

Das Problem

Die Physik steckte an der Wende zum 20. Jahrhundert in einem Dilemma, das einige Physiker mit der SRT zu lösen glaubten. Für diese Physiker – die Relativisten – ist seitdem die Sache klar: Das mathematische Gebilde der SRT ist gegeben und die experimentellen Nachweise sind erbracht. Sie üben sich darin, die SRT immer wieder zu erklären, ohne Neues in diese Erklärungen einzubringen, und übersehen dabei, dass die Theorie noch jede Menge Angriffspunkte bietet. Und: Nicht nur suchen die Gegner der Relativitätstheorie nach Ungereimtheiten, scheinbaren Fehlern und Widersprüchen – es gibt tatsächlich noch viele Gesichtspunkte der SRT zu diskutieren, und aus einigen Erklärungslücken ergibt sich ein grundlegendes Problem.

Eine solche Lücke besteht bei der Lorentz-Transformation selbst, die in ihrer mathematischen Abbildung zwar eindeutig ist, deren Interpretation aber diverse Möglichkeiten offen lässt. So ist der Sinn der Lorentz- wie jeder anderen Transformation auch, Koordinaten des einen Koordinatensystems auf ein anderes Koordinatensystem zu übertragen. Daraus folgt aber keineswegs zwangsläufig, dass ein Beobachter des einen Systems erkennt, was im anderen System passiert. Zu prüfen ist nämlich, ob die sich aus der Transformation ergebende Relation von Längen und Zeitspannen eindeutig ist. Dazu sollte eine verbesserte Konvention von Bezeichnungen der zu transformierenden Koordinaten eingeführt werden ([Syd6] S. 29f.; [Syd13]). Dann könnte, wie Sydow [Syd13] darlegt, verständlich werden, warum ein Beobachter B aus seinem Koordinatensystem K genau dasselbe im relativ bewegten Koordinatensystem K' sieht wie der bewegte Beobachter B' im System K des anderen. Das legt nahe, dass die Effekte der SRT nur **scheinbare** sind.

Ein weiterer erklärungsbedürftiger Aspekt betrifft die Ein- und Zwei-Weg-Lichtgeschwindigkeit. In der SRT ist immer die Rede von der Zwei-Weg-Lichtgeschwindigkeit, denn Einstein schickt zur Ermittlung seiner Gleichungen einen Lichtstrahl zu einem Spiegel. Dort wird der Strahl reflektiert und kehrt nach der erforderlichen Laufzeit des Lichts zurück zum Beobachter ([Ein5] S. 894). Demnach läuft Einsteins Gedankenexperiment mit der Transformation einer Lichtkugel in das System eines zu ihm relativ bewegten Beobachters darauf hinaus, dass diese Lichtkugel in einer Spiegelkugel zu reflektieren ist, um dann zum Ausgangspunkt der Lichtkugel zurück zu gelangen. Wie solche Spiegelkugeln (Ellipsoide) zu gestalten sind, zeigt Sydow ([Syd6] S. 80ff.; [Syd12]). Er verdeutlicht, dass die theoretischen Spiegelkugeln für unterschiedlich bewegte Beobachter auch eine unterschiedliche Form haben müssen, um die Reflexion einer ausgesendeten Lichtkugel gleichzeitig und an einem Raumpunkt zu empfangen.

Wieder bleibt zu überlegen, welcher Beobachter was wahrnimmt. Einstein formuliert: „Ein starrer Körper, welcher in ruhendem Zustand ausgemessen die Gestalt einer Kugel hat, hat also in bewegtem Zustande – vom ruhenden System aus betrachtet – die Gestalt eines Rotationsellipsoides [...]“ ([Ein9] S. 903) Damit suggeriert er, dass solche Körper zweierlei Gestalt haben können. Der Leser wird zwangsläufig zu dem Schluss kommen, dass nur eine der beiden Gestalten real sein kann, während die andere virtuell sein muss. Es soll hier nicht an der Richtigkeit Einsteins Annahme gezweifelt werden. Mit dem Michelson-Morley-Experiment ([Mic1]) dürfte der beschriebene Umstand soweit bewiesen worden sein. Doch die Erklärung bleibt Einstein schuldig. Ebenso bleibt die Erklärung der Ein-Weg-Lichtgeschwindigkeit auf der Strecke. Sie wird als Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit ([Ein5] S. 895) einfach vorausgesetzt.

Wo also liegt also das Problem, das die SRT aufwirft?

Einstein beschreibt, dass die Länge eines Stabes unterschiedliche Werte haben kann. Er schreibt, dass „die Länge des Stabes im bewegten System“ „gleich der Länge l des ruhenden Stabes“ ([Ein5] S. 896) sein muss. Dann findet er die „Länge des (bewegten) Stabes im ruhenden System“ (ebd.) als in der Länge verändert. Damit wird unterstellt, „dass die Länge [des Stabes] für den ruhenden Beobachter verkürzt erscheint“ ([Mes] S. 623). Und zu Recht weist Einstein auf Folgendes hin: Während „also die Y- und Z-Dimension der Kugel (also jedes starren Körpers von beliebiger Gestalt) durch die Bewegung nicht modifiziert erscheinen, erscheint die X-Dimension [...] verkürzt [...]“ ([Ein5] S. 903). Er deutet somit an, dass die Verkürzung der x-Dimension **nicht real** ist. Es gibt keinen Grund anzunehmen, dass es sich in dem Fall um reale Verkürzungen von Maßstäben handeln könnte.

Trotzdem sagt die SRT Längenkontraktion und Zeitdilatation voraus und diese Effekte werden als **reale** Effekte deklariert. „Ebenso wie bei der Zeitdilatation handelt es sich dabei nicht um eine Art ‚scheinbaren Effekt‘ oder eine ‚Täuschung‘.“ ([Emb] UP 4)

Die Wechselwirkungen zwischen elektrischen und magnetischen Feldern sind, wie oben angesprochen, offensichtlich real. Sie werden von Einstein mit der Lorentz-Transformation begründet. Warum also sollen die Effekte aus der Relativbewegung nicht real sein? Mau [6] fasst genau diese Irritation in Worte: „Es ergibt sich nun die wichtige Frage: Sind die Effekte der SRT (Zeitdilatation und Längenkontraktion) real – oder sind sie nur Schein?“ Sind sie real, dann besteht das Verständnisproblem mit der SRT weiterhin. Sind die Effekte aber nur scheinbar, dann könnte man sich darauf einlassen und sie als solche akzeptieren. Die Längenkontraktion würde nicht zum Verschwinden des Maßstabs und die Zeitdilatation nicht zum Stehenbleiben der Zeit führen.

Demnach besteht ein Nachweisproblem, aus dem ein ganz grundlegendes Verständnisproblem hervorgeht:

- 1) Lassen sich Experimente finden, die eine Längenkontraktion oder eine Zeitdilatation zweifelsfrei nachweisen und damit die Gültigkeit der in der SRT getroffenen Aussagen bestätigen, ist auch bewiesen, dass die Effekte der SRT real sind.
- 2) Sind aber die Effekte der SRT real, ist die SRT nicht zu verstehen.

Um also das Verständnisproblem (2) zu lösen, ist im ersten Schritt der Nachweis der beiden Effekte in der Praxis zu erbringen (1). Nur der experimentelle Nachweis kann über die Richtigkeit der Theorie entscheiden. Zusätzlich kommt jedoch dazu:

- 3) Als notwendige Bedingung muss nachgewiesen werden, dass derartige Längenkontraktionen oder Zeitdilatationen durch keine andere Ursache als die Relativbewegung hervorgerufen werden.

Allerdings gibt es Zweifel, ob der Nachweis einer Längenkontraktion überhaupt erfolgreich sein kann, wie Poincaré begründet:

„Was mir aber unbequem ist, ist der Umstand, daß die Verkürzung für alle Körper dieselbe wäre. Man achte wohl darauf, daß eine derartige Deformation sich nicht durch Meßinstrumente nachweisen ließe, mögen diese Instrumente auch einen noch so hohen Grad an Vollkommenheit besitzen. Da nämlich alle Körper in gleicher Weise deformiert werden, so werden auch die Meßinstrumente ebensogut davon betroffen wie die zu messenden Gegenstände selbst, und daher muß diese Deformation unbemerkt bleiben.“ ([Poi] S. 15)

Diese Bemerkung gilt allerdings nur für zu messende Längen, die sich im Inertialsystem des Messenden befinden. Für eine Längenerfassung aus einem relativ bewegten Inertialsystem sollte nach Auffassung der Relativisten die Längenkontraktion nachzuweisen sein.

Leichter erscheint der Nachweis der Zeitdilatation. Da Uhren wegen des Kausalitätsprinzips nicht rückwärts laufen dürfen, sollte eine auf der Uhr registrierte Zeitdilatation auch dann noch zu erfassen sein, wenn diese Uhr wieder in das Inertialsystem des Beobachters überführt würde.

Vor diesem Hintergrund werden im folgenden Kapitel durchgeführte und oft zitierte Experimente zum Nachweis der SRT unter die Lupe genommen. Ziel ist es letztlich, das beschriebene Verständnisproblem zu lösen.

II. Tests der speziellen Relativitätstheorie

„Tausende Experimente wurden durchgeführt, seit Einstein seine Relativitätstheorie veröffentlicht hat, und alle zeigen, dass sowohl Zeitdilatation als auch Längenkontraktion wirklich existieren.“ ([Osw] 2:26‘)

Mit dieser Aussage konfrontiert, steht man vor einer schier unlösbaren Aufgabe. Da gibt es so unglaublich viele Tests, die zur Bestätigung der SRT absolviert wurden, und offenbar gibt es keinen einzigen, der die bestehenden Zweifel gelten ließe. Da stellt sich schon die Frage, ob es sich überhaupt lohnt, diesen Wust an Beweisen zugunsten der SRT angreifen zu wollen. Wird das nicht ein Kampf gegen Windmühlen? Letztlich wissen wir, dass die SRT auf einem soliden mathematischen Fundament steht. Ist es da nicht von vornherein zu erwarten, dass die durchgeführten Versuche zu ihrer Bestätigung von Erfolg gekrönt sein müssen?

Andererseits fragt sich schon, warum es Tausende von Experimenten gibt. Würde nicht ein einziger Versuch reichen, um Längenkontraktion und Zeitdilatation nachzuweisen? Damit sollte doch die SRT dann unumstößlich als bewiesen angesehen werden können. Nun, man könnte unterstellen, dass mit weiterer Entwicklung der Technik die Messergebnisse von Versuchen immer genauer werden und dass man Versuche mit höheren Relativgeschwindigkeiten durchführen kann. Die Bestätigung der SRT sollte aber unabhängig von der Genauigkeit einer ermittelten Längenkontraktion oder Zeitdilatation sein. Die Richtigkeit der SRT erweist sich im Nachweis, dass es diese Effekte gibt. Sie ist ein qualitatives Merkmal, das nur mit richtig oder falsch zu beantworten ist. Sind die durchgeführten Versuche vielleicht nicht aussagekräftig genug? Wozu aber dienen sie dann?

Und dennoch, welchen Zweck hätte es, die Ergebnisse all dieser Versuche zu diskreditieren? Und: Kann es bei der Vielfalt der Experimente überhaupt gelingen, alle zu analysieren?

