Die Spezielle Relativitätstheorie

eine theoretische Ausarbeitung von

Marco Möller

Inhaltsverzeichnis

1 Was heißt hier *„relativ“*

Wir alle kennen den Namen Albert Einstein und verbinden ihn zwangsläufig mit der Formel „E = mc²“. Das dies irgend etwas mit der Relativitätstheorie zu tun hat, ist uns ebenfalls bewusst. Aber kaum einer weis, was es mit dem Ganzen auf sich hat. Das möchte ich nun versuchen, in Ansätzen zu erklären.

Vor Einstein glaubt man das das Ganze Universum mit einem Stoff gefüllt ist, dem Äther. Dieser Stoff war nötig, damit sich das Licht auch zwischen den Planeten (im Vakuum) ausbreiten kann, ähnlich wie Schallwellen Luft zum ausbreiten benötigen. Beim Schall lässt sich ausmessen, dass bei schneller Bewegung durch die Luft die Schallgeschwindigkeit abnimmt. Alles hat in dieser Vorstellung also eine gewisse Geschwindigkeit gegenüber dem Äther der sich nicht bewegt.

Dies müsste bei dem Licht demzufolge auch so sein. Das heist, wenn wir uns schneller bewegen, würde das Licht in unseren Augen langsamer. 1881 hatte A. Michelson ein Gerät entwickelt, mit der man die Geschwindigkeit des Lichtes in zwei verschiedenen Richtungen äußerst genau miteinander vergleichen konnte, ein sogenanntes Interferometer (Abb. 1.1). Bei seinen Versuchen stellte er fest, dass die Lichtgeschwindigkeit in Rotationsrichtung der Erde (West -> Ost) und die Geschwindigkeit, die rechtwinklig zur erstgenannten steht (Nord -> Süd) genau gleich sind. Wenn man berücksichtigt das die Erde am Äquator eine Rotationsgeschwindigkeit von ca. 464 m/s hat und zudem eine Bahngeschwindigkeit von ca. 29800 m/s (Bewegung um die Sonne), hätten sich diese Geschwindigkeiten nun von der Lichtgeschwindigkeit in der Rotationsrichtung der Erde abziehen müssen, taten es aber nicht. Hier haben wir also einen Widerspruch zu dem Konzept des Äthers. Dies heißt im Klartext das die Theorie des Ähters schlichtweg falsch ist.

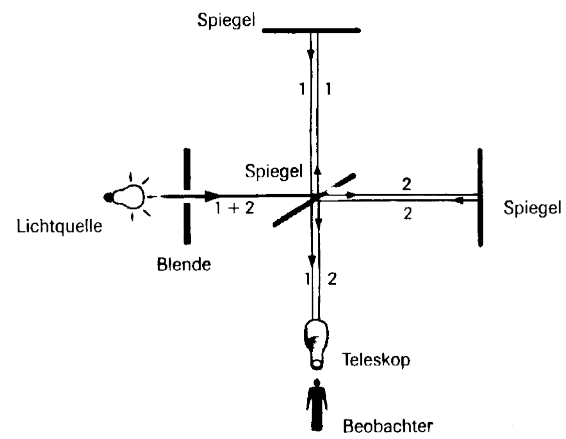


Abb. 1.1 Michelson-Morley Interferometer

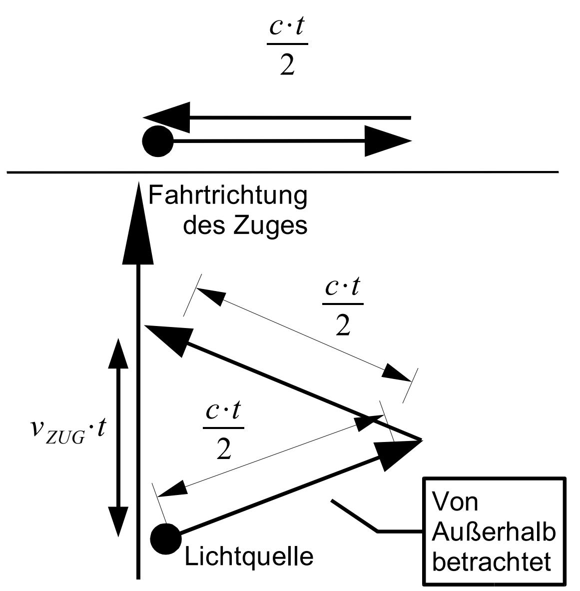
Die Konsequenz ist, dass die Lichtgeschwindigkeit für jeden Betrachter der sie misst gleich groß ist, unabhängig davon, mit welcher Geschwindigkeit er sich bewegt. Hieraus ergibt sich ein Haufen weiterer Konsequenzen.

2 Ein Gedankenexperiment

Um die Problematik und ihre Konsequenzen besser darstellen zu können, möchte ich hier einmal ein Gedankenexperiment machen, wie es in der theoretischen Physik üblich ist. Hieraus werde ich dann Schritt für Schritt Formeln entwickeln, mit denen ich dann zeigen kann, dass diese Materie nicht unbedingt für den Durchschnittsbürger unmöglich zu erfassen ist. Gedankenexperimente werde ich im Folgenden noch häufiger machen. Man darf dabei allerdings nicht immer meinen das die dort beschriebenen Effekte im Alltag auch so zu beobachten wären. Hierfür sind die Auswirkungen meist viel zu klein.

