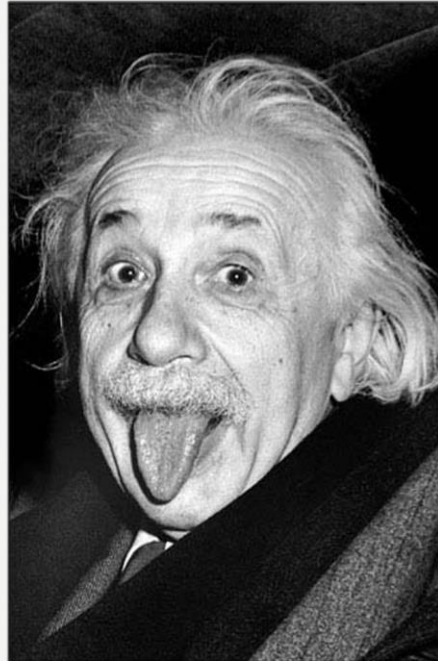


Dr. Jörg Noller

Was ist Zeit?

BA-Seminar
Dienstags, 12-14 Uhr c.t.
Raum E006





Albert Einstein (1879-1955)
Zur Elektrodynamik bewegter Körper (1905)



- Worin besteht der Unterschied zwischen der speziellen und der allgemeinen Relativitätstheorie?
- Was ist ein inertiales Bezugssystem?
- Welches sind die beiden Postulate der speziellen Relativitätstheorie?
- Was versteht man unter dem Relativitätsprinzip?
- Welche paradoxen Konsequenzen hat die Tatsache, dass die Lichtgeschwindigkeit überall gleich ist?
- Welche Konsequenzen hat die Relativitätstheorie für unser Verständnis von Raum und Zeit?
- Wie verhält sich die Relativitätstheorie zu den Zeit-Theorien bei Newton und Leibniz?
- Wie sollen überhaupt Philosophen über Ergebnisse der Physik reden?



Russell Stannard: *Relativitätstheorien / Relativity. A Very Short Introduction*. Oxford / New York: Oxford University Press, 2008



„Wir alle wachsen mit bestimmten Grundvorstellungen über Raum, Zeit und Materie auf, darunter den folgenden:

- Wir leben alle im selben dreidimensionalen Raum.
- Die Zeit vergeht für jedermann gleich schnell.
- Zwei Ereignisse treten entweder gleichzeitig auf, oder das eine findet vor dem anderen statt.
- Mit genügend Antriebskraft gibt es keine Grenze für die Geschwindigkeit einer Bewegung.
- Materie kann weder erzeugt noch zerstört werden.
- Die Summe der Winkel in einem Dreieck beträgt 180° .
- Der Kreisumfang ist 2π multipliziert mit dem Radius
- In einem Vakuum bewegt sich Licht immer geradlinig.“ (7)



Solche Vorstellungen scheinen wenig mehr als gesunder Menschenverstand zu sein.

Aber Vorsicht:

»Der gesunde Menschenverstand ist die Summe der Vorurteile, die man bis zu seinem 18. Lebensjahr angesammelt hat.« (Albert Einstein)“ (7)



„[Einsteins] Theorie hat zwei Teile:

- (1) die spezielle Relativitätstheorie, die 1905 formuliert wurde, und
- (2) die allgemeine Relativitätstheorie, die 1916 erschien.

Erstere handelt von den Wirkungen gleichförmiger Bewegung auf Raum und Zeit. Letztere schließt zusätzlich die Wirkungen der Beschleunigung und der Schwerkraft ein. Erstere ist ein Sonderfall der allumfassenden allgemeinen Theorie.“ (8)



1. Spezielle Relativitätstheorie

Das Relativitätsprinzip und die Lichtgeschwindigkeit



„Stellen Sie sich vor, Sie befinden sich in einem Eisenbahnwaggon, der an einem Bahnhof hält. Aus dem Fenster sehen Sie einen zweiten Zug, der neben Ihrem Zug steht. Die Pfeife ertönt, und schließlich setzen Sie sich in Bewegung. Sanft gleiten Sie an dem anderen Zug vorbei. Dessen letzter Waggon verschwindet aus Ihrem Blickfeld, was Ihnen ermöglicht zu sehen, wie der Bahnhof ebenfalls in der Ferne verschwindet, da auch er zurückgelassen wird. Nur dass der Bahnhof eben nicht verschwindet: Er bleibt einfach an seiner alten Stelle und bewegt sich nirgendwohin - genauso wie Sie im Zug sitzen und sich nirgendwohin bewegen. Allmählich dämmert es Ihnen, dass Sie sich überhaupt nicht bewegt haben: Der andere Zug war es, der sich fortbewegt hat.“ (9)



