

# FACHARBEIT

---

- + Thema:  
Die Lichtgeschwindigkeit als universelle Konstante
- + Fach:  
Physik
- + Autor:  
Christian Thiemann
- + Veröffentlichung:  
14. März 2001
- + Schule:  
Herbartgymnasium Oldenburg

Download der Facharbeit unter:

[http://www.sisol.de/jobschool/arbeiten/index\\_download.sisol?detail=1](http://www.sisol.de/jobschool/arbeiten/index_download.sisol?detail=1)



Christian Thiemann

# **DIE LICHTGESCHWINDIGKEIT ALS UNIVERSELLE KONSTANTE**

## **EXPERIMENTELLE NACHWEISE UND DIE FOLGEN FÜR DIE PHYSIK**



Facharbeit Physik 2001

Das Titelbild stellt eine Rekonstruktion des Michelson-Morley-Versuchs dar, wie er Ende des 19. Jahrhunderts auf einer in Quecksilber schwimmenden Steinplatte in einem Keller in Chicago von Albert Michelson und Edward Morley aufgebaut wurde. Die Darstellung stützt sich dabei auf die im Literaturverzeichnis angegebenen Quellen. Fehlende Detailangaben in den Quellen wurden in Anlehnung an die damaligen Gegebenheiten frei ergänzt.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>ÜBERBLICK .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>DAS LICHT UND SEINE GESCHWINDIGKEIT .....</b>	<b>1</b>
2.1	DIE GESTALT DES LICHTES .....	1
2.1.1	<i>Die Geschichte des Äthers.....</i>	<i>1</i>
2.1.2	<i>Das Licht als Schwingung des Äthers.....</i>	<i>2</i>
2.2	DIE AUSBREITUNGSGESCHWINDIGKEIT DES LICHTES .....	3
2.3	DIE KONSTANZ DER LICHTGESCHWINDIGKEIT.....	4
<b>3</b>	<b>KONSEQUENZEN DER KONSTANZ DER LICHTGESCHWINDIGKEIT .....</b>	<b>7</b>
3.1	DIE ZEITDILATATION .....	8
3.1.1	<i>Theorie.....</i>	<i>8</i>
3.1.2	<i>Experimentelle Nachweise.....</i>	<i>12</i>
3.2	WEITERE KONSEQUENZEN.....	13
<b>4</b>	<b>ALBERT EINSTEIN UND ISAAC NEWTON.....</b>	<b>14</b>
<b>5</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>15</b>

## 1 Überblick

In einem dunklen Zimmer zündet jemand eine Kerze an. Sofort ist der Raum hell. Aufgrund dieser Beobachtung glaubte man lange Zeit, dass sich Licht momentan, also ohne Zeitverlust bzw. mit unendlich hoher Geschwindigkeit ausbreitet. Im Zeitalter der Raumfahrt ist dies eine faszinierende Vorstellung: Egal, wie weit Sender und Empfänger voneinander entfernt sind, sobald der Sender das Signal gesendet hat, ist es auch schon beim Empfänger angekommen. Die Realität lehrt uns jedoch das Gegenteil. Die Bilder der Marssonde „Pathfinder“ wurden von der NASA erst einige Minuten nach ihrem Absenden empfangen. Warum das so ist, was Ole Römer damit zu tun hat und was Albert Michelson seltsames über die Lichtgeschwindigkeit herausfand, wird im Kapitel 2 ausgeführt.

„Der Raum ist gleichmäßig. Jeder Punkt des Raumes läßt sich mit Hilfe von drei Zahlen genau beschreiben. Jeder Körper bewegt sich überall und für jeden Beobachter mit derselben Geschwindigkeit und überall im Raum vergeht die Zeit immer gleich schnell.“ Wie diese Vorstellung 1959 im Europäischen Kernforschungszentrum CERN experimentell widerlegt wurde, warum Albert Einstein es schon über 50 Jahre vorher wusste und was er noch so alles über die Welt herausfand, findet man im Kapitel 3. Einstein versus Newton – zwei Weltanschauungen widersprechen sich. Warum sich die eine durchsetzte und die andere trotzdem nicht falsch ist, wird im Kapitel 4 gezeigt.

