

9. Neue Interpretation von experimentellen Befunden

Im Folgenden werden die wichtigsten Experimente zur Speziellen Relativitätstheorie dargestellt und bewertet. Insbesondere für das Michelson-Morley- und das Kennedy-Thorndike-Experiment ergibt sich ein neuer Ansatz, wenn das Konzept der Phasengeschwindigkeit des Lichts berücksichtigt wird. Des Weiteren werden auch andere wesentliche Versuche kurz diskutiert.

9.1 Das Michelson-Morley-Experiment

Zunächst wird der von A. A. Michelson und E. W. Morley durchgeführte Versuch beschrieben. Wegen der großen Bedeutung dieses Experiments erfolgt anschließend eine weiterführende Literaturlauswertung und dann werden die sich daraus ergebenden Konsequenzen bewertet.

9.1.1 Versuchsaufbau und Auswertung

Die Skizze des Versuchsaufbaus in Abb. 9.1 ist eine Wiedergabe aus der Originalliteratur von 1887 [7]. Hierin ist ein Experiment dargestellt, bei dem ein Lichtstrahl bei a mit Hilfe eines halb durchlässigen Spiegels aufgespalten, an den Stellen b und c reflektiert und an der Stelle d mit Hilfe eines Interferometers untersucht wird. Teil 1 stellt die Situation einer ortsfesten, Teil 2 die einer (gegenüber dem angenommenen Äther) bewegten Messvorrichtung dar.

Es liegt hier die Annahme zugrunde, dass die Lichtgeschwindigkeit und die gegenüber einem ruhenden Äther vorliegende Geschwindigkeit sich addieren und sich letztere mit Hilfe dieses Versuchs messen lässt. Für die Zeit für Hin- und Rückweg zwischen a und c ergibt sich

$$T_{\parallel} = \frac{D}{c + v} + \frac{D}{c - v} = \frac{2Dc}{c^2 - v^2} \quad (9.01)$$

wobei D der Abstand zwischen a und c ist. Für die insgesamt zurückgelegte Strecke gilt

$$D_{\parallel} = 2D \frac{c^2}{c^2 - v^2} \quad (9.02)$$

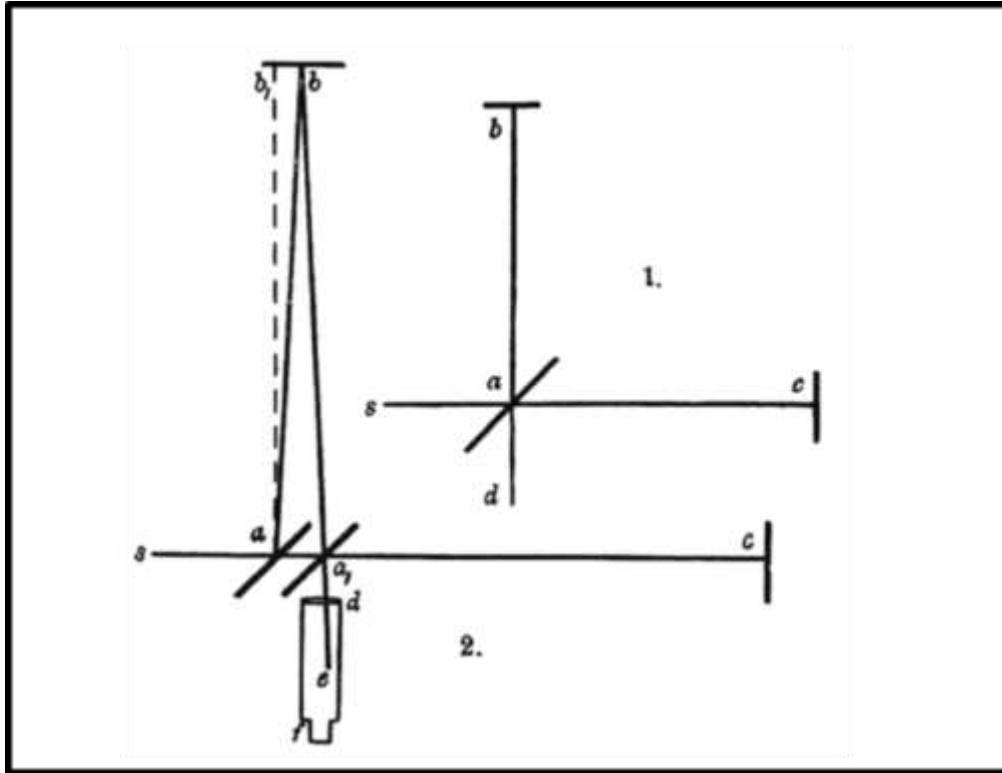


Abb. 9.1: Aufbau des Michelson-Morley-Experiments, entnommen aus [7]

In Querrichtung folgt dann aus

$$T_{\perp} = \frac{D_{\perp}}{v_{\perp}} \quad (9.03)$$

und

$$v_{\perp}^2 = c^2 + v^2 \quad (9.04)$$

$$D_{\perp} = 2D \sqrt{1 + \frac{v^2}{c^2}} \quad (9.05)$$

Unter Vernachlässigung von Termen 4. Ordnung und höher ergibt sich aus den Gleichungen (9.02) und (9.05) nach einer Taylorentwicklung

$$D_{\parallel} \approx 2D \left(1 + \frac{v^2}{c^2} \right) \quad (9.06)$$

$$D_{\perp} \approx 2D \left(1 + \frac{v^2}{2c^2} \right) \quad (9.07)$$

Die Differenz beträgt dann

$$\Delta D = D_{\parallel} - D_{\perp} = 2D \left(1 + \frac{v^2}{c^2} \right) - 2D \left(1 + \frac{v^2}{2c^2} \right) = D \frac{v^2}{c^2} \quad (9.08)$$

Aus heutiger Sicht besteht ein offensichtliches Problem bei dieser Berechnung, da in den Gleichungen Geschwindigkeiten $v > c$ auftreten. Dies wird bei korrekter Ermittlung vermieden und die entsprechende Herleitung soll im Folgenden dargestellt werden.

