

Horst P. H. Melcher

Der bewegte Stab ist nicht verkürzt

Die physikalisch-sachgemäße Erklärung des Michelson-Versuches

In memoriam Abraham Pais (1918-2000)

Veröffentlicht: 08.02.2017

Zusammenfassung

Noch immer werden ausnahmslos und dabei physikalisch unbefriedigend der Michelson-Morley-Versuch (MMV) sowie dessen Varianten mit Hilfe der aus der Äthertheorie bekannten Lorentz-Kontraktion (LK) interpretiert. Im Gegensatz dazu wird hier gezeigt, dass an Stelle dieser hypothetischen Kontraktion für die korrekte Behandlung des physikalischen Problems allein die sachgemäße relativistische Addition von Geschwindigkeiten in Frage kommt. Seit der Speziellen Relativitätstheorie (SRT) ist bekannt, dass die Behandlung der Superposition von Geschwindigkeiten, bei denen die Vakuum-Lichtgeschwindigkeit (VLG) auftritt, niemals mit der klassischen (linearen) Gleichung vorgenommen werden darf. Das bedeutet, dass der MMV nicht klassisch, sondern relativistisch zu interpretieren ist. Damit ist schließlich klar, dass die ursprüngliche (klassische) Ausgangsgleichung mit dem positiven Erwartungswert dem korrekten experimentellen Nullergebnis widersprechen muss. Schließlich ist zu betonen, dass die beim MMV verwendete LK der Äthertheorie begrifflich von jener Längenkontraktion der SRT unterschieden werden muss, obwohl beide dieselbe mathematische Form aufweisen.

Die inkorrekte (klassische) Gleichung für den Lichtversuch nach Michelson

Mit Hilfe einer genialen Messapparatur, dem von Michelson konstruierten Interferometer, wurde versucht, den Äther nachzuweisen, der als hypothetisches Trägermedium für Lichtwellen galt. Bei der Bewegung der Erde um die Sonne müsste ihr ein vermeintlicher den Weltraum erfüllender Äther als Wind der Geschwindigkeit entgegenwehen von der Größe der Erdbahngeschwindigkeit $v = 30 \text{ km/s}$. Der Grundgedanke, der der Messung von v zugrunde liegt, besteht darin, einen Unterschied der Lichtgeschwindigkeit zu ermitteln, der sich in verschiedenen Ausbreitungsrichtungen gegenüber der Fahrtrichtung ergeben müsste.

Zur Prüfung dieses physikalischen Sachverhaltes wurde in Anbetracht der bekannten Geschwindigkeitszusammensetzung mechanisch bewegter Körper die Ausgangsgleichung (1) aufgestellt. Folgender Sachverhalt ist jedem Radfahrer bekannt: Seine Geschwindigkeit u setzt sich mit Rückenwind zu $u + v$ und bei Gegenwind zu $u - v$ zusammen. Bei Seitenwind (90° und 270°) beträgt die resultierende Geschwindigkeit bei Anwendung des Pythagoras $\sqrt{u^2 - v^2}$. Legt man jeweils dieselbe Strecke l hin und zurück bei den unterschiedlichen Windrichtungen, aber gleicher Windgeschwindigkeit, so ergibt sich, dass die Fahrzeit bei Rück- und Gegenwind größer ist als die beiden Zeiten bei Seitenwind:

$$\Delta t = \frac{l}{u+v} + \frac{l}{u-v} - \left(\frac{l}{\sqrt{u^2 - v^2}} + \frac{l}{\sqrt{u^2 - v^2}} \right) > 0 \quad (1)$$

Diese Gleichung ist inkorrekt, wenn $u = c$ Vakuum-Lichtgeschwindigkeit (VLG) gesetzt wird. Die Fehlerhaftigkeit ist bereits einsehbar, da dann in der Gleichung (1) wegen $c + v$ eine Überlichtgeschwindigkeit auftritt, die es (in dieser Art) in der Realität nicht gibt. Damit sind sämtliche Rechnungen und Gleichungen, die aus (1) mit $u = c$ folgen, unreal.

