zur relativen Bewegungsrichtung der Erde durch den Äther steht, ergibt sich ebenfalls eine Korrektur, die in Abbildung 2b deutlich wird. Das Licht legt eine Strecke von

$$\sqrt{l^2 + (vt_{AC})^2} \quad (0.6)$$

zurück und benötigt mit Lichtgeschwindigkeit c die Zeit

$$t_{AC} = \frac{\sqrt{l^2 + (vt_{AC})^2}}{c} \quad (0.7a)$$

$$t_{AC}^2 = \frac{l^2 + (vt_{AC})^2}{c^2} \quad (0.7b)$$

$$t_{AC} = \frac{l}{\sqrt{c^2 - v^2}}, \quad (0.7c)$$

um diese zurückzulegen. Diese Korrektur ergibt sich sowohl für den Hin- als auch den Rückweg, sodass die Laufzeit durch diesen Interferometerarm insgesamt

$$t_{ACA} = \frac{2l}{\sqrt{c^2 - v^2}} \quad (0.8)$$

beträgt.

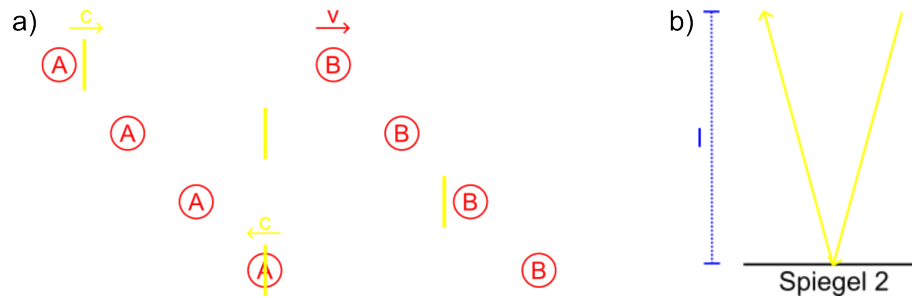


Abbildung 2: Es ergeben sich Laufzeitkorrekturen sowohl für a) den Interferometerarm parallel zur relativen Bewegungsrichtung als auch für b) den Interferometerarm orthogonal zur relativen Bewegungsrichtung.

Die beiden Teilwellen kommen also für den angenommenen Fall $v \neq 0$ zeitversetzt mit einer Laufzeitdifferenz von $\Delta t = t_{ABA} - t_{ACA}$ am Detektor an. Wird nun das Experiment drehbar gelagert und während des Versuchs um 90° gedreht, so ändert sich diese Laufzeitdifferenz und es ergibt sich eine Änderung der gemessenen Intensitätsverteilung am Detektor, mithilfe derer die Relativgeschwindigkeit zwischen Erde und Weltäther ermittelt werden kann[1].

In seinem ersten Experiment 1881 übersah Michelson die Laufzeitkorrektur für den zweiten Interferometerarm. Erst 1887 führte er das Experiment erneut mit Edward Morley (1838-1923) unter Berücksichtigung dieser Korrektur durch. Hierdurch wurde die berechnete Differenz der Interferenzänderung bei Drehung um 90° noch kleiner, sodass der Aufbau verbessert werden musste. In beiden Versionen war die gemessene Änderung der Interferenz am Detektor im Experiment jedoch bedeutend kleiner als die theoretisch vorhergesagte, sodass die Theorie eines ruhenden Äthers verworfen werden musste[2],[3].

Gravitationswellendetektion

Das Prinzip des Michelson-Interferometers hat jedoch nicht nur eine historisch herausragende Bedeutung, sondern besitzt auch eine aktuelle Relevanz in der Forschung zur Detektion von Gravitationswellen.

Gravitationswellen sind sich periodisch ausbreitende Änderungen der Raumzeitkrümmung, die von beschleunigten Massen erzeugt werden und sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. Werden ruhende Teilchen, die wie in Abbildung 3 angeordnet sind, von einer Gravitationswelle überlaufen, so ändert sich der Abstand zwischen den Teilchen periodisch. Mit seiner Allgemeinen Relativitätstheorie sagte

Einstein bereits im Jahr 1916 die Existenz solcher Gravitationswellen voraus, die experimentelle Messung solcher Gravitationswellen gelang jedoch erst Jahrzehnte später. Einstein selbst ging nicht davon aus, dass es irgendwann möglich sein würde, Gravitationswellen nachzuweisen, da die von ihnen hervorgerufenen Längenänderungen zu klein seien, um in einer Messung festgestellt werden zu können[4],[5].

