

Handbuch zu den Schlüsselexperimenten des KLP Physik Grundkurs Qualifikationsphase

Schlüsselexperiment 22: „Michelson-Morley-Experiment“

0. Grundlegende Idee des Versuchs

Historisch sollte mit dem „Michelson-Morley-Experiment“ die Relativgeschwindigkeit der Erde gegenüber dem mutmaßlichen Trägermedium des Lichts namens Äther ermittelt werden, indem Lichtstrahlen nach orthogonalen Laufwegen zur Interferenz gebracht wurden. Das Negativergebnis weist die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit in allen Bezugssystemen und die Nichtexistenz des Äthers nach.

1. Bezug zu den Kompetenzen des Lehrplans

Mit Bezug zum „Michelson-Morley-Experiment“ werden für den Grundkurs im KLP folgende Kompetenzbeschreibungen genannt:

Die Schülerinnen und Schüler

- interpretieren das Michelson-Morley-Experiment als ein Indiz für die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit (UF4),
- erläutern die Bedeutung der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit als Ausgangspunkt für die Entwicklung der speziellen Relativitätstheorie (UF1),
- begründen mit der Lichtgeschwindigkeit als Obergrenze für Geschwindigkeiten von Objekten, dass eine additive Überlagerung von Geschwindigkeiten nur für „kleine“ Geschwindigkeiten gilt (UF2),
- erläutern die relativistische Längenkontraktion über eine Plausibilitätsbetrachtung (K3),
- beschreiben Konsequenzen der relativistischen Einflüsse auf Raum und Zeit anhand anschaulicher und einfacher Abbildungen (K3),
- diskutieren die Bedeutung von Schlüsselexperimenten bei physikalischen Paradigmenwechseln an Beispielen aus der Relativitätstheorie (B4, E7).

2. Fachliche und fachmethodische Hinweise

Vom 17. bis zum späten 19. Jahrhundert ging man davon aus, dass Licht als Wellenphänomen ein Medium zur Ausbreitung benötigt, so wie es bei Wasser- oder Schallwellen der Fall ist. Dieses Medium wurde Äther (altgr. für „Himmel“) genannt [3]. Der Begriff geht auf die Aristotelische Elementenlehre zurück und bezeichnet dort einen unveränderlichen, masselosen Stoff: das fünfte Element (spätlat. *quinta essentia*, das „fünfte Seiende“, vgl. Quintessenz), welches das Universum ausfüllt und alle Körper durchdringt.

Christiaan Huygens als Begründer der Theorie der Wellennatur des Lichts [6] nahm an, dass dieses Trägermedium der Lichtwellen als ausgezeichnetes Bezugssystem in Ruhe sei und sich alle Himmelskörper relativ zu ihm durchs All bewegen. Diesen Bewegungen sollte der Äther

allerdings keinen mechanischen Widerstand entgegensetzen. Es wurde angenommen, dass ein „Ätherwind“ entsteht, wenn sich das Sonnensystem durchs All bewegt welches vom ruhenden Äther ausgefüllt wird (siehe Abb. 1).

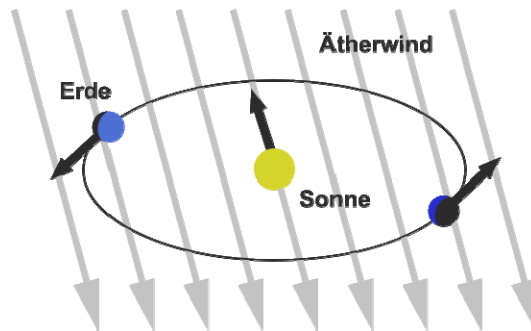


Abbildung 1: Der Ätherwind relativ zur Bewegung des Sonnensystems und der Erde (aus [4]).

Albert A. Michelson führte 1881 in Potsdam ein Experiment mit einem nach ihm benannten Interferometer durch, welches der Vermessung der Relativgeschwindigkeit der Erde gegenüber dem Ätherwind dienen sollte (siehe Abb. 2).

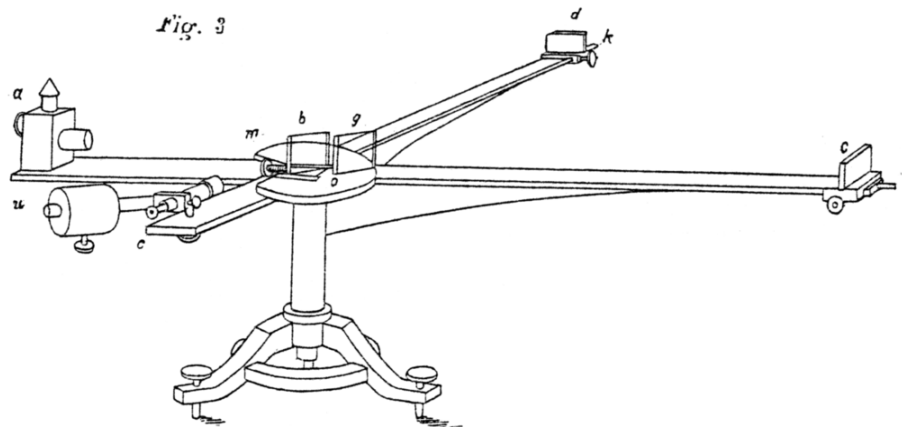


Abbildung 2: Das Michelson-Interferometer von 1881 (aus [5], nach [1]).