2.1 Der Aufbau

Man stelle sich vor, wir würden in einem fahrenden Zug rechtwinklig zur Fahrtrichtung eine Entfernung mit Hilfe eines Laserentfernungsmessers bestimmen (z. B. vom linken bis zum rechten Zugrand). Dieses Gerät sendet nun einen Lichtimpuls aus, uns misst die Zeit bis der Impuls wieder da ist. Die vom Licht zurückgelegte Entfernung (s) ist also Zeit (t) mal Lichtgeschwindigkeit (c): $s=c \cdot t$. Der Impuls läuft für einen Betrachter im Zug auf dem gleichen Weg hin und zurück. Wenn man das Ganze nun von außerhalb des Zuges beobachtet, sieht man, dass das Licht dank der permanenten Zugbewegung nicht am gleichen Punkt wieder ankommt wo es losgesendet wurde, sondern um die Entfernung die der Zug in der Zwischenzeit zurückgelegt hat versetzt. Auch hier würde man die zurückgelegt Strecke des Lichtes über die Formel $s=c \cdot t$ berechnen.



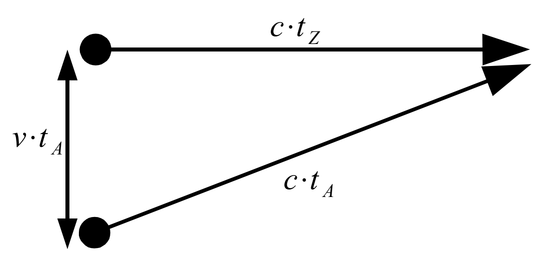
(Abb. 3.1)
Draufsicht auf den Versuch im Zug

Hier beginnt nun sich ein Widerspruch breit zu machen. Wir würden nun nämlich die selbe Entfernungen für offensichtlich unterschiedlich Strecken ausrechnen ($s=c \cdot t$). Da die Lichtgeschwindigkeit konstant ist, muss also außerhalb des Zuges eine andere Zeit verstrichen sein, damit die Länge des schrägen Lichtstrahls wirklich länger ist als die gradlinige. Der ganze Sachverhalt ist in der Abbildung 3.1 noch einmal verdeutlicht.

Hiermit lässt sich Zeigen, das die Zeit nicht überall gleich verläuft. Hier z.B. läuft die Zeit im Zug anders als außerhalb, um dem Problem der unterschiedlichen Längen bei gleicher Zeit (aus der oben genannten Formel) Herr zu werden. Im folgenden wollen wir nun eine Gleichung herleiten, mit der sich die Zeiten umrechnen lassen.

2.2 Rechnen

Um eine Formel entwickeln zu können vereinfachen wir den Versuch von oben, und lassen den Lichtstrahl nur in eine Richtung laufen, da dies für unsere Berechnungen genügt. Zudem werden wir die Zeit in Zeit im Zug t_Z und in Zeit Außerhalb t_A aufteilen, da wie wir oben schon gesehen haben die Zeit nicht überall gleich ist!



(Abb. 3.2) **Längendreieck zur Formelherleitung der Zeitdilatation**

Aus der Abbildung 3.2 lässt sich sehr schön erkennen, das wir es hier mit einem rechtwinkligen Dreieck zu tun haben, das sich hier wie folgt nach Pythagoras beschreiben lässt.

$$(v \cdot t_A)^2 + (c \cdot t_Z)^2 = (c \cdot t_A)^2$$

Diese Formel können wir nun schrittweise nach t_Z oder t_A umstellen. Ich werde hier als erstes einmal nach t_Z umstellen. Wie wir sehen werden ist die Umformung nach t_A dann nur noch ein Kinderspiel.

$$(v \cdot t_A)^2 + (c \cdot t_Z)^2 = (c \cdot t_A)^2$$

$$(c \cdot t_Z)^2 = (c \cdot t_A)^2 - (v \cdot t_A)^2$$

$$c^2 \cdot t_Z^2 = c^2 \cdot t_A^2 - v^2 \cdot t_A^2$$

$$t_Z^2 = \frac{c^2 \cdot t_A^2 - v^2 \cdot t_A^2}{c^2}$$

$$t_Z^2 = t_A^2 - \frac{v^2}{c^2} \cdot t_A^2$$

$$t_Z^2 = t_A^2 \cdot \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)$$

$$t_Z = t_A \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$t_Z = t_A \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}$$

Oder nach t_A :

$$t_A = \frac{t_Z}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

2.2.1Ein Beispiel

So nun haben wir also dem Pythagoras angewendet, und eine Formel herausbekommen. Mit dieser Formel sind wir nun in der Lage, die für einen anderen Betrachter vergangene Zeit in die für uns vergangene Zeit umzurechnen. Hierfür brauchen wir nur die *Relativgeschwindigkeit* (v) zwischen uns und dem anderen Betrachter.

Dies will ich einmal an einem Beispiel verdeutlichen. Stellen wir uns einmal vor wir wir würden eine bemannte Mission zum nächstgelegenen Stern Alpha Centauri machen, der ca. 4 Lichtjahre (Lj) von der Erde entfernt ist. Nun sind wir mittlerweile in der Lage, ein Raumschiff zu bauen, das in der Lage ist, mit halber Lichtgeschwindigkeit (c/2) zu reisen. Die Mission besteht nur daraus die Relativitätstheorie zu beweisen. Das heißt, das nach der Ankunft sofort umgedreht und zurückgeflogen würde. Um uns das Leben zu vereinfachen, ignorieren wir hier einmal, das das Raumschiff eigentlich noch beschleunigt werden müsste. Dies würde hier zu weit führen, da wir damit schon längst in der allgemeinen Relativitätstheorie wären.