9.1 Das Michelson-Morley-Experiment

Zunächst wird dabei $T_{\parallel}$ betrachtet. Hierzu werden die in Kapitel 2 abgeleiteten Beziehungen verwendet (vgl. Tab. 2.1)

$$T_{\parallel} = \frac{D}{c \left(1 - \frac{v}{c}\right)} + \frac{D}{c \left(1 + \frac{v}{c}\right)} = \frac{2D}{c} \gamma^2 \quad (9.09)$$

Es wird deutlich, dass bei dieser Betrachtung die für Hin- und Rückweg geltenden Beziehungen exakt umgekehrt sind wie von Michelson und Morley angenommen, in der Summe ergibt sich damit aber das gleiche Ergebnis.

In Querrichtung verhält es sich etwas anders. Zur Ermittlung werden die in Abb. 9.2 dargestellten Beziehungen genutzt (vgl. auch Darstellungen in Kap. 2.1.2 und 2.2.3).

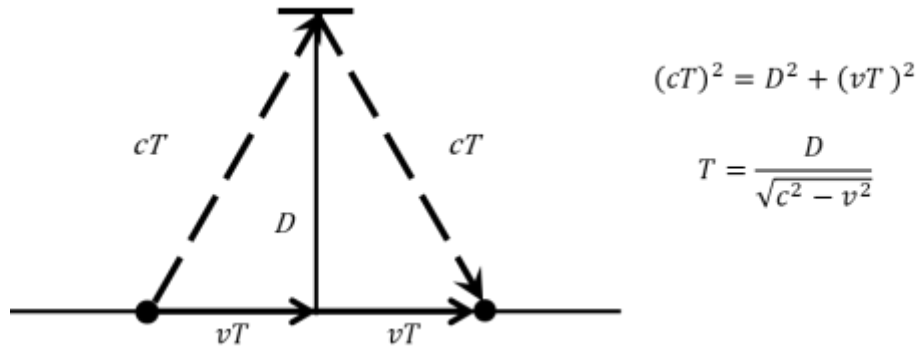


Abb. 9.2: Zusammenhang zwischen dem Abstand D zum Reflektor und den Geschwindigkeiten v und c .

Daraus ergibt sich folgende Abhängigkeit für $T_{\perp}$

$$T_{\perp} = \frac{2D}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{2D}{c} \gamma \quad (9.10)$$

und damit

$$D_{\perp} = \frac{2D}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = 2D\gamma \quad (9.11)$$

Dieses Resultat weicht vom Ergebnis von Michelson und Morley aus Gl. (9.05) ab. Der Unterschied liegt im folgenden Term mit seiner Taylorentwicklung

$$\sqrt{1 + \frac{v^2}{c^2}} = 1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} - \frac{1}{8} \frac{v^4}{c^4} + \frac{3}{48} \frac{v^6}{c^6} - \dots \quad (9.12)$$

im Vergleich zur korrekten Darstellung

$$\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = 1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} + \frac{3}{8} \frac{v^4}{c^4} + \frac{15}{48} \frac{v^6}{c^6} + \dots \quad (9.13)$$

Vernachlässigt man Terme 4. Ordnung und höher so sind die Ergebnisse gleich und damit sind die Beziehungen ohne Einschränkungen verwendbar.

Es folgt somit

$$\Delta D = \frac{T_{\parallel} - T_{\perp}}{c} = 2D(\gamma^2 - \gamma) \quad (9.14)$$

und für $v \ll c$ wegen

$$\gamma \approx 1 + \frac{v^2}{2c^2} \quad (9.15)$$

ergibt sich

$$\Delta D \approx 2D \left(\left(1 + \frac{v^2}{2c^2} \right)^2 - \left(1 + \frac{v^2}{2c^2} \right) \right) \approx D \frac{v^2}{c^2} \quad (9.16)$$

Die aufgebaute Versuchseinrichtung hätte mit Hilfe von Interferenzmessungen Geschwindigkeiten von 8 km/s nachweisen können, zeigte aber ein Nullresultat. Die Bewegung der Erde um die Sonne (ohne weitere Berücksichtigung der Bewegung der Sonne in der Milchstraße) führt jedoch zu Werten von etwa 30 km/s.

Von G. F. FitzGerald wurde bereits im Jahre 1889 die These aufgestellt, dass sich der Raum bei Geschwindigkeiten nahe der Lichtgeschwindigkeit kontrahieren muss [8]. Er nahm an, dass die Kontraktion quadratisch von der Geschwindigkeit des bewegten Beobachters abhängt. H. A. Lorentz kam 1892 unabhängig davon zum gleichen Ergebnis [13]. Erst später, als die Lorentz-Transformationen vollständig formuliert waren, wurde dem Verhältnis zwischen Quer- und Längsrichtung der Faktor γ (vgl. Gl. 1.03) zugeordnet (z. B. [12,13]).

Aus den Versuchsergebnissen wurde zusätzlich gefolgert, dass ein erwarteter „Ätherwind“ nicht existiert. Diese Interpretation ist korrekt, wenn die Ausbreitung des Lichts mit einem Trägermedium wie z. B. einem Gas oder einer Flüssigkeit zur Leitung des Schalls verglichen wird. Unterstellt man jedoch bei einem absolut ruhenden Raum die auftretende Zeitdilatation und Raumkontraktion in Bewegungsrichtung eines darin bewegten Körpers als Eigenschaften des Raums, so ist ebenfalls eine einfache und in sich schlüssige Darstellung möglich. Betrachtet man die Phasengeschwindigkeit des Lichts treten keine Widersprüche beim Übergang von dem ruhenden in ein dazu bewegtes System auf.

Zusammenfassend ist als Ergebnis für das Michelson-Morley-Experiment festzustellen, dass es in Bewegungsrichtung eine Kontraktion geben muss. Dies widerlegte die bis dahin vorherrschende Annahme, dass es einen der Luft entsprechenden Ätherwind gibt. Weiterführende Interpretationen können aber daraus nicht getroffen werden.