Es bestand aus zwei Metallarmen, an deren Enden jeweils ein vollreflektierender Spiegel bzw. eine Lichtquelle (Natriumlicht oder weißes Licht) bzw. eine Optik angebracht war, durch die Interferenzmuster betrachtet und vermessen werden konnte.

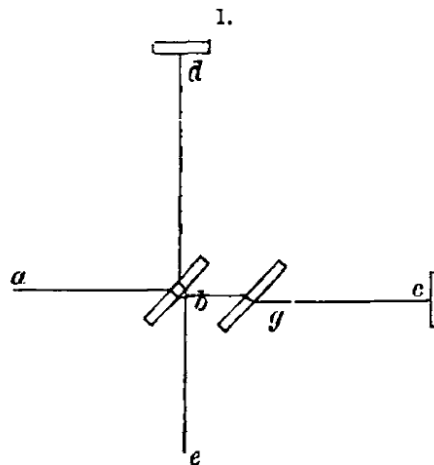


Abbildung 3: Der Lichtweg im Michelson-Interferometer von 1881 (Lichtquelle a, Strahlteiler b, Spiegel c und d, Messoptik e, Ausgleichsscheibe g, aus [1]).

Am Kreuzungspunkt der beiden Arme war eine Glasplatte als Strahlteiler angebracht, welcher das Licht der Lampe in zwei Strahlen teilte und zu den Spiegeln am Ende der beiden Arme durchließ bzw. reflektierte. Die Spiegel warfen die beiden Lichtstrahlen zurück, die nach erneuter Reflektion am bzw. Durchlaufen des Strahlteilers miteinander interferierten und in der Messoptik ein Muster entstehen ließen. Da das Licht von der Lichtquelle aus gesehen auf der Rückseite des Strahlteilers reflektiert wurde (also die Glasplatte vor der ersten Reflektion durchquerte), wurde dieser zusätzliche Weg durch das wellenlängenverkürzende Material Glas ausgeglichen, indem man eine weitere Glasplatte hinter dem Strahlteiler einführte (siehe Abb. 3).

Eine weitere Grundannahme des Experiments ist die vektorielle Addition der Geschwindigkeiten der sich durch den Äther bewegenden Erde und der des Lichts, welches z.B. von der Lichtquelle des Interferometers ausgesandt wird und vom Medium fortgetragen wird. Entsprechend des damaligen Wissensstandes sollte diese Addition klassisch geschehen, also entsprechend der Galilei-Transformation. Wenn also ein Arm des Interferometers parallel zum Ätherwind ausgerichtet wird, sollte in diesem Arm die Lichtgeschwindigkeit anders sein als im orthogonal ausgerichteten Arm. Durch Drehung des Interferometers und der daraus resultierenden Änderung der Lichtlaufzeiten in den Interferometerarmen sollte eine Veränderung der Ausrichtung des Interferometers zum Ätherwind messbar sein. Diese Veränderung sollte durch die Veränderung des Interferenzmusters der beiden Lichtstrahlen sichtbar gemacht und quantifiziert werden.

Da das Ursprungsexperiment nicht genau genug war, um die angenommene Relativgeschwindigkeit zu messen, wurde es in einer verbesserten Variante von Albert A. Michelson und Edward E. Morley 1887 in Cleveland (Ohio, USA) wiederholt.

Die Verbesserung lag vor allem in einer Lagerung des Interferometers auf einem schweren Stein, der seinerseits in einer Wanne gefüllt mit Quecksilber schwamm (siehe Abb. 4; in der deutschen Übersetzung von Clara von Simson fälschlicherweise als Blei bezeichnet). Somit wurden Störungen durch Erschütterungen oder Verwindungen des Interferometers minimiert, vor allem, wenn die Apparatur gedreht wurde.

