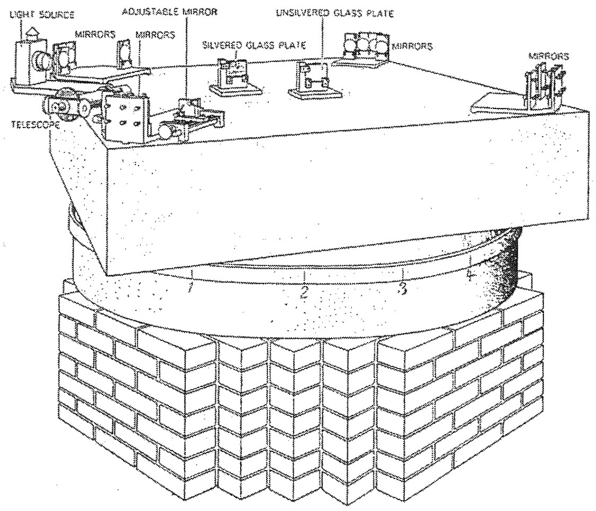
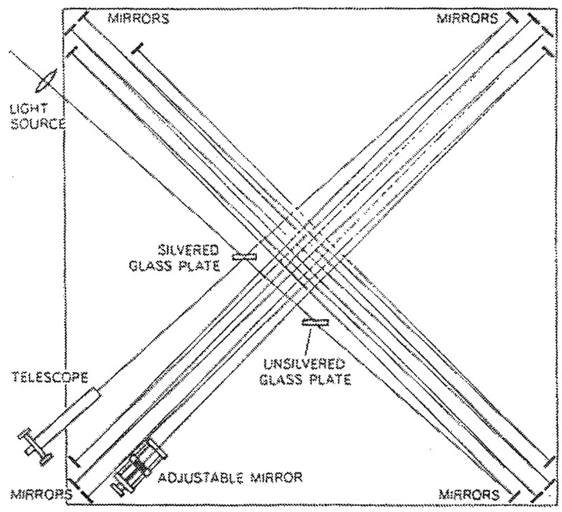
Der Versuch von Michelson und Morley

Aufbau

Die Michelson-Morley-Apparatur entspricht einem klassischen **Interferometer**, also einem Messinstrument, das die Interferenz von Wellen (konstruktive und destruktive Überlagerungen) ausnutzt, um kleine Strecken- resp. Laufzeitunterschiede auszumessen. Die **Wellenlänge** λ resp. **Schwingungsperiode** T der benutzten Wellenart bestimmt, wie kleine Strecken bzw. Zeiten so gemessen werden können.

Im Falle von rotem Licht sind $\lambda \approx 600\,\mathrm{nm} = 6 \cdot 10^{-7}\,\mathrm{m}$ und $T \approx 2\,\mathrm{fs} = 2 \cdot 10^{-15}\,\mathrm{s}$, sodass mit dem Interferometer gut Distanzen von bis zu etwa $100\,\mathrm{nm}$ und Zeiten bis etwa $0.4\,\mathrm{fs}$ aufgelöst werden können – Genauigkeiten, die sich mit keinem "normalen" Massstab resp. keiner "normalen" Stoppuhr erreichen lassen.





Theoretische Berechnung des Laufzeitunterschiedes

Wir gehen von der **Ätherhypothese** aus: Licht breitet sich in einem ansonsten unbemerkten Medium namens Äther isotrop, d.h. in alle Richtungen gleich schnell, aus. Die Erde und damit der Michelson-Morley-Versuch sollen sich relativ zum ruhenden Äther bewegen, sodass im Ruhesystem des Versuchs das Licht nicht mehr in alle Richtungen gleich schnell ist. Es müssen sich somit unterschiedliche Laufzeiten parallel resp. senkrecht zum Ätherwind ergeben.

$v =$ Geschwindigkeit des Ätherwindes resp. Geschwindigkeit des Experimentes im Äther

$c =$ Geschwindigkeit des Lichts im Äther (isotrop)

Die Laufzeit t_1 für den Hin- und den Rückweg (Länge l_1) mit resp. gegen den Ätherwind beträgt:

$$t_1 = \frac{l_1}{c+v} + \frac{l_1}{c-v} = \ldots = \frac{2l_1}{c}\,\frac{1}{1-\frac{v^2}{c^2}} \approx \frac{2l_1}{c}\left(1+\frac{v^2}{c^2}\right) \qquad \text{für} \quad v \ll c$$

Die Laufzeit t_2 für den Hin- und den Rückweg (Länge l_2) senkrecht zum Ätherwind ist gegeben durch:

$$t_2 = \frac{2l_2}{\sqrt{c^2-v^2}} = \ldots = \frac{2l_2}{c}\,\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \approx \frac{2l_2}{c}\left(1+\frac{1}{2}\,\frac{v^2}{c^2}\right) \qquad \text{für} \quad v \ll c$$

Für den **Laufzeitunterschied** Δt erhalten wir:

$$\Delta t = t_1 - t_2 \approx \frac{2l_1}{c}\left(1+\frac{v^2}{c^2}\right) - \frac{2l_2}{c}\left(1+\frac{1}{2}\,\frac{v^2}{c^2}\right)$$