9.1.2 Literaturlauswertung

Das Michelson-Morley-Experiment wird in einer Vielzahl von Veröffentlichungen diskutiert. Die im Jahre 1927 im Mount Wilson Observatorium in Pasadena durchgeführte „Conference on the Michelson-Morley-Experiment“ stellt aber sicher einen Höhepunkt dar. Aufgrund der Bedeutung der beteiligten namhaften Wissenschaftler und der ausführlichen

Diskussionen liegt in den 1928 veröffentlichten Tagungsunterlagen [49] ein sehr aussagekräftiges Dokument des wissenschaftlichen Stands der damaligen Zeit vor, an dem sich bis heute nichts Wesentliches geändert hat. Aus diesem Grunde soll im Folgenden ausführlich auf Details dieser Konferenz eingegangen werden. Neben ihrem wissenschaftlichen Rang ergeben sich auch interessante historische Aspekte, die ebenfalls gewürdigt werden sollen.

Zunächst berichtete A. A. Michelson über den historischen Hintergrund [49a]. Er beschrieb die ersten Versuche am Helmholtz-Institut in Berlin, die aber aufgrund der störenden Einflüsse des Verkehrs nicht zum Erfolg führten und dann später im Observatorium in Potsdam wiederholt wurden. Das erzielte Nullresultat wurde damals von vielen Wissenschaftlern wegen der geringen Armlänge des Geräts von etwa 1m angezweifelt. Erst die Verbesserungen durch E. W. Morley ergaben dann bei einem erneuten Versuch in Cleveland ein eindeutiges Ergebnis.

Von H. A. Lorentz [49b] wurde der theoretische Ansatz des Experiments erläutert, wobei hier deutlich komplexere Betrachtungen als von A. A. Michelson durchgeführt wurden, insbesondere bezüglich der von Michelson bis dahin nicht untersuchten Winkelabhängigkeiten (vgl. Kap. 8.1.1). Anschließend wurde von D. C. Miller [49c] der zur damaligen Zeit aktuelle Stand der Versuche dargestellt. Dabei berichtete er auch über Versuche, die positive Effekte zur Messung eines Äthers gezeigt haben sollten. (Anm.: Diese konnten später nicht bestätigt werden). R. S. Kennedy berichtete dann über die Interferometer-Messtechnik [49d].

E. R. Hedrick [49e] und danach P. S. Epstein [49f] gingen in ihren Präsentationen ausführlich auf zusätzliche theoretische Aspekte ein. Hierbei ist insbesondere die Berücksichtigung des gegenüber einem potenziellen Äther bewegten Spiegelsystems zu nennen. Es wird ausführlich auf Bewertungen von A. Righi [50] eingegangen, allerdings gibt es auch ältere Untersuchungen zu diesem Thema (z. B. [51,52]). (Anmerkung: Wegen des plötzlichen Todes von A. Righi gibt es von ihm nur unvollständige Aufzeichnungen. Diese wurden von J. Stein S. J., dem damaligen Leiter des vatikanischen Observatoriums zusammengefasst [50]). Von E. R. Hedrick werden allein 15 Literaturstellen aufgeführt, die sich mit Interferenz-Problemen beim Michelson-Morley-Experiment beschäftigen [49e].

Es ist bemerkenswert, dass die Ergebnisse der verschiedenen Autoren teilweise erheblich voneinander abweichen. Während A. Righi der Auffassung war, dass das Michelson-Morley-Experiment aufgrund der Winkelanordnung der Spiegel bei der Bewegung durch den Äther prinzipiell keine Ergebnisse zeigen konnte, war E. R. Hedrick dagegen der Meinung, dass dieser Effekt vorliegt aber vernachlässigt werden könnte.

Ohne auf die Details einzugehen ist festzuhalten, dass in allen Fällen immer nur die Bewegung des Reflektionsspiegels betrachtet wird, nicht aber das Gesamtsystem des bewegten Interferometers. Seitens H. A. Lorentz wurde in der Diskussion festgestellt, dass die Berechnungen mit bewegtem Spiegel von seinen Ergebnissen abwichen, und regte eine Überarbeitung an [49f]. Eine Betrachtung der Phasengeschwindigkeit, die eine einfache Erklärung der Phänomene ermöglicht hätte, erfolgte hier nicht.

H. A. Lorentz verstarb im Jahr nach der Konferenz und es liegen keine Berichte darüber vor, ob er sich noch mit diesem Problem beschäftigt hat. Auch von anderen Autoren wird hierzu keine Stellung genommen.

9.2 Das Kennedy-Thorndike-Experiment

Bei diesem Experiment werden ebenfalls Messungen mit einem Interferometer durchgeführt. Der Versuch unterscheidet sich vom Michelson-Morley-Experiment im Wesentlichen dadurch, dass hier beim Interferometer unterschiedlich lange Messarme verwendet werden. Außerdem wird durch eine stabile Bauweise und eine extrem genaue Temperaturführung erreicht, dass mit dieser Vorrichtung Langzeitversuche möglich sind. So wurde z. B. die erste bereits im Jahr 1932 gebaute Messvorrichtung mit einem Wasserbad umgeben, dessen Temperatur auf $1/1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ konstant gehalten werden konnte. Mit dieser Vorrichtung wurden Versuche über Tage, teilweise Monate durchgeführt.

Die Durchführung dieses Versuches beruht darauf, dass die Messvorrichtung nicht direkt bewegt wird, sondern dass durch die Erdrotation die Apparatur in verschiedenen Winkeln zum angenommenen Äther ausgerichtet und daher sowohl Drehungen als auch Beschleunigungen durch die Drehbewegung der Erde hervorgerufen werden [16]. Es gibt in der Literatur Darstellungen, in denen die Drehbewegung einer solchen Apparatur dem Michelson-Morley Experiment zugeordnet und für den Kennedy-Thorndike Versuch nur die Beschleunigungskomponente betrachtet wird [54]; da die Effekte aber stets zusammen auftreten sollen sie hier auch gemeinsam dargestellt werden.