## 2 Das Licht und seine Geschwindigkeit

Die Vorstellung von der Art und der Geschwindigkeit des Lichtes hat sich während der Geschichte der Physik ebenso drastisch geändert wie die Vorstellung von der Gestalt der Erde. Diese Veränderungen sollen im folgenden dargestellt werden.

### 2.1 Die Gestalt des Lichtes

Bis zum Ende des 19. Jahrhunderts sah man das Licht als Schwingung des sogenannten Äthers an. Wie es zu dieser Vorstellung kam, wird in den beiden folgenden Kapiteln erklärt.

#### 2.1.1 Die Geschichte des Äthers

Der griechische Philosoph *Aristoteles* beschrieb in seinem Weltbild das Universum mit Hilfe von ineinander gelegten Kugeln, die er als kristallene Himmelsphären bezeichnete. In diesen Kugeln sollten die Planeten eingeschlossen sein. Die äußerste

Kristallkugel sollte dabei die Fixsterne enthalten und sich einmal am Tag um den Mittelpunkt des Universums, die Erde, drehen. Weil die Kugeln ohne Lücke aneinander lagen, wurden die inneren Kristallkugeln durch Reibung mitbewegt. Hinter der äußersten Kugel sollte das Universum zu Ende sein. Dort durfte es auch keinen Raum geben, denn Raum und Materie waren nach Aristoteles untrennbar miteinander verknüpft: Ohne Raum keine Materie, aber auch ohne Materie kein Raum.

Auch in späteren Weltbildern trennte man sich nicht von diesem Grundsatz und somit war der *Äther* geboren. Als Äther bezeichnete man das Material, das die Leere zwischen den Planeten füllte, kurz: Der Äther sollte überall dort sein, wo nicht schon andere Materie war.

Im 16. Jahrhundert stellte der in Ostpreußen geborene Astronom *Nikolaus Kopernikus* die Sonne in die Mitte des Universums. Die kristallinen Kugeln, in denen sich die Gestirne – und nun auch die Erde – befinden sollten, behielt er aber bei.

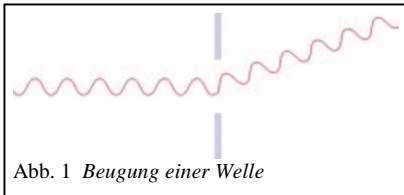
Eine völlig neue Vorstellung vom Universum wurde im 17. Jahrhundert vom englischen Physiker, Mathematiker und Astronom *Isaac Newton* geprägt: Einer Erzählung nach soll Newton irgendwann einmal unter einem Apfelbaum gesessen und darüber nachgedacht haben, welche Kräfte den Mond um die Erde und die Planeten um die Sonne bewegen. Plötzlich sah er einen Apfel zu Boden fallen und erkannte die Anziehungskraft der Erde. [vgl. BLex92NwT, Band I, S.202]

Über den Wahrheitsgehalt dieser Anekdote mag man sich streiten. Fest steht jedoch, dass Newton dieselbe Kraft, die einen Apfel auf die Erde fallen läßt, dafür verantwortlich machte, dass die Planeten sich auf kreisförmigen Bahnen bewegen. Das Interessante an Newtons Weltbild ist jedoch die Rolle des Äthers. Dieser sollte nämlich in einem *absoluten Raum* ruhen. Etwas anschaulicher beschrieben: Das gesamte Universum ist ein Aquarium (absoluter Raum), das mit einer durchsichtigen Flüssigkeit (Äther) gefüllt ist. In dieser Flüssigkeit schwimmen die Planeten, die sich durch ihre Schwerkraft gegenseitig beeinflussen und sich deshalb auf bestimmten Bahnen bewegen. Das Aquarium selber erzeugt weder eine Schwerkraft noch wird es von irgendwelchen Kräften beeinflusst oder bewegt sich in sonst einer Weise.