„Das ist eine simple Beobachtung. Manchmal lassen wir uns alle auf diese Weise täuschen. In Wahrheit können Sie nicht entscheiden, ob Sie sich wirklich bewegen oder nicht - zumindest dann nicht, wenn es sich um eine konstante, gleichförmige, geradlinige Bewegung handelt. Normalerweise, wenn Sie etwa mit dem Auto reisen, wissen Sie, dass Sie sich bewegen. Selbst wenn Sie die Augen geschlossen haben, können Sie fühlen, wie Sie in verschiedene Richtungen gedrückt werden, wenn der Wagen um Kurven und über Schlaglöcher fährt, plötzlich beschleunigt oder abbremsst. Aber in einem Flugzeug, das konstant dahingleitet, hätten Sie, abgesehen von dem Motorengeräusch und den leichten Vibrationen, keine Möglichkeit zu / entscheiden, ob Sie sich bewegen oder nicht. Das Leben innerhalb des Flugzeugs verläuft genauso, als ob das Flugzeug auf der Erde stehen würde. Wir sagen, dass das Flugzeug ein inertiales Bezugssystem darstellt. Damit meinen wir, dass sich Newtons Trägheitsgesetz anwenden lässt, d.h., dass ein von diesem Bezugssystem aus betrachteter Gegenstand weder seine Geschwindigkeit noch seine Richtung ändern wird, wenn keine unausgeglichene Kraft auf ihn wirkt. Beispielsweise bleibt ein vor Ihnen auf dem Ablagetisch stehendes Wasserglas an diesem Ort, bis Sie es mit Ihrer Hand bewegen.“ (9 f.)



„Aber was geschieht, wenn Sie aus dem Flugzeugfenster blicken und sehen, wie die Erde unter Ihnen vorbeigleitet? Sagt Ihnen das nicht, dass sich das Flugzeug bewegt? Nicht wirklich, schließlich ist die Erde nicht stationär, sie bewegt sich auf einer Umlaufbahn um die Sonne, die Sonne selbst befindet sich auf einer Umlaufbahn um das Zentrum der Milchstraßengalaxie, und die Milchstraßengalaxie bewegt sich innerhalb einer Anhäufung von ähnlichen Galaxien. Wir können nur sagen, dass diese Bewegungen alle relativ sind. Das Flugzeug bewegt sich relativ zur Erde, die Erde bewegt sich relativ zum Flugzeug. Es gibt keine Möglichkeit zu entscheiden, wer tatsächlich unbewegt ist. Jeder, der sich gleichförmig relativ zu einem ruhenden anderen bewegt, ist berechtigt, sich selbst als ruhend und die andere Person als bewegt zu betrachten. Das ist deshalb so, weil die Naturgesetze - die Regeln, die alle Ereignisse regieren - für jeden, der sich in konstanter, gleichförmiger Bewegung befindet, d. h. für jeden, der in einem inertialen Bezugssystem ist, dieselben sind. Das ist das *Relativitätsprinzip*.“ (10)



„Und tatsächlich war es nicht Einstein, der dieses Prinzip entdeckte, sondern es geht auf Galileo zurück. Wenn das so ist, warum wurde dann das Wort »Relativität« mit dem Namen von Einstein verbunden? Einstein bemerkte, dass sich unter den Naturgesetzen Maxwells Gesetze des Elektromagnetismus befanden. Maxwell zufolge ist Licht eine Form elektromagnetischer Strahlung. Daher ist es möglich, aufgrund der Kenntnis der Stärken elektrischer und magnetischer Kräfte die Lichtgeschwindigkeit c in einem Vakuum zu berechnen. Die Tatsache, dass Licht eine Geschwindigkeit besitzt, leuchtet nicht unmittelbar ein. Wenn Sie sich in ein abgedunkeltes Zimmer begeben und eine Lampe einschalten, scheint das Licht augenblicklich überall zu sein - an der Decke, den Wänden und auf dem Fußboden. Aber das stimmt nicht. Das Licht braucht Zeit, um von der Glühbirne zu seinem Bestimmungsort zu wandern. Nicht viel Zeit - es ist zu schnell, als dass man die Verzögerung mit bloßem Auge erkennen könnte. Nach diesem Naturgesetz beläuft sich die Lichtgeschwindigkeit c in einem Vakuum auf 299.792,458 Kilometer pro Sekunde (oder mit einem sehr kleinen Unterschied in der Luft). Das ist also das Ergebnis der Geschwindigkeitsmessung.“ (11)



„Was geschieht nun, wenn sich die Lichtquelle bewegt? Man könnte z.B. erwarten, dass sich das Licht wie eine Granate verhält, die von einem vorbeifahrenden Kriegsschiff abgefeuert wurde: Ein Beobachter am Meeresufer würde erwarten, dass die Geschwindigkeit des Schiffes sich zu der Mündungsgeschwindigkeit der Granate hinzuaddieren würde, wenn sie nach vorne abgefeuert wird, und abgezogen werden würde, wenn die Granate vom / Heck abgefeuert wird. 1964 wurde das Verhalten des Lichts in dieser Hinsicht im Genfer CERN-Laboratorium überprüft, indem man winzige subatomare Partikel verwendete, die neutrale Pionen genannt werden. Die Pionen, die sich mit $0,99975 c$ fortbewegen, zerfielen unter Abstrahlung von zwei Lichtpulsen. Man fand heraus, dass beide Pulse innerhalb der Messgenauigkeit von $0,1 \%$ die übliche Lichtgeschwindigkeit c aufwiesen. Also hängt die Lichtgeschwindigkeit nicht von der Geschwindigkeit der Quelle ab.“ (11 f.)