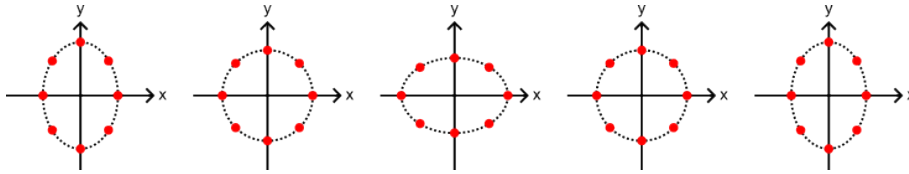


Abbildung 3: Abgebildet ist schematisch der zeitliche Verlauf des Einflusses von Gravitationswellen auf die roten Teilchen. Eine ähnliche Abbildung befindet sich in [4].

In den 1970er Jahren beobachteten Russel Hulse und Joseph Taylor Pulsare mit einem Radioteleskop am Arecibo-Observatorium in Puerto Rico. Hierbei stellten sie fest, dass sich einer der beobachteten Pulsare auf einem Orbit um einen sehr viel kleineren Neutronenstern befinden musste. Über die Jahre wurde eine langsam abnehmende Umlaufzeit des Pulsars um den Neutronenstern beobachtet. Dies implizierte, dass der Pulsar Energie verlor und Pulsar und Neutronenstern ineinander kreisten. Die Geschwindigkeit, mit welcher der Pulsar Energie verlor, entsprach genau der Vorhersage der Allgemeinen Relativitätstheorie. Das Doppelsternsystem erzeugt Gravitationswellen, die Energie transportieren und verliert so selbst Energie. Auch wenn es sich bei der Entdeckung um keinen direkten Nachweis der Gravitationswellen handelte, so waren die Beobachtungen von Hulse und Taylor ein überzeugender Nachweis für Einsteins Vorhersagen. Die beiden erhielten für ihre Beobachtungen 1993 den Nobelpreis für Physik. Auch in späteren Jahren wurden weitere solcher Doppelpulsare mit langsam abnehmender Umlaufdauer entdeckt, welche Einsteins Voraussagen weiter untermauerten[5],[6].

Der direkte Nachweis von Gravitationswellen sollte durch die Messung der scheinbaren Längenänderung von Objekten möglich sein, wenn diese von Gravitationswellen überlaufen werden. Dies gestaltet sich allerdings als äußerst schwierig, da die Änderung der Raumzeitkrümmung minimal ist. Die durch den Einfluss der Gravitationswellen zu erwartende Längenabweichung liegt bei nicht mehr als 10^{-19} m, sodass andere lokale Effekte im Vergleich dazu überwiegen. Am 14. September 2015 gelang es schließlich erstmals am Gravitationswellen-Observatorium LIGO, Gravitationswellen direkt nachzuweisen, die durch die Kollision zweier Schwarzer Löcher entstanden waren. Das LIGO-Observatorium besteht aus zwei bis auf die Länge der Interferometerarme identischen Interferometern, die sich an den ca.

3000 m voneinander entfernten Standorten Hanford (Washington) und Livingston (Louisiana) in den USA befinden. Um diese Strecke zurückzulegen, benötigen die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitenden Gravitationswellen ca. 10 ms. Die grundsätzliche Funktionsweise der Interferometer basiert auf dem Michelson-Interferometer. Sie bestehen aus zwei rechtwinklig zueinander ausgerichteten 4 km (Livingston) bzw. 2 km (Hanford) langen Interferometerarmen. Ein Laserstrahl schickt Laserlicht auf einen Strahlteiler, der die eine Hälfte des Laserlichts zum Spiegel am Ende des einen Interferometerarms reflektiert, während die andere Hälfte des Lichts durch den Strahlteiler transmittiert wird und auf den Spiegel am Ende des anderen Interferometerarms trifft. Beide Teilwellen werden am jeweiligen Spiegel wieder zurück auf den Strahlteiler reflektiert und treffen dann auf einen Detektor. Durchläuft eine Gravitationswelle nun die Interferometer, so führt dies zu kleinsten relativen Längenänderungen der Interferometerarme, sodass ein verändertes Signal detektiert wird. Um die Empfindlichkeit der Messapparatur zu erhöhen, wird das Grundprinzip des Michelson-Interferometers erweitert. In beide Interferometerarme wird ein Fabry-Pérot-Interferometer eingebaut, wodurch die effektive Lauflänge des Lichts und damit die relative Längenänderung vergrößert wird. Außerdem durchläuft der Laserstrahl bevor er den Strahlteiler erreicht einen Spiegel, der das Licht in Richtung des Strahlteilers hindurchlässt, in die Gegenrichtung jedoch das Licht zurückreflektiert auf den Strahlteiler. Hierdurch kann das vom Strahlteiler in Richtung Laser zurückgeworfene Licht direkt wieder zurück ins Interferometer umgelenkt und nutzbar gemacht werden[4],[6].