Fangen wir an: Die Gesamtstrecke beträgt also 8 LJ. und das Raumschiff würde in unseren Augen bei einer Geschwindigkeit von c/2 genau 16 Jahre für die Reise benötigen. Was aber würde die Besatzung meinen wenn sie wieder da ist wie lange sie unterwegs waren. Dies lässt sich mit der Formel aus 3.2 relativ leicht errechnen:

$$t_{Raumschiff} = t_{Erde} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{v_{Raumschiff}}{c}\right)^2}$$

$$t_{Raumschiff} = 16\,Jahre \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\left(\frac{c}{2}\right)}{c}\right)^2}$$

$$t_{Raumschiff} = 16\,Jahre \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{1}{2}\right)^2}$$

$$t_{Raumschiff} = 16\,Jahre \cdot \sqrt{1 - \frac{1}{4}}$$

$$t_{Raumschiff} = 16\,Jahre \cdot \sqrt{\frac{3}{4}}$$

$$t_{Raumschiff} = 16\,Jahre \cdot 0{,}866$$

$$t_{Raumschiff} = 13{,}86\,Jahre$$

Die Besatzung des Raumschiffes würde uns also erzählen, das sie nur 13,86 Jahre vergangen sind. Auch die Atomuhr an Board würden dies bestätigen, obwohl bei uns auf der Erde eindeutig 16 Jahre vergangen sind. Weiter würden sie auch noch behaupten, das die Strecke fiel kürzer war. Sie würden argumentieren, das sie ja nur 13,86 Jahre bei c/2 geflogen und somit nur 6,93 LJ zurückgelegt hätten. Der Stern Alpha Centauri wäre also 3,465 LJ und nicht wie wir fälschlich behaupten 4 LJ entfernt ist. Die Entfernung beträgt also nur 86,6 % von dem was wir meinen, gleiches gilt wie schon gezeigt für die Zeit. Dies ist genau der wert, der als Faktor in unserer Formel steht. Wir können also sagen, das sich Längen und Entfernungen mit dem gleichen Faktor (k) verändern.

$$k = \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}$$

In Fachkreisen spricht man bei diesen beiden Phänomenen von der Zeitdilatation (Zeit vergeht langsamer) und der Lägen- bzw. Lorenzkontraktion (Strecken werden kürzer). Wie sich dieser Effekt zeigt, erläutere ich unter 4.1 weiter.

2.2.2Warum bemerken wir davon sonst nichts?

Schön und gut, aber warum ist uns, mit Ausnahme derer die ab und zu mal die Zeit vergessen, vor Einstein noch nicht aufgefallen das die Zeit nicht immer gleich schnell verstreicht. Betrachten wir hierfür einmal ein Auto das mit dem wahnsinns Tempo von v = 300 km/h (83,33 m/s) über die Autobahn rast. Errechnen wir doch einfach auch hierfür einmal den Zeitdilatationsfaktor k (Korrekturfaktor).

$$k = \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}$$

k = 0,999 999 999 999 958

Das bedeutet das wir sogar bei einem so hohen Tempo erst eine Auswirkung auf der 14. Stelle nach dem Komma haben. Wenn man 50 Jahre seines Lebens in einem solchen Wagen verbringen würde, dann hätte man nur 66 µs Zeit gegenüber jemanden anderes verloren. Wenn man bedenkt, das wir solche Geschwindigkeiten auch erst seit kurzer Zeit beherrschen, ist es nicht verwunderlich, das es Früher sowie heute im täglichen Leben niemanden auffällt, das die Zeit nicht absolut, sondern relativ ist.

Hier einmal eine Tabelle mit Umrechnungsfaktoren für bekannte Geschwindigkeiten. (hier habe ich mit dem genauen Wert von c gerechnet c = 299 792,458 km/s)

Objekt	v (km/s)	k
Auto	0,03	0,999999999999995
Flugzeug	0,5	0,999999999998609
Raumsonde	40	0,999999991098800
10 % von c	29979,25	0,994987437106620
50 % von c	149896,23	0,866025403784439
90 % von c	269813,21	0,435889894354067
95 % von c	284802,84	0,312249899919920
99 % von c	296794,53	0,141067359796659
99,9 % von c	299492,67	0,044710177812219
bei c	299792,46	0

Man kann in dieser Tabelle sehr schön erkennen, das sich erst in der Nähe der Lichtgeschwindigkeit namhafte Änderungen bei der Zeitdilatation bemerkbar machen.

2.2.3Was passiert bei Lichtgeschwindigkeit und darüber?

Bei genauerer Betrachtung fällt uns die letzte Zeile ins Auge, da hier für k Null steht. In diesem Fall bewegt sich unser Gegenüber mit Lichtgeschwindigkeit von uns fort. Dies bedeutet, das Wir in unserer Formel für v = c einsetzen müssten wodurch der Ganze Faktor zu Null wird. In diesem Falle bleibt die Zeit für denjenigen der sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegt einfach stehen. Dieser selbst merkt davon nichts. Er wird bei der Ankunft meinen, das er erst im letzten Augenblick losgeflogen sei. Nach dem aussteigen wird er feststellen, das alle seine Bekannten in den letzten Augenblicken um mehrere Jahre gealtert sind.