Zur großen Überraschung der meisten Physiker erbrachten die Messungen bei Lichtversuchen vom Michelson-Typ im Rahmen der Messfehler nicht den Erwartungswert $\Delta t > 0$, aus dem man den Wert $v = 30$ km/s hätte errechnen können, sondern $\Delta t = 0$ und damit $v = 0$. Man sprach sogar von einem „negativen“ Ergebnis der Versuche. Der Wert $v = 0$ bringt zwar eine Übereinstimmung zwischen der theoretischen Gleichung mit dem Messergebnis, was auch eine Erklärung mit Hilfe des Relativitätsprinzips (RP) nahelegt: In keinen auf der Erde ablaufenden Vorgang (Prozess) geht die Erdgeschwindigkeit ein. Gemäß dem speziellen RP verlaufen nämlich alle Versuche unterschiedslos, ob sie im ruhenden oder geradlinig mit gleicher Geschwindigkeit bewegten Labor (Inertialsystem) ausgeführt werden.

Die Gleichung (1) ist dennoch unbefriedigend, da man ja auch für endliche Geschwindigkeiten, also für $v \neq 0$, gemäß dem RP $\Delta t = 0$ erwarten muss. Demzufolge erbrachten auch Michelson-Versuche mit bewegten Lichtquellen (Sonnen-, Planeten- und Sternlicht) Nullergebnisse. Die Fehlinterpretation „Der bewegte Stab ist verkürzt“ wird hier durch die sachgemäße (relativistische) Interpretation der Superposition der Geschwindigkeiten ersetzt.

Die künstliche Gleichung der Ätherphysik zur Interpretation des MMV

Auf der Grundlage der Ätherphysik behaupteten G. F. FitzGerald (1889) und H. A. Lorentz (1892), dass ein in Längsrichtung zum Äther bewegter Gegenstand eine Stauchung (ohne Bauchung) erfährt, so dass dabei also seine Querdimensionen unverändert bleiben würden. Jedoch könne diese Gestaltsänderung durch keinen Versuch nachgewiesen werden. Mit Bezug auf diese Lorentz-

Kontraktion (LK) $l \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ die von der relativistischen Kontraktion trotz mathematischer Gleichheit und häufig benutzter gleicher Bezeichnung begrifflich unterschieden werden muss, erhält man dann an Stelle der Gl. (1) diese künstliche Gleichung

$$\Delta t = \frac{l \cdot \sqrt{1 - v^2/c^2}}{c + v} + \frac{l \cdot \sqrt{1 - v^2/c^2}}{c - v} - \left(\frac{l}{\sqrt{c^2 - v^2}} + \frac{l}{\sqrt{c^2 - v^2}} \right) = 0. \quad (2)$$

Die ursprüngliche (inadäquate) Gleichung ist hier durch einen physikalisch unbegründeten Akt (per Gewalt) in Übereinstimmung mit dem Nullresultat des Messergebnisses gebracht worden. Obwohl im Nenner der ersten Gliedes noch immer die irrealen Überlichtgeschwindigkeit erscheint, die Inkorrektheit also leicht erkennbar ist, die in Lehrbüchern zur SRT unangetastet bleibt.

Einstein hat wiederholt die Interpretation des MMV mit der Kontraktion der Lorentzschen Theorie ablehnend kritisiert, was offenbar bis dato unbeachtet geblieben ist, denn man bedient sich nach wie vor ausschließlich der Kontraktion dieser Äthertheorie. Einstein stellte seiner Arbeit von 1907 „Über das Relativitätsprinzip“ [1] u. a. folgende Worte über die LK voran: „Diese ad hoc eingeführte Annahme erschien mir aber doch nur als ein künstliches Mittel, um die Theorie zu retten.“ Und weiter liest man, dass das Relativitätsprinzip (RP) „das negative Ergebnis des Versuches von Michelson und Morley ohne weiteres voraussehen“ ließe. Einstein gibt eine korrekte Gleichung für den MMV nicht an, die außer dem RP noch dem Unabhängigkeitsprinzip „c gleich konstant“ genügen müsste.