Die Strategie liegt in der Systematisierung der Versuche. Hundert durchgeführte Versuche am Kreisbeschleuniger liefern nur eine Aussage über die Relevanz aller Versuche für die Aussage zur Richtigkeit der SRT. Hundert durchgeführte Flüge mit Uhren zur Ermittlung von Geschwindigkeitseinflüssen geben nur eine auswertbare Aussage. Hunderte Messungen von kosmischen Myonen sollten kein anderes Ergebnis bezüglich der SRT ergeben. Und wenn einem Versuch ein systematischer Fehler zugrunde liegt, kann man diesen Versuch auch gern hundertmal wiederholen. Dessen Ergebnisaussage wird dadurch nicht anders. Demnach bringt es schon einen wissenschaftlichen Gewinn, wenn man die Versuche in Klassen gruppiert und zu jeder Klasse konkrete Untersuchungen anstellt.

Solche Untersuchungen sollten sich vier Fragen widmen:

- Sind die Versuchsbedingungen SRT-konform oder gibt es Einflüsse durch Beschleunigungen?
- Wirken die Versuchsbedingungen zufällig auf das Ergebnis oder wurden sie gerade so gewählt, dass sich ein zufällig passendes Ergebnis einstellt?
- Lassen sich die Ergebnisse von Versuchen auch durch andere Annahmen erklären ([Sel] S. 11)?
- Gibt es offensichtliche Fehler in der Versuchsdurchführung?

Was nicht als Kriterium herangezogen werden soll, ist die Genauigkeit der durchgeführten Experimente. Dass die Genauigkeit der Messinstrumente und Verfahren zur Zeit der Durchführung der Versuche noch nicht den Erfordernissen entsprachen, kann lediglich eine Annahme sein, die hier nicht zu beweisen ist.

So werden im Folgenden verschiedene Versuche analysiert, die in der Vergangenheit durchgeführt wurden und als prototypisch für den Nachweis der Richtigkeit der SRT anzusehen sind. Zwar können bei Weitem nicht alle Versuche untersucht werden, doch einige „Aushängeschilder“ werden einer Analyse unterzogen, um zu prüfen, ob es Mängel bei der Interpretation der Versuche als Beweis für die SRT gibt. Die daraus abzuleitenden Schlüsse könnten Anlass geben, über die SRT neu nachzudenken.

Einsteins Postulate

Gemäß einem Ansatz sind Längenkontraktion und Zeitdilatation zum Nachweis der Richtigkeit der SRT zu ermitteln. Andererseits gibt es Versuche, die allein darauf abzielen, die von Einstein formulierten Postulate als richtig nachzuweisen. Diese Versuche sind nicht zu vernachlässigen. Sie werden zwar keinen hinreichenden Beweis liefern können, stellen aber eine notwendige Bedingung dar, um die SRT zu untermauern. Umgekehrt würden sie Zweifel an der SRT schüren, wenn sie die Postulate nicht bestätigten. Der Zweck der Durchführung solcher Versuche kann ausschließlich sein, die SRT in Misskredit zu bringen.

Einstein postulierte in seinem Werk von 1905 ([Ein5] S. 891f.) zwei Voraussetzungen, um daraus die SRT abzuleiten: erstens das Relativitätsprinzip und zweitens das Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit. Sie „sind zwar logisch voneinander unabhängig, hängen aber dennoch auf eine vielleicht unerwartete Weise zusammen“ ([Emb] Abs.: „Postulate“). Damit ist gesagt, dass das Relativitätsprinzip als solches nur richtig sein kann, wenn es eine Maximalgeschwindigkeit in jedem Inertialsystem gibt und diese in jedem Inertialsystem dieselbe ist.

Folgeseiten für die Leseprobe entfernt

hinlänglich bekannt. Neben der Lorentz-Theorie ist die Idee der Zeitdilatation fundamental.

Die häufig als Standardbeispiele herangezogenen, meist lange zurückliegenden Versuche des Nachweises der Zeitdilatation sollen hier genauer unter die Lupe genommen werden. Es geht dabei weniger darum, ob die Versuche grundsätzlich abzulehnen sind, ob bei der Durchführung grundlegende Fehler gemacht wurden oder ob die erforderlichen Genauigkeiten zur damaligen Zeit überhaupt erreichbar waren. Vielmehr steht die Frage im Mittelpunkt, ob die durchgeführten Experimente zweifelsfrei als Beweis für die Existenz der Zeitdilatation dienen können.

Kosmische Myonen

Mit dem sogenannten Myonen-Experiment ist die von B. Rossi und D. B. Hall im Jahre 1941 durchgeführte Messung ([Pöp]) kosmischer Strahlung gemeint. Diese Strahlung erreicht die Erde aus allen Richtungen des Weltalls. Durch Reaktion dieser Strahlung mit den Teilchen in den Höhenschichten der Atmosphäre entstehen die Myonen. Man weiß von ihnen, dass sie eine sehr kurze, im Mikrosekundenbereich liegende Lebensdauer haben ([D.H4]). Da sie nachgewiesenermaßen mit einer Geschwindigkeit nahe Lichtgeschwindigkeit dahinrasen, könnten sie nach konventioneller Berechnung in ihrer kurzen Lebenszeit nie die Erdoberfläche erreichen. Da sie das aber in großer Zahl tun, musste man sich eine besondere Erklärung dafür einfallen lassen. Diese basiert auf dem Effekt der Zeitdilatation bei hohen Geschwindigkeiten. Aufgrund der Zeitdilatation verlängert sich die Lebensdauer der kosmischen Myonen in einem Maße, das es ihnen erlaubt, die Erdoberfläche (Meereshöhe) zu erreichen. Ohne diese Zeitdilatation würden sie einfach vorher schon zerfallen.

Um sich dem Thema zu nähern, sei die Frage gestellt, die sich bei der Schilderung des Sachverhalts regelrecht aufdrängt: In welcher Höhe entstehen die Myonen in der Atmosphäre? Erst mit Beantwortung dieser Frage ist es möglich, eine Abschätzung der von den Myonen zurückgelegten Strecke zwischen ihrem Entstehungsort und der Erdoberfläche auf Meereshöhe vorzunehmen.

Offensichtlich beträgt die Strecke, die ein Myon mit Lichtgeschwindigkeit in der mittleren Lebenszeit von etwa $2,2 \mu\text{s}$ ([D.H4]) zurücklegt, nur etwa 660 m, und korrespondiert somit in keiner Weise mit den Beobachtungen. Doch hängt in erster Linie das Erreichen der Erdoberfläche von der Entstehungshöhe des Myons ab. Die folgende Tabelle 2.1 führt entsprechende Werte auf, wie sie der Literatur zu entnehmen sind:

Verfasser	Wertung und Höhe	Jahr	Quelle
Ahrens	„im Mittel“ „zwischen 50 km und 15 km“	2003	[Ahr] S. 43
unbekannt	„in 30 Kilometer Höhe“	2011	[U17]

Fließbach	„etwa“ „30 km“	2012	[Fli] S. 132
Bührke	„Wie Physiker wissen“ „etwa 30 km“	1999	[Büh] S. 46
Schmutzer	„etwa“ „20 bis 30 km“	1996	[Scm] S. 61
Ripota	„etwa“ „20 bis 30 km“	o. J.	[Rip] S. 50
Artecha	„von 20–30 km“	2008	[Art] S. 128
Trefzger	„oberhalb von“ „20 km“	2013	[Tre] S. 8
Sexl	„in rund 20 km“	1979	[Sex] S. 83
Pelte	„etwa“ „h = 20 km“	2005	[Pel] S. 327
Heisenberg	„hauptsächlich“ „etwa 20 km“	1953	[Hei] S. 5
Imlintz	„ersten Wechselwirkungen“ „ungefähr 20 km“	2010	[Iml] S. 12
Pöpperl	„entstehen“ „etwa 15 km“	o. J.	[Pöp]
Varesi	„entstehen“ „ca. 15km“	2005	[Var]
Eckstein	„entstehen“ „10 bis 20 km“	2008	[Eck] S. 28
Karg	„entstehen“ „etwa 10 bis 15 km“	2016	[Kar] S. 23
Pörtner	„Entstehen in 10-15 km Höhe“	2013	[Pör] S. 4
Chown	„entstehen“ „etwa 12,5 Kilometer“	2013	[Cho] S. 129
Almer	„entstehen“ „ca. 12 km“	2011	[Alm]
Maalampi	„typischerweise“ 12 km	2008	[Maa] S. 67
Meyndt	„entstehen“ „etwa 10 bis 15 Kilometer“	2013	[Meyt] S. 21
Mücke	„mehr als“ „10 km“	2003	[Müc] S. 9
Dehne	„Entstehungsort“ „10 km“	2003	[Deh] S. 5
Kainzbauer	„ungefähr“ „10 km“	o. J.	[Kai]
Bachmann	„erzeugten“ „ca. 10 km“	2011	[Bach] S. 6
Ruder	„in großer Höhe“ „(≈ 10 km)“	1993	[Rud] S. 53
Weger	„Heutzutage wissen wir“ „9–12 km“	2012	[Weg] S. 4
Meschede	„erzeugt“ „9000 m“	2010	[Mes] S. 631
Chew	üblicherweise über 6000 Meter	2014	[Che] S. 1

Tab. 2.1: Entstehungshöhen von Myonen aus Literaturbeispielen ([Syd25] S. 2f.)

Angesichts der Wichtigkeit, die Entstehungshöhe der Myonen zu kennen, verwundert es, wie uneinig sich die Wissenschaftler in diesem Punkt sind. Zudem zeigt die Tabelle 2.1, dass auch in der wissenschaftlichen Literatur auf eine Präzisierung der Höhenangabe verzichtet wird. Die korrekte Entstehungshöhe der Myonen wird nicht nachgewiesen, vielmehr greift man auf den Durchschnitt aller Werte oder den häufigsten Wert zurück. Das ist aber wissenschaftlich betrachtet unbefriedigend.

Die Abweichungen zwischen den genannten Werten und deren Vagheit werfen die Frage auf, warum sich alle Wissenschaftsautoren überhaupt auf eine bestimmte, wenngleich ungefähre, Entstehungshöhe festlegen.

Der Verdacht, dass hier eine Höhe konstruiert wird, bei welcher die (sich mit einer gegebenen Geschwindigkeit fortbewegenden) Myonen noch die Erde erreichen können, liegt nahe. Auf den Energiegehalt detektierter Myonen zu schließen, ist mit heutigen Mitteln möglich. Benutzt man dann die hinreichend bekannte Formel der Zeitdilatation, kommt man auf den Verlängerungsfaktor für die Lebenszeit der Myonen. Hat man damit

diese neue Lebenszeit, ist es simpel, sie mit der vorher angenommenen Geschwindigkeit zu multiplizieren, und man bekommt umgehend die Höhe heraus, aus welcher das Myon die Erdoberfläche erreicht haben muss.

Im Folgenden wird erörtert, wie der Zusammenhang zwischen der Entstehungshöhe und dem Entstehungsmechanismus der kosmischen Myonen zu begründen ist. Dann wird der Zerfallsmechanismus der Myonen betrachtet, um auf die verbleibende Anzahl der Myonen in einer bestimmten Höhe zu schließen. Erster Schritt ist die Untersuchung der Lebenszeit oder Lebensdauer der Myonen.