Ein anderer Punkt, den man aus dieser Formel ableiten kann ist, was es mit Geschwindigkeit oberhalb der Lichtgeschwindigkeit auf sich hat. Wenn ich für v z.B. 2c einsetzen würde hätte ich letztendlich -3 unter der Wurzel stehen. Da sich aber keine Wurzel von negativen Zahlen im Reellen ziehen lassen, sind Geschwindigkeiten oberhalb der Lichtgeschwindigkeit verboten.

Eine nicht mathematische Erklärung für das Verbot von Überlichtgeschwindigkeiten gibt es auch noch. Stelle man sich vor wir würden versuchen ein Raumschiff mit einem konstanten Wert über Lichtgeschwindigkeit hinaus zu beschleunigen. Je näher wir uns der Lichtgeschwindigkeit nähern würden, desto mehr Zeit würde vergehen, bis unser Raumschiff um einen bestimmten Betrag schneller geworden ist. Dies liegt daran, das die Beschleunigung in Geschwindigkeitszunahme pro Zeit gemessen wird. Vom Standpunkt des Raumschiffes aus, würde die Beschleunigung wirklich konstant sein. Für uns hingegen, würde sich zeigen, das die Beschleunigung immer langsamer wird. Die besagte Zeiteinheit (in der Beschleunigung) müssen wir nämlich auch mit der Zeitdilatationsformel in unsere Einheiten transferieren. Bei Lichtgeschwindigkeit nun würde die Zeit stillstehen. Das heißt, spätestens hier wäre mit der Beschleunigung Schluss. Wir hätten also eine Kurve der Geschwindigkeit die sich c annähert, es aber nie erreichen wird.

3 Nichts ist schneller als das Licht, auch das Licht nicht!

Wie wir im vorherigen Absatz gesehen haben, ist es aus Sicht der Relativitätstheorie nicht möglich die Lichtgeschwindigkeit zu überschreiten. Hier will ich zeigen das dies auch noch in anderer Sicht verstanden werden kann.

Jeder Mensch kennt folgendes, ob ich mich in einem Zimmer befinde oder in einem fahrenden Zug: Wenn ich mit etwas werfe, verhält es sich in meinen Augen immer gleich! Aber was bedeutet das? Im Falle des Zuges würde daraus folgen, dass der Stein, der sich für mich als Mitfahrer mit 10 km/h bewegt, für einen Beobachter auf dem Bahndamm um die Geschwindigkeit des Zuges schneller, also z.B. mit (10 + 200) km/h = 210 km/h bewegt. Daraus lässt sich ableiten, dass sich Geschwindigkeiten einfach addieren. Merke: Geschwindigkeiten addieren sich, zumindest vorerst!

(Abb. 4.1) **Beim Licht addieren sich die Geschwindigkeiten nicht!**

3.1 Licht schneller gemacht?

Nehmen wir nun einmal an, das wir auf einem Bahnhof stehen, und ein Zug mit 300 km/h (83,33 m/s) heraneilt. Wenn wir nun die Geschwindigkeit seines Scheinwerferlichtes messen würden, müssten wir enttäuscht feststellen, das dieses Licht mit um 83,33 m/s schneller ist, sondern den genauen Wert von c hat (Abb. 3.1). Ähnliches gilt, wenn sich der Zug mit diesem Tempo von uns entfernt, wir messen für das Licht seiner Rückleuchten erneut genau c. Auch hier zeigt sich wieder, egal wie schnell wir oder die Lichtquelle sich bewegt, die Lichtgeschwindigkeit bleibt immer gleich.

3.2 Geschwindigkeitsaddition

Wie wir gesehen haben addieren sich Geschwindigkeit. Stellen wir uns aber einmal folgendes vor. Wir befinden uns in einem Raumschiff und bewegen uns mit 0,999 c von der Erde weg. Plötzlich zieht ein anderer Flitzer an uns vorbei. Als wir seine Geschwindigkeit messen stellen wir fest, das er um 0,6 c schneller ist als wir. Kann das überhaupt sein? Dies würde ja anscheinend bedeuten, das er sich mit 1,599 c relativ zur Erde bewegen würde. Da dies bekanntlich nicht geht muss irgendwo ein Fehler in unserer Überlegung stecken.

Es ist wahr, den aufgezeigten Fall kann es wirklich geben. Unserer Fehler war, das wir seine Geschwindigkeit in unserem eigenen Zeitmaß gemessen haben. Dieses muss aber transformiert werden, wenn wir seine Geschwindigkeit relativ zu jemand anderes ausrechnen wollen. In unserem Raumschiff ist die Zeit schon fast stehen geblieben, weshalb wir für das andere Raumschiffe eine so hohe Geschwindigkeit messen. Von der Erde aus betrachtet, wäre das zweite Raumschiff unwesentlich schneller als unseres. Auch hierfür lässt sich eine Formel herleiten.

$$v_{Gesamt}=\frac{v_1+v_2}{1+\frac{v_1\cdot v_2}{c^2}}$$

Wenn man diese Formel genauer untersucht stellt man auch hier wieder fest, das bei geringen Geschwindigkeiten tatsächlich die uns allen bekannte Näherung $v_{Gesamt}=v_1+v_2$ gilt.