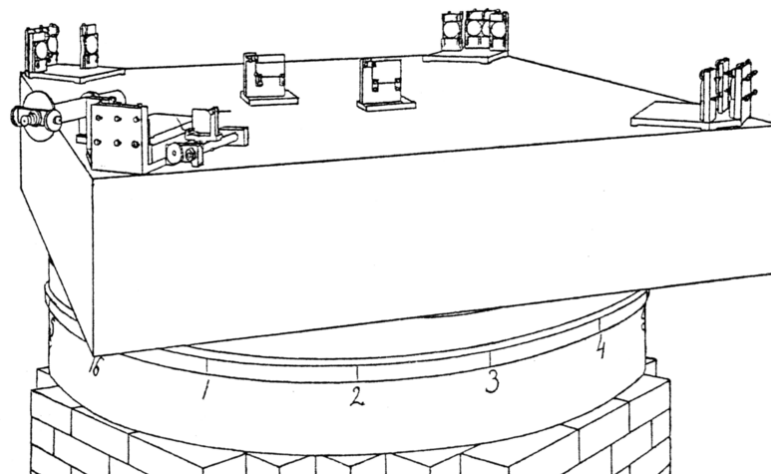


Abbildung 4: Das von Michelson und Morley benutzte Interferometer von 1887 (aus [5], nach [2]).

Außerdem wurde der Strahlweg durch Mehrfachreflexion vervierfacht, so dass die Lichtlaufzeiten verlängert wurden und relative Veränderungen aufgrund des Ätherwindes somit besser messbar sein sollten (siehe Abb. 5).

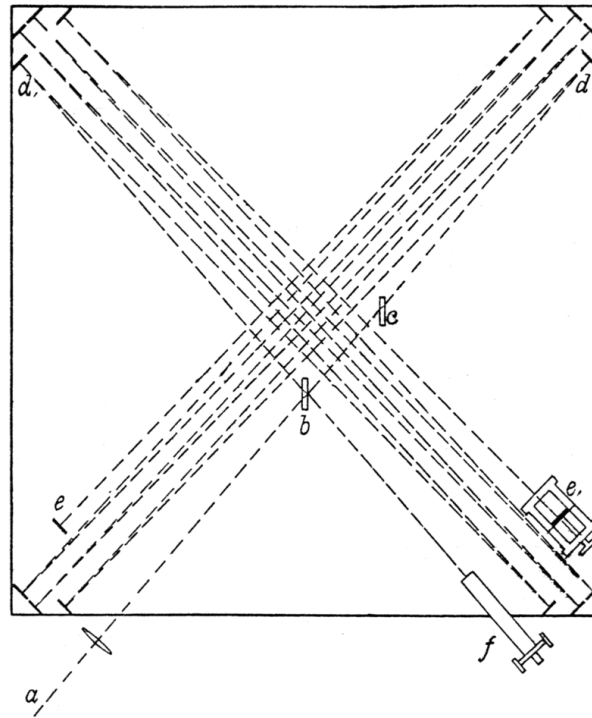


Abbildung 5: Der Lichtweg im von Michelson und Morley benutzten Interferometer von 1887 (aus [5], nach [2]).

Durch die unterschiedlichen Geschwindigkeiten in den Interferometerarmen sollten sich entsprechend unterschiedliche Lichtlaufzeiten ergeben (siehe Abb. 6).

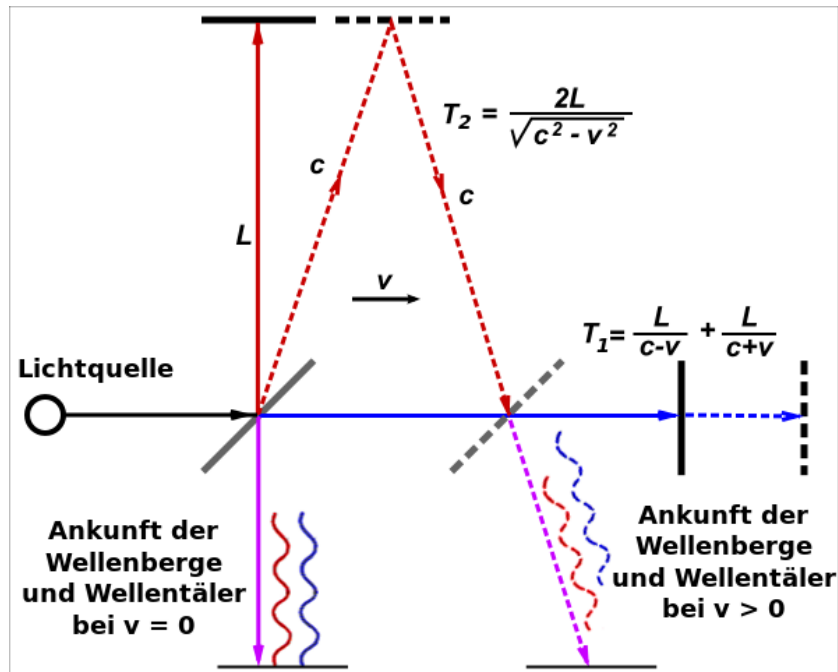


Abbildung 6: Darstellung der unterschiedlichen Lichtlaufzeiten in beiden Interferometerarmen (einfacher Lichtweg, aus [4]).

