

Experiment von Michelson & Morley und Relativität von Raum und Zeit

Teilaufgabe 1: Das Michelson Interferometer

Mikrowellen werden mit Hilfe eines Michelson-Interferometers untersucht. Das Michelson-Interferometer besteht aus dem Mikrowellensender und dem Mikrowellenempfänger sowie aus zwei Metallplatten und einer Glasplatte (siehe Abbildung 1).

Beim Verschieben der Metallplatte B und gleichzeitigem Festhalten der Metallplatte A treten Maxima und Minima der Empfänger-Spannung auf.

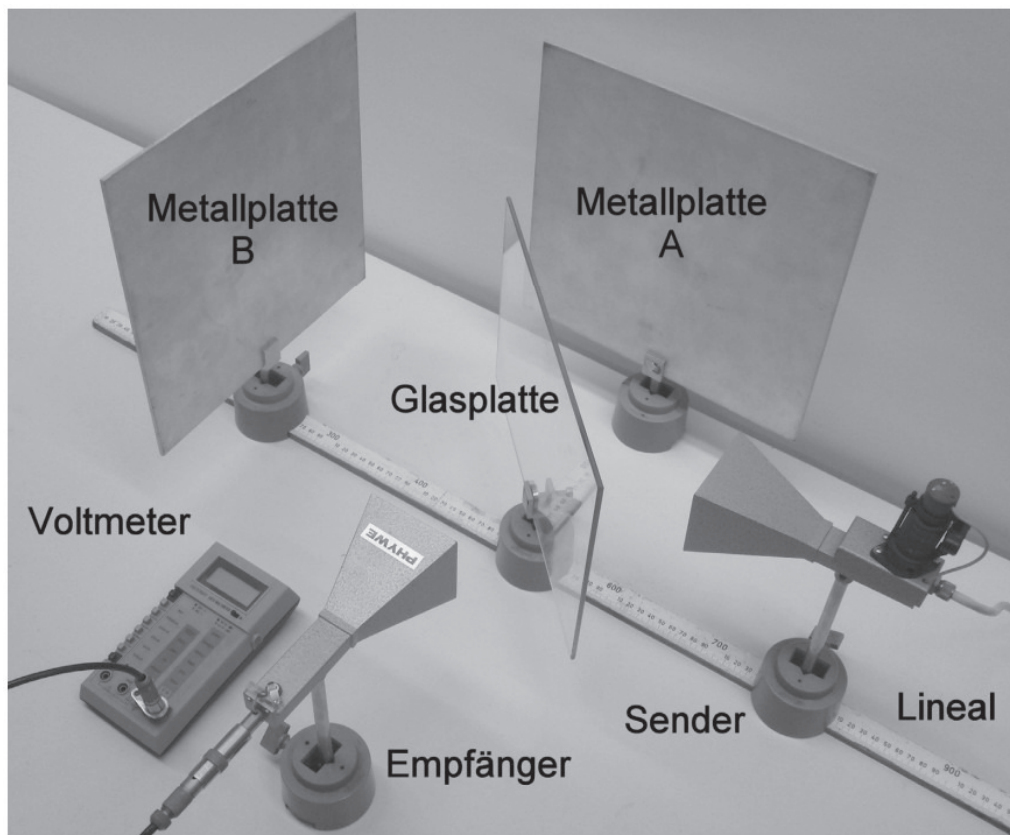


Abbildung 1: Das Michelson Interferometer mit Mikrowellen

1.1 Skizzieren Sie den schematischen Aufbau eines Michelson Interferometers.

Erläutern Sie das periodische Auftreten von Maxima und Minima der Empfänger-Spannung.

Begründen Sie, warum (ausgehend von einem Maximum als Startpunkt) eine Verschiebung der Metallplatte B um $\Delta l = \frac{\lambda}{4}$ ein Minimum der Empfänger-Spannung zur Folge hat und warum die Verschiebung um $\Delta l = \frac{\lambda}{2}$ zu einem neuen Maximum der Empfänger-Spannung führt. werden kann.

1.2 Im Diagramm in Abbildung 2 sind die Werte für die Strecke Δl (um die die Metallplatte B nach außen, also von der Glasplatte weg, verschoben wurde) und die jeweilige Empfänger-Spannung U dargestellt.