Beim Sonderfall $v_1 = v_2 = c$ ist auch $v_{Gesamt} = c$. Somit ist auch hier die Regel, das nichts schneller als das Licht sein kann nicht verletzt worden.

4 Der Einfluss des Lichts auf unsere Welt

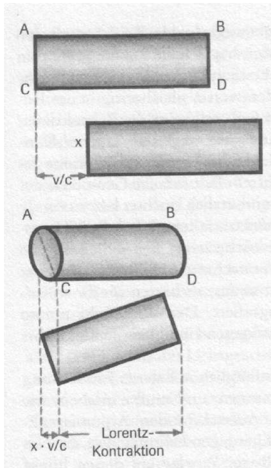
Bislang haben wir einige wichtige Leitsätze festgestellt. Fassen wir nocheinmal kurz zusammen.

- Die Geschwindigkeit des Lichtes erscheint jedem Betrachter gleich.
- Nichts ist schneller als das Licht.

Im folgenden möchte ich ein paar weitere Gedankenexperimente anstellen, wobei es mir hier nicht um ein Ergebnis ansich geht, sondern möchte ich die Problematik verdeutlichen.

4.1 Verzerrung durch Tempo

Stellen wir uns einmal vor, ein zylindrischer Körper würde sich mit einer Geschwindigkeit nahe der Lichtgeschwindigkeit an uns vorbei bewegen (Abb. 4.1). Wenn er genau neben uns ist und wir ihn betrachten, fällt uns auf, das er schräg fliegt. Dies ist aber mal wieder ein Effekt, der durch die endliche Lichtgeschwindigkeit hervorgerufen wird. Normalerweise könnten wir seine Hinterseite (Punkt A - C) nicht erkennen, da diese von der davor liegenden Ecke verdeckt wird. Da aber nach Aussendung des Lichtes von Punkt C noch ein wenig Zeit vergeht, hat der Körper inzwischen Zeit, sich weiterzubewegen, um so das Licht zu uns durchzulassen.

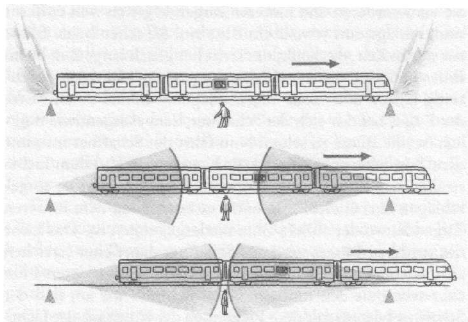


(Abb. 4.1) Lorenz-kontraktion führt zur Drehung

Zudem erscheint der Körper gestaucht. Dies ist der Effekt der Lorenzkontraktion. Hier lässt es sich aber anschaulicher dadurch Erklären, das das Licht von Punkt D eine mehr Zeit benötigt um bei uns anzukommen. Das Licht was wir hier sehen, zeigt also einen früheren Zustand des Körpers als es das Licht von C tut. Da der Körper aber zu diesem früheren Zeitpunkt noch nicht ganz so weit von uns entfernt war, erscheint der er kürzer.

4.2 Zeitpunkt eines Ereignisses / Gleichzeitigkeit

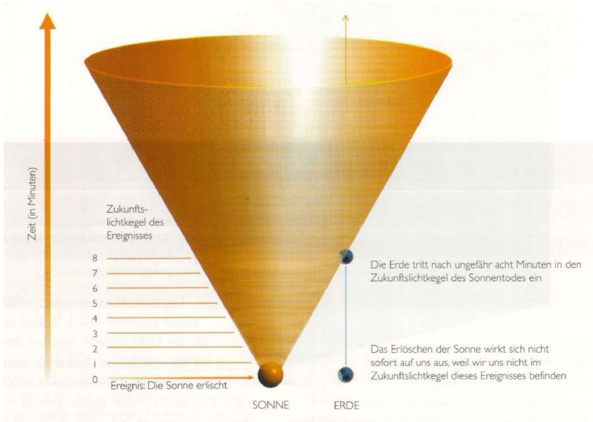
Stellen wir uns einmal vor, wir stehen an einem Bahndamm und sehen einen Zug vorbeifahren. In dem Moment wo wir genau in der Mitte zwischen den beiden Zugenden stehen schlagen in diese zwei Blitze ein. Wir meinen sofort das beide Blitze genau gleichzeitig eingeschlagen sind. Der Schaffner, der sich gerade in der Mitte des Zuges befindet widerspricht uns hierbei aber. Das leuchtet auch ein, wenn man bedenkt, das das Licht von den beiden Zugenden eine gewisse Zeit bis zum Beobachter braucht. In dieser Zeit hat sich der Zug mit dem Schaffner aber schon ein Stück weiterbewegt. Der Schaffner sieht also das Licht von der Zugspitze zuerst, da er sich dieser



