



Horst P. H. Melcher

Irrtümer und Fehlinterpretationen bei Versuchen vom Michelson-Typ

Erweiterte Fassung des Vortrages vom 12. November 2015 in der Klasse Naturwissenschaften und Technikwissenschaften der Leibniz-Sozietät

Das physikalische Ziel dieser Abhandlung ist es, die noch immer anzutreffende Lorentzsche Theorie mit ihrer unnatürlichen Längenkontraktion (LK) als Erklärung bzw. Interpretation überflüssig bzw. verzichtbar zu machen. Es wird gezeigt, dass diese legendäre Kontraktionshypothese durch die physikalisch sinnvolle (nichtlineare) Geschwindigkeits-Addition zu ersetzen ist.

Anlass zu diesem Vortragsthema zum 100. Jahrestag der Vollendung der Allgemeinen Relativitätstheorie durch Albert Einstein ist der Beitrag Einsteins, in dem er 1907 erstmals seine Gedanken zur Entwicklung der ART niedergeschrieben und diesem Artikel kritische Bemerkungen zur Interpretation des Michelson-Morley-Experimentes (MME) vorangestellt hat. Einsteins Hinweise, die er 1951 wiederholt hat, ohne selbst eine Lösung zu geben, werden nach mehr als drei Generationen in der Gegenwartsliteratur über den Michelson-Versuch (MV) noch immer nicht beachtet. Es soll u. a. auch deutlich werden, warum der MV in Einsteins Arbeiten nicht jene Bedeutung gefunden hat, die manche Autoren aus welchen Gründen auch immer erwartet hätten.

Eine Vielzahl von Bezugnahmen auf die Ätherdrift-Versuche vom Michelson-Typ weist bezüglich der Interpretation Mängel prinzipieller Art auf. Man zitiert zwar die Nullresultate dieser Experimente, einen hypothetischen Ätherwind endlicher Geschwindigkeit aufzufinden, begründet dann aber – bis auf den heutigen Tag – die Nullresultate doch mit einem Effekt, der auf eine Ätherexistenz zurückgeführt wird, nämlich mit der aus der Lorentzschen Äthertheorie folgenden Kontraktion bewegter Körper. Diese LK wird noch immer auch als einzige Interpretation offeriert, ohne dabei auf ihre Unnatürlichkeit hinzuweisen. Vom Verzicht der Lorentz-Kontraktion der Äthertheorie bleibt dabei die begrifflich zu unterscheidende relativistische Kontraktion unberührt.

Es gibt keinen direkten logischen Weg, der von einem Experiment weder zum Begriffssystem der Speziellen Relativitätstheorie (SRT) noch zur Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) führt. In Verkennung dieser Tatsache wird der Michelson-Versuch (MV) bei didaktischen Einführungen in die SRT geradezu missbraucht, anstatt die große Chance zu nutzen, in die deduktive Methode der Erkenntnisgewinnung einzuführen, die noch immer gegenüber der althergebrachten „Vom Experiment zur Theorie“ so gut wie völlig vernachlässigt wird.

In Anbetracht der vielen unnötigen Neben-, Um- und Irrwege sollte man schon aus Zeitgewinn und wegen der Vermittlung klarer relativistischer Denkweisen auf verwirrende Darstellungen zum Äther verzichten, so dass überholte Denkweisen in das Gebiet der Wissenschaftsgeschichte gehören, ohne dabei die große Rolle der Physik in der Kulturgeschichte der Menschheit zu vernachlässigen.

Das Relativitätsprinzip und der Michelson-Versuch

Zur frühen Erfahrungswelt gehören bereits solche Tatsachen: 1. Man fragt sich im haltenden Zug, fährt unser Zug oder der Nachbarzug, wenn man keinen Außenvergleich hat. 2. Rollende Kugeln (Billard) verhalten sich im haltenden Zug wie im gleichmäßig geradeaus fahrenden Zug. 3. Das gilt auch für Versuche z. B. mit Wasser- oder Luftpistolen, ob man längs oder quer zur Fahrtrichtung schießt. Schussweite und Schussrichtung sind im Abteil unabhängig von dessen Fahrt- oder Fluggeschwindigkeit. Nun entsteht die Frage, wie das wohl wäre, wenn die mechanischen Versuche durch Lichtversuche ersetzt werden, indem man an Stelle der Luftpistole z. B. eine Laserpistole (oder Taschenlampe)

verwendet. Man ist geneigt, dieses seit Galilei für die Mechanik bekannte Relativitätsprinzip ohne weiteres auch für das Gebiet der optischen Versuche zu akzeptieren. Doch halt! Diese Versuche gelten für haltende und fahrende Labors nur, wenn kein Wind durch das Abteil bzw. Labor weht, also ein geschlossenes System vorliegt. Ein Fahrtwind würde sich z. B. bei Federballspielen und akustischen Versuchen auswirken. Da gab es bei den Lichtversuchen Bedenken von Seiten der Äthertheoretiker wegen eines vermeintlich wirkenden Fahrtwindes, nämlich eines Ätherwindes, der der Erde in einem ruhend angenommenen Äther entgegenwehen könnte. In Analogie zu Wasser- oder Schallwellen, die zur Ausbreitung jeweils ein Trägermedium erforderten, sollte auch ein Lichtmedium (genannt Äther) für die Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen notwendig sein. Auf der Suche nach diesem Medium ist unter vielen anderen Versuchen der von Michelson 1881 in Potsdam bzw. der 1887 verbesserte Versuch von Michelson gemeinsam mit Morley durchgeführte am bekanntesten geworden.