[vgl. Sex178, S.1ff.]

### **2.1.2 Das Licht als Schwingung des Äthers**

Anfang des 19. Jahrhunderts wurde beim Licht die Eigenschaft der *Beugung* nachgewiesen. Hierbei handelt es sich um das Phänomen, dass eine Welle einen



schmalen Spalt (Verhältnis von Spaltbreite zu Wellenlänge ist klein gegen 1) nicht ohne Ablenkung durchlaufen kann (Abb. 1).

Da diese Eigenschaft auch beim Schall beobachtet werden kann, schloss man, dass Licht eine mechanische Welle ist, also ein Medium braucht, um sich auszubreiten. Da jedoch das Licht der Sonne die Erde erreicht, musste sich zwischen Sonne und Erde (sowie allen anderen sichtbaren Planeten) dieses Medium befinden. Damit schien die schon seit langem bestehende Vermutung, Licht sei eine Schwingung der Moleküle des Äthers, endlich bewiesen zu sein.

[vgl. Sexl78, S.6]

Diese Ansicht wurde jedoch unter anderem durch den Michelson-Morley-Versuch, der in Kapitel 2.3 genauer beschrieben wird, revidiert. Heute sieht man das Licht sowohl als elektromagnetische Welle als auch als Teilchen (Welle-Teilchen-Dualismus), worauf ich aber nicht weiter eingehen möchte.

## **2.2 Die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes**

Die Geschwindigkeit eines Körpers kann man bestimmen, indem man die Zeit misst, die er zum Durchlaufen einer bestimmten Strecke benötigt. Je höher nun seine Geschwindigkeit, desto kleiner ist die benötigte Zeit. Hat man es nun mit sehr großen Geschwindigkeiten zu tun, muss man eine sehr lange Strecke benutzen, um eine relativ lange Zeit zu messen, oder man verfügt über ein sehr genaues Zeitmessgerät, sodass man auch eine kurze Strecke mit der dazugehörigen kurzen Laufzeit benutzen kann. Beides war früher nicht möglich. Selbst wenn man die Zeit auf eine Hundertstelsekunde genau hätte messen können, das Licht hätte in dieser Zeit trotzdem noch 3000km zurückgelegt. Eine so lange Strecke aufzubauen, in der sich das Licht ungehindert ausbreiten kann, war damals unmöglich.

Dennoch versuchte man trotzdem, die Geschwindigkeit des Lichtes zu messen. Doch in den verwendeten kurzen Strecken ergab sich mit den alten Uhren eine Zeitdifferenz von Null. Daraus schloss man, dass das Licht unendlich schnell ist, also zum Durchlaufen einer noch so langen Strecke keine Zeit benötigt.

Der dänische Astronom *Ole Römer* zeigte das Gegenteil: Bis 1675 führte er eine längere Beobachtung der Verfinsterungen des Jupitermondes Io durch. Dieser tritt nämlich in regelmäßigen Abständen in den Schatten des Jupiters ein. Da sich die Erde schneller als der Jupiter um die Sonne bewegt, entfernt sie sich ein halbes Jahr lang von Jupiter, um ihm im nächsten Halbjahr wieder näherzukommen. Römer beobachtete nun, dass sich

die eigentlich regelmäßigen Abstände der Io-Verfinsterung während des Entfernungshalbjahres vergrößerten und sich während des Annäherungshalbjahres verkleinerten. Hierin sah Römer den Beweis, dass Licht eine endliche Geschwindigkeit besitzt. Während des Entfernungshalbjahres muss das Licht vom Jupitermond zur Erde nämlich eine immer größer werdende Entfernung zurücklegen, während des Annäherungshalbjahres eine immer kleiner werdende. Hätte das Licht eine unendliche Geschwindigkeit, wäre die Veränderung der Entfernung irrelevant, da das Licht gleichzeitig überall auf seiner Laufbahn wäre. [s. Anmerkung im Literaturverzeichnis]