„Sie hängt auch nicht davon ab, ob man annimmt, dass der Beobachter des Lichts sich bewegt oder nicht. Betrachten wir noch einmal den Fall eines sich bewegenden Schiffs. Da -wir schon festgestellt haben, dass Licht sich nicht wie eine Granate verhält, die von einer Kanone abgefeuert wird, könnten wir möglicherweise erwarten, dass es sich so verhält wie Wellen auf dem Wasser. Befände der Beobachter sich nun auf einem sich bewegenden Boot, würde sich die Wellenfront vor dem Boot langsamer zu bewegen scheinen als die Wellenfront, die sich nach hinten ausbreitet — wegen der Bewegung des Bootes und seiner selbst relativ zum Wasser“ (12)

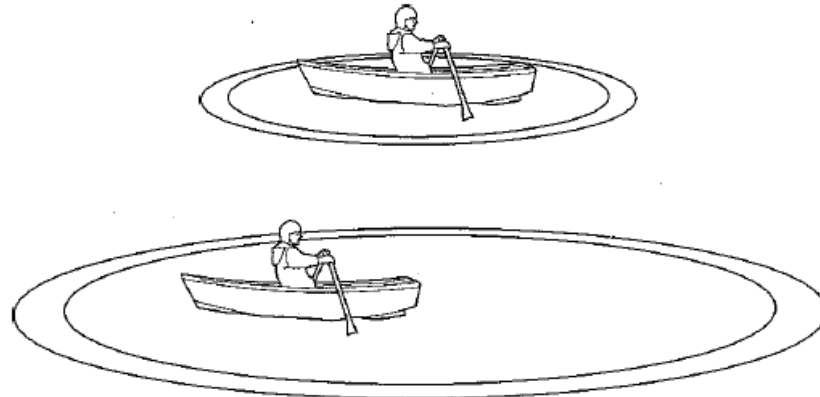


Abb. 1: Wellen, die von einem Boot ausgesandt werden, scheinen sich für einen Beobachter auf dem Boot langsamer nach vorne zu bewegen als nach hinten



„Angenommen, Licht ist eine Welle, die sich durch ein Medium bewegt, das den ganzen Raum durchdringt - ein Medium, das behelfsweise Äther genannt wurde -, dann sollten wir, da die Erde sich ihren Weg durch den Äther bahnt, feststellen, dass die Lichtgeschwindigkeit relativ zu uns Beobachtern, die wir uns gemeinsam mit der Erde bewegen, in verschiedenen Richtungen verschieden ist. Aber in einem berühmten Experiment, das von Michelson und Morley 1887 durchgeführt wurde, stellte man fest, dass / die Lichtgeschwindigkeit in allen Richtungen dieselbe ist. Die Lichtgeschwindigkeit ist also unabhängig davon, ob die Quelle oder der Beobachter als bewegt angesehen werden.“ (12 f.)



Also gelangen wir zu Folgendem:

(1) dem Relativitätsprinzip, das besagt, dass die Naturgesetze für alle inertialen Bezugssysteme dieselben sind;

(2) dem Wert der Lichtgeschwindigkeit in einem Vakuum, der aufgrund dieser Gesetze berechnet werden kann - dieser Wert ist in allen inertialen Bezugssystemen derselbe, unabhängig von der jeweiligen Geschwindigkeit der Quelle oder des Beobachters.

Diese beiden Aussagen wurden als die beiden Postulate (oder Grundprinzipien) der speziellen Relativitätstheorie bekannt.



„Diese Tatsachen galten unter Physikern lange Zeit als Allgemeingut. Es bedurfte des Genies von Albert Einstein, um zu erkennen, dass, obwohl jede der beiden Aussagen sinnvoll war, wenn man sie gesondert betrachtete, sie keinen Sinn zu ergeben schienen, wenn man die beiden Gedanken zusammenfügte. Wenn die erste Aussage wahr ist, schien es, dass die zweite falsch, oder wenn die zweite richtig war, die erste falsch sein muss. Wenn beide richtig sind - was wir anscheinend festgestellt haben -, dann muss etwas sehr Wichtiges nicht stimmen. Die Tatsache, dass die Lichtgeschwindigkeit für alle inertialen Beobachter unabhängig von der Bewegung der Quelle oder des Beobachters dieselbe ist, bedeutet, dass unser gewöhnliches Verfahren der Addition und Subtraktion von Geschwindigkeiten falsch ist. Und wenn mit unserem Begriff von Geschwindigkeit (die schlicht die Entfernung geteilt durch Zeit ist) etwas nicht stimmt, dann folgt daraus wiederum, dass etwas mit unserem Begriff des Raumes oder der Zeit oder beidem verkehrt sein muss. Wir haben es hier nicht mit irgendeiner Besonderheit des Lichts oder elektromagnetischer Strahlung zu tun. Alles, was sich mit derselben Geschwindigkeit wie das Licht fortbewegt, wird für alle inertialen Beobachter denselben Wert im Hinblick auf seine Geschwindigkeit haben. Entscheidend ist die Geschwindigkeit (und die Folgerungen für den zugrundeliegenden Raum und die Zeit) - nicht die Tatsache, dass wir es zufällig mit Licht zu tun haben.“ (14)



Zeitdilatation



„Um zu sehen, was hier nicht stimmt, stellen Sie sich eine Astronautin in einem Hochgeschwindigkeitsraumschiff und eine Person in einer Weltraumflugkontrollstation auf der Erde vor. Beide haben identische Uhren. Die Astronautin soll ein einfaches Experiment durchführen. Auf dem Boden des Raumschiffs soll sie eine Lampe befestigen, die einen Lichtpuls aussendet. Der Puls wandert direkt nach oben im rechten Winkel zur Bewegungsrichtung des Raumschiffs (siehe Abb. 2). Dort trifft der Puls auf eine Zielscheibe, die an der Decke befestigt ist. Nehmen wir an, dass das Raumschiff 4 Meter hoch ist. Da das Licht sich mit der Geschwindigkeit c ausbreitet, stellt die Astronautin fest, dass die Zeit t' , die der Lichtpuls für diese Reise braucht, anhand der Messung ihrer Uhr $t'=4/c$ beträgt.“ (15)