Michelson versuchte mit Hilfe eines genial von ihm konstruierten Interferometers den hypothetischen Äther aufzuspüren, indem er die Ausbreitung von Lichtstrahlen in unterschiedlichen Richtungen zur Geschwindigkeit der Erde auf Ihrer Bahn um die Sonne verglich. Um sichere Aussagen zu machen, war eine Messung von mindestens 10^{-16} s nötig. Die direkte Messung so kurzer Zeiten ist nicht möglich. Sie lassen sich allerdings durch Vergleichs- bzw. Differenzmessung ermitteln. Mit dem Michelson-Interferometer gelingt es, aus Änderungen eines Interferenzmusters, das bei Vergleichsmessungen entsteht, Zeitunterschiede dieser Größenordnung zu ermitteln.

Um das Prinzip dieser Michelson-Messungen zu demonstrieren, genügt es, mit zwei getrennten gleichlangen Stäben oder Rohren (jeweils ca. 1 m lang) zu hantieren. Das eine Rohr werde in Ost-West-Richtung und das andere in Nord-Süd-Richtung gehalten. Diese rechtwinklig ausgerichteten Rohre der Länge l können einen gemeinsamen Ausgangs- oder Nullpunkt haben. Längs der Strecke l laufen jeweils hin und zurück Lichtwellen, die dafür die Zeit $2l/c$ benötigen; c ist Vakuumlichtgeschwindigkeit (VLG). Vom Westen her wehe ein hypothetischer Ätherwind als Träger der Lichtwellen, der als Rücken- und Vorderwind die nunmehr folgende Gesamtlaufzeit in x -Richtung benötige

$$t_x = \frac{l}{c-v} + \frac{l}{c+v}.$$

Bei West-Ost-Seitenwind ergibt sich durch Zusammensetzung mit dem Pythagoras für 90° und 270° für die Fahrtdauer in y -Richtung die Gesamtzeit

$$t_y = \frac{l}{\sqrt{c^2-v^2}} + \frac{l}{\sqrt{c^2-v^2}}.$$

Wegen $t_x > t_y$, lässt sich aus dem Vergleich, also aus der Differenz beider Laufzeiten in unterschiedlicher Richtung, aus $\Delta t = t_x - t_y$ schließlich v berechnen:

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

Dieser (theoretische) Erwartungswert $\Delta t > 0$ wurde von Michelson (1881) sowie von Michelson und Morley und von den zahllosen nachfolgenden Experimentatoren nicht gemessen. Es wurde stets (innerhalb der Messgenauigkeit) ein Null-Resultat $\Delta t = 0$ ermittelt und daraus $v = 0$.

Die Übereinstimmung zwischen der theoretischen Erwartung und dem experimentellen Ergebnis liefert die an Stelle von (1) wegen $v = 0$ adäquate Gleichung (2)

$$\Delta t = \frac{2l}{c} - \frac{2l}{c} = 0. \quad (2)$$

Mit diesen Ätherdrift-Versuchen und mit anderen Experimenten wurden ein Ätherwind und damit ein (ruhender) Äther nicht festgestellt. Einstein hat in seiner SRT überhaupt auf einen Äther verzich-

tet. Die Tatsache, dass die Geschwindigkeit des Labors gegenüber irgendeinem anderen Bezugssystem keine Rolle spielt, also in Messungen gleich welcher Art nicht eingeht oder berücksichtigt werden müsste, ist der Inhalt des Relativitätsprinzips. Das klassische nur auf die Mechanik bezogene Relativitätsprinzip von Galilei wurde von Einstein als Spezielles Relativitätsprinzip (SRP) für physikalische Sachverhalte und Prozesse aller Art in Inertialsystemen erweitert.

Die beiden gleichlangen Arme des Interferometers, hier schematisch durch die beiden gleichlangen Rohre oder Stäbe realisiert, die getrennt an beliebigen Orten in beliebigen Lagen des dreidimensionalen Raumes angebracht werden könnten, können als zwei Uhren aufgefasst werden. Sie haben denselben Zeittakt („Tick-tack“) in jeder Lage und an allen Orten des Raumes und können durch beliebige Uhren anderer Bauart ersetzt werden.

Beim MV liegen nicht zwei Inertialsysteme vor. Lichtquelle (Sender) und Empfänger (Auge, Fotoplatte) befinden sich nämlich im konstanten Abstand zueinander, ohne dass dazwischen noch ein strömendes Medium vorhanden wäre. Die Prozesse finden in ein und demselben Inertialsystem statt, ohne Verbindung zu einem zweiten.

Umdeutung des Messergebnisses $v = 0$ in die unnatürliche Ätherauffassung $v \neq 0$

Von Äthergläubigen wurde das Messresultat $\Delta t = 0$ beklagt und ignoriert. Da der von ihnen erhoffte Wert $v > 0$ (etwa der Wert der Geschwindigkeit der Erde auf ihrer Bahn um die Sonne) seinerzeit und bis heute generell nicht gemessen werden konnte, sprach man in der Enttäuschung sogar unzutreffend von einem „negativen Ergebnis“. Das reale Messergebnis, also $\Delta t = 0$, aus dem ja $v = 0$ zu folgern wäre, wurde gewaltsam mit einer sog. Ad-hoc-Hypothese herbeigeführt, wonach sich Körper in Bewegungsrichtung jeweils in Abhängigkeit von v stets genau um den Betrag verkürzen sollten, dass sich das zu messende Nullresultat ergeben sollte.

Zu diesem Zweck bringt man die Ausgangsgleichung (1) auf folgende Form

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

Multipliziert man den ersten Term in der Klammer mit $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$, dann erhält man mit dieser kürzeren Länge für $v \neq 0$ den (gewünschten) Wert $\Delta t = 0$. Diese Längenverkürzung

$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ wird als Lorentz-Kontraktion (LK) bezeichnet. Sie muss von der formal gleichen relativistischen Kontraktion begrifflich unterschieden werden.