Sein Unbehagen bezüglich der LK bringt Einstein auch in seiner Botschaft zu Michelsons 100. Geburtstag 1952 zum Ausdruck, in der er u. a. allgemein darlegt, wie man zu einer Theorie gelangt bzw. eine solche aufstellt (und nicht „findet“). Mit Bezug auf die Kontraktion der Äthertheorie schreibt

Einstein: „Lorentz' Grundannahme vom ruhenden Äther erschien mir gerade deshalb nicht überzeugend, weil sie zu einer Interpretation des Michelson-Morley-Experimentes führte, die mir unnatürlich erschien“.

Die sachgemäß-korrekte Interpretation des Null-Ergebnisses des MME

Einstein lehnt zu Recht die Interpretation des Null-Ergebnisses durch die Kontraktion der Äthertheorie ab. Er gibt allerdings die notwendigerweise aus seiner SRT zu folgernde Interpretation nicht an. Lehrbücher der SRT begnügen sich bei der Deutung des MMV mit der Kontraktion aus der Äthertheorie ohne kritische Bemerkungen. Einige schreiben sogar, dass die Interpretation der Null-Ergebnisse einzig und allein mit Hilfe der Kontraktion aus der Äthertheorie möglich sei.

Unter der Kapitelüberschrift „Der bewegte Stab ist verkürzt“, mit Bezug auf den in Vorwärtsrichtung weisenden Arm der Michelson-Apparatur, wird von H. Günther das Null-Ergebnis mit folgenden Worten begründet. „Die Erklärung des Michelson-Experimentes wird danach heute als FITZGERALD-LORENTZ-Kontraktion oder kurz LORENTZ-Kontraktion bezeichnet“. Diese „Erklärung“ wird noch durch den abschließenden Satz bekräftigt: „Die Differenz der Laufzeit-Differenzen wird durch die Drehung nicht geändert, wenn wir die LORENTZ-Kontraktion bewegter Längen beachten, so dass auch keine Änderung des Interferenzbildes erwartet werden kann“ [2, S.36]. Das Kapitel „Der bewegte Stab ist verkürzt – Das Michelson-Experiment“ ist praktisch unverändert auch in seinem nachfolgenden Buch „Die Spezielle Relativitätstheorie – Einsteins Welt in einer neuen Axiomatik“ enthalten [3, S. 38-45].

Wikipedia (2012) bemüht bei der Erklärung des MMV ebenfalls allein die Äthertheorie. Man liest dort: „In einem mit v bewegten Bezugssystem, in dem das Interferometer ruht, sind die Laufzeiten gleich. Betrachtet man ein Bezugssystem, in dem sich das Interferometer mit der Geschwindigkeit v bewegt und die Lichtgeschwindigkeit weiter unverändert ist, erklärt man sich das Ergebnis wie oben erklärt mit der Lorentzkontraktion. **Diese Erklärung wird als die derzeit gültige angesehen.**“ Dieser Wikipedia-Artikel wurde vom SPIEGEL kommentarlos nachgedruckt. In der verwirrenden Fülle nicht notwendiger Angaben zum MME findet man auch bei Wikipedia 2016 fast unverändert dieselbe unbefriedigende „Erklärung“ wie 2012. Eine Anzahl weiterer Bücher mit der Äther-Interpretation des MMV sind in [4] angegeben.

Günther schreibt [2, S. 45], dass wir stillschweigend von der Annahme ausgegangen seien, dass die Arme des Interferometers nicht unabhängig von der Geschwindigkeit sind. „Darin liegt der Fehler“. Diese Aussage und Denkweise sind inakzeptabel. Der „Fehler“ liegt allein darin, dass man bei der Erklärung des MME die klassische Zusammensetzung von Geschwindigkeiten beibehält, selbst wenn dabei die VLG auftritt. In diesem Fall ist jedoch nicht mehr das lineare, sondern das nichtlineare, das relativistische Additionstheorem anzuwenden. Geht man von den beiden Einsteinschen Axiomen (Prinzipien) der SRT aus, auf denen die Lorentz-Transformation beruht, so findet man daraus für die Zusammensetzung der Geschwindigkeiten u und v , die den Winkel φ einschließen, die Resultante

$$w = \frac{\sqrt{u^2 + v^2 + 2uv \cos \varphi - \left(\frac{uv \sin \varphi}{c}\right)^2}}{1 + \frac{uv \cos \varphi}{c^2}}. \quad (3)$$