Die von Ole Römer gefundene Lichtgeschwindigkeit (je nach Quelle zwischen  $225.000 \frac{km}{s}$  und  $307.200 \frac{km}{s}$ ) kommt der wirklichen Lichtgeschwindigkeit bereits sehr nahe. Heute benutzt man moderne Technik zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit:

Der Lichtstrahl einer extrem schnell pulsierenden Lichtquelle wird auf eine Photodiode gerichtet. Diese erzeugt aufgrund der Helligkeitsschwankungen eine wechselnde Spannung, die mit einem Oszilloskop sichtbar gemacht wird. Nun baut man den Versuch so auf, dass am linken Rand der Mattscheibe immer ein Spannungsmaximum zu sehen ist. Dies wird dadurch realisiert, dass immer, wenn die Lichtquelle maximale Intensität erreicht hat, über ein Triggerkabel im Oszilloskop ein Rücksprung des Elektronenstrahls ausgelöst wird. Außerdem muss die Lichtquelle in einem ganz bestimmten Abstand zur Photodiode aufgestellt werden. Nun entfernt man die Lichtquelle von der Photodiode um eine bestimmte Strecke. Die Laufzeit im Triggerkabel ändert sich nicht, wohl aber die des Lichtstrahls zur Photodiode. Dadurch wird zwar immer noch zum gleichen Zeitpunkt der Rücksprung des Elektronenstrahls ausgelöst, das Spannungsmaximum erscheint aber nicht mehr am linken Rand der Mattscheibe, sondern etwas weiter rechts, was „etwas später“ bedeutet. Aus der Strecke und dieser Zeitdifferenz lässt sich bei genügend aufwendiger Durchführung die Lichtgeschwindigkeit sehr genau berechnen. [vgl. DB86, S.218]

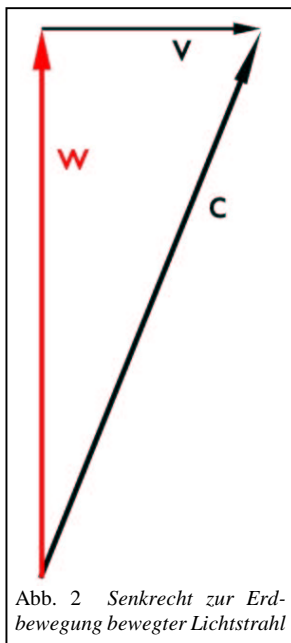
Der heute als exakt angenommene Wert der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum beträgt  $c = 299.792,458 \frac{km}{s}$  [Sexl78, S.13].

### **2.3 Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit**

Da der Äther (wie in Kapitel 2.1 beschrieben) im absoluten Raum ruhte, die Erde sich jedoch um die Sonne drehte, musste sich die Erde auch innerhalb des Äthers bewegen. Der amerikanische Physiker *Albert Michelson* hatte nun eine seiner Meinung nach sichere Methode gefunden, den Äther nachzuweisen. Dazu ein kleines Gedankenexperiment:

Stellen wir uns Bahngleise vor, die jemand im absoluten Raum verlegt hat (d.h. die Bahngleise bewegen sich überhaupt nicht). Nun stellen wir uns auf den Bahndamm und beobachten einen Zug, der mit einer bestimmten Geschwindigkeit  $v$  über diese Bahngleise fährt. Ein Passagier wirft verbotenerweise eine Flasche aus dem Zug, die nach kurzer Zeit mit der Geschwindigkeit  $w$  an der Lokomotive vorbeifliegt (wir gehen davon aus, dass die Flasche von keiner Schwerkraft beeinflusst wird). Als Beobachter aus dem ruhenden System wissen wir, dass die Flasche vor ihrer Beschleunigung schon eine Anfangsgeschwindigkeit (die des Zuges) hatte und sie sich deshalb mit der Geschwindigkeit  $c = w + v$  an uns vorbeibewegt.