Die offenbar beliebte Weiterführung der Gleichung (ohne Längenverkürzung in Bewegungsrichtung) führt schließlich nach Näherung wegen $v \ll c$ auf

$$\Delta t = \frac{2l}{c} \cdot \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} > 0.$$

Diese Gleichung gilt nicht im Falle der VLG, da bereits die Ausgangsgleichung für Licht unzutreffend ist. Für Licht hat man (theoretisch) gemäß der richtigen Ausgangsgleichung stets $\Delta t = 0$ zu erwarten. Die gemessenen Werte weichen auf Grund zufälliger und systematischer Fehler davon ab. Es ist aber ersichtlich, dass man durch Messungen weder das SRP noch das nichtlineare Gesetz der Geschwindigkeitszusammensetzung findet.

Schließlich sei noch bemerkt, dass man diese irreale („ätherische“) LK aus der Ausgangsgleichung sogar auf unendlich verschiedene Weise erhalten kann, indem man nämlich den ersten Term in der

Klammer mit $\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^n$ und den zweiten mit $\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{n-1/2}$ multipliziert. Hieraus ist ein weiteres Mal die Willkürlichkeit einer solchen Manipulation ersichtlich.

Es ist überhaupt auf die Ungültigkeit der Ausgangsgleichung (1) hinzuweisen. Man erkennt sofort am ersten Term, dass er unzutreffend ist, da er wegen $c + v$ auf Überlichtgeschwindigkeiten führt, die es (im vorliegenden Fall) bekanntlich nicht gibt: Licht kann Licht nicht überholen. Diese klassische Gleichung (1) ist nur gültig, wenn es um Geschwindigkeitszusammensetzungen mit $u \ll c$ und $v \ll c$ geht. Bei Superpositionen von c mit anderen Geschwindigkeiten $u \leq c$ ist stets das (nichtlineare) relativistische Additionstheorem und nicht die lineare Galileische Addition anzuwenden. Die (ätherische) LK ist also unreal, da sie aus der nichtrelativistischen Addition resultiert. Aus der Irrealität des Äthers kann selbstverständlich nicht auf eine tatsächliche (ätherische) Lorentz-Kontraktion gefolgert werden. Beim eigentlichen MV, also im Ruhesystem, ist eine Superposition von Geschwindigkeiten gar nicht vorhanden, so dass sich die Frage nach einer Additionsregel erübrigt.

Der Wille zur Aufrechterhaltung des Ätherbildes hat die Ätheranhänger veranlasst, das reale Versuchsergebnis $v = 0$ so umzudeuten, das man einen strömenden Äther mit $v \neq 0$ beibehält, der Abmessungen von Gegenständen in Bewegungsrichtung in der Weise verkürzen soll, dass sich auf diese Weise das experimentelle Null-Resultat ergibt. Mit dem Beharren auf einen Ätherwind wurde der MV nicht mehr in einem einzigen Inertialsystem mit $v = 0$, sondern in zwei Inertialsystemen betrachtet, wofür $v \neq 0$ maßgebend ist. Die daraus resultierende Gleichung mit der LK führt dann formal zum Nullergebnis des MV. Auf diese Weise wird allerdings die Lorentzsche Äthertheorie beibehalten. Eine klare Abkehr bzw. Unterscheidung davon wird unterlassen, wenn die Angabe der physikalisch richtigen (relativistischen) Gleichung an Stelle der klassischen Ausgangsgleichung (1) unterbleibt, was offenbar in der Regel der Fall ist. Das aber gehört dazu, wenn man den MV in einem „bewegten“, also in einem zweiten Inertialsystem betrachtet. In diesem Fall (siehe weiter unten) tritt die „ätherische“ LK gar nicht auf. Das bedeutet gewissermaßen, dass Autoren, die den MV (warum eigentlich?) in einem bewegten System mit auftretender LK darstellen, de facto Ätherphysik betreiben, wenn es unterbleibt, die physikalisch adäquate Interpretation auf Grund der richtigen Gleichung für die Geschwindigkeitssuperposition vorzunehmen.

Einstein hatte sich in seiner Arbeit von 1907 gegen die Kontraktionshypothese von G. F. FitzGerald (1889) und H. A. Lorentz (1892) ausgesprochen, die den Widerspruch zwischen Theorie und Experiment nur formal beseitigt hätte. Das Null-Ergebnis des MME sei ohnehin wegen des Prinzips der Relativität von vornherein gegeben. „Diese ad hoc eingeführte Annahme schien aber doch nur ein künstliches Mittel, um die Theorie zu retten. ... das negative Ergebnis des Versuches von Michelson und Morley (ließe sich) ohne weiteres voraussehen.“ [1].

Einstein hat sich in seiner Gruß-Adresse zum 100. Geburtstag Albert Abraham Michelsons 1952 nochmals über die LK geäußert. Es ist bemerkenswert und außergewöhnlich, dass er darin auch seine eigenen Gedanken und Taten zur Schaffung seiner SRT einbezieht [2]:

„Lorentz' Grundannahme vom ruhenden Äther schien mir gerade deshalb nicht überzeugend, weil sie zu einer Interpretation des Michelson-Morley-Experimentes führte, die mir unnatürlich erschien. Mein direkter Weg zur speziellen Relativitätstheorie wurde hauptsächlich durch die Überzeugung bestimmt, dass die in einem im Magnetfeld bewegten Leiter induzierte elektromotorische Kraft nichts anderes sei als ein elektrisches Feld. Aber auch das Ergebnis des Fizeauschen Versuches und das Phänomen der Aberration führten mich. Es führt ja kein logischer Weg zur Aufstellung einer Theorie, sondern nur tastendes Konstruieren mit sorgfältiger Berücksichtigung des Tatsachenwissens.“ Einstein wählt hier offenbar mit Bedacht das Wort „Tatsachenwissen“, wohl um den Unterschied zu einer eher abseitigen Kontraktionshypothese herauszustellen. Schließlich waren noch immer Erwartungen nicht erfüllt worden, die auf eine Verbindung oder sogar Voraussetzung des MV für die Schaffung der SRT gerichtet waren.