Es wurde im ersten sowie in nachfolgenden Versuchen mit noch erheblich gesteigerter Genauigkeit wie auch beim Michelson-Morley-Experiment ein Nullresultat ermittelt.

Im Folgenden wird zunächst gezeigt, dass die von den Autoren im Jahr 1932 entwickelte Interpretation [16] nicht korrekt ist, sondern einige konzeptionelle Mängel enthält. Aus diesem Grunde werden heute Darstellungen des Sachverhalts ausschließlich in modifizierter Form verwendet, wie z. B. von D. Giulini [19] wiedergegeben. Es wird weiterhin gezeigt, dass auch diese Schwachstellen enthalten, die durch eine modifizierte Darstellung aufgehoben werden können. Diese wird ausführlich diskutiert und dann abschließend bewertet.

9.2.1 Darstellungen aus der Originalliteratur

Betrachtet wird ein System S in dem ein Lichtstrahl in der Zeit dt die Distanz ds zurücklegt [16]. Es gilt

$$ds = cdt \quad (9.20)$$

Wird nun ein System S' betrachtet, dass sich gegenüber S mit der Geschwindigkeit v bewegt, dann gilt

$$c^2(dt')^2 = (ds')^2 + v^2(dt')^2 + 2vds'dt'\cos\theta' \quad (9.21)$$

wobei θ' der Winkel zwischen Lichtausbreitung und Bewegungsrichtung ist. Für $\theta' = 0$ führt dies zu

$$cdt' = ds' + vdt' \quad (9.22)$$

Werden die Ergebnisse des Michelson-Morley-Experiments berücksichtigt, so ergeben sich folgende Beziehungen in Längsrichtung (θ bzw. $\theta' = 0^{\circ}$) sowie in Querrichtung (θ bzw. $\theta' = 90^{\circ}$)

	Bewegtes System S'		Nicht bewegtes System S
$\theta' = 0^\circ$	$dt' = \frac{ds'}{c \left(1 - \frac{v}{c}\right)}$	$\theta = 0^\circ$	$dt' = \frac{ds}{\gamma c \left(1 - \frac{v}{c}\right)}$
$\theta' = 90^\circ$	$dt' = \frac{ds'}{c} \gamma$	$\theta = 90^\circ$	$dt' = \frac{ds}{c} \gamma$

Nach Integration folgt dann gemäß [11] die Beziehung

$$t'_{\parallel} - t'_{\perp} = \frac{s'_{\parallel} - s'_{\perp}}{c} \gamma \quad (9.23)$$

Hier zeigt sich ein offensichtlicher konzeptioneller Mangel, da nur der Weg in Richtung zum reflektierenden Spiegel aber nicht zurück betrachtet wird. Sind Lichtausbreitung und Bewegungsrichtung des Systems gleichgerichtet, so ergeben sich für Hin- und Rückweg unterschiedliche Werte. Außerdem wird hier vorausgesetzt, dass die Raumkontraktion und Zeitdilatation exakt gleich sind, was an dieser Stelle ohne zusätzliche Annahmen jedoch nicht möglich ist. Es soll daher hier die Bewertung der Originalliteratur abgebrochen und zu neueren Darstellungen übergegangen werden.

9.2.2 Neuere Darstellungen

In neuerer Literatur (z. B. nach [19]) wird der Sachverhalt anders wiedergegeben. Hierbei kann demnach nur die Beziehung

$$t'_{\parallel} - t'_{\perp} = B \frac{2(s'_{\parallel} - s'_{\perp})}{c} \gamma \quad (9.24)$$

dargestellt werden, wobei die Konstante B später, z. B. durch das Ives-Stilwell-Experiment (vgl. Kap 9.3) bestimmt wird und sich dann dabei zu $B = 1$ ergibt.

Das eigentliche Problem bei der Interpretation des Kennedy-Thorndike-Experiments auch in seiner neueren Darstellung liegt jedoch in der Auswertung. Hierbei entsteht die Situation, dass gemäß der Beziehung

$$\Delta N = f \cdot B \frac{2(s'_{\parallel} - s'_{\perp})}{c} \gamma \quad (9.25)$$

mit f als Frequenz eine Abhängigkeit zwischen der Anzahl der Schwingungen, die auf dem Hin- und Rückweg zwischen Lichtquelle und Interferometer auftreten und der Frequenz ein Zusammenhang hergestellt wird. Berücksichtigt man jedoch die unterschiedliche Länge der Messarme so wird sofort klar, dass ein aufgespaltener und gleichzeitig in unterschiedliche Richtungen ausgestrahlter Lichtstrahl nicht zum selben Zeitpunkt zurückkommt, sondern dass hier eine Verzögerung vorliegt. Daher wird im Folgenden eine alternative Formulierung des Sachverhalts vorgenommen.

9.2.3 Neuinterpretation des Experiments

Wie bereits ausgeführt ist ein wesentliches Merkmal des Versuchsaufbaus, dass unterschiedlich lange Messarme eingesetzt werden. Aus diesem Grund ist es nicht sinnvoll die Gesamtzahl an Schwingungen des Lichts bezüglich der Armdistanzen miteinander zu vergleichen. Das Konzept der Konstanz der Phasengeschwindigkeit des Lichts erlaubt hier eine andere Betrachtung für die auftretenden Interferenzeffekte. Betrachtet man also die Wechselwirkung von Lichtimpulsen und möchte diese beim Eintreffen am Interferometer miteinander vergleichen so wird deutlich, dass der Impuls, der den kürzeren Arm durchläuft, mit einer Verzögerung gestartet werden muss.