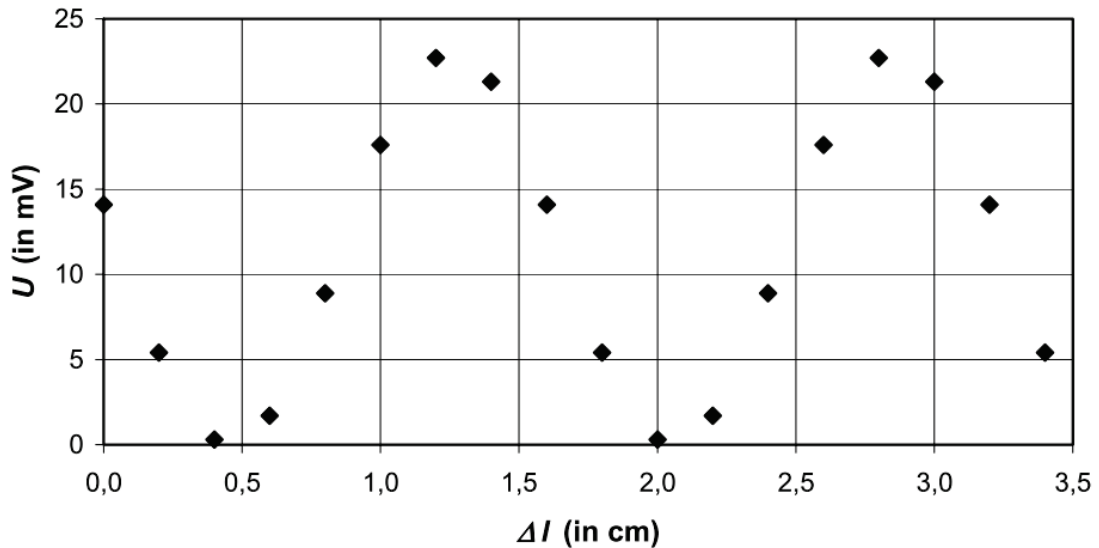
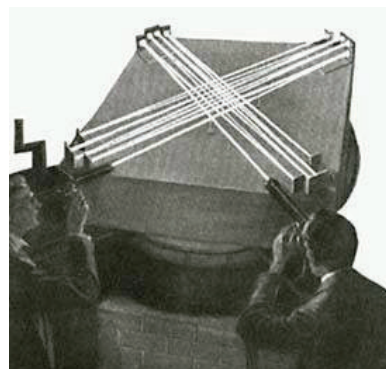
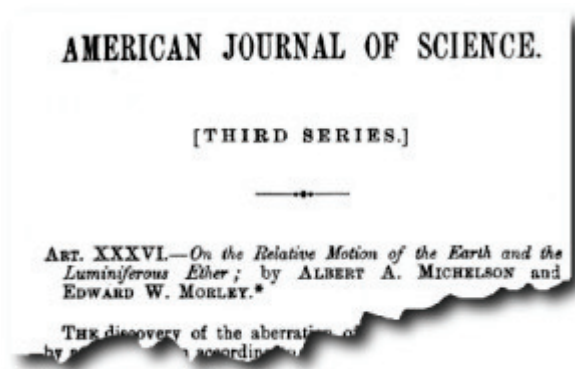


Abbildung 2: Messungen am Michelson-Interferometer

Bestimmen Sie anhand des Diagramms die Wellenlänge λ und die Frequenz f der Mikrowellen.

Teilaufgabe 2: Relativität von Raum und Zeit



2.1 Michelson und Morley nutzten das Interferometerexperiment als Versuch, einen Äther als lichttragendes Medium nachzuweisen.

Erläutern Sie, wie Michelson und Morley mit Hilfe des Experiments den Äther nachweisen wollten.

- 2.2 Bei einer Messreihe zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit verwendeten Michelson und Morley eine Laufstrecke $2l$ von 22 m. Abhängig von der Ausbreitungsrichtung des Lichts relativ zur Erdbewegung ($v_{Erde} = 3 \cdot 10^4 \frac{m}{s}$) ergeben sich folgende Laufzeiten für das Licht:

$$t_{\perp} = \frac{2l}{c} \quad \text{bzw.} \quad t_{\parallel} = \frac{2l}{c} \cdot \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} .$$

Bestimmen Sie die Zeiten t_{\perp} und t_{\parallel} , welche das Licht ($c_{Luft} = 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$) -unter der Annahme eines Äthers- zum Zurücklegen der Strecke $2l$ benötigt.

Aus etwa 1600 Messungen erhielt Michelson das Resultat $c = 299796 \pm 4 \text{ km/s}$.

Diskutieren Sie, ob dieses Ergebnis genau genug ist, um die Laufzeitdifferenz zwischen t_{\perp} und t_{\parallel} nachweisen zu können.