Was bedeutet eigentlich diese Angabe der Lebenszeit? Hierzu zwei Aussagen:

„Die Lebensdauer eines Myons ist die Zeit zwischen Entstehen und Zerfall dieses Teilchens.“ ([Maa] S. 66) Und: Der Prozess des Myonen-Sterbens wird durch ihre Zerfallswahrscheinlichkeit Γ bestimmt und diese „Zerfallswahrscheinlichkeit Γ führt zu einer konstanten Zerfallsrate für Myonen“ ([Kin] S. 5). Die noch ‚lebenden‘ Myonen lassen sich nach der Gleichung bestimmen:

$$N(t) = N_0 e^{-\frac{t}{\tau_\mu}} \quad ([Kin] \text{ S. } 5) \quad (2.7)$$

Die Gleichung ist als „Zerfallsgesetz“ ([Mes] S. 943) bekannt. Die Anzahl der existierenden Myonen $N(t)$ bezogen auf eine Anzahl betrachteter Myonen N_0 folgen dem in Gleichung 2.7 angegebenen Verlauf. Dieser Verlauf ist allerdings ein statistischer.

Wenngleich es nicht möglich ist, den Zerfallszeitpunkt eines einzelnen Myons vorherzusagen, so wird doch die als Wahrscheinlichkeitskurve aufzufassende Gleichung 2.7 darauf hinweisen, wie viele Myonen nach einer Zeit t noch existieren. Damit sagt die Formel aus, dass es am Ende eines großen Zeitraums t immer noch eine gewisse Wahrscheinlichkeit dafür gibt, dass Myonen existieren. Von einer festgeschriebenen Lebensdauer für Myonen kann also nicht die Rede sein.

Der für den Zerfall charakteristische Wert τ_μ ist die „Zerfallskonstante“ ([Mes] S. 630). Die Zusammenhänge zwischen der Zerfallskonstanten, der Lebenszeit und der Halbwertszeit sind in Sydow [Syd9] nachvollziehbar dargestellt. Karg erläutert: „An dieser Stelle ist nicht die Halbwertszeit $T_{1/2}$ für uns interessant, sondern die mittlere Lebensdauer τ . Die mittlere Lebensdauer ist der Mittelwert der statistischen Verteilung der Lebensdauern. Sie ist der Kehrwert der Zerfallskonstanten und damit die Zeit, nach der nur noch $1/e = 37\%$ aller Myonen vorhanden sind.“ ([Kar] S. 10)

Zum besseren Verständnis ist in Abbildung 2.6 diese Zerfallskurve für die Ausgangsmenge von 100 Myonen mit den charakteristischen Werten dargestellt. Die im Diagramm gezeichnete Funktion nach Gleichung 2.7 hat den Zerfallskoeffizienten 0,455.

Die Maßeinheit des Zerfallskoeffizienten ist $1/\mu\text{s}$, denn er drückt gerade das Reziproke von τ_μ in Gleichung 2.7 aus ([Syd9] S. 4). Damit folgt die Zerfallszeit $\tau_\mu = 1/0,455 = 2,2 \mu\text{s}$ ([Mes] S. 631). Des Weiteren sind in der Abbildung 2.6 charakteristische Größen visualisiert. Der Schnittpunkt mit der Ordinate entspricht der Myonenzahl bei $t = 0$. Die Halbwertszeit sind 50 % von einer Ausgangsmenge. Die mittlere Lebenszeit ergibt sich für die Myonen zu etwa 37 % ([Syd9] S. 4f.). Für den Zerfallskoeffizienten τ_μ ergeben sich dann die Halbwertszeit und die mittlere Lebenszeit durch Auswertung der Zerfallskurve nach Gleichung 2.7 zu den im Diagramm (Abb. 2.6) eingetragenen Zeiten.

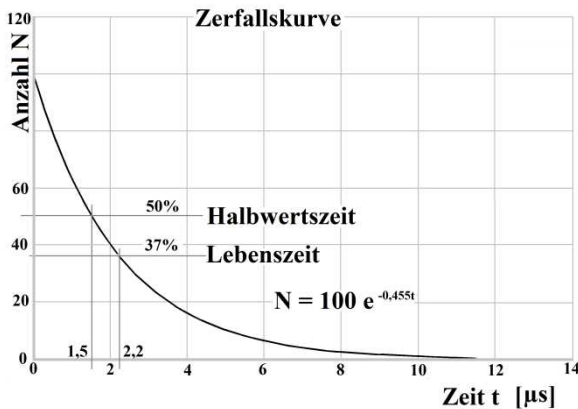


Abb. 2.6: Angenommene Zerfallskurve der Myonen

Was der Kurve in Abbildung 2.6 offensichtlich entnommen werden kann, ist die Unhaltbarkeit der Festlegung, dass Myonen eine vorbestimmbare Lebenszeit haben. Der Prozess des Zerfalls der Myonen ist statistisch und der Zerfall eines einzelnen Myons nur zufällig. Gibt es zu einem Zeitpunkt die Wahrscheinlichkeit, dass nur noch ein Myon der betrachteten Menge N_0 übrig ist, dann würden bei der Verdopplung der betrachteten Menge N_0 zu diesem Zeitpunkt auch zwei übriggebliebene Teilchen wahrscheinlich sein. Damit ist gesagt, dass die Frage nach der Menge der auf Meereshöhe registrierten Myonen nur zu einem Teil vom Zerfallskoeffizienten abhängt. Im Wesentlichen spielt auch die Anzahl der in die Betrachtung einzubeziehenden Myonen eine Rolle. Angesichts der Erkenntnis einer fragwürdigen Argumentationsweise bei der Erklärung des Myonenzerfalls als Beweis für die Zeitdilatation bleibt der Gedanke nicht aus, dass neue Wege zu beschreiten sind. Der gesamte Vorgang der Myonenentstehung und des Myonenzerfalls ist hier erneut zu beleuchten.

Die Erdatmosphäre steht mehr oder weniger unter Dauerbeschuss durch kosmische Partikel aus dem All. Woher dieser Beschuss kommt, will die Wissenschaft noch herausfinden. Er ist aber nachweisbar. Den größten Teil der Partikel machen Protonen aus. Sie fliegen nicht nur mit hoher, sondern fast mit Lichtgeschwindigkeit. Die Energie, mit der sie ankommen, ist also sehr hoch. Wenn sie mit den Partikeln der Atmosphäre kollidieren, gibt es eine Wechselwirkung. „In den oberen Atmosphärenschichten stoßen

diese [Protonen] mit Molekülen zusammen, wobei u. a. geladene Pionen und Kaonen entstehen.“ ([Bach] S. 5) Diese „sind nicht stabil, sondern sie zerfallen weiter, unter anderem in Myonen“ (ebd.). Zusammen mit den vielen anderen Zerfallsprodukten der Pionen und Kaonen bilden sie einen kosmischen Schauer. Die Abbildung 2.7 illustriert dies: Vier kosmische Teilchen stehen in Wechselwirkung mit Molekülen der Atmosphäre, bilden Pionen und ein Schauer aus Teilchen geht auf die Erde nieder.

Die Wechselwirkung der Teilchen „passiert“ nicht in einer vorbestimmten Höhe. Der wissenschaftlichen Akkuratessse wegen ist die Frage nach der Höhe lediglich eine nach der Wahrscheinlichkeit des Zusammenstoßes kosmischer Teilchen mit den Teilchen der Atmosphäre.

Zur Beantwortung wird die Atmosphäre in Volumenelemente eingeteilt. Dem Volumenelement kommt eine bestimmte Dichte zu, die sich aus der Anzahl der im Volumenelement enthaltenen Moleküle ergibt. Kennt man dann den Wirkungsquerschnitt der Moleküle mit den kosmischen Partikeln, bei welchem die Wechselwirkung ausgelöst wird, lässt sich die Wirkungswahrscheinlichkeit des kosmischen Teilchens in diesem Volumenelement errechnen. Nach diesem „Fahrplan“ wird im Folgenden die Wirkungswahrscheinlichkeit für die kosmischen Teilchen in der Atmosphäre berechnet.

Zuerst ein Blick auf die Atmosphäre. Bach ([Bach] S. 5) spricht davon, dass die gesuchte Wechselwirkung in den „oberen Atmosphärenschichten“ stattfindet. Aussagen, dass die Atmosphäre als unendlich hoch angenommen werden müsse ([Meyr] S. 408; [Köh]), sind nicht hilfreich. Es soll für die weiteren Betrachtungen von einer Höhe der Atmosphäre ausgegangen werden, die praktikabel ist.

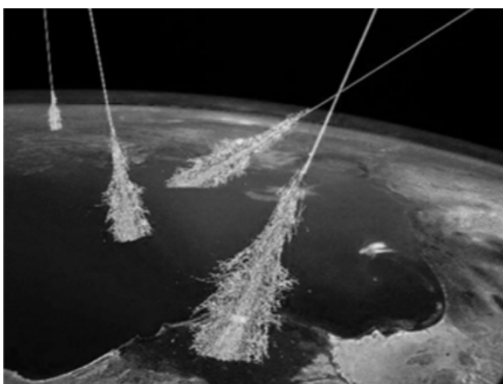


Abb. 2.7: Entwicklung von kosmischen Schauern ([Swo])

Die Praktikabilität ist wie folgt erklärt: Eine Atmosphäre, die bis ins Unendliche geht, bedeutete zwangsläufig, dass es Teilchen der Atmosphäre geben muss, die ebenso zur Atmosphäre eines anderen Planeten zu zählen wären. Aber die Atmosphäre eines Planeten ist seine Gashülle. „Diese [...] wird durch die Anziehungskraft des Himmelskörpers in dessen Umgebung gehalten.“ ([Frö]) Teilchen, die wegen ihrer Geschwindigkeit einen

höheren energetischen Wert haben, als durch die Gravitationskraft des Planeten kompensiert werden kann, gehören nicht mehr zur Atmosphäre. Sie würden die Atmosphäre verlassen.

Teilt man die Atmosphäre in die ihr zuordenbare Schichten ein, wird als die äußere Schicht die Exosphäre mit 10 000 km ([Dec]) angegeben. Zu prüfen ist, ob die Betrachtung bis in diese Höhe sinnvoll ist. Um an dieser Stelle weiterzukommen, wird sich des Mittels der barometrischen Höhenformel bedient:

$$p = p_0 e^{-\frac{h}{H}} \text{ ([Rib] S.5)} \quad (2.8)$$

Sie bildet den Druckabfall als Exponentialfunktion ab und ermöglicht eine Annäherung an den Druckabfall in der Atmosphäre über die Höhe durch eine einfache Exponentialkurve. Die erforderlichen Werte finden sich in der DIN 5450, die eine Norm- oder Standardatmosphäre ([Stü]) bis in eine Höhe von 88 km definiert. Dort ist der Zusammenhang von Druck und Dichte als Funktion der Höhe in Form einer Wertetabelle hinterlegt. Mithilfe einer Excel-Tabelle lassen sich diese Werte fitten und in eine Exponentialfunktion überführen ([Syd16]). Damit ergeben sich die folgenden Gleichungen:

$$p(h) = 1,0465e^{-0,000143h} \text{ mit } h[\text{m}]; p[\text{Bar}] \quad (2.9)$$

$$\rho(h) = 1,4325e^{-0,000143h} \text{ mit } h[\text{m}]; \rho[\text{kg/m}^3] \quad (2.10)$$

Mit der Formel für die Dichte ist durch einfaches Aufaddieren die Masse der Atmosphäre in Abhängigkeit von der Höhe ermittelbar ([Syd16]). Das Aufaddieren der Massen bis zur gewünschten Höhe ergibt den folgenden Zusammenhang:

$$M_{KS}(h) = 5,13226 \cdot 10^{18} \{1 - e^{-0,0001427h}\} [\text{kg}] \text{ ([Syd16] S. 6)} \quad (2.11)$$

Durch willkürliche Festlegung der Höhe von 80 km ist so die Masse der Luft bis in diese Höhe berechnet worden. Betrachtet man den Rest der Luftmassen, die sich oberhalb der angenommenen Höhe befinden, und setzt diese mit der gesamten Atmosphärenmasse in Relation, so ergibt sich:

$$\frac{M_{KS(h=\infty)} - M_{KS(h=80000)}}{M_{KS(h=\infty)}} 100 = 100e^{-0,0001427 \cdot 80000} = 0,0011\% \quad (2.12)$$

Das bedeutet, dass bei Betrachtung der Atmosphäre bis in eine Höhe von 80 km ganze 99,9989 % der Atmosphärenmasse beachtet werden. Damit kann die Atmosphärenhöhe aus praktischen Erwägungen für die kosmischen Teilchen bis zu 80 km Höhe als relevant angenommen werden.