Wenn die Längen der Arme L_C (länger) und L_B (kürzer) sind, so ist Wartezeit T_0 bis zum Absenden des Impulses bei der Betrachtung eines unbewegten Systems

$$T_0 = \frac{2L_C}{c} - \frac{2L_B}{c} = \frac{2L_C(1-k_A)}{c} \quad (9.30)$$

mit

$$k_A = \frac{L_B}{L_C} \quad (9.31)$$

als Apparate-Konstante für das Verhältnis der Armlängen. Die Gesamtzeiten für Hin- und Rückweg eines Lichtsignals sind demnach

$$T_B = \frac{2L_C(1-k_A)}{c} + \frac{2L_C k_A}{c} \quad (9.32)$$

$$T_C = \frac{2L_C}{c} \quad (9.33)$$

wobei Gl. (9.32) und Gl. (9.33) offensichtlich gleich sind. Betrachtet man nun ein bewegtes System längs und quer zur Bewegungsrichtung und setzt für den Verlauf in Längsrichtung die Verkürzung um den Faktor γ gemäß den Ergebnissen des Michelson-Morley-Versuchs ein, so ergeben sich die folgenden Gleichungen für die jeweiligen Situationen

$$T_{\parallel B} = T_{\perp B} = a \frac{2L_C(1-k_A)}{c} + b \frac{2L_C k_A}{c} \gamma \quad (9.34)$$

$$T_{\parallel C} = T_{\perp C} = b \frac{2L_C}{c} \gamma \quad (9.35)$$

wobei a eine zunächst unbekannte Korrekturkonstante der erforderlichen Startzeit des Signals für den kürzeren Messarm ist. Die Konstante b wird verwendet, weil aus dem Ergebnis des Michelson-Morley-Experiments nur das Verhältnis zwischen der Kontraktion von Längs- zu Querrichtung nicht aber deren absolute Größe bekannt ist.

Es werden nun Gl. (9.34) und Gl. (9.35) gleichgesetzt. Die Rechnung ergibt

$$b \frac{2L_C}{c} \gamma = a \frac{2L_C(1-k_A)}{c} + b \frac{2L_C k_A}{c} \gamma \quad (9.36)$$