Es ist rätselhaft, warum selbst heutige Physiker und Autoren die LK als endgültige Interpretation des MV angeben. Soweit dem Verfasser bekannt, existiert kein Lehrbuch, in dem erstens die allein

zutreffende Interpretation des MV das SRP angeführt und zweitens die physikalisch zutreffende Gleichung für den MV im bewegten System mitgeteilt wird.

Der Hinweis Einsteins auf seinen Weg von der Elektrodynamik zur SRT ist beim Blick in Darstellungen zur SRT besonders bedenkenswert, da man sich in zahllosen Texten allein auf die Mechanik beschränkt und/oder sich dabei noch ungerechtfertigt mit dem MV beschäftigt, als ob er eine entscheidende Rolle oder sogar einen einfachen Zugang zum Begriffssystem der SRT überhaupt erst ermöglichen würde.

Beispiele für Fehlinterpretationen des Michelson-Versuches

In der vierbändigen *Einführung in die Theoretische Physik* von Clemens Schaefer [3] heißt es zum Ergebnis des MV: „Die Lorentz-Kontraktion ist ein Beispiel dafür, und es steht gar nichts im Wege, zu sagen, daß der Michelsonsche Versuch ein experimenteller Beweis für die Realität dieser Kontraktion sei.“

In der sechsbändigen *Physik* von Wilhelm Macke [4] liest man in zwei Bänden: „Der MICHELSON-Versuch zeigt, daß im bewegten Koordinatensystem der Erde kein Ätherwind festzustellen sei. Der negative Ausgang dieses Experiments ist **nur** (fett von HM) durch die Lorentzsche Kontraktionshypothese zu verstehen, nach der alle bewegten Körper in der Bewegungsrichtung um einen Faktor

$$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

verkürzt sein sollen.“

Bei Greiner/Rafelski [5] lautet der letzte Satz zum Kapitel „Das Michelson-Experiment“: „Lorentz konnte auch nachweisen, daß die von ihm postulierte Kontraktion direkt aus der Theorie der elektromagnetischen Wechselwirkung ableitbar ist. Heute können wir diese Überlegungen auf alle Wechselwirkungen ausdehnen und erkennen, daß die Lorentzkontraktion ein universelles Phänomen aller Materie ist.“ Das würde aber bedeuten, dass noch heute die Lorentzsche Theorie nicht überholt sei.

Helmut Günther wählt in seinem Buch [6] die Kapitel-Überschrift „Der bewegte Stab ist verkürzt – Das MICHELSON-Experiment“. Nach ausschließlich äthertheoretischer Darstellung heißt es abschließend: „Die Erklärung des MICHELSON-Experiments wird danach heute als FITZGerald-Lorentz-Kontraktion oder kurz LORENTZ-Kontraktion bezeichnet.“ Eine tatsächlich heutige Erklärung, also ohne LK, unterbleibt.

In ähnlicher Weise wird der MV bei Wikipedia [7] abgehandelt. Dort heißt es etwas wirr und nicht akzeptabel: „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** (fett von HM). Obwohl in vielen Schilderungen zur Entwicklung der SRT dieses Experiment als Ausgangspunkt der Theorie geschildert wird, hat Einstein selbst einen direkten Einfluss des Experiments auf seine Ideen abgestritten“. Dieser umfangreiche, aber insgesamt inakzeptable Text über den MV von Wikipedia wurde vom SPIEGEL nachgedruckt [8], der auf begründete Einwände und Hinweise nicht reagiert hat. – Im Unterschied zu der fettgedruckten irrationalen Behauptung wird vom Verfasser weiter unten das Null-Ergebnis mit der natürlichen Geschwindigkeits-Zusammensetzung erklärt.

Inakzeptabel ist auch der Lehrbuchtext mit der Kapitel-Überschrift „Die Experimente von Michelson und Kennedy-Thorndike zum Nachweis der relativistischen Längenkontraktion“ [9].

Der ungarische Physiker Lajos Janossy schreibt in seinem Buch [10]: “The only acceptable explanation – in our view – of the negative outcome of the Michelson-Morley experiment is to assume that the interferometer, however carefully it is turned round, nevertheless it deforms; the deformation being such that it compensates exactly the phase shift which would appear without the deformation“. Weiter liest man: „In fact we think that the Michelson-Morley experiment can be taken as an interferometric measurement of the Lorentz contraction“.

In dem an und für sich soliden Buch von Skinner [11] findet man eine überzogene Beurteilung des MV, die schon in der Nähe religiöser oder göttlicher Charakterisierung liegt: „The Michelson-Morley experiment extends our range of experience and shows that our usual concepts of space and time are not valid in that extended range“. In den USA ist die irrtümliche Meinung weit verbreitet, dass

Michelson, der erste Nobelpreisträger in den USA, jene Versuche angestellt hätte, auf denen die Einsteinsche Relativitätstheorie beruhe.

Eine Fehleinschätzung des MV führt in dem vierbändigen Lehrbuch von Daniel [12] sogar zu dem Kapitel „Unmittelbare Folgerungen aus dem Michelson-Versuch“ mit den Abschnitten „Zeitdilatation“, „Lorentz-Kontraktion“, „Relativistische Addition von Geschwindigkeiten“ und „Vierdimensionales Raum-Zeit-Kontinuum“. Derartige unmittelbare Folgerungen sind aus dem Versuch, bei dem eine Relativgeschwindigkeit v nicht gemessen wurde, selbstverständlich nicht möglich.

Schließlich sei noch das 2012 erschienene Lehrbuch von Rebhan „Theoretische Physik: Relativitätstheorie und Kosmologie“ [13] angeführt, auf dessen Einband sogar das Prinzip des Michelsonschen Interferometers den ersten Platz gefunden hat. Allerdings werden für die beiden gleichlangen Interferometerarme eingedenk der Lorentz-Kontraktion unterschiedliche Lichtlaufzeiten angegeben. Damit wird (offenbar unbeabsichtigt) gezeigt, dass die Äthertheorie nicht überwunden ist. Im Buch selbst unterbleiben dazu korrigierende Bemerkungen, und der eigentliche physikalische Sachverhalt wird nicht angegeben.