Streng genommen muss davon ausgegangen werden muss, dass auch über 80 km Höhe noch Teilchen miteinander kollidieren können, doch sollen sie wegen der anzunehmenden

Seltenheit das Ergebnis dieser Betrachtung nicht beeinflussen. Hingegen muss darauf geachtet werden, dass für diese Betrachtung eine gleichmäßige Atmosphäre benötigt wird. Es sollten also die Bestandteile in einer gleichbleibenden Mischung vorliegen. Die Entmischung von Bestandteilen der Atmosphäre machte deren mathematische Modellierung ungleich schwerer. „Eine solche Entmischung wird aber unterhalb etwa 80 km Höhe nicht beobachtet.“ ([Roe] S. 71)

Als nächstes ist zu ermitteln, von wie vielen Teilchen oder Molekülen je Volumenelement auszugehen ist. Dabei kann man durchaus von der Zusammensetzung der Atmosphäre in den verschiedenen Höhenbereichen ausgehen. Man erhält dann eine Berechnung, die auf die Durchmesser und Massen der unterschiedlichen Bestandteile und deren Konzentration in der Atmosphäre eingehen muss.

Zur Vereinfachung dieser Rechnung sei über all diese Teilchen ein Durchschnitt gebildet und dieser dann zum Typenvertreter deklariert. Ohne den Beweis der Richtigkeit anzutreten, soll als Typenvertreter das Stickstoffmolekül bzw. sogar nur das Stickstoffatom angenommen werden, denn wesentlich für die Wechselwirkung sind lediglich die Atomkerne.

Die Ermittlung der Anzahl der Stickstoffatome in einem Volumenelement lässt sich aus der Atmosphärendichte ρ_A in diesem Volumenelement ableiten. Dabei ergibt sich die im Volumenelement vorhandene Masse m_g aus dem Produkt der Dichte ρ_A mal dem Volumen V_E des betrachteten Volumenelements. Teilt man diese Gesamtmasse m_g durch die Masse eines einzelnen Stickstoffatoms m_N , erhält man die Anzahl N_N der Stickstoffatome im Volumenelement:

$$N_N = \frac{V_E \cdot \rho_A}{m_N} \quad (2.13)$$

Der Einfachheit halber ist davon auszugehen, dass das Volumenelement gerade dem Würfel mit der Seitenlänge 1 m entspricht. Spätere Variationen des Volumenelementes beziehen sich dann lediglich auf dessen Höhe. Der Querschnitt bleibt immer 1 m^2 . Es folgt die Vereinfachung:

$$N_N = 1 \text{ m}^3 \cdot \frac{\rho_A}{m_N} \quad (2.13a)$$

Ist nun die Anzahl der Stickstoffatome im Volumenelement bekannt, muss die Wahrscheinlichkeit berechnet werden, mit der ein Proton ein solches Atom (besser gesagt, dessen Kern) trifft. Dazu wird von der Gleichverteilung der Stickstoffatome im Volumenelement ausgegangen ([Syd27] S. 2). Mit dieser Gleichverteilung ist es möglich, das Volumenelement in Schichten mit gleicher Anzahl an Stickstoffatomen einzuteilen. Für die Ermittlung der Wahrscheinlichkeit einer Kollision von Protonen, die durch die

Deckfläche des Volumenelements rasen, ist nun jede Schicht für sich zu betrachten. Ein solches Proton kann in einer Schicht auch nur maximal eine Kollision haben. Der Winkel, in dem das Proton einschlägt, spielt dabei keine Rolle.

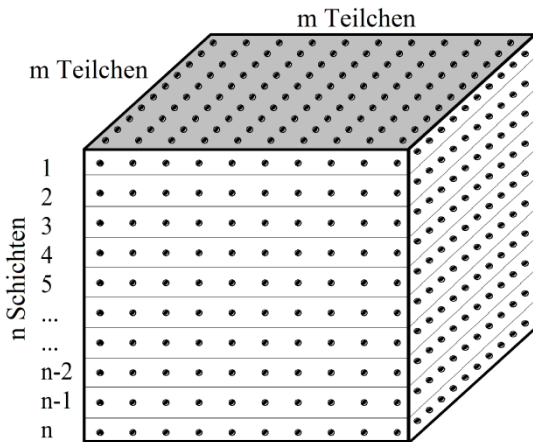


Abb. 2.8: Einteilung eines Volumenelements in Schichten mit identischer Anzahl von Atomen ([Syd27] S. 2)

Für den hier angenommenen Würfel gilt $m = n$. Die Anzahl m der sich in einer Schicht befindlichen Teilchen N_E berechnet sich dann zu:

$$N_E = \sqrt[3]{\left(\frac{\rho A}{m_N}\right)^2} \quad (2.14)$$

Mit der Kenntnis der Teilchen, die in einer Schicht oder Ebene liegen, kann die Wahrscheinlichkeit p berechnet werden, mit der ein diese Ebene durchquerendes Proton eine Kollision verursacht. Diese Wahrscheinlichkeit entspricht dem Verhältnis des Querschnitts mit dem Wirkungsradius R_W aller Stickstoffatome und der gesamten Querschnittsfläche A :

$$p = N_E \frac{\pi}{4} R_W^2 \cdot \frac{1}{A} \quad (2.15)$$

Da von einer Querschnittsfläche $A = 1 \text{ m}^2$ ausgegangen wird, ist sie bei der Berechnung zu

vernachlässigen, wenn man die Maßeinheiten richtig anwendet.

Mit der so errechneten Trefferwahrscheinlichkeit für eine Schicht des betrachteten Volumenelements ist auf die Trefferwahrscheinlichkeit für das gesamte Volumenelement zu schließen.

$$p_n = 1 - (1 - p)^n \quad ([\text{Syd27}] \text{ S. 4 (3)}) \quad (2.16)$$

Diese Formel beruht darauf, dass sämtliche Bedingungen als konstant angenommen werden. Es ergibt sich, dass von einer Gesamtanzahl G von Protonen, die das

Volumenelement durchqueren, ein Anteil P_g durch eine Kollision wegfällt. Diese Protonen spielen für das nächste, darunterliegende Volumenelement keine Rolle mehr:

$$P_g = p_n \cdot G \quad (2.17)$$

Bei diesem Prozess der Durchquerung übereinanderliegender Volumenelemente der Atmosphäre ändern sich sowohl deren Dichte als auch die Anzahl der übrig gebliebenen Protonen mit der Höhe. Dabei ist die Dichte nach der Dichtefunktion Gleichung 2.10 zu variieren und die in das Volumenelement eindringenden Protonen ergeben sich nach der Rekursionsformel:

$$G_{i+1} = G_i - P_g \quad (2.18)$$

Mit den gefundenen Gleichungen ist es möglich, den funktionellen Verlauf der Protonenkollisionen zu ermitteln ([Syd25]).

Es gibt sicherlich Kritikpunkte, an erster Stelle die vielen getroffenen Annahmen: die gefittete Dichteverteilung der Luft über die Höhe, die Annahme eines Typenvertreters und die willkürliche Festlegung eines Wirkungsradius der Teilchen. Auch können Kaonen und noch andere Teilchen ([Iml] S. 4 und S. 14) an der Myonenentstehung beteiligt sein, blieben aber bei den Überlegungen außer Acht.

Doch zeigt die in Abbildung 2.9 dargestellte Kurve erstens, dass grundsätzlich nicht von einer speziellen Kollisionshöhe der Protonen die Rede sein kann. Kollisionen können in jeder Höhe passieren. Zweitens gibt es dabei eine Höhe, in welcher die Wahrscheinlichkeit für Kollisionen maximal ist.

Mit dem gezeigten höhenabhängigen Verlauf der Wahrscheinlichkeitskurve für Kollisionen ist nun der erste Schritt auf dem Weg der Interpretation des Myonenzerfallsexperiments getan.

Wenn die Protonen mit den Stickstoffkernen zusammenstoßen, entstehen die Pionen. Der Entstehungsort sollte der Ort der Kollision sein. Damit gibt die in Abbildung 2.9 dargestellte Kurve ebenfalls die Wahrscheinlichkeit der Pionenentstehung wieder. Unterstellt man für die Pionen ein exponentielles Zerfallsgesetz (Abb. 2.6 S. 34), ergibt sich für den Zerfall der Pionen, dass diese Exponentialkurven für jeden Ort der Entstehung der Pionen anzutragen sind ([Syd25] S. 9 Abb. 2). Für den Zerfall der Pionen an einem Ort sind dann die Werte aller Zerfallskurven an diesem Ort zu addieren.

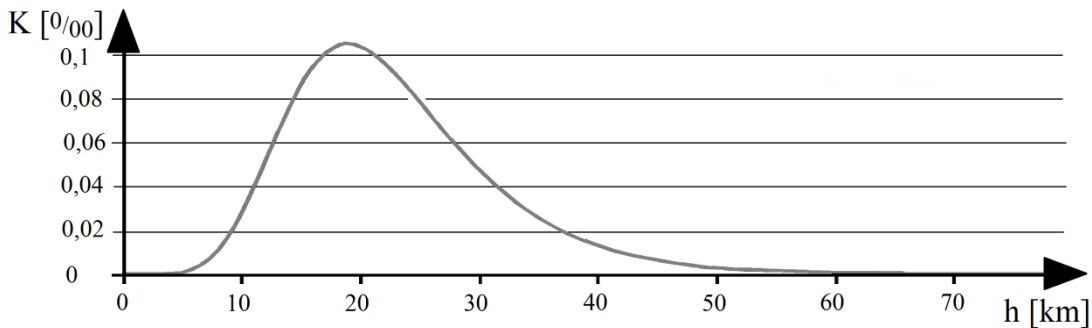


Abb. 2.9: Wahrscheinlichkeit der Protonenkollisionen als Funktion der Höhe ([Syd25])

Aufgrund der extrem kurzen mittleren Lebensdauer der Pionen von $2,6 \cdot 10^{-9}$ s wird laut Berechnung die Zerfallskurve der Pionen denselben Wahrscheinlichkeitsverlauf haben, wie er in Abbildung 2.9 ersichtlich ist. Das bedeutet nicht, dass die Pionen sich nicht weiterbewegt hätten oder sofort zerfallen würden. Was hier berechnet wurde, ist die Zerfallswahrscheinlichkeit von Pionen in einer Höhe.

Sicherlich ist zu beachten, dass in diese Rechnung zum Zerfallsprozess der Pionen keinerlei relativistische Zeitdilatation einging.

Fasst man die so entstandene Kurve des Pionenzerfalls als Entstehungskurve der Myonen auf, ist die gleiche Prozedur mit den Zerfallskurven der Myonen noch einmal durchzuführen. In Abbildung 2.10 ist zu erkennen, dass der Myonenzerfall nicht wesentlich, aber doch deutlich von der Kurve des Pionenzerfalls abweicht.