$$b \frac{2L_C}{c} (1 - k_A) \gamma = a \frac{2L_C(1-k_A)}{c} \quad (9.37)$$

9.2 Das Kennedy-Thorndike-Experiment

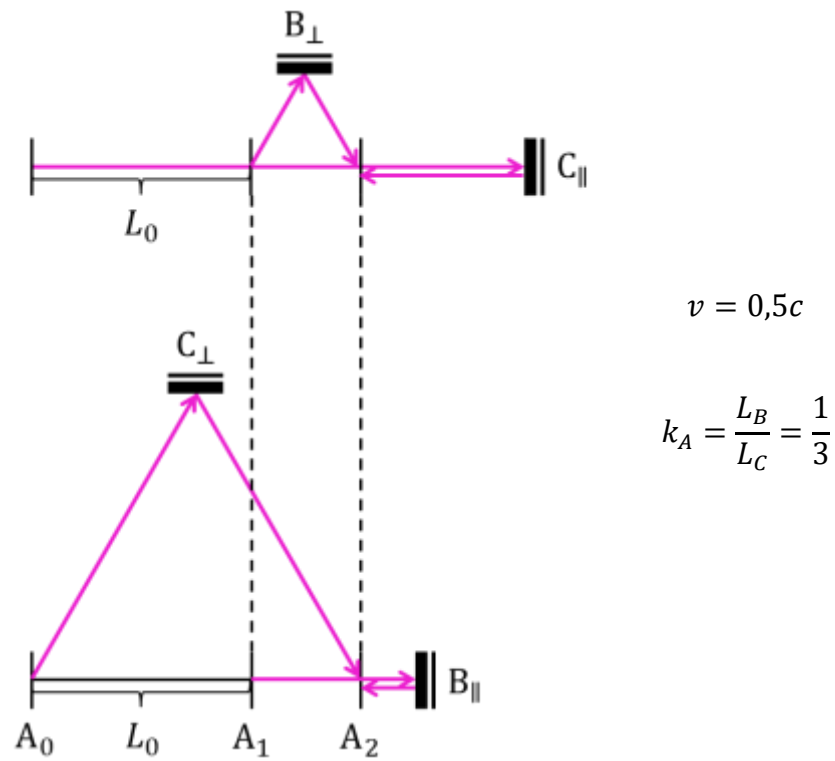


Abb. 9.3: Kennedy-Thorndike Versuch: Drehung

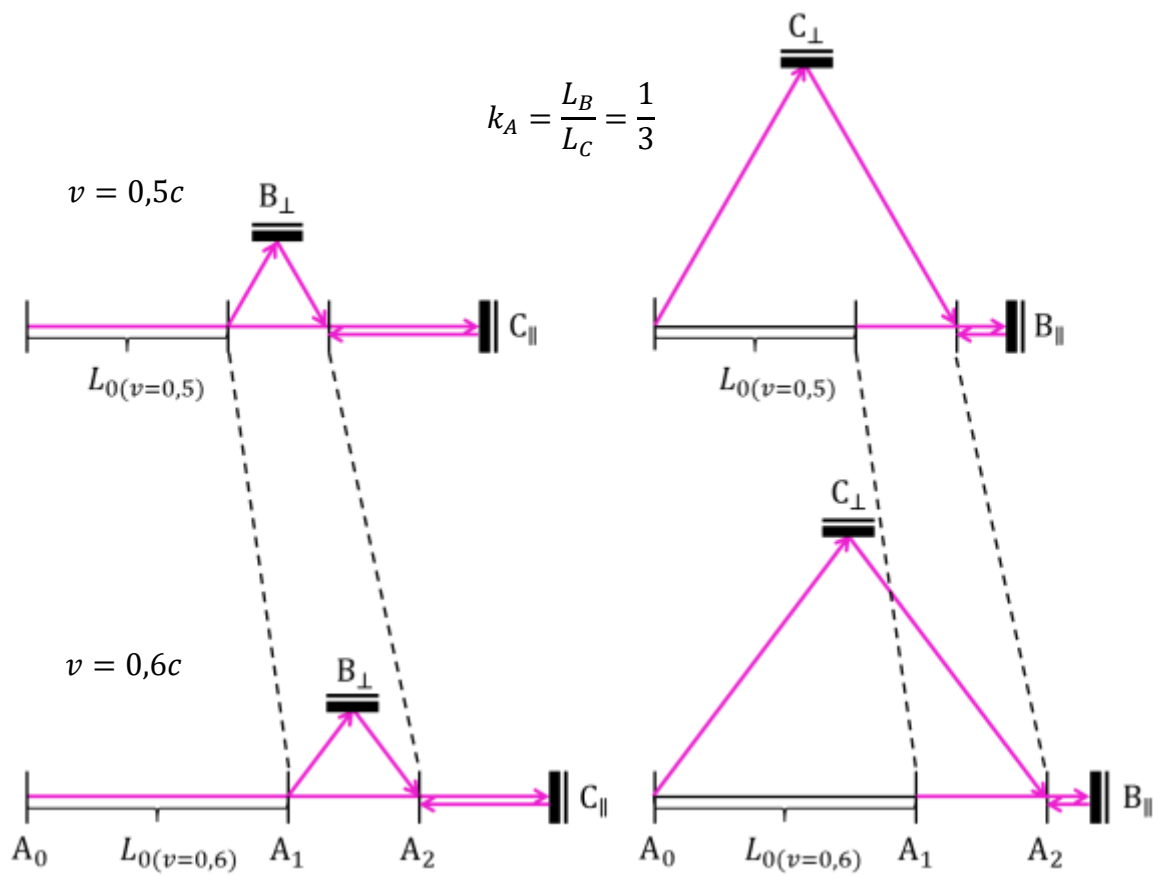


Abb. 9.4: Kennedy-Thorndike Versuch: Beschleunigung

mit

$$\frac{a}{b} = \gamma \quad (9.38)$$

Damit ist gezeigt, dass ein Nullresultat der Messungen nur dann auftreten kann, wenn das Verhältnis vom Faktor für die Startzeit des Signals des verkürzten Messarms und der Korrekturfaktor der Längenkontraktion exakt dem Lorentz-Faktor γ entsprechen. Wir wissen heute aus zusätzlichen Versuchen bezüglich der Zeitdilatation (z. B. von Ives-Sitwell, vgl. Kap. 9.3), dass der Faktor $b = 1$ ist. Zum Zeitpunkt der ersten Veröffentlichung im Jahr 1932 war dies jedoch noch nicht bekannt.

Der Versuchsaufbau lässt sich gemäß Abb. 9.3 und Abb. 9.4 darstellen, wobei für das Verhältnis der Messarmlängen die Größe $1/3$ gewählt wurde. Zunächst wird hier das Verhalten bei einer Drehbewegung betrachtet (Abb. 9.3) außerdem ist die Situation für eine Beschleunigung dargestellt (Abb. 9.4). In der Praxis wird sich in der Regel immer der Fall einstellen, dass beide Situationen zusammen auftreten und sich die Effekte überlagern. Es werden Lichtimpulse ausgesandt, die an den Spiegeln B und C reflektiert werden; die Bezeichnungen $C_{\parallel}$, $C_{\perp}$, $B_{\parallel}$ und $B_{\perp}$ zeigen an, ob die Reflektion längs zur Bewegungsrichtung oder quer dazu erfolgt.

Die Koordinaten der entsprechenden Punkte sind in nachfolgender Zusammenstellung wiedergegeben. Es wurde das Format x, y, t gewählt; in z -Richtung findet keine Bewegung statt und diese wurde daher nicht aufgeführt (d. h. $z = 0$). Für das Verhältnis der Raumkontraktion zwischen Längs- und Querrichtung wurde der Faktor γ gemäß dem Versuch von Michelson-Morley angesetzt.

Koordinate	x	y	t
$C_{\parallel}$	$\frac{L_C}{\gamma \left(1 - \frac{v}{c}\right)}$	0	$\frac{L_C}{\gamma c \left(1 - \frac{v}{c}\right)}$
$C_{\perp}$	$\frac{\gamma L_C v}{c}$	L_C	$\frac{\gamma L_C}{c}$
A_1	$\frac{2\gamma L_C v}{c} (1 - k_A)$	0	$\frac{2\gamma L_C}{c} (1 - k_A)$
$B_{\parallel}$	$\frac{2\gamma L_C v}{c} (1 - k_A) + \frac{L_C k_A}{\gamma \left(1 - \frac{v}{c}\right)}$	0	$\frac{2\gamma L_C}{c} (1 - k_A) + \frac{L_C k_A}{\gamma c \left(1 - \frac{v}{c}\right)}$
$B_{\perp}$	$\frac{2\gamma L_C v}{c} (1 - k_A) + \frac{\gamma L_C v}{c} k_A$	$L_C k_A$	$\frac{2\gamma L_C}{c} (1 - k_A) + \frac{\gamma L_C}{c} k_A$
A_2	$\frac{2\gamma L_C v}{c}$	0	$\frac{2\gamma L_C}{c}$

Tab. 9.1: Darstellung der Koordinaten aus Abb. 9.3

Die in Tab. 9.1 dargestellten Werte für A_2 lassen sich gemäß des Strahlenverlaufs auf 4 verschiedene Arten berechnen, die alle zu dem gleichen Endergebnis führen (Tab. 9.2). Es wurde hier also gezeigt, dass eine Drehung der Apparatur und der Vergleich zwischen unbewegtem und bewegtem System zu den gleichen Ergebnissen führen. Aus den Betrachtungen ergibt sich darüber hinaus, dass die Startzeit des Signals des verkürzten Messarms und der Korrekturfaktor der Längenkontraktion exakt γ entsprechen müssen. Dies soll im folgenden Kapitel noch weiter diskutiert werden.

Die Darstellung der Verhältnisse bei einer Beschleunigung in Abb. 9.4 ergeben die gleichen Verhältnisse wie sie bereits in den Kap. 4 und 5 präsentiert wurden und deshalb ist hier keine weitere Diskussion erforderlich. Beim Übergang zwischen Systemen unterschiedlicher Geschwindigkeit ergeben sich keine prinzipiellen Unterschiede.