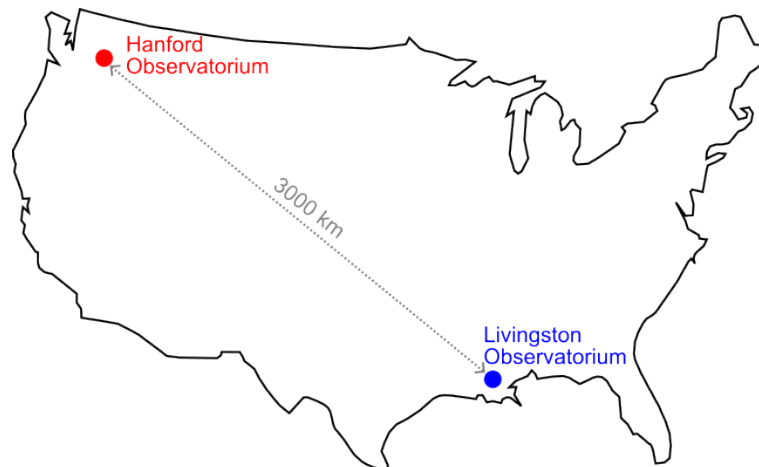


Abbildung 4: Die beiden LIGO-Observatorien befinden sich in Hanford (Washington) und Livingston (Louisiana) in einem Abstand von ca. 3000 km.

Gefahrenanalyse

Die Hauptgefahr, die beim Experimentieren mit dem Michelson-Interferometer im Schülerlabor besteht, geht von den Lasern aus. Es werden Laser der Laserklasse 2 mit einer Leistung von weniger als 1 mW verwendet. Es muss darauf geachtet werden, nicht direkt in den Laser oder den Strahlengang zu schauen. Die Schülerinnen und Schüler sollen sich also nicht auf Augenhöhe mit dem Lichtstrahl begeben. Schmuck und Armbanduhren müssen für die Dauer des Versuchs abgelegt werden, um Reflexion zu vermeiden.

In einem Versuchsteil wird außerdem mit elektrischem Strom mit einer Stromstärke von bis zu 1 A gearbeitet, um einen Draht zu erhitzen. Hier ist es wichtig, dass der Draht nicht berührt wird, während Strom fließt.

Auch der Umgang mit den optischen Bauteilen bedarf einer gewissen Umsicht, um deren Funktionsweise zu erhalten. Die Linsen, Strahlteiler und Spiegel dürfen nicht mit den Fingern berührt werden, sondern müssen an ihren Halterungen bzw. mit den in den Breadboardboxen bereitgestellten Handschuhen angefasst werden, um keine Fingerabdrücke zu hinterlassen. Bei den Lasern ist darauf zu achten, dass diese nur an der Halterung angefasst werden, um sie nicht durch versehentliches Umknicken der Kabel zu beschädigen.

Diese Sicherheitsaspekte und Bedienungshinweise müssen im Einführungsvortrag herausgehoben werden und bei Bedarf während des Experimentierens wiederholt werden.

Literatur

- [1] K. Simonyi. *Kulturgeschichte der Physik - Von den Anfängen bis heute*. 3., überarbeitete und erweiterte Auflage. Haan-Gruiten: Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer, 2017. ISBN: 978-3-8085-5760-0.
- [2] A. Michelson. „The Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether“. In: *The American Journal of Science* Vol. XXII (Juli - Dez. 1881), 120-129.
- [3] A. Michelson und E. Morley. „On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether“. In: *The American Journal of Science* Vol. XXXIV (Nov. 1887), 333-345.
- [4] A. Boblest, T. Müller und G. Wunner. *Spezielle und Allgemeine Relativitätstheorie - Grundlagen, Anwendungen in Astrophysik und Kosmologie sowie relativistische Visualisierung*. 2. Auflage. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2022. e-ISBN: 978-3-662-63352-6.
- [5] J. Gaßner und J. Müller. *Können wir die Welt verstehen? - Meileinsteine der Physik von Aristoteles zur Stringtheorie*. 5. Auflage. Frankfurt am Main: S. Fischer Verlag, 2019. ISBN: 978-3-10-397481-2.
- [6] K. McLin, C. Peruta und L. Cominsky. *Direct Observation of Gravitational Waves - LIGO Educator's Guide*. Abgerufen am 28.08.2024 von: https://www.ligo.caltech.edu/system/media_files/binaries/303/original/ligo-educators-guide.pdf?1455165573