Mit der Berechnung der Wahrscheinlichkeiten der zerfallenden Pionen auf der Erdoberfläche ergibt sich ein Wert von 0,0054 Pionen je 1000 einfallenden kosmischen Protonen ([Syd25] S. 5; Tab. 4; F40017). Geht man von einem Beschuss kosmischer Protonen und Neutronen in der Größenordnung von etwa 10 000 Teilchen je Quadratmeter und Sekunde aus (Abb. 2.11), müssten theoretisch etwa 0,054 Pionen je Quadratmeter und Sekunde auf Meereshöhe zu registrieren sein.

Ein Rückschluss von den Pionen in der Höhe null auf die Myonen derselben Höhe ist nicht direkt möglich. Nimmt man an, dass jedes Pion zu einem Sekundärteilchenschauer führt, dann ergibt sich das 10^6 -Fache ([Ahr] S. 44) an in Meereshöhe entstehenden Sekundärteilchen im Vergleich zu den einfallenden Primärteilchen. Da nur etwa 1,7 % der Sekundärteilchen ([Ahr] S. 44) Myonen sind, folgte daraus, dass mit $(0,054 \cdot 10^6 \cdot 0,017)$ bis zu 1000 Myonen je Quadratmeter und Sekunde in Meereshöhe zu erwarten sind.

Dieser Wert kann in der Praxis nicht nachgewiesen werden. Messungen erbrachten Werte von um die 200 Myonen pro Quadratmeter und pro Sekunde ([Fui], [Eck] S. 28, [Kin] S. 6). Damit steht der hier durchgeführten klassischen Rechnung die Realität entgegen. Die Rechnung sagt viel mehr Myonen vorher, als in der Realität nachgewiesen

Folgeseiten für die Leseprobe entfernt

finden. Ohne Protokolle sind die veröffentlichten Daten weder nachvollziehbar noch einzuordnen.

Im Übrigen weisen die angegebenen Dilatationswerte eindeutig auf die Anwendung der Formeln der „eingeschränkten Relativitätstheorie“ hin, da sie positiv sind. Im Rahmen der SRT dürften Dilatationen bezüglich der als ruhend angenommenen Uhr auf der Erde grundsätzlich nur negativ sein. Denn es sind die bewegten Uhren, die langsamer gehen. Damit ist der Schluss erlaubt, dass alle auf dieser theoretischen Basis interpretierten Atomuhrenversuche derselben Wertung zu unterziehen sind wie die des Hafele-Keating-Experiments: Wenn diese Versuche etwas nachweisen, dann ist es nicht die SRT.

Ein Nachweis der SRT könnte ausschließlich sein, dass gemessene Zeitdilatationen symmetrisch ausfallen. Nach Osten geflogene Uhren müssten dann dieselbe Zeitdilatation ausweisen wie die mit gleicher Geschwindigkeit nach Westen geflogenen Uhren. Zusätzlich müssten gefundene Zeitdilatationen zur auf der Erde ruhenden Uhr immer negativ ausfallen.

An dieser Stelle scheint es angezeigt, alle derartigen Versuche, in denen Atomuhren in Flugzeugen transportiert werden, als unbrauchbar für den Nachweis der SRT zu deklarieren. Unterstellt man aber, dass die Messergebnisse valide sind, müssen sie einen physikalischen Grund haben. Doch welchen? Wenn die Relativgeschwindigkeit nach den Herleitungen der SRT keine Ursache liefert, bleibt nach heutigem Wissensstand nur die Gravitation übrig. Hierauf weisen sogar Hafele und Keating selbst hin: „Obwohl es völlig gerechtfertigt ist, in unseren theoretischen Näherungen Terme höherer Ordnung [...] zu vernachlässigen, können aber vielleicht nicht ganz vernachlässigbare Effekte erster Ordnung aus der Anwesenheit von Sonne und Mond erwachsen.“ (übersetzt aus [Haf3] S. 167)

Solche Gedanken nach dem Einfluss einer Beschleunigung auf die Zeitdilatation sind an dieser Stelle nur hypothetisch. Ob ein solcher Einfluss möglich ist, wird der nächste Versuch zeigen. Jedenfalls müsste der Einfluss einer Beschleunigung immer auch ein absoluter sein, der in irgendeiner Weise von einem existierenden Potenzialgefälle abhängt. Damit erscheint die Einführung eines allgemeinen, sich am Fixsternhimmel orientierenden Koordinatensystems gerechtfertigt.

Das Maryland-Experiment (1975)

Ein zentrales Experiment, das den Einfluss von Gravitation und auch der Geschwindigkeit auf die Zeitdilatation nachweisen sollte, ist das Maryland-Experiment.

„Eine Forschergruppe der Universität von Maryland (USA) führte den Versuch von Hafele und Keating sozusagen seriös durch. Anstelle gewöhnlicher

Verkehrsflugzeuge auf nicht genau bekannten Kursen wurde ein Flugzeug der US-Navy verwendet, dessen Kurs während des ganzen Fluges sehr genau aufgezeichnet wurde. Dieses Flugzeug konnte bis zu 15 Stunden seine Runden drehen und bis in eine Höhe von 35'000 Fuss aufsteigen. Dabei wurde schon während des Fluges die Zeit der drei Atomuhren an Bord mit derjenigen der drei Uhren derselben Bauart am Boden verglichen, indem ständig Laserpulse mit einer Pulsbreite von 0.1 ns ausgetauscht wurden. Die drei fliegenden Uhren wurden sorgfältig gegen Erschütterungen, Temperaturschwankungen, Druckunterschiede und Einflüsse des Magnetfeldes abgeschirmt, und die baubedingten Differenzen zwischen den beteiligten 6 Atomuhren wurden vor, zwischen und nach den Flügen genau ausgemessen und rechnerisch korrigiert.“ ([Eck] S. 145)

Die Versuchsdurchführung ließ schon wegen der beschriebenen Verbesserungen ein aussagekräftigeres Ergebnis als beim Hafele-Keating-Experiment erwarten, und letztlich konnte „C.O. Alley [...] mit seinem Team die Prognosen von SRT und ART insgesamt mit einer Genauigkeit von etwa 1.6 % bestätigen“ (ebd.).

Die Bemerkung, dass dieser Versuch „seriös“ durchgeführt wurde, soll sicherlich jenen von Hafele und Keating nicht als unseriös charakterisieren. Sie verweist lediglich darauf, dass viele Störfaktoren des Hafele-Keating-Experiments eliminiert wurden. So wurden die Messungen der Zeitdilatation in Höhen durchgeführt, die über mehrere Stunden konstant gehalten wurden. Es gab auch nicht ausschließlich nur die Messungen vor und nach dem Flug, sondern es wurden kontinuierlich Messungen in relativ konstanten Abständen gemacht. Dadurch ergaben sich statistisch vermittelbare Ergebnisse und die absolvierten Höhenänderungen und Start- und Landemanöver waren gut herauszurechnen.

Es ging nicht darum, Effekte aus der Erddrehung selbst zu bestimmen. Solche Effekte, wie sie im Hafele-Keating-Experiment angenommen wurden, wären bei den im Maryland-Experiment durchgeführten lokalen Flügen zu klein ([All2] S. 18). Da das Flugzeug eine Runde in Form eines Nord-Süd-ausgerichteten Stadions flog, spielte die Erddrehung bei der Messung keine Rolle. Wenngleich im Maryland-Experiment die Möglichkeit der Anwendung der Formeln von Builder nicht ausgeschlossen wurde ([All2] S. 18), haben die zur Auswertung des Experiments herangezogenen Formeln nichts mehr mit der „eingeschränkten Relativitätstheorie“ zu tun.

Der Unterschied in der Herangehensweise der beiden Experimente ergibt sich aus deren jeweiligem Zweck. Während das Hafele-Keating-Experiment darauf ausgelegt war, die SRT mit einer aus der Relativgeschwindigkeit resultierenden Zeitdilatation zu bestätigen, „ging es in dem [Maryland-] Experiment um die gravitative Rotverschiebung, das ist die Zeitdilatation aufgrund von Gravitation, wie sie durch die allgemeine Relativitätstheorie vorhergesagt wird“ ([Scu4]). Zwar fanden in ersterem Experiment die gravitative Rotverschiebung und im Maryland-Experiment die geschwindigkeitsabhängige

Zeitdilatation Berücksichtigung, doch standen sie nicht im Zentrum des Interesses des jeweiligen Experiments.

Entgegen der oben zitierten Andeutung, dass das Maryland-Experiment gewissermaßen das bessere Hafele-Keating-Experiment sei, muss hier festgestellt werden, dass sich die beiden Experimente in ihrer Auswertung gerade widersprechen sollten. Wenn das Maryland-Experiment eine geschwindigkeitsabhängige Zeitdilatation nach den Formeln und den Voraussagen der SRT nachweisen würde, wären die im Hafele-Keating-Experiment gefundenen Asymmetrien konsequenterweise nicht zu erklären.

In Abbildung 2.30 sind absolute Zeitdilatationen als Funktionen der Versuchszeit eingetragen. Die steilste Kurve zeigt die zu erwartende Zeitdilatation aus der Gravitation. Diese sollte zum Ende des Versuchs 52,8 ns betragen. Im negativen Bereich des Diagramms ist die Kurve der aus der Geschwindigkeit resultierenden Zeitdilatation eingetragen. Da die Piloten versuchten, die Geschwindigkeit des Flugzeugs weitestgehend konstant zu halten, stellt sich diese Kurve als Gerade dar. Der zum Versuchsende mit -5,7 ns angenommene Wert der Dilatation wird dieser Geschwindigkeit zugeschrieben. Da sich die beiden Dilatationen überlagern sollten, ergibt sich die mittlere Kurve als Summe der beiden. Die mittlere Kurve entspricht damit der zu messenden Gesamtdilatation. In diese wurden dann noch die gemessenen Werte eingetragen.

Die Deckung der gemessenen Werte mit der Summe der vorausgesagten Zeitdilatationen ist erstaunlich gut. Damit ist der Nachweis der Theorie durch die Messwerte erbracht. Seitens der Wissenschaft stellt sich dieses Ergebnis als grandios dar, da es mit einem Versuchsaufbau gleich zwei Theorien bestätigt. Die sich bei so viel Übereinstimmung aufdrängende Frage ist jedoch, ob und wie sich das Ergebnis verifizieren lässt. Wenn das Maryland-Experiment tatsächlich die SRT bedingungslos beweisen sollte, müsste dies klar nachvollziehbar sein.

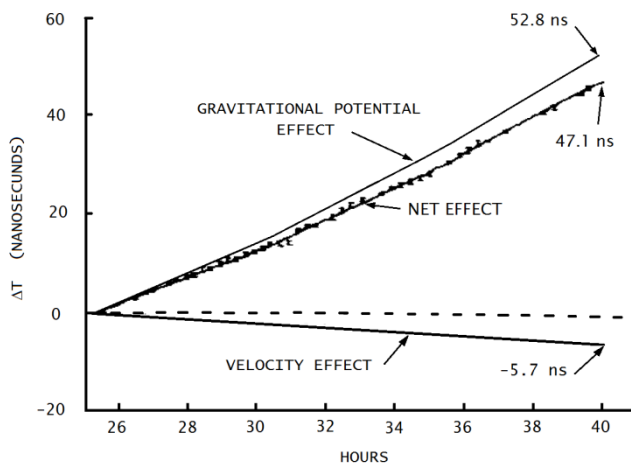


Abb. 2.30: Auswertung der Zeitdilatation im Maryland-Experiment ([All2] S. 21)

Dazu werden die folgenden Werte, C.O. Alley folgend ([All2] S. 21), überprüft:

- die Zeitdilatation aus der Geschwindigkeit, ermittelt nach der Formel

$$\frac{\Delta\tau}{t} = v^2 / 2c^2 \quad (2.46)$$

Die einzusetzende mittlere Geschwindigkeit wurde mit 138 m/s angegeben, sodass sich die Zeitdilatation zu $\Delta\tau = 0,106 \cdot 10^{-12}$ t ergibt.