Die folgende Herleitung kann optional auch im Unterricht durchgeführt werden (siehe Abschnitt 5 und 6). Die Lichtlaufzeiten vom Strahlteiler zum Spiegel und zurück im Arm parallel zum Ätherwind betragen

$$t_{\text{hin}} = \frac{L}{c+v}$$

bzw.

$$t_{\text{zurück}} = \frac{L}{c - v}$$

Mit der Lichtgeschwindigkeit c , der Ätherwindgeschwindigkeit v und der Armlänge L . Die Gesamtlaufzeit in diesem Arm beträgt damit

$$t_{\text{para}} = t_{\text{hin}} + t_{\text{zurück}} = \frac{L}{c + v} + \frac{L}{c - v} = \frac{2 \cdot c \cdot L}{c^2 - v^2} = \frac{2L}{c} \cdot \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Für Laufzeit vom Strahlteiler zum Spiegel und zurück in orthogonaler Richtung muss – wie bei der Lichtuhr – die Bewegung der Apparatur berücksichtigt werden, d.h. der Lichtweg hat die Form eines gleichschenkligen bzw. zweier rechtwinkliger Dreiecke für Hin- und Rückweg. Die Strecke des Hinwegs z.B. ergibt sich zu

$$c \cdot t_{\text{hin}} = \sqrt{L^2 + (v \cdot t_{\text{hin}})^2}$$

Durch Umformen erhält man die Laufzeit für den Hinweg

$$t_{\text{hin}} = \frac{L}{\sqrt{c^2 - v^2}}$$

Die Laufzeit für den Rückweg ist identisch, d.h. die Gesamtlaufzeit orthogonal zum Ätherwind ergibt sich zu

$$t_{\text{ortho}} = \frac{2 \cdot L}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{2 \cdot L}{c} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Damit sind die Laufzeiten in den beiden Armen verschieden. Der Zeitunterschied ergibt sich zu

$$\Delta t = t_{\text{para}} - t_{\text{ortho}} = L \cdot \frac{v^2}{c^3}$$

und ist somit abhängig von der Armlänge L . Dreht man die Apparatur um 90 Grad, ergibt sich ein Gesamtlaufzeitunterschied zum Ausgangszustand von

$$2 \cdot \Delta t = 2 \cdot L \cdot \frac{v^2}{c^3}$$

Dies entspricht einem Weglängenunterschied von

$$d = c \cdot 2 \cdot \Delta t = 2 \cdot L \cdot \frac{v^2}{c^2}$$

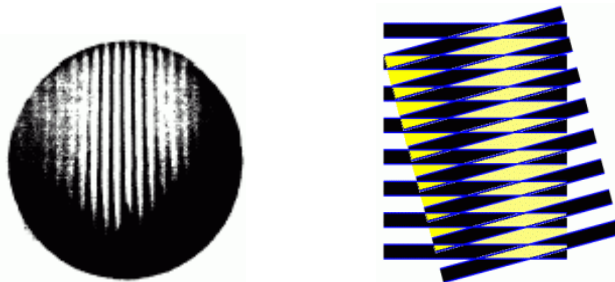


Abbildung 7: Interferenzstreifen aufgenommen in einem historischen Michelson-Interferometers und ihre Entstehung aus zwei interferierende Wellenfronten (aus [10]).

Gemessen wird die Verschiebung der Interferenzstreifen weg vom Hauptmaximum nach der Drehung. Ein Streifenabstand repräsentiert eine Wellenlänge und die Weglängendifferenz nach der Drehung die Verschiebung der Streifen (siehe Abb. 7).

Setzt man diese Verschiebung Δs in Relation zum Abstand benachbarter Streifen s , entspricht dieser Wert dem Verhältnis von Weglängendifferenz d und der Wellenlänge λ :

$$s_{\text{rel}} = \frac{\Delta s}{s} = \frac{d}{\lambda}$$

Für die Geschwindigkeit des Ätherwindes ergibt sich also

$$v = \sqrt{\frac{d \cdot c^2}{2 \cdot L}} = \sqrt{\frac{s_{\text{rel}} \cdot \lambda \cdot c^2}{2 \cdot L}}$$

Michelson und Morley maßen eine relative Streifenverschiebung von $s_{\text{rel}} \leq 0,02$. Bei einer mittleren Wellenlänge des weißen Lichts von $\lambda = 600 \text{ nm}$ und einer effektiven Armlänge von $L = 11 \text{ m}$ wie beim Experiment von 1887 ergibt sich eine Geschwindigkeit des Ätherwindes von

$$v = \sqrt{\frac{0,02 \cdot 6 \cdot 10^{-7} \text{ m} \cdot c^2}{2 \cdot 11 \text{ m}}} = 7 \cdot 10^3 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 7 \frac{\text{km}}{\text{s}}$$

Dieses Ergebnis musste als Nullresultat gewertet werden, da schon die Bahngeschwindigkeit der Erde um die Sonne mit ca. 30 km/s wesentlich höher ist, ganz abgesehen von der Geschwindigkeit des Sonnensystems um das galaktische Zentrum von 220 km/s bzw. die Relativgeschwindigkeit der Erde zum – damals noch nicht bekannten – kosmischen Mikrowellenhintergrund von 368 km/s [4].