Diese Gleichung, zuerst von Einstein in seiner Gründungsarbeit der SRT angegeben [5], ist das allgemeingültige (relativistische) Gesetz für Geschwindigkeitszusammensetzungen, der „relativistische Kosinussatz“ für Geschwindigkeiten $u \leq c$ und $v \leq c$. Der klassische Kosinussatz ist hierin als Spezialfall für kleine Geschwindigkeiten gegenüber der VLG enthalten: $u \ll c$ und $v \ll c$, also für $\frac{uv}{c^2} \ll 1$

Gemäß dem klassischen Kosinussatz $w_{kl} = \sqrt{u^2 + v^2 + 2uv \cos \varphi}$ mit den vier in Frage kommenden Winkeln sind die Gleichungen (2) und (3) berechnet worden. Eine künstliche Übereinstimmung mit dem Null-Resultat des Experimentes wurde mit (3) dadurch erzielt, dass die Längsrichtungen noch mit dem Lorentzischen Wurzelfaktor multipliziert worden sind. Der klassische Kosinussatz führt nur für gegenüber c kleine Geschwindigkeiten bei einer graphischen Darstellung zu Parallelogrammen.

Im Unterschied zum klassischen Kosinussatz erhält man mit der sachgemäßen Gleichung (3) ohne jegliches Dazutun sofort eine Übereinstimmung mit dem Messresultat $\Delta t = 0$ für $u = c$ sowie für alle Winkel $0 \leq \varphi \leq 360^\circ$, und auch nicht wie in (2) allein für zwei spezielle Richtungen. Diese Gleichung ist der Ausdruck für die Isotropie der Lichtausbreitung, die im Lichtversuch von Michelson und Morley gemessen wurde.

Berechnet man die vier resultierenden Geschwindigkeiten der Gleichung (2) nunmehr relativistisch gemäß (3), so erhält man

$$\Delta t = \frac{l \left(1 + \frac{cv}{c^2}\right)}{c + v} + \frac{l \left(1 - \frac{cv}{c^2}\right)}{c - v} - \frac{2l}{\sqrt{c^2 + v^2 - \left(\frac{cv}{c}\right)^2}} = 0. \quad (4)$$

Das Ergebnis von (4), nämlich

$$\Delta t = \frac{2l}{c} - \frac{2l}{c} = 0,$$

bedeutet, dass die Lichtlaufzeit in den beiden Armen der MM-Apparatur gleich ist, dass sich das Licht in beiden Armen mit derselben Geschwindigkeit ausbreitet. Man kann die Anordnung auch als zwei Uhren betrachten, die denselben Takt haben. Im Gegensatz zu diesem natürlichen Sachverhalt wird auf dem Einband des Buches von Rebhan [6] für die gleichlangen Arme l des Michelson-Interferometers eine unterschiedlich lange Lichtlaufzeit angegeben, ohne daß im Text eine Aufklärung erfolgt.

Die Länge l ist hier nicht wie in (2) notwendig zweimal mit einem künstlichen Wurzelfaktor verbunden; sie spielt für die unterschiedlichen Geschwindigkeitsrichtungen überhaupt keine Rolle. Es gibt also keine LK. Eine solche Kontraktion ist beim MMV unreal. Der bewegte Stab ist also nicht verkürzt.

