

Überlegungen zu einer allgemeingültigen Physik ohne „Kontraktion der Längen“ und „Dilatation der Zeit“

- .
- .
- .

(I) Zur Deutung des Michelsonergebnisses

Zusammenfassung: Es wird gezeigt, dass das unerwartete Ergebnis des Michelsonversuchs (d. h. der Nachweis der Einflusslosigkeit der Raumbewegung der Erde auf das irdische optische Experiment) sowohl mit der Voraussetzung erklärt werden kann, dass die Erde gegen das in der Versuchsanordnung laufende Licht ruht, als auch mit der Annahme, dass die vorausgesetzte Bewegung der Erde gegen die Lichtwellen durch eine „Kontraktion der Längen in Bewegungsrichtung“ und eine „Dilatation der Zeit“ exakt kompensiert und damit der Beobachtung entzogen wird.

1. Der Versuch von Michelson und Morley beweist, dass die Raumbewegung der Erde im Widerspruch zu den Erwartungen der Mehrheit der Physiker des ausgehenden neunzehnten Jahrhunderts keinen Einfluss auf die Parameter der Vakuumlichtfortpflanzung in einer irdischen Versuchsanordnung hat. Insbesondere bleibt die Laufzeit t , die die elektromagnetischen Wellen benötigen, um eine Strecke von der Länge a zurückzulegen, von der Bewegung der Erde und von dem Winkel η , den die Fortpflanzungsrichtung der elektromagnetischen Wellen mit der Richtung der Raumbewegung der Erde einschließt, völlig unberührt. Die mathematische Begründung der mit dem Versuchsergebnis nicht zu vereinbarenden gegenteiligen Erwartung und die Aufhebung dieses Widerspruchs mit Hilfe der „Längenkontraktion“ und der „Zeitdilatation“ soll nachfolgend anhand eines vereinfachten Schemas des Michelsonversuchs erläutert werden.

1. 1. Betrachtet werden nur die aus einer geradlinigen Raumbewegung der Erde folgenden Annahmen. Ein möglicher Einfluss der Rotation der Erde oder einer von den Experimentatoren verursachten Bewegung der Versuchsanordnung relativ zum Laborsystem wird an dieser Stelle nicht diskutiert. Eine schematische Darstellung der Versuchsanordnung und die nachfolgend skizzierte mathematische Ableitung der Laufzeiterwartungen findet der Leser in zahlreichen Publikationen. Insbesondere sei auf das in vielen Auflagen erschienenen Buch von Bernhard Bavink „Ergebnisse und Probleme der Naturwissenschaften“ verwiesen.

1. 2. In der Versuchsanordnung, deren wichtigster Bestandteil ein Michelsoninterferometer ist, wird ein Lichtbündel durch das Prisma P in zwei Halbstrahlen zerlegt. Die in ihnen enthaltenen Halbwellenzüge sind einander kohärent und können somit nach ihrer Wiederausammenführung mit einander interferieren, falls sie wegen eines Laufzeitunterschiedes nicht „in Phase“ sind. Die Halbstrahlen durchlaufen die Apparatur in zwei im rechten Winkel zueinander angeordneten gleichlangen Armen. Nach Reflexion an den Spiegeln $S1$ und $S2$ kehren die Halbstrahlen zum Prisma zurück und gelangen nach ihrer Wiederausammenführung in einen Detektor, in dem mögliche Interferenzerscheinungen gemessen werden.

1. 3. Unter der (seinerzeit verworfenen) Annahme, dass die im Laborsystem ruhende Versuchsanordnung damit auch gegen die Lichtwellen ruht, sind für beide Halbstrahlen unabhängig von den Winkeln η , den die Pendelwege mit der Richtung der Raumbewegung der Erde einschließen, die zurückzulegenden Wege gleich lang: $PS1=PS2=S1P=S2P=a$.