Im Gegensatz zur Phlogistonhypothese erweist sich die Ätherhypothese als sehr zählebig. Man ist geneigt, an das Wort von Max Planck in seiner Selbstbiographie zu denken: „Eine neue wissenschaftliche Wahrheit pflegt sich nicht in der Weise durchzusetzen, daß ihre Gegner überzeugt werden und sich als belehrt erklären, sondern vielmehr dadurch, daß die Gegner allmählich aussterben und daß die heranwachsende Generation von vornherein mit der Wahrheit vertraut gemacht ist“.

Bewegte Lichtquellen gegenüber dem Michelson-Interferometer: Zwei Inertialsysteme

Mitunter wird das Ergebnis des MV mit den Worten abgetan „ c gleich konstant“. Von einigen Autoren wird behauptet, dass mit dem MV nachgewiesen wurde, dass die VLG konstant sei. Der eigentliche Sinn der Kurzform dieser These bezieht sich jedoch auf das Unabhängigkeitsprinzip, demzufolge die VLG unabhängig denselben Wert besitzt, ob sich Lichtquelle und/oder Empfänger mit einer Geschwindigkeit v bewegen oder nicht. Einstein hat in einer Fußnote als Quelle für dieses Prinzip die Maxwellsche Theorie des Elektromagnetismus angegeben [14].

Dieses Prinzip spielt für die Interpretation des MV keine Rolle: Es ist, wie aus Gl. 2 ersichtlich, beim MV nämlich eine Zusammensetzung der VLG mit einer anderen Geschwindigkeit nicht gegeben.

Besteht aber zwischen einer außerhalb der Erde befindlichen Lichtquelle (Sonne, Planeten, Fixsterne) und dem Interferometer eine Geschwindigkeit v , dann ist bei Messungen mit dem Michelsonschen Interferometer ebenfalls ein Null-Ergebnis zu erwarten, nämlich auf Grund des Prinzips „ c gleich konstant“. (Gleichgültig, von welchem Himmelskörper Licht auf der Erde ankommt, es hat stets dieselbe Geschwindigkeit c). Die von R. Tomaschek und unabhängig von D. C. Miller ausgeführten Versuche mit Licht extraterrestrischer Lichtquellen bestätigten das erwartete Null-Ergebnis (1924/25). Das soll nun ausführlich dargestellt werden.

Zu diesem Zweck geht man von dem Additionstheorem der Geschwindigkeiten aus, das Einstein bereits am Anfang seiner Arbeit zur Begründung der SRT mitgeteilt hat [15]. Dieses Theorem (relativistischer Kosinussatz für Geschwindigkeiten) gilt für alle Geschwindigkeiten $u \leq c$ sowie $v \leq c$ und für alle Winkel, die die Geschwindigkeiten u und v , die der Winkel φ zwischen 0° und 360° einschließt:

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

Man erkennt, dass für kleine Geschwindigkeiten (u und v klein gegenüber c) die ersten drei Summanden den klassischen Kosinus für die resultierende Geschwindigkeit w darstellt. In geometrischer Darstellung ist für den klassischen Fall kleiner Geschwindigkeiten u und v die Resultierende eine Diago-

nale in einem Parallelogramm. Da auch w nie größer als c werden kann, ist für größere Geschwindigkeiten das Viereck kein Parallelogramm.

Man sieht aus (3), dass die Gl. 1 aus dem klassischen Kosinussatz mit $u = c$ für alle vier Winkel φ hervorgegangen ist und für das Additionsproblem nicht richtig sein kann. Daraus ergibt dann auch, dass die daraus gefolgerte (klassische) Lorentz-Kontraktion illusorisch ist und eine physikalische Bedeutung nicht haben kann. Somit sind dann auch die oben bei Günther [6] und Wikipedia [7] zitierten Angaben, wonach die heute gültige Erklärung des Nullresultates des MV im bewegten Bezugssystem die (in der Lorentz-Theorie) angegebene Lorentz-Kontraktion sei. Es wird nun gezeigt, dass die adäquate physikalische Aussage bzw. Interpretation ohne Deformation von Gegenständen (Kontraktion) auskommt, dass es allein auf die richtige Zusammensetzung von Geschwindigkeiten ankommt, in diesem Fall also auf die Superposition der VLG z. B. von extraterrestrischen Quellen mit der Geschwindigkeit v zwischen zwei Inertialsystemen.

Für $u = c$ und die vier Winkel findet man aus (3) die vier jeweils resultierenden Geschwindigkeiten schließlich an Stelle der klassischen Gleichung (1) nunmehr die gültige (relativistische) Gleichung

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

also hieraus wie oben

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

Im Unterschied zu der obigen (klassischen) Gleichung (1) erhält hier sowohl für $v = 0$ (ruhendes Inertialsystem) als auch für das bewegte Inertialsystem für $v \neq 0$ den Wert $\Delta t = 0$. Angesichts der Abbildung der unzutreffend unterschiedlichen Lichtlaufzeiten in den beiden Interferometerarmen des Michelsonschen Interferometers bedeutet dieser Sachverhalt, dass die relativistische Zusammensetzung der Geschwindigkeiten aus c und v das physikalische richtige Ergebnis liefert. Mit anderen Worten: Die Anwendung des relativistischen Additionstheorems, das aus der Lorentz-Transformation für Längen- und Zeitmessungen hervorgegangen ist, erklärt notwendig und hinreichend das Zustandekommen des Null-Ergebnisses des Interferometerversuches und zeigt dabei die Tatsache, dass in Inertialsystemen die gleichen physikalischen Gesetze in gleicher Form gelten: Zwei Uhren mit derselben Taktfrequenz $2l/c$.