Trotz der Entwicklung der Relativitätstheorie wurden bis in die 1930er Jahre immer wieder neue und genauere Messungen zur Relativgeschwindigkeit des Ätherwindes durchgeführt, die allerdings das bekannte negative Ergebnis bestätigten (Tabelle in [4]). Die obere Grenze für die Ätherwindgeschwindigkeit wurde dabei auf 1,5 km/s verringert.

Bereits in den Jahren 1889 bzw. 1892, d.h. lange vor der Formulierung der Speziellen Relativitätstheorie durch Albert Einstein im Jahr 1905 [9], lieferten zuerst George F. FitzGerald [7] und Hendrik A. Lorentz [8] eine vom Ansatz her korrekte Erklärung für das Nullresultat; sie erkannten, dass der Raum in Bewegungsrichtung der Erde kontrahieren musste, um die unterschiedlichen Lichtlaufzeiten zu kompensieren. Allerdings verzichteten sie noch nicht auf das Konzept des Äthers. Diese und andere Erkenntnisse im ausgehenden 19. Jahrhundert führten dann schließlich zur Entwicklung der speziellen Relativitätstheorie.

3. Fachdidaktische Hinweise

Durch das Michelson-Morley-Experiment sollte ursprünglich die Relativgeschwindigkeit der Erde zum umgebenden Äther gemessen werden. Stattdessen war das Nullresultat ein deutlicher Hinweis auf die Nichtexistenz eines lichttragenden, stationären Äthers. Heutzutage, also auch im Rahmen des Kernlehrplans, wird es vor allem als *experimentum crucis*, also als Schlüsselexperiment für die Falsifizierung einer Theorie und damit für einen Paradigmenwechsel in der Sicht auf Raum und Zeit verwendet. Durch die Falsifizierung der Lichtäthertheorie wurde die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit in allen Bezugssystemen deutlich, was letztlich zur Entwicklung der Speziellen Relativitätstheorie führte. Dafür war das Michelson-Morley-Experiment allerdings ursprünglich nicht angelegt. Diese Diskrepanz

aus damaligen Zielen und der heutigen Sichtweise sollte im Unterricht thematisiert werden, um die historische Relevanz des Experiments zu verdeutlichen und seine historische Einordnung möglich zu machen.

Selbst wenn im Unterricht ein Interferometer zur Verfügung steht, wird eine quantitative Durchführung des Michelson-Morley-Experiments nicht möglich sein. Trotzdem ist es empfehlenswert, die Funktionsweise des Geräts mit einem Laser und die Entstehung eines entsprechenden Interferenzmusters zu demonstrieren (siehe auch Abschnitte 5 und 6).

Eine Einführung der Lorentz-Transformation bzw. dem relativistischen Additionstheorem für Geschwindigkeiten ist laut Kernlehrplan nicht gefordert und es sollte auch aufgrund der Komplexität des Themas im Grundkurs darauf verzichtet werden.

4. Computergestützte Modelle und Videos des Michelson-Morley-Experiments

Um die unterschiedlichen Lichtlaufzeiten im Michelson-Interferometer zu verdeutlichen, bieten sich Applets und Animationen an.

Hier eine einfache interaktive Animation:

<http://www.cabrillo.edu/~jmccullough/Applets/Flash/Modern%20Physics%20and%20Relativity/MichelsonMorley.swf>

Hier ein Applet mit einstellbarer Äthergeschwindigkeit:

http://galileoandinstein.physics.virginia.edu/more_stuff/flashlets/mmexpt6.htm

In diesem Applet ist die Streifenverschiebung des Interferenzmusters visualisiert:

http://www.kcvs.ca/site/projects/physics_files/specialRelativity/michelsonMorley/mmExperiment.swf

5. Vorschlag für das Vorgehen im Unterricht

Da die Originaltexte der Veröffentlichungen von Michelson und Morley verfügbar sind und in ihren Einleitungen einen für Schülerinnen und Schüler gut verständlichen Überblick über den damaligen Stand der Wissenschaft, der Fragestellung und den experimentellen Schwierigkeiten bieten, ist ein Einstieg in die Thematik über Auszüge der Texte denkbar.