(Abb. 4.2) **Es gibt keine Gleichzeitigkeit**

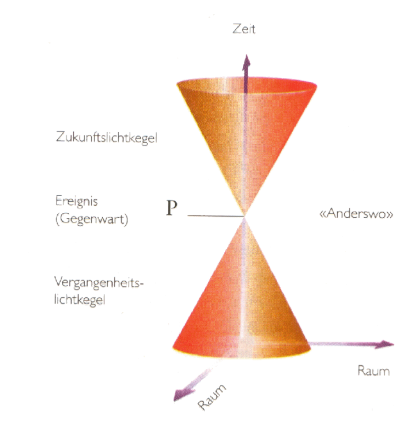
Lichtquelle entgegenbewegt (Abb. 4.2). Wer hat nun recht? Der Schaffner würde Argumentieren, das das Licht aus beiden Richtungen gleich schnell bei ihm ankommt. Da er sich in der Mitte des Zuges befindet, müsste, wenn die beiden Blitzeinschläge wirklich gleichzeitig gewesen seine sollten, das Licht auch gleichzeitig bei ihm ankommen. In der Tat haben aber beide Recht. Sowohl der Beobachter vom Bahndamm als auch der Schaffner. Beide Sichtweisen sind vollkommen gleichberechtigt, da es sich in beiden Fällen um Inertialsysteme handelt, aber dazu später mehr (6.1). Durch die Begrenzung der Lichtgeschwindigkeit lässt sich nicht bis in letzte Konsequenz sagen in welcher Reihenfolge Ereignisse stattgefunden haben.

4.3 Lichtkegel



(Abb. 4.3) Die Sonne erlischt

Nichts kann sich schneller ausbreiten als das Licht. Weder Druckwellen (Explosionen), noch irgendeine art der Information. Wie kennen alle das Beispiel das ein Schmetterlingsflügelschlagen in Tokio bei uns einen Orkan verursachen könnte. Bis das Eintritt können aber gut und gerne einige Tage ins Land gehen. Stellen wir uns eine der schlimmsten Katastrophen für die Menschheit vor, die Sonne erlischt plötzlich (warum auch immer). Wir wissen das das Licht von der Sonne 8 Minuten zu uns benötigt. Vor Ablauf dieser 8 Minuten würden wir also nicht die geringste Konsequenz spüren können, da sich ja nichts schneller als das Licht zu uns bewegen kann (Abb. 4.3). Hieraus lässt sich ein Prinzip formulieren. Alle Objekte können nur von Ereignissen beeinflusst werden, die sich innerhalb ihres Vergangenheitslichtkegel befinden. Dieser hat z.B. 8 Minuten in die Vergangenheit eine Ausdehnung bis zur Sonne, und vor 4 Jahren sogar bis nach Alpha Centauri (4 Lichtjahre entfernt). Dies lässt sich aber auch auf die Zukunft übertragen, den Zukunftslichtkegel. Ein Geschehnis bei uns kann frühestens in 8 Minuten die Sonne beeinflussen und frühestens in 4 Jahren sich auf Alpha Centauri auswirken. Zusammen bezeichnet man dies als Ereignislichtkegel (Abb. 4.4).



(Abb. 4.4) Der Ereignislicht-kegel

5 Großes Konzept

Bisher haben wir viele einzelne Puzzelteile zusammengetragen, mit der wir zum Teil auch rechnerisch die Auswirkungen der speziellen Relativitätstheorie herleiten können. Im Folgenden möchte ich die professionellen Rechensysteme und was dazu notwendig ist einmal vorstellen.

5.1 Inertialsysteme

Den Begriff Inertialsystem habe ich bisher zu Vermeiden versucht. Die Relativitätstheorie verdankt ihren Namen dem Umstand, das alle Geschwindigkeit, Ereignissen, ect. immer relativ zu etwas anderem gemessen werden, und man keine absoluten Werte angeben kann! Wenn wir z.B. sagen, in einem Raumschiff sind nur 3,5 Jahre vergangen, sagen wir dazu, das es sich mit 0,5 c relativ zu uns bewegt hat (Beispiel von 2.2.1).

Im Raumschiff gelten aber trotz der relativ zu uns verlangsamten Zeit die gleichen Physikalischen Gesetze für die Mannschaft. Die Mannschaft würde es also gar nicht merken das sie sich so schnell bewegen würde. Auch sie könnte z.B. die Zeitdilatation für ein von ihnen abgeschossenes Geschoss berechnen, und bräuchte auch dafür nur die Relativgeschwindigkeit zu ihrem Raumschiff verwenden. Man kann also sagen, das sich alle Naturgesätze in allen gleichförmig bewegten Systemen (ohne Beschleunigungseinwikung) gleich verhalten. Alle diese System kann man als Bezugssystem für Berechnungen verwenden. Jedes von ihnen ist deshalb ein Inertialsystem.

Um von einem in ein anderes Inertialsystem umzurechnen, benötigt man ein Berechnungssystem was dieses zu leisten im stande ist.

5.2 Galilei-Transformation / Newtonsche Mechanik

Ein klassisches Berechnungsverfahren möchte ich hier vorweg einmal kurz vorstellen, damit die Änderungen später deutlicher werden. Bei der Galilei-Transformation ist die Umrechnung zwischen zwei Inertialsystemen relativ einfach. Hier einmal ein kleines Beispiel:

Wir befinden uns an einem Bahnhof und betrachten einen in 1000 m entfernten Hügel. Nun würden wir gerne wissen wie weit dieser Hügel von einem Zug entfernt ist. Dafür benötigen wir die seit seiner Abfahrt vergangene Zeit (10 s) und seine Geschwindigkeit (20 m/s). Die Beschleunigung ignorieren wir, da die Problematik auch so deutlich wird.

$$Entfernung_{Zug} = Entfernung_{Wir} - (Zeit_{seit\ Abfahrt} \cdot v_{Zug})$$

Umgekehrt könnten Personen im Zug mit dieser Formel Argumentieren:

$$Entfernung_{Wir} = Entfernung_{Zug} + (Zeit_{seit\ Abfahrt} \cdot v_{Zug})$$

Die Vergangenen Zeiten werden bei der Galilei-Transformation als gleich angesehen.