Die absolute Zeitdilatation über den Zeitraum von $t = 15$ h ergibt sich dann zu 5,72 ns. Damit bestätigt sich die angegebene Flugzeit von genau 15 h.

- die Zeitdilatation durch die Gravitation, ermittelt nach

$$\frac{\Delta\tau}{t} = \frac{\Delta\phi}{c^2} \quad (2.47)$$

Zur Berechnung sind die einzelnen Dilatationen in den verschiedenen Höhen zu summieren. Bei Alley ([All2] S. 12 (18) wird die Potenzialdifferenz angegeben mit

$$\Delta\Phi = gh \quad (2.48)$$

Die mit dieser Formel erreichte Genauigkeit führt auf die relativen Zeitdilatationen in den einzelnen Höhen gem. Gleichung 2.46 zu 25000 ft $\equiv 0,832 \cdot 10^{-12}$; 30000 ft $\equiv 0,998 \cdot 10^{-12}$; 35000 ft $\equiv 1,164 \cdot 10^{-12}$, sodass sich die mittlere aus dem Gravitationsgefälle ergebende Zeitdilatation für den gesamten Zeitraum zu $d\tau/t = 0,9981 \cdot 10^{-12}$ ergibt. Daraus leitet sich für 15 h Flugzeit eine absolute Zeitdilatation aus Gravitation von $d\tau = 53,9$ ns ab.

Diese als theoretische Vorgabe berechnete Zeitdilatation weicht um 2 % von der in der Arbeit (Abb. 2.30) verwendeten Zeitdilatation ab. Auch die Anwendung genauerer Formeln für die Berechnung des Gravitationspotenzials führen zu keinem anderen Ergebnis.

Interessant ist es nun, die Werte für die einzelnen Zeitbereiche in den unterschiedlichen Höhen zu betrachten. Die für die theoretische Vorbetrachtung erforderlichen Werte sind in den beiden vorangegangenen Anstrichen bereits ermittelt worden. Aus der Überlagerung (Subtraktion) der Zeitdilatationen aus Gravitation und der Geschwindigkeit ergibt sich die zu erwartende Zeitdilatation der Messwerte.

Diese sind:

- 25000 ft $\equiv 0,832 \cdot 10^{-12} - 0,106 \cdot 10^{-12} = 0,726 \cdot 10^{-12}$
- 30000 ft $\equiv 0,998 \cdot 10^{-12} - 0,106 \cdot 10^{-12} = 0,892 \cdot 10^{-12}$
- 35000 ft $\equiv 1,164 \cdot 10^{-12} - 0,106 \cdot 10^{-12} = 1,058 \cdot 10^{-12}$

Werden diese Werte ebenso auf ihre 5 h Zeitabschnitte bezogen und summiert, ergibt sich die zu erwartende Zeitdilatation im Versuch zu 48,2 ns. Hier geht die Toleranz der Zeitdilatation aus dem Gravitationsgefälle mit ein.

Diese theoretischen Werte sind nun mit den im Maryland-Experiment ermittelten Werten zu vergleichen. Um die Anstiege der Messdaten aus Abbildung 2.30 zu entnehmen, wird eine rechentechnische Methode nach [Syd1] angewendet. Abbildung 2.30 wird in ein Grafikprogramm überführt. Dann werden Geraden an die zu analysierenden Messdaten gelegt und mittels Cursor vermessen. Eine Umrechnung der Cursordaten in die Werte des Diagramms ermöglicht die Auswertung der Messdaten.

Höhe [ft]	Höhe [m]	Anstieg nach [Syd1]	Umrechnung [10^{-12}]
25000 ft	7620	2,73	0,758
30000 ft	9144	3,34	0,928
35000 ft	10668	3,73	1,036

Tab. 2.4: Ermittelte Anstiege der Messwerte des Maryland-Experiments

Im Ergebnis dieser Prozedur ([Syd1] S. 13 Tab. 6) ergeben sich für die einzelnen Abschnitte des Maryland-Experimentes die Anstiege der Messdaten. Diese sind entsprechend den Maßstäben in Abbildung 2.30 in ns/h angegeben. Die Umrechnung in die vergleichbare Größenordnung 10^{-12} erfolgt mit dem Faktor 1/3,6. Es ergeben sich die in Tabelle 2.4 aufgeführten Werte.

Mit diesen ermittelten Werten ist der Versuch über seinen gesamten Zeitverlauf mit der Theorie zu vergleichen. In Abbildung 2.31 sind die relativen Zeitdilatationen des Maryland-Experiments dargestellt. In Schwarz ist die Verbindung der Werte der theoretischen Vorhersage gezeichnet. Prägnant an diesen Werten ist, dass sie streng auf einer Geraden liegen. Das war auch zu erwarten, denn der mathematische Zusammenhang ist mit Gleichung 2.46 als Gerade gegeben. Zu beachten ist dabei, dass dieser lineare Zusammenhang nur in schwachen Gravitationsfeldern und/oder über geringe Höhendifferenzen gilt. Gegen den theoretischen Verlauf der zu erwartenden Zeitdilatation sind in Weiß die praktischen Messwerte gezeigt, wie sie sich aus Abbildung 2.30 ergeben.

Der eingangs berichteten Darstellung, dass der durchgeführte Versuch die Übereinstimmung von Theorie und Praxis dokumentiert, kann ab hier nicht mehr gefolgt werden. Mit einer Abweichung der Werte aus Theorie und Praxis von bis zu 4 % steht die oben angegebene 1,6%ige Genauigkeit des Versuchs infrage.

Insbesondere ist aber auffällig, dass sich die Linien in Abbildung 2.31 kreuzen, was nicht mit Toleranzen der Messdatenaufnahme zu erklären ist. Da sich die Werte aus dem Anstieg vieler Messdaten ergeben, sind sie statistisch gut abgesichert. Diese Abweichung der erhobenen Messdaten von der Theorie zu vernachlässigen, ist damit nicht möglich. Es muss für dieses Phänomen eine physikalische Ursache geben.

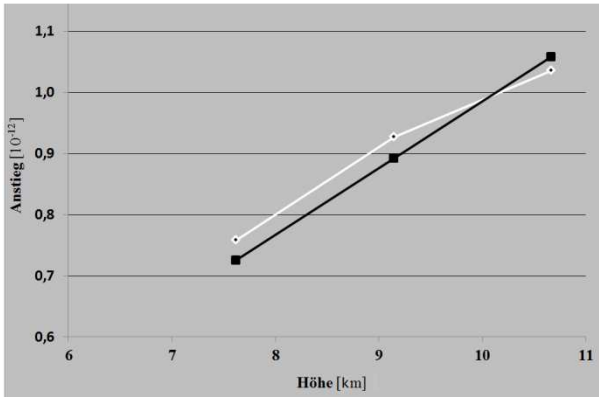


Abb. 2.31: Anstiege der Messdaten des Maryland-Experiments

Wenn es tatsächlich zusätzlich zu den bislang betrachteten Ursachen für die Zeitdilatation im Maryland-Experiment einen physikalischen Einfluss geben sollte, dann kann das nicht von der Geschwindigkeit herrühren. Die Geschwindigkeit, die die Uhren relativ zur Bodenstation absolvierten, wurde bewusst konstant gehalten. Selbst wenn sie in einer Flugrunde variierte, so waren aber die Flugrunden an sich immer identisch. Es ist nicht davon auszugehen, dass in der Höhe von 35 000 Fuß mit einer anderen Geschwindigkeit geflogen wurde.

Insofern ist es folgerichtig, den hier vermuteten zusätzlichen Einfluss auf die Zeitdilatation in einer nicht beachteten Gravitation zu suchen. Deshalb sei hier mit Alley gefragt, ob „das Gravitationsfeld der Sonne die echte Zeit auf einer im freien Fall befindlichen Erde [beeinflusst]“ (frei übersetzt aus [All2] S. 25).

Um abzuschätzen, welcher Einfluss aus einer Bewegung im Gravitationsfeld der Sonne auf die Zeitdilatation einer mit der Erdrotation bewegten Uhr erwachsen kann, wird die mögliche Zeitdilatation nach der Formel berechnet:

$$t(r_1) = t(r_2) \frac{\sqrt{1 - \frac{r_S}{r_1}}}{\sqrt{1 - \frac{r_S}{r_2}}} \quad ([\text{Syd3}] \text{ S. } 13) \quad (2.49)$$

Der Gravitationsradius der Sonne r_S ist mit 3 km anzunehmen ([Teu]) und für r_1 und r_2 finden sich die Werte aus dem Abstand der Erde von der Sonne mit $149,6 \cdot 10^6$ km plus/minus dem Erdradius mit 6371 km. In einfacher Rechnung ergibt sich dann die Zeitdilatation einer Uhr zwischen ihren Positionen zu Mittag und zur Mitternacht zu:

$$\frac{t(r_2) - t(r_1)}{t(r_2)} = 1 - \frac{\sqrt{1 - \frac{r_S}{r_1}}}{\sqrt{1 - \frac{r_S}{r_2}}} = 8,5 \cdot 10^{-13} \quad (2.50)$$

Dieser Wert ([Hof]) liegt in derselben Größenordnung wie die Anstiege des Maryland-Experiments (Tab. 2.4). Damit sollte ein Einfluss auf die Ergebnisse des Experiments zu

erwarten sein. Mit diesem berechtigten Verdacht des Einflusses der Sonnengravitation ist die Ursache für die Zeitdilatation zu ergründen.

Die naheliegendste Antwort nach der Ursache der gravitativen Zeitdilatation liegt in der Masse. Tatsächlich kann es ohne Masse keine Gravitation und somit auch keine gravitative Zeitdilatation geben. Allerdings findet die Zeitdilatation sicherlich nicht zwingend an der Masse statt. Die Beeinflussung des Ganges der Uhren ist allemal vom Abstand zur betrachteten Masse abhängig.

Das Gravitationspotenzial als die gesuchte Ursache zu bezeichnen, führt nicht weiter. Zwar wird es in vielen Gleichungen zur Berechnung der Zeitdilatation verwendet, doch übt es selbst keine Wirkung auf den Gang der Uhren aus. Das Potenzial ist die Darstellung eines Unterschieds. Betrachtet man die im Gravitationsfeld der Erde gängige Berechnung des Gravitationspotenzials $\Phi = g \cdot h$ als Produkt der Gravitationsbeschleunigung g mal der Höhe, dann wird damit lediglich die Potenzialdifferenz $\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$ ausgedrückt, die sich im senkrechten Abstand h einstellt. Die Potentiale Φ_1 und Φ_2 sind ihrerseits als Differenz zum Potenzial im Unendlichen anzusehen. Deshalb ist die Aussage, an einem Ort des Gravitationsfeldes bestehe ein bestimmtes Potenzial, nicht sinnvoll.