Da wie bereits erwähnt das Experiment im Unterricht nicht quantitativ durchgeführt werden kann, sollte eine Animation bzw. ein Applet zur Visualisierung verwendet werden.

Eine Herleitung der Laufzeitunterschiede ist aufgrund der Verwandtschaft zur Lichtuhr zu empfehlen (siehe Abschnitt 6).

Wurde also verdeutlicht, dass die einfache galileische Addition der Geschwindigkeiten von Erdbewegung und Licht nicht korrekt sein kann und dass die Lichtgeschwindigkeit in allen Bezugssystemen konstant ist, sollte die Kontraktion des Raumes in Bewegungsrichtung als Möglichkeit einer Lösung des Problems angesprochen werden. Über die weiteren Schlüsselexperimente Lichtuhr und Myonenerfall kann dann die relativistische Sichtweise auf die Raumzeit vervollständigt werden. Dabei kann die Problematik der Raumkontraktion beim Myonenerfall-Experiment noch einmal aufgegriffen und ggf. hergeleitet werden.

6. Alternativen und weitere fakultative Möglichkeiten

Herleitung bzw. Plausibilitätsbetrachtung zur Konstanz der Lichtgeschwindigkeit

Der Kernlehrplan sieht vor, die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit in allen Bezugssystemen anhand des Michelson-Morley-Experiments plausibel zu machen, d.h. eine Herleitung und Berechnung ist nicht obligatorisch. Die Herleitung der Lichtlaufzeiten ist allerdings im Sinne eines Spiralcurriculums zu empfehlen, da eine enge Verwandtschaft zur Lichtuhr besteht und dadurch die Vorgehensweise geübt wird.

Realexperimente

Wie oben bereits gesagt, sollte bei entsprechender Ausstattung der Sammlung das Gerät bezüglich seines grundsätzlichen Aufbaus und Funktion demonstriert werden.

Eine weitere Möglichkeit, ein reales Michelson-Interferometer im Unterricht einzusetzen, ist diese Version aus LEGO-Steinen:

<http://www.implau.physik.uni-osnabrueck.de/Forschung/LEGO.php>

Sie kann auch als Basis für Facharbeiten verwendet werden.

Interferometrischer Nachweis von Gravitationswellen

Das Messinstrument Interferometer wurde zu Beginn des Jahres 2016 durch die Berichte zum erstmals gelungenen Nachweis von Gravitationswellen in das Bewusstsein einer breiten Öffentlichkeit gerückt.

Gravitationswellen sind Verzerrungen der Raumzeit, die durch die Beschleunigung von Massen entstehen und sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten (ähnlich der Entstehung von elektromagnetischen Wellen durch Beschleunigung von elektrischen Ladungen). Albert Einstein sagte das Phänomen im Rahmen seiner Relativitätstheorie voraus, vermutete aber, dass man diese Oszillationen aufgrund ihrer geringen Amplituden niemals werde nachweisen können [11]. Selbst bei Ereignissen von stellaren Ausmaßen liegen die Verzerrungen des Raumes nur im Bereich von 1000stel Atomkerndurchmessern, wenn die Wellen bereits kosmische Entfernungen zurückgelegt haben.

In den 1960er Jahren baute Joseph Weber erste Gravitationswellendetektoren in Form von großen Metallzylindern, die in einem Vakuum erschütterungsfrei gelagert wurden. Längenänderungen durch Gravitationswellen sollten mittels am Zylinder angebrachten Piezokristallen detektiert werden. Durch Abgleich der Messdaten mit denen von weit entfernt aufgestellten Detektoren sollten lokale Effekte ausgeschlossen werden. Bereits damals wurden Signale detektiert, die auf eine Gravitationswellenquelle im Zentrum der Milchstraße hindeuteten [16].

Ein erster zweifelsfreier, allerdings indirekter Nachweis von Gravitationswellen gelang Russell Alan Hulse und Joseph Hooton Taylor Jr. durch die Entdeckung des Doppelpulsars PSR 1913+16 [18], wofür sie 1993 mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet wurden. Aus der Tatsache, dass die Umlaufdauer der beiden Objekte im Zeitverlauf sinkt, konnte geschlossen werden, dass Energie in Form von Gravitationswellen abgestrahlt wird [17].

Interferometer eignen sich ebenfalls prinzipiell für den Nachweis von Gravitationswellen, da eine Stauchung oder Streckung ihrer Arme aufgrund der Verzerrungen des Raumes zu einer

Veränderung des Interferenzmusters führt. Allerdings erzeugen auch thermische Fluktuationen, geologische oder menschenverursachte Erschütterungen usw. solchen Veränderungen. Die Amplituden sind dabei deutlich größer als die der Gravitationswellen.