Damit ist die Überlegenheit des Prinzips der Relativität gegenüber dem absoluten Raum der Äthertheorie gezeigt. Das bedeutet, dass z. B. die Aussagen bei Günther [6] und Wikipedia [7] korrigiert werden müssten, um damit auch Überbleibsel der Äthertheorie zu beseitigen.

Endlich sei noch bemerkt, dass die mitunter benutzte Klassifizierung oder Qualifizierung des MV als *experimentum crucis* ebenfalls inakzeptabel ist, was ohnehin keine physikalische Erkenntnis in Bezug auf Vorgänge und Sachverhalte bringt. Da schließlich noch mehrere Interpretationen des MV aufgeführt werden, ohne dass angegeben wird, dass der MV dabei die entscheidende (cruciale) Rolle spielt, bleibt solche Klassifizierung ohne Sinn – unabhängig von der Frage, ob es überhaupt solche Experimente gibt, die man nach F. Bacon als *experimentum crucis* betrachten könne.

Michelson-Versuch mit ungleich langen Interferometerarmen

Von verschiedenen Autoren wird hervorgehoben, dass sich das Nullresultat solcher Versuche mit ungleich langen Armen des Interferometers nicht mit der LK erklären lässt. Andere Autoren widersprechen, ohne im Detail eine Begründung zu geben. Nach dem Urteil des Verfassers ist das Null-Ergebnis dieses Versuches wie beim klassischen MV mit dem Relativitätsprinzip zu begründen.

Schließlich sind wie beim MV nicht zwei Inertialsysteme vorhanden, so dass zwischen Lichtquelle und Empfänger keine Geschwindigkeit besteht.

Im anschaulichen Bild handelt es sich um zwei Lichtuhren mit unterschiedlichen Taktfrequenzen. Die Differenz dieser Takte $2l_1/c - 2l_2/c$ bleibt während der gesamten Beobachtungsdauer unverändert; es kann sich also keine Änderung in Messergebnissen zeigen.

Der Kennedy-Thorndike-Versuch

Auf diesen Versuch von Kennedy und Thorndike (KTV) wird in der Literatur kurz hingewiesen, ohne dass jedoch dargelegt wird, worin denn sein Ergebnis, seine Bedeutung und der eigentliche Erkenntnisgewinn bestehen. Im Prinzip handelt es sich um eine Variante des MV mit ungleichlangen Interferometerarmen. Die Apparatur ist im Labor fest eingebaut, so dass die Lichtquelle und der Empfänger (Fotoeinrichtung) einen konstanten Abstand zueinander haben. Mit großem Aufwand wird die Temperatur konstant gehalten. Die Fotoregistrierung erfolgte über einige Monate mit dem Ergebnis eines Nullresultates.

Die von R. J. Kennedy und E. M. Thorndike publizierte Arbeit trägt den Titel *Experimental Establishment of the Relativity of Time* [16]. Die Autoren gaben für das Nullergebnis die Begründung, dass die LK nicht ausreiche und schlossen somit, dass die Zeitdilatation existieren würde. Nach Auffassung des Verfassers ist das Nullergebnis wie beim MV einzig und allein durch das RP zu interpretieren. Die bei Resnick [17] und im Internet wiedergegebene Endformel für die Geschwindigkeit ist aus dem klassischen Kosinussatz hergeleitet, und zum Nachweis der Zeitdilatation müssten zwei Inertialsysteme vorhanden sein. Schließlich ist der erste experimentelle Nachweis der Zeitdilatation erst 1938 gelungen. An der Endformel erkennt man die Übereinstimmung mit dem RP, indem für $v = 0$ Übereinstimmung zwischen Theorie und Experiment vorliegt. Im Urteile des Verfassers beweist dieser Versuch allein, dass die Erde ein hinreichend gutes Inertialsystem ist.

Einsteins Arbeit *Zur Elektrodynamik bewegter Körper* und der Michelson-Versuch

Hat Einstein die Bedeutung des MV „heruntergespielt“? Diese Behauptung von Abraham Pais in seinem berühmten Buch *The Science and the Life of Albert Einstein*, das mit dem Pulitzer Preis ausgezeichnet wurde und als Wissenschaftliche Biographie „Raffiniert ist der Herrgott“ auch in deutscher Sprache erschienen ist, hat der Verfasser mit Bram in persönlichen Gesprächen erörtert und mit seinen Hinweisen Zustimmung gefunden. Erstens hat sich Einstein nur von solchen Versuchen leiten lassen, bei denen Relativgeschwindigkeiten vorliegen, also zwei Inertialsysteme existieren, also vom Fizeau-Versuch, von dem Phänomen der Aberration, vom Doppler-Effekt und von der Relativbewegung bei magnetischen und elektrischen Feldern. Zweitens weist man allgemein auf Prinzipie hin (Energieprinzip, Relativitätsprinzip), nicht aber auf Einzelversuche, die zu den Prinzipien führen.

Im Gegensatz zu der Mehrzahl der Physiker, der Hypothese eines fiktiven Mediums, das ruhend, mitbewegt oder teilweise mitbewegt gedacht wurde, hat Einstein dies in seinem Begriffssystem nicht nötig gehabt. Er hat eingangs zu seiner Arbeit auf „mislungene Versuche, eine Bewegung der Erde relativ zum ‚Lichtmedium‘ zu konstatieren“ hingewiesen und dabei offenbar als erster Physiker das Prinzip der Relativität und dabei überhaupt dessen Bedeutung für die Physik erkannt. Michelson hat trotz seiner richtigen Messungen zeitlebens am Glauben an einen Äther festgehalten.

Wie ist Einstein zur SRT gelangt?