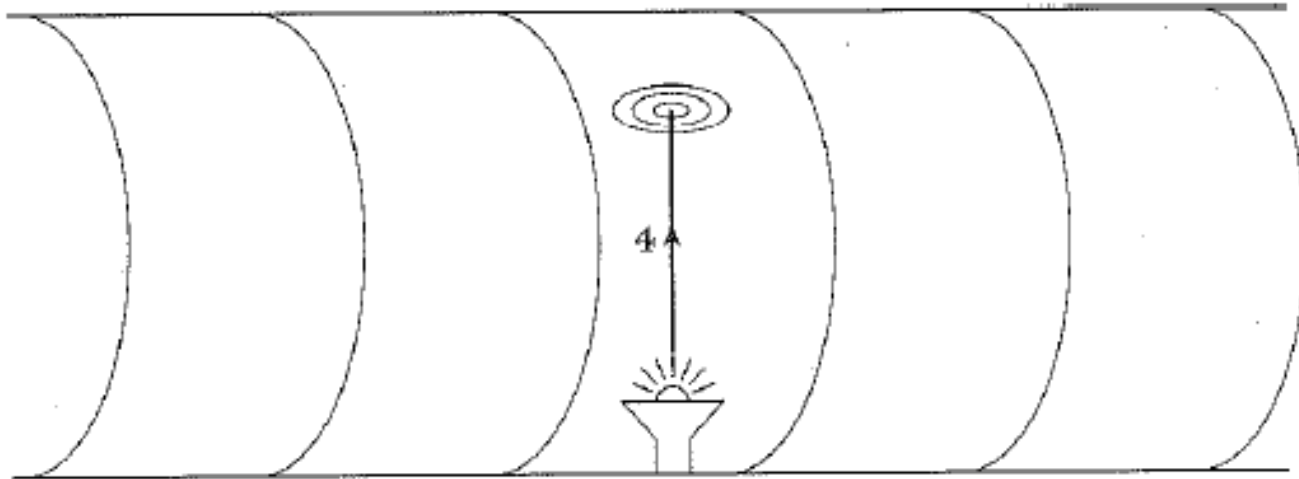


Abb. 2: Die Astronautin richtet einen Lichtpuls auf ein Ziel, so dass das Licht sich rechtwinklig zur Bewegungsrichtung des Raumschiffs bewegt



„Sehen wir uns nun an, wie das Ganze aus der Perspektive der Person in der Raumflugkontrollstation erscheint. Fliegt das Raumschiff über sie hinweg, beobachtet die Per- / son ebenfalls die Reise des Lichtpulses von der Quelle zum Ziel. Aus ihrer Perspektive wird das Ziel sich während der Zeit, die der Puls brauchte, um das Ziel zu erreichen, relativ zu der Stelle, wo es sich befand, als der Puls ausgestrahlt wurde, nach vorne bewegt haben.“ (15 f.)

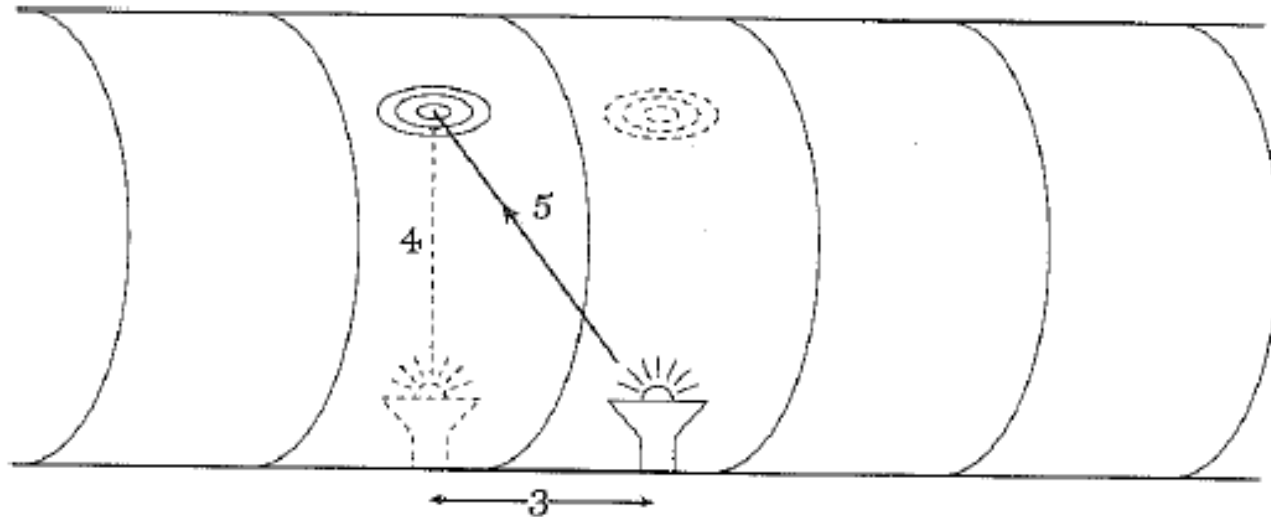


Abb. 3: Fliegt das Raumschiff über ihr vorbei, so bewegt sich das Ziel für die Person in der Raumflugkontrollstation auf der Erde in der Zeit, die der Lichtpuls für seine Reise braucht, vorwärts. Der Puls muss demnach eine diagonale Strecke durchlaufen