Folglich berechnet sich die benötigte Laufzeit für beide Halbstrahlen für den gesamten Pendelweg gleichlautend zu $t=2a/c$. (1)

In diesem Fall sind die kohärenten Wellenzüge bei ihrer Wiederausführung exakt „in Phase“ und es ist eine Veränderung des Interferenzbildes nicht zu erwarten. Diese Berechnung wäre offensichtlich mit dem tatsächlichen Versuchsergebnis vereinbar.

1. 4. Unter der gegenteiligen (von der Mehrheit der Physiker noch immer favorisierten) Voraussetzung, dass die Apparatur infolge der Raumbewegung der Erde gegen das pendelnde Licht bewegt sei, muss hingegen der von den Lichtwellen durchlaufene Pendelweg nicht nur von verschieden sein, sondern es müssen zusätzlich auch die zurückgelegten Wege der beiden Halbstrahlen, falls sie nicht den gleichen Winkel mit der Bewegungsrichtung der Erde einschließen, unterschiedlich lang sein. In diesem Fall können nach der Wiederausführung die Wellenzüge nicht „in Phase“ sein, was sich in einer Veränderung des Interferenzbildes zu erkennen geben sollte. Wir betrachten den einfachsten Fall, dass der eine Halbstrahl parallel zur Raumbewegung der Erde pendelt, der andere aber im rechten Winkel dazu. Der erstere sei der „Parallelpendler“ genannt, der letztere der „Querpendler“. Bei ihrer Berechnung der Lichtlaufzeiten gingen die Experimentatoren von folgenden Überlegungen aus:

1. 5. Wenn die Relativgeschwindigkeit der auf der Erde ruhenden Versuchsanordnung gegen den „im Raum ruhend“ gedachten (oder durch den „leeren Raum“ selber gegebenen) Träger der Lichtwellen v ist, ergibt sich die Geschwindigkeit, mit der der Parallelpendler den Weg PSI zurücklegt, zu $c-v$, weil sich der vor der herannahenden Wellenfront „fliehende“ Spiegel $S1$ in der Zeit t um die Strecke vt gegen das Isotropiesystem der Wellen und damit gegen die herannahende Welle bewegt. Der zurückzulegende Weg hat somit nicht die Länge a , sondern $a+vt$. Folglich legen die Lichtwellen die Länge der Mess-Strecke auf dem Hinweg zum Spiegel SI nicht mit der Vakuumlichtgeschwindigkeit c , sondern mit der Geschwindigkeit $c-v$ zurück. Auf dem Rückweg kommt das Prisma der Wellenfront mit der Geschwindigkeit v entgegen, so dass sich der zurückzulegende Weg um die Strecke vt verkürzt und somit die Relativgeschwindigkeit des Lichtes gegen die Versuchsanordnung gleich $c+v$ ist. Da die Variabilität der Lichtwege bereits als Variabilität der Lichtgeschwindigkeit berücksichtigt wurde, kann bei der Berechnung der Gesamtlichtlaufzeit die Länge der Mess-Strecke

gleichbleibend mit a eingesetzt werden. Wir erhalten $t_{par} = \frac{a}{c-v} + \frac{a}{c+v}$. Daraus folgt für

$$\text{den gesamten Pendelweg } t_{par} = \frac{2a}{c[1 - (v/c)^2]} \quad (2)$$

Wie man sieht, ist die nach (2) berechnete Lichtlaufzeit nicht identisch mit der nach (1) berechneten: Die Laufzeitverkürzung auf dem Rückweg gleicht die Laufzeitverlängerung auf dem Hinweg nicht vollständig aus.

1. 6. Für den querpendelnden Halbstrahl wurde die Lichtlaufzeit (nach dem kritischen Hinweis eines französischen Lesers der ersten Mitteilung über das Versuchsergebnis) unter Heranziehung des Satzes des Pythagoras berechnet. In der Zeit t , die der Querpendler für den Weg $PS2=a$ benötigt, bewegt sich das Prisma P (d. h. der Ausgangs- und Wiedervereinigungspunkt der Halbstrahlen) nach P' und der Spiegel $S2$ nach $S2'$. Es ergibt sich ein rechtwinkliges Dreieck mit den Eckpunkten P, P' und $S2'$, in dem der rechte Winkel bei P' und der vom Licht in der Zeit t mit der Geschwindigkeit c zurückgelegte Weg auf der Hypotenuse liegt: $PS2'=ct$. Die Kathete PP' hat die Länge vt . Die Kathete $P'S2'$ hat unverändert die Länge a . Aus dem Satz des Pythagoras folgt $(ct)^2 = a^2 + (vt)^2$ und somit