Drehen wir die Anordnung um 90°, so steht neu l_1 senkrecht und l_2 parallel zum Ätherwind, sodass sich die Laufzeitberechnung umkehrt:

$$\Delta t' = t_1' - t_2' \approx \frac{2l_1}{c}\left(1 + \frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2}\right) - \frac{2l_2}{c}\left(1 + \frac{v^2}{c^2}\right)$$

Beim Drehen muss somit eine Änderung des Laufzeitsunterschieds erfolgen, die gegeben ist durch:

$$\begin{aligned}\Delta t - \Delta t' &\approx \frac{2l_1}{c}\left(1 + \frac{v^2}{c^2}\right) - \frac{2l_2}{c}\left(1 + \frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2}\right) - \frac{2l_1}{c}\left(1 + \frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2}\right) - \frac{2l_2}{c}\left(1 + \frac{v^2}{c^2}\right)\\ &= \frac{2l_1}{c} + \frac{2l_1}{c}\frac{v^2}{c^2} - \frac{2l_2}{c} - \frac{l_2}{c}\frac{v^2}{c^2} - \frac{2l_1}{c} - \frac{l_1}{c}\frac{v^2}{c^2} + \frac{2l_2}{c} + \frac{2l_2}{c}\frac{v^2}{c^2}\\ &= \frac{2l_1}{c}\frac{v^2}{c^2} - \frac{l_2}{c}\frac{v^2}{c^2} - \frac{l_1}{c}\frac{v^2}{c^2} + \frac{2l_2}{c}\frac{v^2}{c^2} = \frac{l_1}{c}\frac{v^2}{c^2} + \frac{l_2}{c}\frac{v^2}{c^2} = \frac{l_1 + l_2}{c}\frac{v^2}{c^2}\end{aligned}$$

Setzen wir $l = l_1 = l_2$, so ergibt sich daraus:

$$\Delta t - \Delta t' = \frac{2l}{c}\frac{v^2}{c^2}$$

Weshalb hätten Michelson und Morley den Ätherwind sicher nachweisen können?

Die Änderung der Laufzeitdifferenz müsste gemäss der Ätherhypothese zu einer beobachtbaren Veränderung der Interferenz ("hell/dunkel") führen, ...

- falls sie grösser ist als die mit rotem Licht messbare Zeitdifferenz ($T \approx 0.4\,\mathrm{fs} = 4 \cdot 10^{-16}\,\mathrm{s}$) und
- falls sich die Erde resp. der Versuch relativ zum Äther bewegt (v).

[1] Nimmt man einmal an, dass der Äther im Schwerpunkt des Sonnensystems ruht (dies ist für die Messung der ungünstigste Fall, da dann als Relativgeschwindigkeit nur die Erdbahngeschwindigkeit mit $30\,\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{s}}$) auftritt; im anderen Fall würde einmal im Jahr auch die Erdbahngeschwindigkeit plus die Geschwindigkeit des Sonnensystems relativ zum Äther auftreten), so ist $\frac{v}{c} = \frac{30\,\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{s}}}{300\,000\,\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{s}}} = 10^{-4}$ und somit $\frac{v^2}{c^2} = 10^{-8}$. Daraus folgern wir für die notwendige Grösse des Experiments:

$$\Delta t - \Delta t' = \frac{2l}{c}\frac{v^2}{c^2} > 0.4\,\mathrm{fs} \quad \Rightarrow \quad l > 0.4\,\mathrm{fs} \cdot \frac{c}{2} \cdot \frac{c^2}{v^2} = 4 \cdot 10^{-16}\,\mathrm{s} \cdot \frac{3 \cdot 10^8\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}}{2} \cdot 10^8 = 6\,\mathrm{m}$$

Mit $l = 10\,\mathrm{m}$ hätte also in jedem Fall eine Veränderung des Interferenzbildes beobachtet werden müssen!

Resultat

Bei allen Ausführungen des Michelson-Morley-Versuches wurden niemals innerhalb der Messgenauigkeit Verschiebungen des Interferenzbildes bei Drehung der Apparatur beobachtet. Die Messungen wurden zu verschiedenen Tages- und Jahreszeiten, mit verschiedenen Wellenlängen und auf verschiedenen Höhen über dem Meeresspiegel durchgeführt. Durch diese Versuche ist damit *eindeutig* gezeigt, dass die Lichtgeschwindigkeit (auf der Erdoberfläche) nicht vom Bewegungszustand des Beobachters abhängt.

Für die Physiker blieb nun das Problem der Deutung: Einerseits scheint zur Erklärung vieler Versuchsergebnisse ein ruhender Äther kaum vermeidbar, andererseits ist jeder Versuch, diesen ruhenden Äther zu finden, fehlgeschlagen.

[1] Ab hier entstammt der Text mit kleinen Änderungen dem Buch **Ruder, H.&M.:** *Die Spezielle Relativitätstheorie*, Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig/Wiesbaden (1993), ebenso die Grafiken auf der Vorderseite.