Übertragen wir das Gedankenexperiment auf Licht: Das Licht bewegte sich nach damaliger Vorstellung immer mit der Geschwindigkeit  $c = 300.000 \frac{km}{s}$  im Äther. Nun fragen wir den Passagier im Zug, wie schnell das Licht, das sich in der gleichen Richtung wie der Zug bewegt, an ihm vorbeigelaufen sei. Er wird die Lichtgeschwindigkeit messen und uns (gemäß obiger Formel) den Wert  $w = c - v$  mitteilen, also eine geringere als die im Äther. Dies ist ja auch nicht verwunderlich, da der Zug ja mit dem Licht mitfährt, sodass das Licht für den Passagier scheinbar langsamer als  $c$  ist. Wir lassen den Passagier eine Taschenlampe in Richtung Zugende halten und bitten einen zweiten Passagier, die Geschwindigkeit des nun gegen den Zug laufenden Lichtes zu messen. Dieser teilt uns die Geschwindigkeit  $w = c + v$  mit. Auch dies lässt sich leicht nachvollziehen: Das Licht läuft dem Zug entgegen; für den Passagier scheint es sich also schneller als  $c$  zu bewegen.



Nun ersetzen wir den Zug durch die Erde und können folgende Erkenntnisse zusammenfassen:

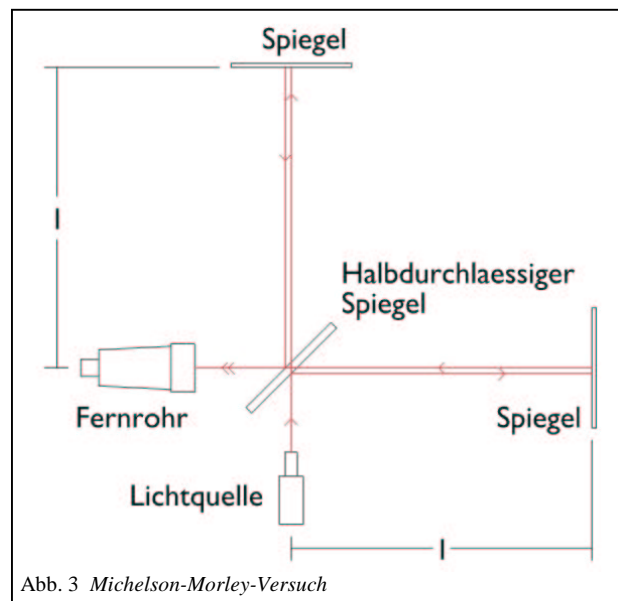
Die Erde bewegt sich mit einer Geschwindigkeit  $v$  in einer bestimmten Richtung durch den Äther. Wenn wir einen Lichtstrahl in dieser Richtung aussenden, bewegt er sich mit der Geschwindigkeit  $c$  durch den Äther. Auf der Erde messen wir jedoch die Geschwindigkeit  $w = c - v$ . Schicken wir den Lichtstrahl jedoch in die entgegengesetzte Richtung, so messen wir die Geschwindigkeit  $w = c + v$ . Für eine Strecke  $l$  würde der mit der Erde bewegte Lichtstrahl also länger brauchen als der entgegengesetzt bewegte.