$$t^2 = \frac{a^2}{c^2[1 - (v/c)^2]}, \text{ so dass sich für den Querpendler auf dem Hinweg zum Spiegel nach}$$

Ziehen der Wurzel die Laufzeit zu $t_{quer} = \frac{a}{c\sqrt{1-(v/c)^2}}$ ergibt. Da nach dieser Überlegung der Querpendler auf dem Rückweg zum Prisma eine gleich lange Laufzeit benötigt, ergibt sich seine Gesamtlaufzeit zu $t_{quer} = \frac{2a}{c\sqrt{1-(v/c)^2}}$. (3)

1. 7. Formel (3) zeigt, dass der Querpendler für den zurückzulegenden Pendelweg etwas weniger Zeit benötigen sollte als der Parallelpender. Daraus hätte sich im Vergleich zum Parallelpender eine Laufzeitdifferenz mit einer entsprechenden Phasenverschiebung sowie einer Veränderung des Interferenzbildes ergeben müssen, die aber bekanntlich im Experiment nicht gefunden wurde.

2. Michelson selber schloss aus dem unerwarteten Versuchsergebnis, dass die Erde (im Widerspruch zur Maxwell-Lorentzschen Elektrodynamik) gegen die in der Versuchsanordnung pendelnden Lichtwellen *ruht*, weil der „Äther“ als Isotropiesystem dieser Wellen zur Gänze von der Erde „mitgeführt“ wird. Diese Schlussfolgerung war (und ist bis heute) für die Mehrheit der theoretischen Physiker aus Gründen, die an anderer Stelle ausführlicher dargelegt werden sollen, auch deswegen nicht akzeptabel, weil sie der Annahme widerspricht, dass alle im Raum bewegten Körper damit grundsätzlich auch gegen das Licht bewegt sind. Daher beschloss K. A. Lorentz, die Laufzeiterwartung durch einen entsprechenden Korrekturfaktor an das Versuchsergebnis anzupassen: Die „unerwünschte“, weil dem Versuchsergebnis widersprechende rechnerische Laufzeitdifferenz ist durch den Faktor $\sqrt{1-(v/c)^2}$ gegeben. Sie verschwindet, wenn man in Formel (2) die Länge a mit

diesem Faktor multipliziert. Aus $t_{par} = \frac{2a\sqrt{1-(v/c)^2}}{c[1-(v/c)^2]}$ erhält man die korrigierte

Gesamtlaufzeit des Parallelpenders zu $t_{par} = \frac{2a}{c\sqrt{1-(v/c)^2}}$ (4)

und somit exakt die gleiche Laufzeit, wie sie nach Formel (3) für den Querpendler berechnet wurde. Da nach dieser mathematischen Korrektur die berechnete Laufzeit zumindest insofern mit den Beobachtungsdaten übereinstimmt, dass ein Laufzeitunterschied nicht zu erwarten ist,

darf geschrieben werden: $t_{par} = t_{quer} = \frac{2a}{c\sqrt{1-(v/c)^2}}$. (5)

Ausweislich dieser Berechnung müssen die wieder zusammengeführten Wellenzüge „in Phase“ sein, was erklären würde, warum eine signifikante Veränderung des Interferenzbildes nicht gefunden wurde.