An Stelle der klassischen Gleichung (1), die für die VLG nicht gilt, was betont werden sollte, ist die relativistische Gleichung (3) zutreffend. Man erkennt, dass die Lorentz-Kontraktion der Äthertheorie zur Interpretation des Messergebnisses sowohl überflüssig als auch unzutreffend ist. Die relativistische Längenkontraktion spielt beim MMV keine Rolle, sie wird allein bei speziellen Messproblemen angewendet. Die Interpretation des MMV wird häufig mit der Kurzbemerkung „ c gleich konstant“ abgetan. Jedoch ist bei der mathematischen Begründung nicht dieses Prinzip allein ausschlaggebend, sondern notwendig und hinreichend sind die beiden Prinzipien der SRT. Die häufig zu findende Aussage, dass der MMV das Prinzip „ c gleich konstant“ beweisen würde, ist unzutreffend. Irrtümlich ist auch die Aussage, dass der MMV der experimentelle Ausgang zur SRT gewesen sei. Es führt kein direkter logischer Weg vom Experiment zur Theorie. Während es bei Günther [3, S.20] heißt, dass der MMV ein „Schlüsselexperiment der SRT“ sei, wird hier gezeigt, dass eben nicht das Rudiment der Kontraktion aus der Äthertheorie als Interpretation (auch nach Günther) in Frage kommt, sondern das Additionstheorem für Geschwindigkeiten der SRT der Gleichung 3. Diese sachgemäße Interpreta-

tion steht nun gewissermaßen nicht am Beginn wie die „Kontraktions-Axiomatik“, sondern am Ende der SRT.

In unseren persönlichen Diskussionen an der Rockefeller University (1987) hat Abraham Pais, der beste Einstein-Kenner, von seiner Annahme in seinem berühmten Einstein-Buch [7, p.172, dt. Ausgabe S. 172] Abstand genommen, dass Einstein den Einfluss des MMV auf seine SRT-Arbeit „heruntergespielt“ hätte.

Das anschauliche Axiom einer irrealen Längenverkürzung (Stauchung ohne Bauchung) durch den Äther geistert seit mehr als 100 Jahren noch immer durch Lehrbücher der SRT. Es sollte endlich durch die relativistische Superposition von Geschwindigkeiten hinfällig und als Rudiment der Äthertheorie überflüssig und überwunden sein. Die hier begründete Irrealität der Längen-Kontraktion bezieht sich auf alle Versuche vom Michelson-Typ, bei denen die Geschwindigkeitszusammensetzung nach dem klassischen Kosinussatz erfolgt; das ist z. B. auch beim Versuch von Kennedy und Thorndike der Fall [8]. In der Arbeit [9] wird die Interpretation des MMV auf der Grundlage der klassischen Geschwindigkeitsaddition vorgenommen, so dass sie als unzutreffend angesehen werden muss. Ein häufig und gern von mir zitierter Ausspruch Einsteins trifft auch auf die natürliche relativistische Interpretation des MMV zu: „Die Physik ist nicht anschaulich, die Physik ist begrifflich“.

Literatur

- [1] Einstein, A.: Das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen. Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik **4** (1907) 411-468.
- [2] Günther, H.: Starthilfe Relativitätstheorie. Ein neuer Zugang zu Einsteins Welt. 2. überarbeit. und erw. Aufl. B.G. Teubner Stuttgart, Leipzig 2004.
- [3] Günther, H.: Die Spezielle Relativitätstheorie. Einsteins Welt in einer neuen Axiomatik. Springer Spektrum, Wiesbaden 2013.
- [4] Melcher, H.: Irrtümer und Fehlinterpretationen bei Versuchen vom Michelson-Typ. Leibniz Online, Nr. 22 (2016). Zeitschrift der Leibniz-Sozietät e. V. ISSN 1863-3285.
- [5] Einstein, A.: Zur Elektrodynamik bewegter Körper. Ann. Phys. **17** (1905) 891-921.
- [6] Rebhan, E.: Theoretische Physik: Relativitätstheorie und Kosmologie. Springer Spektrum, Berlin 2012.
- [7] Pais, A.: `Subtle is the Lord` The Science and the Life of Albert Einstein. Oxford University Press, New York 1982. Deutsche Ausgabe: Albert Einstein. Eine wissenschaftliche Biographie. Vieweg, Braunschweig/Wiesbaden 1986.
- [8] Kennedy, R. J., E. M. Thorndike: Experimental Establishment of the Relativity of Time. Phys. Rev. **42**(1932) 400-418.
- [9] Pfarr, J.: Zur Interpretation des Michelson-Versuchs. In: Grundlagenprobleme der modernen Physik. Hrsg. J. Nitsch, J. Pfarr und E.-W. Stachow. BI, Zürich 1981.

Adresse des Verfassers:
Prof. Dr. Horst Melcher: homelcher@aol.com