5.3 Lorenz Transformation

Das Problem an der oben dargestellten Formel ist, das die Personen im Zug eine andere Zeitspanne der seit der Abfahrt vergangen ist messen würden, da sie in Bewegung sind. Dies würde bedeuten, das die oben gezeigten Formeln zu widersprüchlichen Aussagen führen würden. Die Lösung dieser Problematik würde wie unter 2.2 verlaufen. Hier einfach einmal die Formeln:

$$Entfernung_{Zug} = \frac{Entfernung_{Wir} - (Zeit_{seit\ Abfahrt} \cdot v_{Zug})}{\sqrt{1 - \left(\frac{v_{Zug}}{c}\right)^2}}$$

$$Entfernung_{Wir} = \frac{Entfernung_{Zug} + (Zeit_{seit\ Abfahrt} \cdot v_{Zug})}{\sqrt{1 - \left(\frac{v_{Zug}}{c}\right)^2}}$$

Desweiteren gibt es Formeln für die verschiedenen Zeiten.

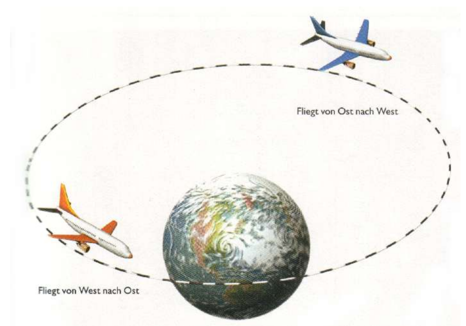
6 Beobachtete Relativität

Viele könnten jetzt meinen, das dies alles nur Hirngespinste von durchgeknallten Physikern sind. Das dies nicht so ist, kann allerdings nachgewiesen werden. Wie wir gesehen habe sind die Effekte der Zeitdilatation bei für uns üblichen Geschwindigkeiten sehr klein. Das heißt, wir müssen entweder extrem genau messen, oder etwas auf eine sehr hohe Geschwindigkeit bringen. Für beide Möglichkeiten habe ich ein Beispiel.

6.1 Atomuhr im Flugzeug um die Welt

Vor einigen Jahrzehnten hat es einen Versuch gegeben, bei dem man zwei genau synchonisierte Atomuhren in zwei entgegengesetzt fliegene Flugzeuge verfrachtete (Abb. 6.1), und beim Ankunft auf der anderen Erdseite die Zeiten verglich. Die Uhren wichen genau um den vorausgesagten Betrag voneinander ab. Hierbei muss man allerdings nicht nur die Fluggeschwindigkeit berücksichtigen, sondern auch die Geschwindigkeit der Erde, die sich die ganze Zeit unter den Flugzeugen weiterdreht. Der Effekt ist allerdings sehr klein.

6.2 Hochenergetische Teilchen



(Abb. 6.1) **Zeitdilatation bei Flügen**

Einen größeren messbaren Effekt liefern sogenannte Myonen. Das sind Teilchen die in den oberen Schichten unserer Atmosphäre durch die Kollision von hochenergetischen kosmischen Teilchen mit Atomkernen der Atmosphäre entstehen. Diese Teilchen sind allerdings sehr instabil und zerfallen nach einer Halbwertzeit von 1,5 µs, was wir mit künstlich erzeugten Myonen nachgewiesen haben. Wir wissen das diese Teilchen in einer Höhe von ca. 30 km entstehen. Da sie sich fast mit Lichtgeschwindigkeit fortbewegen legen sie alle 1,5 µs 450 m zurück. Eigentlich müssten diese Teilchen alle zerfallen sein, bis sie auf dem Erdboden angekommen sind. Wir können allerdings noch große Mengen dieser Teilchen hier am Boden messen. Wie ist das zu erklären? Durch ihre hohe Geschwindigkeit verlangsamt sich die innere Uhr der Myonen dermaßen, das für das Myon weitaus weniger Zeit vergeht, bis es den Erdboden erreicht.

Ähnliche Versuche mit Halbwertzeiten kann man heute in Teilchenbeschleunigern durchführen, die Teilchen auf unterschiedliche Geschwindigkeiten bringen können, und somit den Effekt sehr genau vermessen können.

7 Auswirkungen und Anwendungen

Für die Praktiker unter den Lesern, die sich nicht nur an einer tollen theoretischen Entdeckung erfreuen können, möchte ich jetzt einmal ein Beispiel bringen wo wir diese Berechnungen wirklich benötigen.