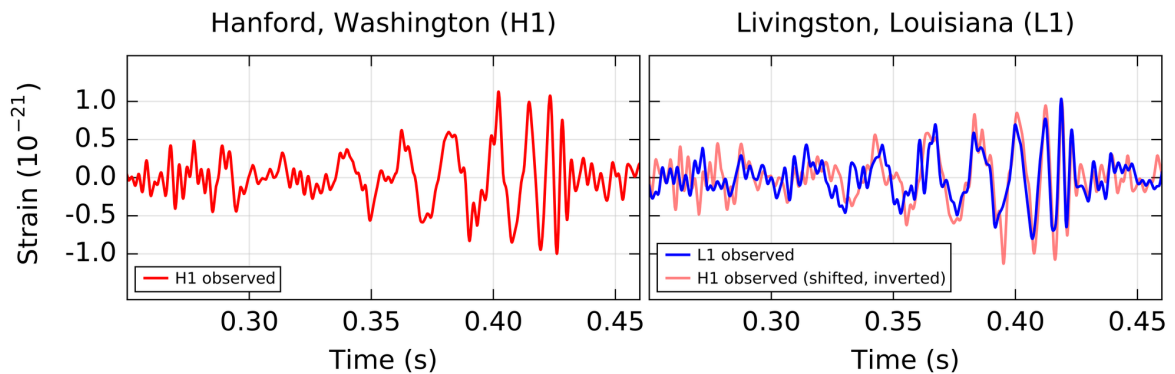


Abbildung 8: Signale der beiden LIGO-Detektoren (relative Deformation der Arme), rechts überlagert durch Verschiebung aufgrund der Signallaufzeiten und Invertierung aufgrund der relativen Lage der Interferometer (aus [13]).

Erst durch Korrelation der Messdaten von zwei großen Laser-Interferometern in Livingstone, Louisiana und Hanford, Washington (USA) mit effektiven Armlängen von jeweils 300 km (75·4 km aufgrund von 75facher Mehrfachreflexion) konnte am 14. September 2015 die Verschmelzung von zwei schwarzen Löchern (engl. *binary black hole merger*) in 1,3 Milliarden Lichtjahren Entfernung verfolgt werden (Ereignis GW150914, siehe Abb. 8). Die Signale trafen mit einer Verzögerung von ca. 6,9 ms ein, was innerhalb der Lichtlaufzeit zwischen den beiden Standorten liegt. So konnte auch der Himmelsbereich eingegrenzt werden, in dem das Ereignis stattgefunden haben musste.

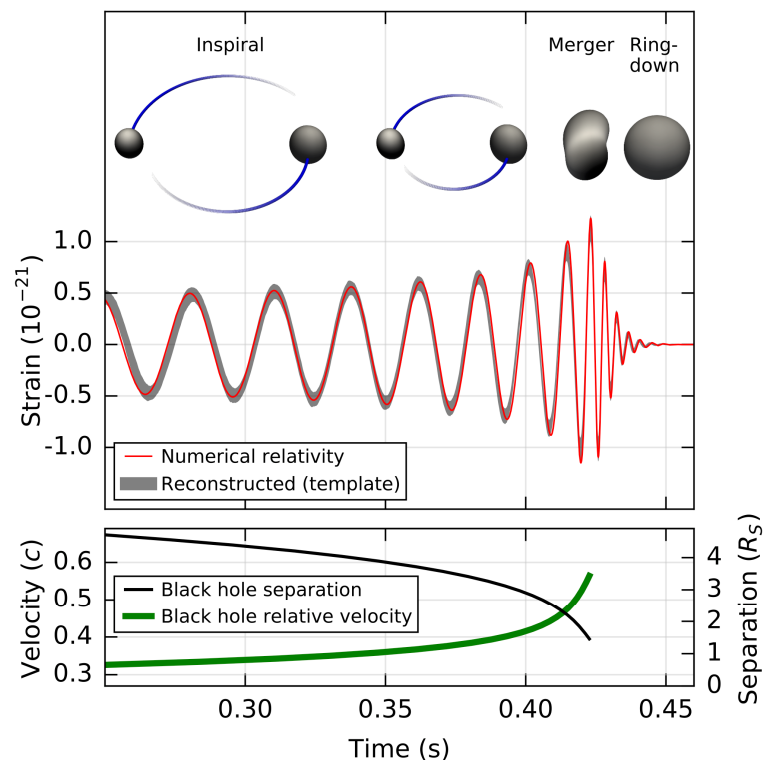


Abbildung 9: Graphische Darstellung der ineinander stürzenden schwarzen Löcher, ein simuliertes Detektorsignal und Geschwindigkeit und Abstand der beiden Objekte. Die schwarzen Löcher nähern sich innerhalb von ca. 420 ms um ca. 3,5 Schwarzschildradien (ca. 210 km) an, wobei ihre Relativgeschwindigkeit von ca. 0,3 c auf ca. 0,6 c steigt. Nach der Kollision klingen die Vibrationen des resultierenden Objekts ab (aus [15]).