Weg über:	x	t
$C_{\parallel}$	$\frac{L_C}{\gamma \left(1 - \frac{v}{c}\right)} - \frac{L_C}{\gamma \left(1 + \frac{v}{c}\right)}$	$\frac{L_C}{\gamma c \left(1 - \frac{v}{c}\right)} + \frac{L_C}{\gamma c \left(1 + \frac{v}{c}\right)}$
$C_{\perp}$	$\frac{\gamma L_C v}{c} + \frac{\gamma L_C v}{c}$	$\frac{\gamma L_C}{c} + \frac{\gamma L_C}{c}$
$B_{\parallel}$	$\frac{2\gamma L_C v}{c} (1 - k_A) + \frac{L_C k_A}{\gamma \left(1 - \frac{v}{c}\right)} - \frac{L_C k_A}{\gamma \left(1 + \frac{v}{c}\right)}$	$\frac{2\gamma L_C}{c} (1 - k_A) + \frac{L_C k_A}{\gamma c \left(1 - \frac{v}{c}\right)} + \frac{L_C k_A}{\gamma c \left(1 + \frac{v}{c}\right)}$
$B_{\perp}$	$\frac{2\gamma L_C v}{c} (1 - k_A) + \frac{\gamma L_C v}{c} k_A + \frac{\gamma L_C v}{c} k_A$	$\frac{2\gamma L_C}{c} (1 - k_A) + \frac{\gamma L_C}{c} k_A + \frac{\gamma L_C}{c} k_A$

Tab. 9.2: Berechnung des Wertes für A_2 bei einem Weg über die Positionen $C_{\parallel}$, $C_{\perp}$, $B_{\parallel}$ und $B_{\perp}$. Alle Berechnungen führen zum selben Endergebnat.

9.2.4 Bewertung der Ergebnisse

Betrachtet man die Ergebnisse der Versuche von Michelson-Morley und Kennedy-Thorndike mit den erzielten Nullresultaten so wird deutlich, dass eine abschließende Bewertung der Konstanten a und b ohne weitere Angaben nicht erfolgen kann und damit eine Aussage bezüglich der Gültigkeit der Lorentz-Transformation unvollständig bleibt. Üblicherweise wird hierzu das Experiment von Ives-Stilwell verwendet, das in Kurzform in Kap.9.3 dargestellt ist. Es gibt jedoch auch andere einfache Möglichkeiten dies zu verifizieren.

Nimmt man z. B. an, dass $a = 1$ und damit $b = 1/\gamma$ ist, so würde dies bedeuten, dass ein bewegtes System keiner Zeitdilatation unterworfen ist, dafür aber die Raumkontraktion in Bewegungsrichtung γ^2 und zusätzlich in Querrichtung γ ist. Dieser Effekt würde jedoch bei einer Reihe von Versuchen feststellbar sein. Dies wäre z. B. beim Austausch von Signalen

zwischen bewegten Körpern (vgl. Kap.2.1) oder auch bei der Frequenzbestimmung von Signalen aus bewegten Körpern (vgl. Kap. 8) der Fall. Neben den messbaren Unterschieden tritt auch der Fall auf, dass das Relativitätsprinzip verletzt wird und es bei der Betrachtung aus einem Zustand der Ruhe und der Bewegung zu unterschiedlichen Ergebnissen kommen würde. Dies gilt neben dem hier dargestellten Beispiel für alle möglichen Konstellationen, in denen nicht die Konstanten $a = \gamma$ und $b = 1$ gewählt werden.

Der Titel der von Kennedy und Thorndike herausgegebenen Veröffentlichung lautet „Experimental Establishment of the Relativity of Time“. Aufgrund der dargestellten Abhängigkeiten der Konstanten wird heute der Anspruch, dass hiermit ein echter Nachweis geführt wurde, als nicht erfüllt zurückgewiesen, z. B. [19]. Wäre es jedoch seitens der Verfasser 1932 zu einer korrekten Ableitung und einer zusätzlichen Interpretation mit zum damaligen Zeitpunkt bereits bekannten Versuchsergebnissen gekommen, so hätte die Aussage Bestand. Unabhängig davon ist dieses Experiment und die zwischenzeitlich erfolgten Verbesserungen in der Genauigkeit ein wichtiges Element zum Verständnis der Vorgänge beim Signalaustausch von bewegten Beobachtern.

9.3 Weitere wichtige Experimente

Es gibt eine Vielzahl von weiteren bahnbrechenden Experimenten, von denen die für die hier angestellten Überlegungen wichtigsten im Folgenden in Kürze vorgestellt werden sollen.

a) Rømer-Experiment

Hierbei handelt es sich um das erste Experiment, mit dem die Größe der Lichtgeschwindigkeit gemessen wurde. Wichtig war hier insbesondere, dass erstmalig (im Jahr 1676!) der Nachweis geführt wurde, dass diese endlich ist. Der Nachweis erfolgte von O. C. Rømer durch Messung der Verfinsterung des Jupiter-Mondes Io, die bei Erdnähe des Jupiters früher, bei Erdferne später auftritt. Aus seinen Messergebnissen wurde von C. Huygens im Jahr 1678 die Lichtgeschwindigkeit zu 213.000 km/s berechnet, was etwa 71% des tatsächlichen Wertes entspricht.

b) Aberration des Lichts

Dieser Messeffekt wurde von J. Bradley im Jahre 1725 erstmalig nachgewiesen. Er entdeckte, dass der Stern Gamma Draconis im Laufe eines Jahres eine geringfügige Ortsveränderung am Himmel zeigt und führte diese auf die Endlichkeit der Lichtgeschwindigkeit zurück. Seine Messergebnisse erreichten bereits eine Genauigkeit von 2% (zu weiteren Details vgl. auch Darstellung in Kap. 1.3).