„Aus ihrer Sicht ist der Pfad nicht senkrecht, sondern geneigt (siehe Abb. 3). Die Länge dieses geneigten Pfades wird eindeutig größer sein als die Länge des Pfades aus der Sicht der Astronautin. Nehmen wir an, dass das Raumschiff sich in der Zeit, die der Lichtpuls braucht, um von der Quelle zum Ziel zu wandern, um 3 Meter vorwärts bewegt. Unter Verwendung des Satzes von Pythagoras, dem zufolge $3^2+4^2=5^2$ ist, sehen wir, dass die Strecke, die der Lichtpuls durchläuft, um zum Ziel zu gelangen, für die Person in der Kontrollstation 5 Meter beträgt.“ (16)



„Wie groß ist nun die Zeit, die sie für den bewegten Lichtpuls berechnet? Sie ist offensichtlich die zurückge / legte Entfernung, 5 Meter, geteilt durch die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichts. Wir hatten gesehen, dass diese Geschwindigkeit c ist (dieselbe wie die für die Astronautin). Für die Person in der Kontrollstation ist also die mit ihrer Uhr gemessene Zeit $t = 5/c$.“ (16 f.)



„Das ist aber nicht die Zeit, die die Astronautin gemessen hat. Nach ihrer Messung war diese Zeit $t'=4/c$. Die beiden stimmen also nicht darin überein, wie lange der Lichtpuls für seine Reise gebraucht hat. Für die Person in der Kontrollstation ist die Anzeige auf der Uhr der Astronautin zu niedrig: Deren Uhr geht langsamer als ihre eigene.“ (17)



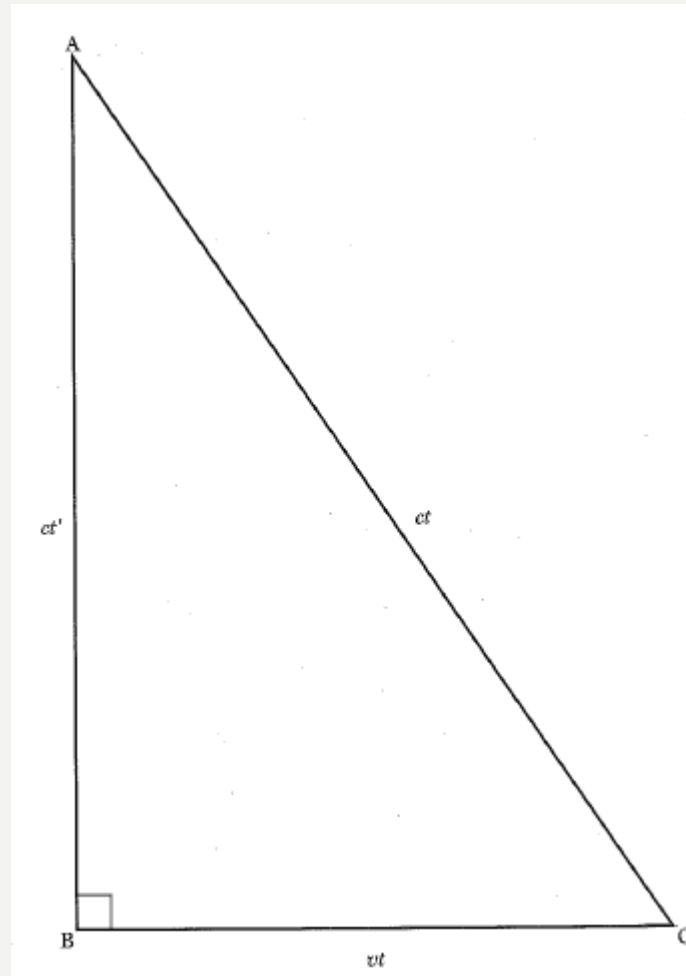
„Und nicht nur die Uhr, auch alle anderen Ereignisse im Raumschiff sind im selben Maß verlangsamt. Wäre das anders, würde die Astronautin merken können, dass ihre Uhr nachgeht (im Vergleich etwa zu ihrer Herzfrequenz oder zu der Zeit, die ein Wasserkessel zum Kochen braucht usw.). Und das würde ihr die Folgerung gestatten, dass sie sich bewegt - so dass ihre Geschwindigkeit den Uhrmechanismus irgendwie beeinflusst. Aber solches wird vom Relativitätsprinzip ausgeschlossen. Jede gleichförmige Bewegung ist relativ. Das Leben aus der Perspektive der Astronautin muss genauso vor sich gehen wie für die Person in der Kontrollstation. Daraus schließen wir, dass alles, was im Raumschiff geschieht: die Uhr, die Funktionsweise der Elektronik, die Alterungsprozesse der Astronautin, ihre Denkvorgänge, alle im selben Maß verlangsamt sind. Beobachtet sie ihre langsame Uhr mit ihrem langsamen Gehirn, wird nichts als fehlerhaft erscheinen. Aus ihrer Perspektive heraus erscheint alles im Raumschiff normal und verändert sich im selben Takt.“ (17)