Er hat diese Theorie nicht „gefunden“, sondern wiederholt bemerkt, wie man eine Theorie „aufstellt“ bzw. „konstruiert“. Es soll kurz gezeigt werden, wie er mit Hilfe der beiden Prinzipien zu dem Kern der SRT, zur Lorentz-Transformation, gelangt ist. Er hat es eingangs zu seiner „Gründungsarbeit“ *Zur Elektrodynamik bewegter Körper* selbst dargelegt. In seinem Beispiel, der Ausbreitung zweier Kugelwellen in je einem Inertialsystem Prinzip der Relativität und Konstanz der VLG, also $c = c'$, erhält man die Lorentz-Transformation, wie das nachfolgend kurz gezeigt wird:

Lorentz-Transformation

Zwei Inertialsysteme S und S' mit Relativgeschwindigkeit v. In jedem System breitet sich eine Licht-Kugelwelle aus:

Gemäß Spez.-Relativitätsprinzip:

$$x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2 = x'^2 + y'^2 + z'^2 - c^2 t'^2,$$

Konstanz-Prinzip: $c \equiv c'$.

Abgekürzt

$$x^2 - c^2 t^2 = x'^2 - c^2 t'^2 \quad (\text{Invariante})$$

Ansatz zur Lösung mit „Korrekturfaktor“ γ der Galilei-Transformation

$$x' = \gamma(x - vt) \quad \text{und} \quad x = \gamma(x' + vt')$$

$$x' = ct' \quad \text{und} \quad x = ct. \quad \text{Daher also mit der Abkürzung } \frac{v}{c} = \beta$$

$$x' = \gamma\left(x - \frac{v}{c} \cdot x\right) = \gamma x(1 - \beta) \quad \text{und} \quad x = \gamma\left(x' + \frac{v}{c} \cdot x'\right) = \gamma x'(1 + \beta)$$

Aus $x'x = \gamma^2 x x'(1 - \beta^2)$ folgt

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad \text{und damit schließlich} \quad x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad \text{und} \quad x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Hieraus folgt die Zeittransformation wegen $t' = \frac{x'}{c}$

$$t' = \frac{x/c - (v/c^2) \cdot ct}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{t - (v/c^2) \cdot x}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad \text{und durch relativistische Vertauschung}$$

$$t = \frac{t' + (v/c^2) \cdot x'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$$

Es gibt keine universale Zeit. Jedes Inertialsystem hat eine Eigenzeit.

Aus x/t folgt die Geschwindigkeitstransformation (in x-Richtung)

$$u_x = \frac{u'_x + v}{1 + \frac{u'_x v}{c^2}}.$$

Resümee: Experimente vom Michelson-Typ ohne Lorentz-Kontraktion

Experimente zur Auffindung eines Äthers führten weder vor noch nach 1905 zu einem Erfolg. Sie erwiesen sich wie der MV (oder in verbesserter Version der MMV) für die Aufstellung der SRT als nicht notwendig und deshalb im Einzelnen nicht als erwähnenswert. Die Nullresultate der Versuche nach Michelson sind wegen des (speziellen) Relativitätsprinzips nach Einstein eine Selbstverständlichkeit. Einstein hat das von Galilei für die Mechanik formulierte Relativitätsprinzip nicht nur für die Elektrodynamik und Optik postuliert, sondern in jeweils derselben mathematischen Form für sämtli-

che physikalische Sachverhalte als gültig betrachtet, offenbar unbeeinflusst von einer Kenntnis des MV.

Für Einstein spielten bei der SRT das Phänomen der Aberration (ruhender Äther) und der „hochbedeutsame“ Versuch von Fizeau (teilweise mitgeführter Äther) eine Rolle, nicht hingegen der MV. Bei diesem bestand keine Geschwindigkeit zwischen zwei Bezugssystemen:

Lichtquelle und Lichtempfänger waren fixiert, d. h. festmontiert, und eine (Äther-)Strömung war nicht vorhanden. Ein vermuteter Ätherwind mit der (entgegengesetzten) Geschwindigkeit der Erde wurde nicht gemessen: $v = 0$. Dieser Nullwert wurde (innerhalb der Fehlergrenzen) in allen soliden Michelson-Experimenten (innerhalb der Fehlergrenzen) gemessen.

Gemäß der Ausgangsgleichung für die zahllosen Experimente mit dem Michelson-Interferometer erwartete man einen von Null verschiedenen Zeitunterschied zwischen den Lichtlaufzeiten der senkrecht orientierten Armen des Interferometers:

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

Es wurde jedoch stets $\Delta t = 0$ gemessen. Das bedeutet, dass kein Ätherwind existiert, dass also $v = 0$ ist. Damit lautet die adäquate Gleichung

$$\Delta t = \frac{l}{c} + \frac{l}{c} - \left(\frac{l}{c} + \frac{l}{c} \right) = 0 \quad \text{oder}$$
$$\Delta t = \frac{2l}{c} - \frac{2l}{c} = 0. \quad (2)$$

Anschaulich bedeutet das, dass hier zwei gleiche Lichtuhren vorliegen, deren jeweilige Taktfrequenz $\frac{2l}{c}$ beträgt, die unabhängig von deren Lage im Raum ist und folglich für beliebig viele Uhren gilt. Es wird ein Äther nicht nachgewiesen. Die Geschwindigkeit der Erde ergibt sich auf Grund nicht vorhandener Außenkontakte bei der Messung wegen des Relativitätsprinzips zu $v = 0$.

Aus (2) zu folgern, das „c gleich konstant“ sei, ist unzutreffend. Diese Aussage (als Prinzip) bezieht sich auf die Unabhängigkeit von c, wenn eine Geschwindigkeitszusammensetzung mit $v \neq 0$ vorliegt, was hier nicht der Fall ist.