- 2.3 Das Experiment lieferte ein Nullergebnis. Ein Äther war mit diesem Experiment nicht nachweisbar. Albert Einstein hat das Ergebnis des Michelson-Morley-Experiments auf revolutionäre Art interpretiert:

„[...] Beispiele ähnlicher Art, sowie die mißlungenen Versuche, eine Bewegung der Erde relativ zum „Lichtmedium“ zu konstatieren, führen zu der Vermutung, daß dem Begriffe der absoluten Ruhe nicht nur in der Mechanik, sondern auch in der Elektrodynamik keine Eigenschaften der Erscheinungen entsprechen, sondern daß vielmehr für alle Koordinatensysteme, für welche die mechanischen Gleichungen gelten, auch die gleichen elektrodynamischen und optischen Gesetze gelten, wie dies für die Größen erster Ordnung bereits erwiesen ist. Wir wollen diese Vermutung (deren Inhalt im folgenden „Prinzip der Relativität“ genannt werden wird) zur Voraussetzung erheben und außerdem die mit ihm nur scheinbar unverträgliche Voraussetzung einführen, daß sich das Licht im leeren Raume stets mit einer bestimmten, vom Bewegungszustande des emittierenden Körpers unabhängigen Geschwindigkeit v fortpflanze. Diese beiden Voraussetzungen genügen, um zu einer einfachen und widerspruchsfreien Elektrodynamik bewegter Körper zu gelangen unter Zugrundelegung der Maxwellschen Theorie für ruhende Körper. Die Einführung eines „Lichtäthers“ wird sich insofern als überflüssig erweisen, als nach der zu entwickelnden Auffassung weder ein mit besonderen Eigenschaften ausgestatteter „absolut ruhender Raum“ eingeführt, noch einem Punkte des leeren Raumes, in welchem elektromagnetische Prozesse stattfinden, ein Geschwindigkeitsvektor zugeordnet wird. [...]“

Einstein, Albert. 'Zur Elektrodynamik bewegter Körper'. *Annalen der Physik*, 17 (1905)

Geben Sie die zwei Prinzipien an, welche Albert Einstein aus dem Versuchsergebnis abgeleitet hat und markieren Sie die entsprechenden Stellen im Originaltext.

(Anmerkung: Es reicht nicht nur ein Schlagwort, d.h. jedes Prinzip soll in 1-2 Sätzen zusammengefasst werden.)

- 2.4 Auf den zwei Grundprinzipien (vgl. 2.3) basiert die Relativitätstheorie von Albert Einstein. Ein wesentliches Ergebnis der speziellen Relativitätstheorie ist die Zeitdilatation.

Leiten Sie begründet und mit Hilfe einer instruktiven Skizze her, dass folgender Zusammenhang zwischen der Zeitspanne Δt_0 im bewegten System und Δt im Ruhesystem gilt:

$$\Delta t_0 = \Delta t \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}, \text{ wobei } \begin{array}{l} v: \text{Relativgeschwindigkeit} \\ c: \text{Lichtgeschwindigkeit.} \end{array}$$

- 2.5 Myonen entstehen in ca. 10 km Höhe durch Reaktionen der kosmischen Strahlung mit Atomkernen und Molekülen der Atmosphäre. Die Myonen bewegen sich mit einer Geschwindigkeit von ca. $v = 0,9998 \cdot c$ in Richtung Erdoberfläche. Ruhende Myonen haben eine mittlere Lebensdauer von ca. $t = 2,2 \mu\text{s}$.

Berechnen Sie klassisch, wie weit ein Myon fliegen kann, bevor es im Mittel zerfällt.

Tatsächlich können Myonen auf der Erdoberfläche nachgewiesen werden. Dieses Ergebnis steht im Widerspruch zu obiger Rechnung. Dieser kann aber mit einer relativistischen Betrachtung des Problems aufgelöst werden.

Bestimmen Sie unter Berücksichtigung der speziellen Relativitätstheorie die mittlere Lebensdauer der Myonen, welche man von der Erde aus beobachtet und erläutern Sie, wie sich hiermit der obige Widerspruch auflösen lässt.

- 2.6 In Aufgabenteil 2.5 wurden die Myonen im Inertialsystem „Erde“ betrachtet. Nach dem Relativitätsprinzip kann man die Beobachtungen jedoch auch aus dem Ruhesystem der Myonen betrachten. Wie können jetzt die Myonen auf die Erdoberfläche gelangen, da die mittlere Lebensdauer in ihrem Ruhesystem nur $2,2 \mu\text{s}$ beträgt?

Diskutieren Sie die Widerspruchsfreiheit der experimentellen Ergebnisse auch aus Sicht der Myonen.