„Nur für die Person in der Kontrollstation ist im Raumschiff alles verlangsamt. Das ist das Phänomen der Zeitdilatation. Die Astronautin hat ihre Zeit und die Person in der Kontrollstation hat ebenfalls ihre Zeit. Diese beiden Zeiten sind nicht identisch.“ (18)



„In diesem Beispiel haben wir einen Sonderfall betrachtet, in dem die Astronautin und das Raumschiff sich 3 Meter in derjenigen Zeit weiterbewegen, die das Licht braucht, um die 5 Meter von der Quelle zum Ziel zurückzulegen. Mit anderen Worten, das Raumschiff bewegt sich mit einer Geschwindigkeit von $\frac{3}{5}c$, d.h. $0,6c$. Und für diese besondere Geschwindigkeit haben wir gesehen, dass die Zeit der Astronautin sich um einen Faktor von $\frac{4}{5}$, d.h. $0,8$, verlangsamt. Es ist nicht besonders schwierig, eine Formel für jede gewählte Geschwindigkeit v aufzustellen. Wir wenden den Satz des Pythagoras auf das Dreieck ABC an. Die Entfernungen sind wie in Abbildung 4 angegeben.“ (18)





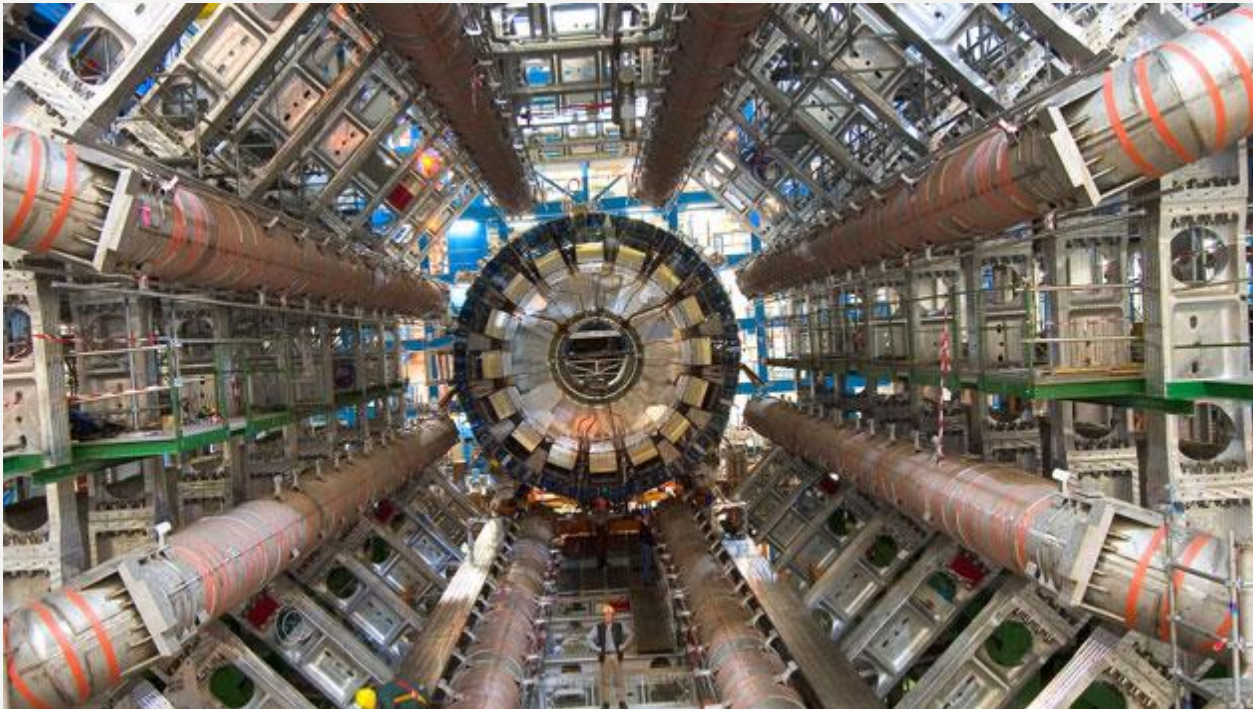
„Ist v im Vergleich zu c klein, ersehen wir aus dieser Formel, dass der Ausdruck unter dem Quadratwurzelzeichen sich 1 annähert und $t'=t$. Aber unabhängig davon, wie klein v wird, ist doch der Dilatationseffekt immer noch vorhanden. Strenggenommen bedeutet das, dass immer dann, wenn wir eine Reise unternehmen - z.B. eine Busfahrt -, wir beim Aussteigen unsere Armbanduhr nachstellen müssten, um sie mit allen stationären Uhren und Armbanduhren wieder zu synchronisieren. Der Grund, warum wir das nicht tun, besteht darin, dass der Effekt so winzig ist. Beispielsweise wird jemand, der sich dafür entscheidet, während seines ganzen Arbeitslebens Schnellzüge zu fahren, bis zu seiner Pensionierung im Vergleich mit denjenigen, die eine ortsgebundene Arbeit verrichten, um nicht mehr als eine Millionstel Sekunde aus dem Takt kommen. Darüber muss man sich also kaum den Kopf zerbrechen.“ (20)