c) Doppelstern Experiment

Hierbei wird durch Betrachtung von Doppelsternsystemen gezeigt, dass die Lichtgeschwindigkeit unabhängig von der Geschwindigkeit des Körpers ist, der die Signale aussendet. Diese Überlegungen wurden maßgeblich von W. de Sitter vorgenommen, der durch spektroskopische Untersuchungen nachwies, dass eine Addition der Geschwindigkeiten des Lichts und der Quelle zu Widersprüchen mit den Keplerschen Gesetzen führen würde [55].

d) Ives-Stilwell-Experiment

Dieses Experiment liefert den direkten Nachweis, dass die Zeit in bewegten Systemen langsamer abläuft als in einem Referenzsystem [17,18]. Hierzu wurde der transversale Doppellereffekt von Licht untersucht, der aus sich nähernden und entfernenden Kanalstrahlen stammte. Die Ergebnisse sind zwischenzeitlich sehr genau und haben den Wert des Lorentz-Faktors γ eindrucksvoll bestätigt.

e) Trouton-Noble-Experiment

Hier wurde ein geladener Plattenkondensator benutzt, der sich frei um eine Achse drehen kann. Beim Vorhandensein eines „Ätherwindes“ würde sich dieser während der Bewegung der Erde drehen. Dieser Versuch ist somit mit dem Michelson-Morley-Experiment vergleichbar. Obwohl elektromagnetische Effekte nicht Gegenstand der hier durchgeführten Überlegungen sind, soll dieses wichtige Experiment nicht unerwähnt bleiben [56].

Weitere Experimente sind in anderen Zusammenstellungen z. B. [19,21,57,58] ausführlich dargestellt.

9.4 Zusammenfassende Bewertung der Experimente

Im Jahr 1949 wurde von H. P. Robertson eine zusammenfassende Klassifizierung der verschiedenen Messverfahren vorgenommen und dabei ein Konzept entwickelt, dass bis heute verwendet wird [59]. Es werden dabei die folgenden Messverfahren und ihre Bedeutung unterschieden:

1. Michelson-Morley:

Die Lichtgeschwindigkeit ist unabhängig von der Richtung bezüglich eines angenommenen bevorzugten Bezugssystems.

2. Kennedy-Thorndike

Die Lichtgeschwindigkeit ist unabhängig von der Relativgeschwindigkeit eines Beobachters bezüglich eines beliebigen Bezugssystems.

3. Ives-Stilwell

Die Zeit in einem bewegten System läuft um den Faktor γ langsamer ab als in einem beliebigen Bezugssystem.

Bei neueren Präsentationen der Experimente werden manchmal etwas andere Interpretationen genutzt. Die hier gewählte Zusammenfassung orientiert aber sich an der ersten von Robertson gewählten Darstellung.

Berücksichtigt man die zuvor dargestellten Zusammenhänge bezüglich der Invarianz der Phasengeschwindigkeit des Lichts so ist festzustellen, dass eine Neuinterpretation der Versuche eine verbesserte Erklärung der Vorgänge zur Folge hat, die grundsätzlichen Zusammenhänge gelten jedoch weiter. Michelson-Morley- und Kennedy-Thorndike-Experiment reichen zusammen nicht aus und die Vorgänge eindeutig zu erklären. Es sind aber neben dem Ives-Stilwell-Experiment andere, einfachere Versuche denkbar, die zum gleichen Ergebnis führen (vgl. Kap. 9.2.4).

Es bleibt abschließend die Frage, warum die große Bedeutung des Themas der Invarianz der Phasengeschwindigkeit des Lichts in zueinander bewegten Inertialsystemen nicht schon früher diskutiert worden ist. Die grundsätzlichen Zusammenhänge gehören seit vielen Jahrzehnten zum Standardwissen der Physik [46a]. Der Einfluss der Bewegung der Versuchseinrichtung wurde ebenfalls vielfach diskutiert (z. B. [49,50,51,52]). Außerdem gibt es ausführliche theoretische Arbeiten zur „Invarianz der Phasengeschwindigkeit“ [27]. Trotzdem ist es bisher nicht zu einer Kombination dieser Erkenntnisse gekommen, die eine große Bedeutung für elementare Grundlagen der heutigen Physik haben. Sicherlich hat der konsequente Ansatz zur Betrachtung von ruhenden und bewegten Beobachtern hierzu wesentlich beigetragen.

Abschließend soll noch auf die zwischenzeitlich erreichte hohe Präzision von Messungen und dadurch mögliche grundlegende Definitionen eingegangen werden.

- Im Jahre 1960 wurde die Definition der Länge eines Meters über die Wellenlänge eingeführt: Ein Meter ist demnach das 1650763,73-fache der Wellenlänge der von Atomen des Nuklids ^{86}Kr beim Übergang vom Zustand $5d5$ zum Zustand $2p10$ ausgesandten, sich im Vakuum ausbreitenden Strahlung [87].
- Diese Festlegung hatte viele Jahre Bestand, bevor sie durch eine neuere, noch genauere Definition abgelöst wurde, bei der Zeit als Definitionsgrundlage gewählt wurde. Die Sekunde ist demnach das 9192631770-fache der Periodendauer der dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstrukturniveaus des Grundzustandes von Atomen des Nuklids ^{133}Cs entsprechenden Strahlung [88].

Ohne Das Prinzip der Invarianz der Phasengeschwindigkeit wären beide Definitionen nicht möglich gewesen, da bereits kleinste Bewegungen eines Beobachters zu einem solchen Referenzsystem zu Messabweichungen führen würden.

Es gibt noch einen weiteren Aspekt zu diesem Thema. Hierbei handelt es sich um den „Frequenzkamm“, bei dem mit einem Femtolaser extrem kurze Impulse erzeugt werden, die sich in einem Spiegelsystem überlagern. Dabei entsteht eine stehende Welle, die auch als Kamm bezeichnet wird (zu Hintergrund und historischer Entwicklung siehe z. B. [53]). Bei dieser Technik handelt es sich interessanterweise um eine „hybride“ Erzeugung von Lichtwellen; die kurzen Impulse kann man auch in ihrer Gesamtheit als Wellen auffassen. Eine klassische Interpretation mit einem Frequenzvergleich versagt hier völlig.