Mit dieser physikalisch zutreffenden Interpretation haben sich die Anhänger der Ätherphysik nicht abgefunden. Das Ende der Ätherphysik ist nicht etwa durch den MV gegeben: Anhänger der Ätherphysik verzichteten trotz der vergeblichen Messergebnisse nicht auf den Äther. Das Zustandekommen des Messwertes $\Delta t = 0$ führten sie bei einem Ätherwind $v \neq 0$ hypothetisch darauf zurück, dass Körper in Vorwärtsrichtung ihrer Bewegung eine Kontraktion erleiden, wobei die Querdimensionen unverändert bleiben sollen. Damit wird formal durch eine willkürliche Multiplikation der Länge l in den ersten beiden Gliedern der klassischen Ausgangsgleichung mit dem Wurzelfaktor eine Übereinstimmung mit dem Null-Messwert herbeigeführt. Diese sog. Ad-hoc-Hypothese (de facto ein Gewaltakt) liefert eine Interpretation des MV mit einem nichtnachgewiesenen Medium (Äther), wodurch sogar eine unmessbare Stauchung bewegter Objekte zustande kommen soll.

Einstein hat u. a. zweimal 1907 und 1951 auf das Künstliche bzw. Unnatürliche dieser Lorentz-Kontraktion hingewiesen. Er hat allerdings, aus welchen Gründen auch immer, die physikalisch reale Erklärung an Stelle der LK nicht mitgeteilt. Diese Kritik Einsteins ist offenbar bis heute unbekannt, insbesondere aber unberücksichtigt, so dass nach mehreren Generationen sogar in der Gegenwartsliteratur zur SRT ausschließlich die Interpretation des MV auf der Grundlage der Äthertheorie (LK) noch immer erfolgt. (Diese Lorentz-Kontraktion ist unreal und begrifflich von der relativistischen Längenkontraktion zu unterscheiden).

Die physikalisch sinnvolle Lösung bzw. Interpretation erfolgt an Stelle der künstlichen Lorentz-Kontraktion mit Hilfe der natürlichen (relativistischen) Geschwindigkeitsaddition. Man ersetzt also

einfach in der Ausgangsgleichung die Summen bzw. Differenzen aus c und v durch jene aus dem relativistischen Kosinussatz für die jeweiligen Winkel und erhält

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

Hieraus folgt sowohl für $v = 0$ (siehe Gl. 2) als auch für $v \neq 0$

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

Es handelt sich um die oben erwähnten Lichtuhren gleicher Taktfrequenz.

Diese physikalische Erklärung macht jene der im Übrigen nicht nachweisbaren LK überflüssig und verzichtbar. Diese physikalische Erklärung gilt für beliebige Winkel der Interferometerarme; insbesondere entfällt jene Besonderheit der Kontraktion in der Vorwärtsrichtung. Mit diesem Ergebnis ist gezeigt, dass man – gemäß dem Relativitätsprinzip – dasselbe Ergebnis für Versuche im ruhenden Labor wie für ein mit $v = \text{const}$ bewegtes Labor erhält. Es ist also im bewegten System (wie im ruhenden) eine Verformung der Gegenstände durch Kontraktion nicht vorhanden. An die Stelle der unnatürlichen Lorentz-Kontraktion tritt die Geschwindigkeits-Transformation. Bei Zusammensetzungen mit c ist natürlich das relativistische Additionstheorem anzuwenden.

Literatur

- [1] Einstein, A.: Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen. Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik **4** (1907) 411-462; **5** (1908)98-97
- [2] Einstein, A.: Grußadresse zum 100. Geburtstag von A. A. Michelson (1952)
- [3] Schaefer, C.: Einführung in die Theoretische Physik Bd.3/1, S. 843. W. de Gruyter Berlin 1950
- [4] Macke, W.: Lehrbuch der Theoretischen Physik Bd. Wellen, S. 334. Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig K.-G. Leipzig 1958
- [5] Greiner, W. und J. Rafelski: Theoretische Physik Bd. 3A, Spezielle Relativitätstheorie, Verlag Harri Deutsch Thun und Frankfurt/M. 1984. S. 15
- [6] Günther, H.: Starthilfe Relativitätstheorie. Ein neuer Zugang zu Einsteins Welt. 2. Aufl. B. G. Teubner Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden 2004. S. 33/36
- [7] Wikipedia (Internet) zu „Michelson-Experiment“
- [8] SPIEGEL Online 09. 02. 2012. Unveränderter Nachdruck von [6]
- [9] Brandes, J. Czerniawski, J.: Spezielle und Allgemeine Relativitätstheorie für Physiker und Philosophen. 4. vollst. überarbeitete und erweiterte Auflage. Verlag relativistischer Interpretationen – VRI, Karlsbad 2010
- [10] Janossy, L.: Theory of relativity bases on physical reality, S.61. Akademiai Kiado, Budapest 1971
- [11] Skinner, R.: Relativity for Scientists and Engineers. Dover Publications, Inc. New York 1982. S. 26
- [12] Daniel, H.: Physik Bd.2 Elektrodynamik, Relativistische Physik. W. de Gruyter, Berlin, New York, Berlin 1997
- [13] Rebhan, E.: Theoretische Physik: Relativitätstheorie und Kosmologie. Springer Spektrum, Berlin 2012
- [14] Einstein, A.: Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig? Ann. Phys. 18 (1905) 639-641
- [15] Einstein, A.: Zur Elektrodynamik bewegter Körper. Ann. Phys. 17 (1905) 891-921

- [16] Kennedy, R.J. and Thorndike, E.M. Experimental Establishment of the Relativity of Time. *Physical Review* 42, Nr. 3, 1932, S. 400-418
- [17] Resnick, Robert: *Introduction to Special Relativity*. John Wiley & Sons 1968. Deutsch im Klett Verlag 1976

Adresse des Verfassers:

Prof. em. Dr. rer. nat. habil. Dr. paed. Horst Melcher
D-14471 Potsdam, Auf dem Kiewitt 23
email: HoMelcher@aol.com