„Auf der anderen Seite erkennen wir an der Formel, dass der Ausdruck unter dem Quadratwurzelzeichen auf 0 zustrebt und f sich 0 annähert, wenn v sich c annähert. Mit anderen Worten: Die Zeit würde für die Astronautin gewissermaßen zum Stillstand kommen. Daraus folgt, dass Astronauten fast überhaupt nicht altern und eigentlich ewig leben würden, wenn sie in der Lage wären, mit annähernder Lichtgeschwindigkeit zu fliegen. Der Nachteil dabei ist natürlich, dass ihre Gehirne nahezu Stillstehen würden, was wiederum bedeutet, dass sie sich dessen nicht bewusst wären, das Geheimnis ewiger Jugend entdeckt zu haben.“ (19)



„Soviel zur Theorie: Aber bewährt sie sich auch in der Praxis? Ja, durchaus. 1977 wurde z.B. am CERN-Laboratorium in Genf ein Experiment an subatomaren Teilchen / durchgeführt, die man Myonen nennt. Diese winzigen Teilchen sind instabil und zerfallen nach einer durchschnittlichen Zeit von $2,2 \times 10^{-6}$ Sekunden (d.h. nach 2,2 Millionstel einer Sekunde) in kleinere Teilchen. Man ließ sie wiederholt auf einer kreisförmigen Bahn mit einem Durchmesser von 14 Metern wandern, und zwar mit einer Geschwindigkeit von $v=0,9994 c$. Die Messung der durchschnittlichen Lebensdauer dieser bewegten Myonen ergab, dass sie um 29,3 Mal länger war als die stationärer Myonen - was genau dem Ergebnis entspricht, das anhand der abgeleiteten Formel erwartet wurde, und zwar mit einer experimentellen Genauigkeit von einem Teil in 2000.“ (20 f.)







„In einem gesonderten Experiment, das 1971 durchgeführt wurde, hat man die Formel bei Geschwindigkeiten von Flugzeugen unter Verwendung von Atomuhren überprüft, von denen eine in einem Flugzeug mitgenommen wurde und die andere sich auf der Erde befand. Wieder wurde eine gute Übereinstimmung mit der Theorie gefunden. Diese und zahlreiche andere Experimente bestätigen alle die Richtigkeit der Formel für die Zeitdilatation.“ (21)



Albert Einstein: Zur Elektrodynamik bewegter Körper. In: Annalen der Physik und Chemie, Jg. 17, 1905, S. 891–921.



3. Zur *Elektrodynamik bewegter Körper*; von *A. Einstein*.

Daß die Elektrodynamik Maxwells — wie dieselbe gegenwärtig aufgefaßt zu werden pflegt — in ihrer Anwendung auf bewegte Körper zu Asymmetrien führt, welche den Phänomenen nicht anzuhaften scheinen, ist bekannt. Man denke z. B. an die elektrodynamische Wechselwirkung zwischen einem Magneten und einem Leiter. Das beobachtbare Phänomen hängt hier nur ab von der Relativbewegung von Leiter und Magnet, während nach der üblichen Auffassung die beiden Fälle, daß der eine oder der andere dieser Körper der bewegte sei, streng voneinander zu trennen sind. Bewegt sich nämlich der Magnet und ruht der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten ein elektrisches Feld von gewissem Energiewerte, welches an den Orten, wo sich Teile des Leiters befinden, einen Strom erzeugt. Ruht aber der Magnet und bewegt sich der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten kein elektrisches Feld, dagegen im Leiter eine elektromotorische Kraft, welcher an sich keine Energie entspricht, die aber — Gleichheit der Relativbewegung bei den beiden ins Auge gefaßten Fällen vorausgesetzt — zu elektrischen Strömen von derselben Größe und demselben Verlaufe Veranlassung gibt, wie im ersten Falle die elektrischen Kräfte.

Beispiele ähnlicher Art, sowie die mißlungenen Versuche, eine Bewegung der Erde relativ zum „Lichtmedium“ zu konstatieren, führen zu der Vermutung, daß dem Begriffe der absoluten Ruhe nicht nur in der Mechanik, sondern auch in der Elektrodynamik keine Eigenschaften der Erscheinungen entsprechen, sondern daß vielmehr für alle Koordinatensysteme, für welche die mechanischen Gleichungen gelten, auch die gleichen elektrodynamischen und optischen Gesetze gelten, wie dies für die Größen erster Ordnung bereits erwiesen ist. Wir wollen diese Vermutung (deren Inhalt im folgenden „Prinzip der Relativität“ genannt werden wird) zur Voraussetzung erheben und außerdem die mit ihm nur scheinbar unverträgliche



3. Zur *Elektrodynamik bewegter Körper*; von *A. Einstein*.

Daß die Elektrodynamik Maxwells — wie dieselbe gegenwärtig aufgefaßt zu werden pflegt — in ihrer Anwendung auf bewegte Körper zu Asymmetrien führt, welche den Phänomenen nicht anzuhaften scheinen, ist bekannt. Man denke z. B. an die elektrodynamische Wechselwirkung zwischen einem Magneten und einem Leiter. Das beobachtbare Phänomen hängt hier nur ab von der Relativbewegung von Leiter und Magnet, während nach der üblichen Auffassung die beiden Fälle, daß der eine oder der andere dieser Körper der bewegte sei, streng voneinander zu trennen sind. Bewegt sich nämlich der Magnet und ruht der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten ein elektrisches Feld von gewissem Energiewerte, welches an den Orten, wo sich Teile des Leiters befinden, einen Strom erzeugt. Ruht aber der Magnet und bewegt sich der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten kein elektrisches Feld, dagegen im Leiter eine elektromotorische Kraft, welcher an sich keine Energie entspricht, die aber — Gleichheit der Relativbewegung bei den beiden ins Auge gefaßten Fällen vorausgesetzt — zu elektrischen Strömen von derselben Größe und demselben Verlaufe Veranlassung gibt, wie im ersten Falle die elektrischen Kräfte.