Vielen ist vielleicht das GPS (Global Positioning System) bekannt. Dieses ist in der Lage über im Weltraum stationierte Sender (Satelliten) uns auf der Erde unsere Position bis auf einige Zentimeter genau bestimmen zu lassen. Dafür ist an Board jedes Satelliten eine Atomuhr untergebracht. Diese bewegt sich allerdings sehr schnell (3.87 km/s) um die Erde. Damit der Fehler der Zeitdilatation sich nicht auf unsere Positionsbestimmung auswirkt, müssen wir ihn zwangsläufig berücksichtigen. Ohne diese Technik wären weder PKW-Navigationssyteme, noch die moderne Luftfahrt möglich. GPS kann eine Genauigkeit von bis zu 1- 2 cm erreichen (Vermessungstechnik).

Für die aktive Weltraumerkundung ist die Relativitätstheorie ebenfalls unverzichtbar geworden. Um den exakten Kurs einer Raumsonde unter den Gravitationseinwirkungen der Planten berechnen zu können, ist vor allem die allgemeine Relativitätstheorie sehr wichtig.

8 Ausblick in Weitergehendes

Ich haben in den letzten Seiten einen kleinen Bereich der theoretischen Physik ansatzweise beleuchten können. Von den anderen Bereichen möchte ich einmal kurz deren Anwendung und Konzepte anreißen.

8.1 Allgemeine Relativitätstheorie

Bei der speziellen Relativitätstheorie haben wir uns immer um Beschleunigungseinwirkungen gedrückt. Dies ist der Angriffspunkt der Allgemeinen Relativitätstheorie. Einstein hat bewiesen, das Beschleunigung und Gravitation identisch sind. Zudem hat er den Raum als vierdimensional betrachtet, mit der Zeit als vierte Dimension. Diese sogenannte Raumzeit wird durch die in ihr enthaltene Materie verworfen (gekrümmt). Sie beschreibt also die Grundkraft der Gravitation die sehr weitläufige (große Entfernung) Wirkungen hat. Diese Theorie kann alle Vorgänge mit Hilfe der Geometrie erklären.

8.2 Quantenphysik

Es gibt aber außer der Gravitation noch drei andere Grundkräfte. Das sind die elektromagnetische Kraft (Elektrischer Strom, Magnetismus, ...), schwache Kernkraft (verantwortlich für radioaktiven Zerfall) und die Starke Kernkraft (hält Atomkerne, Protonen, usw. zusammen). Diese Kräfte ist man heute in der Lage mit sogenannten Yang-Mills-Feld vereinheitlicht zu betrachten.

Eine wichtige Eigenschaft der Quantentheorie ist es, das sie uns verbietet, das wir die Position und Geschwindigkeit eines Teilchens ganz genau wissen können (Heisenberg'sche Unschärferelation). Sie rechnet sehr viel mit Aufenthaltswahrscheinlichkeiten von Teilchen an bestimmten Positionen. Durch sie ist es sogar möglich, das Teilchen sich kurzfristig schneller als das Licht bewegen (Tunneleffekt), was im Widerspruch zur Relativitätstheorie steht. Zudem wird hier nicht die Geometrie als Berechnungsbasis verwendet, sondern ein System von unzähligen winzigen Teilchen. Dieser Theorie verdanken wir die Entwicklung des Transistors, und damit die kompletten Computer Technik.

8.3 Großes Konzept (Superstring Theorie)

Wie wir gesehen haben, wiedersprechen sich die momentan vorhandenen Theorien über die Naturgesätze. Diese Widersprüche versucht man nun mit einer neuen, alle 4 Grundkräfte umfassenden, Theorie zu beseitigen. Diese zu erstellen ist allerdings sehr viel schwieriger als man annehmen könnte, da die Gravitation absolut nicht mit dem Konzept der Quantenphysik zusammenpasst.

Worum geht's (Raum, schwingt selber, jedes Teilchen andere Schwingungsfrequenz)

Normalerweise gibt es in der Physik immer erst praktische Vorstellungen, die man anschließend versucht in mathematische Form zu fassen. Bei der Superstring Theorie ist dies umgekehrt passiert. Durch die Erhöhung der Dimensionszahl auf 10 bzw. 24 hat man genug „Platz“ um alle Kräfte unter einen Hut zu bringen. In vielen Büchern kann man dazu lesen, das es eigentlich eine Theorie des 21. Jahrhunderts ist, die sich durch Zufall in unser Jahrhundert verirrt hat. Bislang haben wir nicht die mathematischen Mittel diese Gleichungen auszurechnen. Wir stellen zwar fest, das wir alle bekannten Theorien aus ihr ableiten können, erhalten aber noch unendlich viele andere Lösungen. Welche hiervon richtig sind, wissen wir nicht. Mit dieser Theorie könnten wir wahrscheinlich entgültig die Frage nach der Möglichkeit von Zeitreisen und Wurmlöchern beantworten.

9 Literaturverzeichnis

- Colin A. Ronan, Naturgeschichte des Universums, Naturbuch Verlag, 1992
- Thomas Bührke, $E = mc^2$, dtv, 1999
- Stephen Hawking, Die Illustrierte kurze Geschichte der Zeit, Rowohlt, 1997 (original 1988)
- Stephen Hawking, Das Universum in der Nussschale, Hoffmann und Campe, 2001
- Michio Kaku, Im Hyperraum - Eine Reise durch Zeittunnel und Paralleluniversen, Rowohlt Verlag, 1998
- Sebastian Neu, Die Spezielle Relativitätstheorie - Lorenz Transformation, http://sebi.neu.bei.t-online.de/, 2000