Die Analogie zur Zeitdilatation ist offensichtlich. Auch zur Ermittlung der Dilatation einer Uhr ist die Differenz des Ganges zweier Uhren zu ermitteln, denn eine Dilatation ist relativ und bezieht sich grundsätzlich auf eine Vergleichsuhr. Dass der Gang jeder einzelnen Uhr aber nicht von dieser Differenz abhängen kann, leuchtet ein.

Ist es also die Gravitation selbst, die den Gang der Uhren bestimmt? Geht man bei der Beantwortung dieser Frage von einem Gravitationsfeld aus, könnte man leicht zu einem solchen Schluss kommen. unterliegt doch eine Uhr in einem Gravitationsfeld in jeder Höhe einer spezifischen Gravitation, die dann zu einem bestimmten Lauf dieser Uhr führt. Um die Frage aber genauer zu betrachten, sind die Gravitationsfelder zweier unterschiedlicher Gestirne heranzuziehen.

Ausgehend von der Gleichung 2.48 für die Berechnung einer Zeitdilatation zwischen zwei Uhren in einem Gravitationsfeld und jeweils unterschiedlicher Höhe gestaltet sich diese Gleichung für Uhren in unterschiedlichen Gravitationsfeldern wie folgt:

$$\frac{t_1(r_1)}{t_2(r_2)} = \sqrt{\frac{1 - \frac{r_{S1}}{r_1}}{1 - \frac{r_{S2}}{r_2}}} \quad (2.51)$$

Betrachtet man nun zwei Uhren in den Gravitationsfeldern der unterschiedlichen Massen M_1 und M_2 und sucht sich Abstände r_1 und r_2 der Uhren zum Zentrum ihrer Masse, sodass die Zeitläufe t_1 und t_2 der Uhren identisch sind, muss gelten:

$$\frac{t_1(r_1)}{t_2(r_2)} = 1 = \sqrt{\frac{1 - \frac{r_{S1}}{r_1}}{1 - \frac{r_{S2}}{r_2}}} \quad (2.52)$$

und es folgt:

$$\frac{r_{S1}}{r_1} = \frac{r_{S2}}{r_2} \quad (2.53)$$

Erkennt man, dass der Gravitationsradius r_S berechnet wird mit

$$r_S = \frac{2GM}{c^2} \text{ ([Teu])} \quad (2.54)$$

und sich die Beschleunigung im Gravitationsfeld zu

$$a = \frac{GM}{r^2} \text{ ([Mes] S. 48)} \quad (2.55)$$

ergibt, lassen sich mit den Gleichungen 2.53 bis 2.55 folgende Beziehungen darstellen:

$$a_1 r_1 = a_2 r_2 \text{ und } \frac{M_1}{r_1} = \frac{M_2}{r_2} \text{ oder } a_1 M_1 = a_2 M_2 \quad (2.56)$$

Daraus leitet sich ab, dass nicht die Gravitation a in einem Gravitationsfeld allein den Gang der Uhren beeinflusst. Anders ausgedrückt sagt die Gleichung 2.56 aus, dass zwei Uhren in verschiedenen Gravitationsfeldern nicht zwangsläufig immer denselben Gang haben, wenn sie sich an einer Stelle ihres Gravitationsfeldes befinden, wo gerade dieselbe Gravitationsbeschleunigung a herrscht. Das funktionierte nur, wenn die die Gravitationsfelder hervorrufenden Massen identisch wären.

Das sich mit der Betrachtung von überlagerten Gravitationsfeldern auftuende Problem ist aus der Gleichung 2.56 abzuleiten. Da es sich bei den Massen, die Gravitationsfelder hervorrufen, in den seltensten Fällen um Massen gleicher Größe handelt, ist die Frage, welche Masse zur Bestimmung des Zeitlaufs einer Uhr in einem überlagerten Gravitationsfeld heranzuziehen ist. Sollte diese Masse eine Funktion der beteiligten Massen sein, dann wäre vorzugeben, wie diese Funktion aussieht.

Zu diesem Zweck wird eine Uhr U_2 im Gravitationsfeld der Sonne deponiert (Abb. 2.32). Der Lauf dieser Uhr soll von der Erde aus betrachtet und mit dem Lauf der Uhr U_1 verglichen werden.

Es ergibt sich der Lauf der Uhr, der durch das Gravitationsfeld der Sonne verursacht wird, entsprechend Gleichung 2.49. Um unabhängig von irgendwelchen Betrachtungsstandpunkten zu sein, wird der Lauf der Uhr U_2 gegen eine im Unendlichen befindliche Uhr dargestellt:

$$\frac{t_2}{t_\infty} = \sqrt{1 - \frac{r_{SS}}{a_S}} \quad (2.57)$$

In diese Formel ginge lediglich der Gravitationsradius r_{SS} der Sonne und der Abstand a_s der Uhr U_2 zum Sonnenmittelpunkt ein. Der Lauf der Uhr im Unendlichen ist mit 1 anzusetzen, da der Abstand r_{SS} / ∞ gegen null geht.

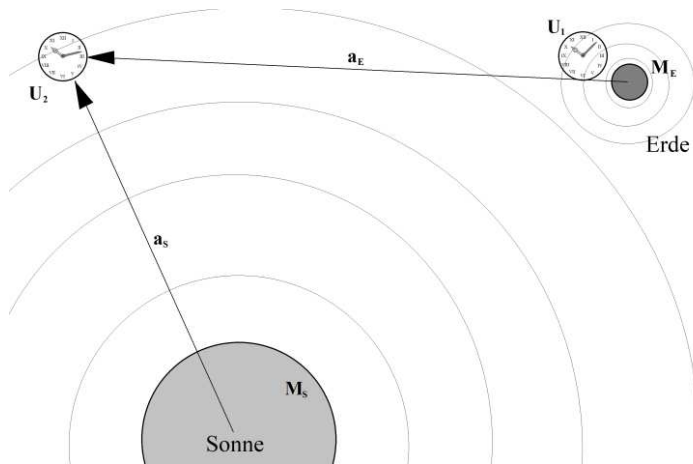


Abb. 2.32: Betrachtung von Uhren unterschiedlichen gravitativen Einflusses ([Syd3] S. 21 Abb. 6)

Würde man die Uhr U_2 in gleicher Weise von der Erde aus betrachten und gegen eine im Unendlichen befindliche Uhr laufen lassen, muss das Gravitationsfeld der Sonne berücksichtigt werden. Der eingehende Quotient r_{SE} / a_E kann nicht in dieser Weise Verwendung finden. Er ist durch einen Umrechnungsfaktor f_U zu korrigieren.

Da aber bei dieser Betrachtung von der Erde aus der Lauf der Uhr U_2 derselbe wie bei der Betrachtung von der Sonne sein muss, gilt:

$$\frac{t_2}{t_\infty} = \sqrt{1 - f_U \frac{r_{SE}}{a_E}} \quad (2.58)$$

Die Gleichsetzung der Gleichungen 2.57 und 2.58 ergibt dann:

$$f_U = \frac{r_{SS}}{a_s} \cdot \frac{a_E}{r_{SE}} \quad ([Syd3] \text{ S. 21}) \quad (2.59)$$

Um also aus der Sicht der Erde auf den Zeitlauf einer durch das Gravitationsfeld der Sonne beeinflussten Uhr zu kommen, ist die Gleichung 2.58 unter Berücksichtigung des Umrechnungsfaktors f_U zu benutzen. Die Richtigkeit dieser Aussage bestätigt sich, da sich beim Einsetzen des Faktors f_U in Gleichung 2.58 sofort die Gleichung 2.57 ergibt.

Verallgemeinert lässt sich schließen, dass die zur Zeitdilatation heranzuziehende Beschleunigung auf die verursachende Masse mit dem zugehörigen Abstand zu beziehen ist:

$$a_i = G \frac{M_i}{r_i^2} \cdot \frac{\vec{r}_i}{r_i} \quad (2.60)$$

Folgeseiten für die Leseprobe entfernt

Wenn solche Gangunterschiede von relativ gegeneinander bewegten Uhren real wären, würde dies eine Zuordnung einer Ganggeschwindigkeit zu jeder Uhr bedeuten. Diese Geschwindigkeit wäre dann absolut. Insofern ist es ein Glück, dass sich eine solche Zeitdilatation nicht feststellen lässt. Ansonsten müsste über den absoluten Raum nachgedacht werden.

Raum und Zeit

Ist man an diesem Punkt angekommen und stellt infrage, dass die Effekte der SRT als reale Effekte messbar sein müssen, ist man genötigt, über eine völlig andere Herangehensweise an die Interpretation der Lichtausbreitung nachzudenken.

Voraussetzung dafür ist, dass die Ausbreitung des Lichts über *eine* Strecke zu betrachten ist, wird doch die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit ebenso über nur *einen* absolvierten Weg erklärt. Nirgends ist gesagt, dass die Lichtgeschwindigkeit in den Inertialsystemen nur dann als konstant gemessen werden kann, wenn ein dazu benutzter Lichtimpuls einen Hin- und einen Rückweg zurücklegt. Dabei ist es wichtig, den Raum in einer Weise zu erklären, die einen absoluten Raum nicht zulässt. Dass diese Erklärung auch auf Zeitspannen zu beziehen ist, ergibt sich aus der raumzeitlichen Auffassung in der modernen Physik. Es geht immer darum, das Relativitätsprinzip mit der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit zu vereinen. Damit ist das Problem zu lösen, dass das Relativitätsprinzip die Nichtfeststellbarkeit des eigenen Bewegungszustands im absoluten Raum fordert, aber die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit in jedem Inertialsystem einen absoluten Raum suggeriert.

Der Ansatz Einsteins, von der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit auf die Gleichheit von Lichtlaufzeiten eines Lichtimpulses über einen Maßstab in Hin- und Rückrichtung zu schließen, ist sicherlich genial. An diesem Ansatz ist auch nichts zu deuteln. Erst als Einstein schloss, dass er den Mittelwert aus den beiden Lichtlaufzeiten zu bilden hat, um die tatsächlich vergangene Lichtlaufzeit zu ermitteln, entfernte er sich von der Logik. Er nutzte die Zwei-Weg-Lichtgeschwindigkeit und umging dabei die mögliche Asymmetrie zwischen Hin- und Rückweg des Lichts. Dieser Ansatz führt zu all den Problemen in der Interpretation der SRT.

Wie muss also der Ansatz lauten, wenn es um die Vermessung von Maßstäben mittels Lichtlaufzeiten geht?

Dieser Ansatz, der sich aus der Isometrie des Raumes ergibt, kann nur lauten: *Die Lichtlaufzeit zur Überbrückung eines Maßstabs durch einen Lichtimpuls ist immer dieselbe, unabhängig davon, in welche Richtung das Licht den Maßstab durchheilt.* Eine bildliche Darstellung dazu findet sich in Abb. 4.7.

Worin unterscheidet sich das von den Annahmen der SRT? Denn auch in der SRT ist ja gerade die kursiv hervorgehobene Aussage die Grundlage für die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit. Der Unterschied zum einsteinschen Ansatz ist einfach der, dass hier ausschließlich von Messungen im eigenen Inertialsystem ausgegangen wird. Einstein wollte mit seinen Überlegungen gerade den Unterschied der Längen- und Zeitmessung in unterschiedlichen Inertialsystemen herausarbeiten.

Wenn hier aber davon ausgegangen wird, dass ausschließlich Messungen im eigenen Inertialsystem durchgeführt werden, dann zielt das darauf ab, die Unabhängigkeit der Messungen vom Bewegungszustand des Inertialsystems zu ergründen. Ausformuliert müsste es heißen, dass die Längen- und Zeitmessungen in einem Inertialsystem unabhängig von jedweder Bewegung und auch Relativbewegung ausfallen.