Beispiele ähnlicher Art, sowie die mißlungenen Versuche, eine Bewegung der Erde relativ zum „Lichtmedium“ zu konstatieren, führen zu der Vermutung, daß dem Begriffe der absoluten Ruhe nicht nur in der Mechanik, sondern auch in der Elektrodynamik keine Eigenschaften der Erscheinungen entsprechen, sondern daß vielmehr für alle Koordinatensysteme, für welche die mechanischen Gleichungen gelten, auch die gleichen elektrodynamischen und optischen Gesetze gelten, wie dies für die Größen erster Ordnung bereits erwiesen ist. Wir wollen diese Vermutung (deren Inhalt im folgenden „Prinzip der Relativität“ genannt werden wird) zur Voraussetzung erheben und außerdem die mit ihm nur scheinbar unverträgliche

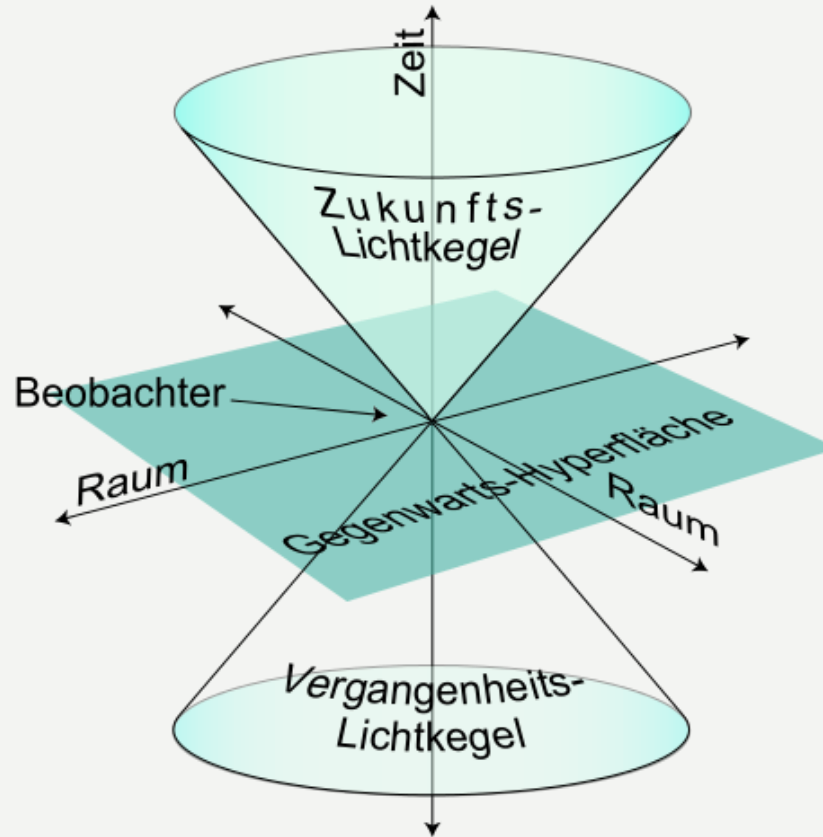


Voraussetzung einführen, daß sich das Licht im leeren Raume stets mit einer bestimmten, vom Bewegungszustande des emittierenden Körpers unabhängigen Geschwindigkeit V fortpflanze. Diese beiden Voraussetzungen genügen, um zu einer einfachen und widerspruchsfreien Elektrodynamik bewegter Körper zu gelangen unter Zugrundelegung der Maxwell'schen Theorie für ruhende Körper. Die Einführung eines „Lichtäthers“ wird sich insofern als überflüssig erweisen, als nach der zu entwickelnden Auffassung weder ein mit besonderen Eigenschaften ausgestatteter „absolut ruhender Raum“ eingeführt, noch einem Punkte des leeren Raumes, in welchem elektromagnetische Prozesse stattfinden, ein Geschwindigkeitsvektor zugeordnet wird.

Die zu entwickelnde Theorie stützt sich — wie jede andere Elektrodynamik — auf die Kinematik des starren Körpers, da die Aussagen einer jeden Theorie Beziehungen zwischen starren Körpern (Koordinatensystemen), Uhren und elektromagnetischen Prozessen betreffen. Die nicht genügende Berücksichtigung dieses Umstandes ist die Wurzel der Schwierigkeiten, mit denen die Elektrodynamik bewegter Körper gegenwärtig zu kämpfen hat.



Wir sehen also, daß wir dem Begriffe der Gleichzeitigkeit keine *absolute* Bedeutung beimessen dürfen, sondern daß zwei Ereignisse, welche, von einem Koordinatensystem aus betrachtet, gleichzeitig sind, von einem relativ zu diesem System bewegten System aus betrachtet, nicht mehr als gleichzeitige Ereignisse aufzufassen sind.





Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!