Die beiden Objekte von 36 bzw. 29 Erdsonnenmassen näherten sich spiralförmig einander, um zu einem schwarzen Loch mit 62 Sonnenmassen zu verschmelzen (siehe Abb. 9). Bei dem Prozess wurden also drei Sonnenmassen in Energie konvertiert und in Form von Gravitationswellen großteils innerhalb von Bruchteilen einer Sekunde abgestrahlt [14].

Damit übertraf die Leistung von GW150914 die kombinierte elektromagnetische Strahlungsleistung aller Sterne des sichtbaren Universums um mehr als das zehnfache [14].

Die Frequenz der Gravitationswellen entspricht der doppelten Umlauffrequenz der beiden Objekte. Da nur schwarze Löcher kompakt genug sind, um mit der beobachteten Frequenz von 75 Hz umeinander zu kreisen ohne sich zu berühren, war dies der Nachweis für die Existenz von Doppelsternsystemen aus zwei schwarzen Löchern [12].

Diese erste direkte Detektion von Gravitationswellen eröffnet der Astronomie neben der etablierten Beobachtung des elektromagnetischen Spektrums eine weitere, teilweise dazu komplementäre Technik zur Untersuchung des Universums.

7. Quellen

- [1] Albert Abraham Michelson: [*The Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether*](#). In: *American Journal of Science*. 22, S. 120–129 (1881). Siehe auch deutsche Übersetzung von Clara von Simson: Albert Abraham Michelson: *Die Relativbewegung der Erde gegen den Lichtäther*. In: *Die Naturwissenschaften*. 19, Nr. 38, S. 779–784 (1931). [doi:10.1007/BF01528662](#).
- [2] Albert Abraham Michelson; Edward Williams Morley: [*On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether*](#). In: *American Journal of Science*. 34, S. 333–345 (1887). Siehe auch deutsche Übersetzung der [1881- und 1887-Arbeit \(Online\)](#).
- [3] [https://de.wikipedia.org/wiki/%C3%84ther_\(Physik\)](https://de.wikipedia.org/wiki/%C3%84ther_(Physik))
- [4] <https://de.wikipedia.org/wiki/Michelson-Morley-Experiment>
- [5] https://en.wikipedia.org/wiki/Michelson%E2%80%93Morley_experiment
- [6] Christiaan Huygens: *Traité de la lumière* ([Abhandlung über das Licht](#)). (1690)
- [7] George Francis FitzGerald: [*The Ether and the Earth's Atmosphere*](#). In: *Science*. 13, S. 390 (1889). [doi:10.1126/science.ns-13.328.390](#).
- [8] Hendrik Antoon Lorentz: [*Die relative Bewegung der Erde und des Äthers*](#). In: *Abhandlungen über Theoretische Physik*. B.G. Teubner, S. 443–447 (Leipzig 1892/1907).
- [9] Albert Einstein: [*Zur Elektrodynamik bewegter Körper*](#). In: *Annalen der Physik*. 322, Nr. 10, S. 891–921 (1905)
- [10] https://en.wikipedia.org/wiki/Fringe_shift
- [11] Albert Einstein: [*Über Gravitationswellen*](#). In: *Königlich-Preußische Akademie der Wissenschaften (Berlin)*. Sitzungsberichte 1918, S. 154–167 (Mitteilung vom 31. Januar 1918)
- [12] Benjamin P. Abbott *et al.* (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration): [*Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger*](#). (PDF). In: *Physical Review Letters* (11. Februar 2016). [doi:10.1103/PhysRevLett.116.061102](#).

- [13] <https://cplberry.com/2016/02/11/gw150914/>
- [14] <https://losc.ligo.org/events/GW150914/>
- [15] <http://www.ligo.org/science/Publication-GW150914/index.php>
- [16] James L. Levine: *Early Gravity-Wave Detection Experiments, 1960–1975*. In: *Physics in Perspective (Birkhäuser Basel)*. 6, Nr. 1, S. 42–75 (April 2004).
[doi:10.1007/s00016-003-0179-6](https://doi.org/10.1007/s00016-003-0179-6).
- [17] J. H. Taylor, L. A. Fowler, P. M. McCulloch: *Measurements of General Relativistic Effects in the Binary Pulsar PSR1913+16*. *Nature* 277, S. 437 (1979)
- [18] Russell Alan Hulse, John Hooton Taylor: *Discovery of a pulsar in a binary system*. *Astrophysical Journal* 195, S. L51-L53 (1975)