Die Voraussetzung für solche Betrachtung ist die Klärung, was Raum und Zeit eigentlich sind. Dabei geht es nicht um den alten Streit in der Physik, ob sie denn absolut oder relativ sind, sondern eher um die Frage, ob Raum und Zeit Existenzformen der Materie ([Scü] S. 745) oder als nicht existent aufzufassen sind.

Nun könnte man nach Einstein'scher Manier einfach unterstellen, dass Raum und Zeit nicht existieren, weil man sie nicht nachweisen kann. Doch ist die Begründetheit dieser Annahme durchaus gegeben.

Natürlich sind Raum und Zeit Kategorien, ohne die die Beschreibung der Welt scheinbar nicht funktionieren kann. Sind sie doch im Sprachgebrauch und auch in der Weltanschauung des Menschen tief verankert. So ist der Raum das, worin sich alle Materie befindet, und die Zeit ist das, womit die Bewegungen dieser Materie beschrieben werden. Aus der Vorstellung vom Raum und der Zeit wurde folgerichtig die Möglichkeit abgeleitet, diese Kategorien zu messen. Man fasst den Raum durch die Messung der räumlichen Dimensionen. Sie sind jedermann begreifbar und begründen die Vorstellung vom Raum. Auch die Zeit wurde messbar gemacht. Mittels Uhren ist der Fluss der Zeit anschaulich verfolgbar.

Den Kategorien Raum und Zeit wurden also messbare Eigenschaften beigegeben, um sie fassbar zu machen. Max Planck fordert: Was „[...] man messen kann, das existiert auch“ ([Pla] S. 40). Allerdings bezog er sich mit dieser Forderung nicht auf Raum und Zeit, sondern speziell auf die Quantifizierung von physikalischen Prozessen. Es ging ihm bei der Vermessung physikalischer Größen um die Quantifizierung der Eigenschaften von Materie. Wollte man aber Raum und Zeit vermessen, müsste man zuerst die Eigenschaft definieren, die diese Größen beschreiben sollen. Welche Eigenschaften können das sein?

Spricht man von Längen, die eine Raumdimension quantifizieren, so meint man damit lediglich das Verhältnis einer Länge, eines Abstandes oder Entfernung zu einer bekannten

Länge. Diese bekannte Länge kann beispielsweise das in Paris aufbewahrte Urmeter sein. Auch die Zeit ist nur eine Relation von Bewegungsabläufen. Ob man zum Vergleich den Umlauf der Erde um die Sonne oder eine Schwingung von Atomen im Kristallgitter heranzieht, ist prinzipiell unerheblich.

Messen bedeutet also die durch Vergleich ermittelte Quantifizierung von Eigenschaften der Materie. Zu überlegen ist erstens, welche Eigenschaften dem Raum und der Zeit zuzuordnen sind, um sie zu messen, und zweitens, ob diese Messergebnisse dann ihrerseits als materiell aufzufassen sind.

Während sich dem populärwissenschaftlich denkenden Physiker hier der Gedanke aufdrängen mag, dass die Eigenschaft eines Objektes nicht Materie für sich sein kann, denkt der Philosoph anders darüber. Lenin definiert die Materie als „philosophische Kategorie zur Bezeichnung der objektiven Realität, die dem Menschen in seinen Empfindungen gegeben ist, die von unseren Empfindungen kopiert, photographiert, abgebildet wird und unabhängig von ihnen existiert“ ([Uhl5] S. 666). Für den Philosophen ist also das Messergebnis eines Vergleichs als materiell zu bezeichnen, denn es ist objektiv und wird als unabhängiges Ergebnis von ihm widergespiegelt. Insofern sind Raum und Zeit sicherlich als Existenzformen der Materie aufzufassen.

Der Physiker kommt aber mit dieser Widerspiegelung der objektiven Realität nicht weiter. Für ihn ist die Materie etwas Stoffliches (ebd.). Dass im Laufe der Entwicklung auch Felder und Energie zur Materie zugeordnet wurden, tut der Sache keinen Abbruch. Wesentlich ist die Struktur, mit welcher die Materie zu erklären ist. Eine solche Struktur beginnt beim Sein. Fasst man die Materie als all das auf, was ist, kommt der Materie eine Existenz zu. Wenn Materie also objektiv und unabhängig vom Bewusstsein existiert, lässt sie sich als Objekt auffassen oder klassifizieren.

Um diese Objekte zu erfassen, müssen sie beschrieben werden können. Zur Beschreibung sind den Objekten charakteristische Eigenschaften beizugeben. Diese Eigenschaften werden als physikalische Größen deklariert. Solche physikalischen Größen sind in Betrag und Maßeinheit darstellbar. Der Betrag ist die Verhältnisgröße in Relation zur Maßeinheit. Das Messen eines Objektes ist somit die Darstellung einer Objekteigenschaft im Verhältnis zu derselben Eigenschaft eines als Normal festgelegten Objekts.

So ist für den Physiker die Frage nach der Materie respektive der Nichtmaterie leicht zu beantworten. Die als physikalische Größen benannten Eigenschaften von Objekten sind selbst keine Materie. Sie haben nichts Stoffliches und dienen lediglich der Beschreibung von materiellen Objekten.

Der Unterschied zwischen den Objekten, die sicher als Materie zu bezeichnen sind, und den beschreibenden Größen, ihren Eigenschaften, ist offensichtlich. Dennoch bleibt die Frage nach einem Kriterium, mit dessen Hilfe die Materie als stoffliche Existenz zu erkennen ist. Diese Frage sorgte schon in Frühzeiten der Physik für Auseinandersetzungen, als es um die Existenz des Äthers ging, und sie ist auch in der modernen Physik gegenwärtig, wo es um die Existenz der Dunklen Materie geht. Die Antwort auf die Frage nach dem Kriterium ist jedem Physiker sicherlich klar. Sie ist so offensichtlich, dass sie kaum Eingang in die Literatur findet. Deshalb sei sie hier explizit herausgestellt:

Materie ist durch Wechselwirkung bestimmt.

Dies ist das Charakteristikum der Materie! Wenn mit einem Objekt keine Wechselwirkung möglich ist, ist die Klassifizierung dieses Objekts als Materie sinnlos. Was bedeutet diese Erkenntnis nun für Raum und Zeit im Rahmen der SRT? Letzteres ist wichtig, denn: Wie man in der ART den Raum mit der ihn erfüllenden Gravitation auffassen möchte oder die Zeit als Abhängige der Gravitation sieht, ist nicht Gegenstand der Untersuchung. Hier geht es um die Betrachtung von Raum und Zeit in einem gravitationsfreien Nichts. Gerade dieses Nichts ist eine Voraussetzung für das Verständnis der SRT. Die Relativität der Bewegungen hypothetischer Objekte abstrahiert von jedweder Wechselwirkung dieser Objekte. Ausschließliches Charakteristikum der SRT ist die Relativbewegung. Insofern ist die SRT ein rein theoretisches Konstrukt.

Wesentlich für das Verständnis der Funktionsweise der SRT ist somit die Ausbreitung des Lichts ohne Wechselwirkung. Und dieses Verständnis wird umso schwieriger, wenn man um die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit weiß.

Um sich der Lösung des Problems zu nähern, sind die folgenden Schritte gedanklich zu verinnerlichen:

- Man stelle sich einen leeren Raum vor.
- Man stelle sich *einen* Beobachter vor, der Maßstäbe und Uhren hat.
- Man stelle sich einen Lichtimpuls vor, der sich im Raum ausbreitet.
- Man betrachte mehrere solche Beobachter, die sich relativ gegeneinander bewegen.

Den leeren Raum gilt es, sich hier nochmals bewusst zu machen: Er ist nicht durchsetzt mit einem Äther, mit Gravitation oder mit Feldern, Energie oder elektromagnetischer Strahlung. Somit ist er schwarz und unendlich. Er hat keine Grenzen, denn eine Grenze müsste durch irgendeine Eigenschaft zu definieren sein. Alleine der Versuch, sich den leeren Raum vorzustellen, verlangt eigentlich, dass dort etwas sein muss. Anders gesagt: Die Vorstellung an sich scheint zu verlangen, dass es eine Weite des Raums gibt und ihm damit auch eine Ausdehnung zugeordnet werden kann. Doch all das ist nicht möglich.

Der Raum existiert nicht. Er hat keine Eigenschaften und es gibt keine Wechselwirkung mit diesem Raum. Ihn sich als Singularität vorzustellen, ist möglich, und kollidiert lediglich damit, dass in der Vorstellung die Singularität nicht unendlich ist. Letztlich ist für die terminologische Klarheit vorteilhaft, diesen Raum als *Nichts* zu bezeichnen. Als ein solches *Nichts* bleibt der Raum ein pures Gedankenkonstrukt.

Stellt man sich nun in diesem Nichts einen Beobachter vor, der mit Maßstäben und einer Uhr ausgerüstet ist, passiert etwas Erstaunliches. Für ihn entsteht ein Raum. Einerseits nimmt er ja selbst Raum ein und andererseits ist er mittels seiner Maßstäbe in der Lage, dieses ihn umgebende Nichts zu okkupieren und zu vermessen. Er wird sich seinen eigenen Raum durch die Objekte definieren, die er im Nichts platziert. Was Wunder, wenn er grundsätzlich behauptete, dass er in diesem Raum ruht.

Hier findet sich der Ursprung einer strengen Differenzierung des Raumbegriffs. Der Beobachter definiert mit seinen Maßstäben seinen Raum, dem er dann die Eigenschaften der Ausdehnung mittels dieser Maßstäbe begeben kann. Dass sich aber all das, was er sich als Raum einrichtet und mit Objekten organisiert, in dem Raum der völligen Leere, dem Nichts, befindet, gerät völlig aus dem Blick.

Während die vom Beobachter in seinen willkürlich festgelegten Raum als Objekte eingebrachten Dinge einer Wechselwirkung unterliegen können, bleibt dieses „Zwischen den Objekten“ immer noch Raum, obwohl es damit keinerlei Wechselwirkung geben kann. Newton hatte mit seiner Raumdefinition ([New] S. 25f.) diesen Sachverhalt schon im Blick. Er legte „relative“ Räume fest, die sich in einem „absoluten“ Raum bewegen. Damit lebt also der o. g. Beobachter in einem relativen Raum. Der von Newton definierte absolute Raum entspricht aber dem Nichts, mit dem es keine Wechselwirkung geben kann. Insofern kann sich der Beobachter in diesem Nichts auch nicht bewegen.

Wichtig ist die Einsicht, dass der Beobachter mitsamt seinen Maßstäben weder eine Größenvorstellung von dem ihn als Nichts umgebenden Raum haben noch eine Bewegung seiner selbst in diesem Raum registrieren kann.

Die Lichtgeschwindigkeit

Welche Auswirkung hat die Vorstellung vom Nichts, das als Raum für existierende Objekte fungiert, auf die Ausbreitung des Lichts?

Geht man den Schritt zurück und betrachtet einen Lichtimpuls im Nichts und ohne weitere Objekte, gilt auch für diesen Lichtimpuls, dass seine Bewegung im Nichts nicht feststellbar ist. Dieser Lichtimpuls wird sich nach den Vorgaben der eigenen Vorstellung richten und sich nur relativ zu einem Objekt bewegen, wenn dieses mit in das Nichts integriert wird. Dem Lichtimpuls aber eine Bewegung zum Nichts zusprechen zu wollen,