2. 1. Das von Lorentz angewendete Verfahren zur mathematischen Egalisierung der Laufzeiten hat den Vorzug, dass es eine einfache physikalische Deutung erlaubt: Die Multiplikation der Strecke a mit dem Faktor der „Längenkontraktion“ kommt einer Verkürzung des Mess-Weges und somit der Vorgabe gleich, dass dem Parallelpender ein Stück des zurückzulegenden Weges erspart wird. Wenn dann zusätzlich noch angenommen wird, dass sich die Länge nur „in Bewegungsrichtung“ der Apparatur verkürzt, nicht aber quer dazu, kommt die mathematische Operation einem Handicap für den Querpendler gleich – er profitiert nicht von der „Kontraktion der Längen“ und verliert dadurch den ursprünglich für ihn berechneten Laufzeitvorsprung. Seither kennt die moderne Physik eine geschwindigkeitsabhängige „Verkürzung der Längen in Bewegungsrichtung“, die meistens als „Lorentzkontraktion“ bezeichnet wird. Ein Eingehen auf die Kontroverse um die physikalische Realität dieser Längenkontraktion lohnt sich nur, wenn man überhaupt die Notwendigkeit für eine derartige Annahme sieht.

3. Mit diesem Ergebnis hätte man sich zufriedengeben können, wenn da nicht ein wichtiger Umstand gewesen wäre. Aus der unstrittigen Geltung des Relativitätsprinzips im irdischen optischen Versuch folgt, dass der Bewegungszustand des Bezugssystems Erde durch ein systeminternes optisches Experiment nicht festgestellt werden kann. Im Widerspruch zu dieser Forderung enthält die von Lorentz abgeleitete Formel (5) aber die

Raumgeschwindigkeit v des Planeten Erde. Es war somit ad hoc ein zweites mathematisches Verfahren zu ersinnen, um v aus dieser Formel zu entfernen. Andere Physiker (meistens werden die Namen Voigt und Lamor genannt) machten deshalb den Vorschlag, zusätzlich zur „Kontraktion der Längen in Bewegungsrichtung“ eine „Dilatation der Zeit“, d. h. eine Dehnung der Zeit, anzunehmen. Wenn man in (5) auf der linken Seite die Zeit t mit dem

Faktor $\frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$ multipliziert, wächst der „Gebrauchswert“ der Zeit

geschwindigkeitsabhängig und man erhält aus $t \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} = \frac{2a}{c\sqrt{1 - (v/c)^2}}$ nach Kürzung

die für den Pendelweg in beliebiger Richtung geltende Laufzeitformel $t_{par} = t_{quer} = \frac{2a}{c}$, (6)

in der die Translationsgeschwindigkeit der Erde nicht mehr enthalten ist. Wie man sieht, ist dies exakt jene Zeit, die weiter oben unter der Annahme einer gegen das Licht ruhenden Mess-Strecke nach (1) für die Lichtlaufzeit in beliebiger Richtung berechnet wurde.

4. Seither gibt es zwei alternative Hypothesen zur Begründung des Michelsonergebnisses und des aus ihm folgenden Relativitätsprinzips in der Optik, die zwar die gleiche Erklärungsmächtigkeit, aber ein sehr unterschiedliches wissenschaftliches Prestige haben: Relativistisch erklärt sich das Michelsonergebnis in der Tat mit der Annahme, dass die Versuchsanordnung zwar gegen die in ihr pendelnden Lichtwellen bewegt sei, dass diese Bewegung aber nicht effektrelevant ist, weil sie infolge der „Längenkontraktion“ und der „Zeitdilatation“ exakt kompensiert und somit der Beobachtung entzogen wird. Weniger aufwendig erklärt sich allerdings das Michelsonergebnis mit der Annahme, dass die in der Versuchsanordnung pendelnden elektromagnetischen Wellen die Raumbewegung der Erde aus einem noch zu definierenden Grund mitvollziehen. Es bleibt jedoch die Frage, ob die letztere Hypothese physikalisch plausibel und widerspruchsfrei begründet werden kann. Man wird diese Frage am ehesten für diskussionswürdig halten, wenn sich zeigen lässt, dass die von Lorentz u. a. vorgeschlagene Begründung des Relativitätsprinzips in der Optik nicht widerspruchsfrei ist. Diese Frage wird im nächstfolgenden Abschnitt erörtert.

08.05.2012

Oskar Törne