Michelson überlegte außerdem, wie schnell ein senkrecht zur Erdbewegung laufender Lichtstrahl gemessen werde (Abb. 2). Stellen wir uns dazu noch einmal den Zug vor: Der Passagier wirft die Flasche mit der Geschwindigkeit  $w$

senkrecht zur Fahrtrichtung aus dem Fenster, sodass sie sich immer weiter vom Zug entfernt und weder die Lokomotive noch das Zugende erreicht. Als Beobachter im absoluten Raum wissen wir wieder um die Anfangsgeschwindigkeit der Flasche ( $v$ ) und erkennen, dass sie sich schräg im Raum bewegt. Übertragen wir nun wieder auf Licht, so misst der Passagier (gemäß Pythagoras) für das Licht die Geschwindigkeit  $w = \sqrt{c^2 - v^2}$ .

All diese Erkenntnisse nutzte Michelson in seinem Versuch aus. Er konstruierte mit seinem Kollegen *Edward Morley* das sogenannte „*Michelson-Interferometer*“ (Abb. 3):

Zwei senkrecht zueinander stehende Strecken der Länge  $l$  werden von einem Lichtstrahl durchlaufen, der durch einen halbdurchlässigen Spiegel aufgeteilt wird. Am Ende der Strecke werden die Lichtstrahlen reflektiert und am halbdurchlässigen Spiegel wieder zusammengeführt. Die eine Hälfte geht dabei zurück in die Lichtquelle, die andere wird durch ein Fernrohr gebündelt.



Michelson entwickelte nun folgende Theorie: Wenn er das Interferometer so aufstellt, dass eine Strecke parallel zur Erdbewegung und die andere senkrecht dazu steht, müsste das Licht für den Hin- und Rücklauf in beiden Strecken unterschiedliche Zeiten benötigen, die sich mit Hilfe der obigen Überlegungen berechnen ließen:

Für die Strecke parallel zur Erdbewegung:

$$t_p = \frac{l}{c-v} + \frac{l}{c+v} = \frac{l \cdot (c+v)}{(c-v) \cdot (c+v)} + \frac{l \cdot (c-v)}{(c+v) \cdot (c-v)} = \frac{2 \cdot l \cdot c}{c^2 - v^2} = \frac{2 \cdot l}{c} \cdot \frac{1}{1 - v^2/c^2}$$

Für die Strecke senkrecht zur Erdbewegung:  $t_s = \frac{2 \cdot l}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{2 \cdot l}{c} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$

Zeitdifferenz der beiden Lichtstrahlen:  $\Delta t = t_s - t_p = \frac{2 \cdot l}{c} \cdot \left( \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - \frac{1}{1 - v^2/c^2} \right)$

Diese Zeitdifferenz wird sich verändern, wenn man das Interferometer dreht. Bei einem Drehwinkel von  $45^\circ$  wird sie null, bei  $90^\circ$  nimmt sie denselben Wert im negativen an, da dann der vorher senkrecht zur Erdbewegung stehende Arm parallel dazu steht.

Da die Zeitdifferenz jedoch sehr klein ist, konnte Michelson nicht einfach mit einer Stoppuhr arbeiten, da die Technik noch nicht so weit fortgeschritten war. Stattdessen beobachtete er den durch das Fernrohr gebündelten Lichtstrahl. Durch den Laufzeitunterschied kommt das Licht nämlich nicht in Phase im Fernrohr an, sondern die Schwingungszustände der beiden Lichtwellen sind verschoben. Dadurch interferieren die beiden Wellen destruktiv (sie überlagern sich, wobei ein positiver Schwingungszustand der einen Welle auf einen negativen der anderen trifft, sodass das Resultat Null ist und die Wellen sich gegenseitig auslöschen). Nun muss es auch eine Interferometerstellung geben, in der beide Strecken im  $45^\circ$ -Winkel zur Erdbewegung stehen, sodass die Zeitdifferenz null ist, die Wellen in Phase ankommen und konstruktiv interferieren (sie überlagern sich, wobei ein positiver Schwingungszustand der einen Welle auf einen ebenfalls positiven der anderen trifft, sodass die Wellen sich gegenseitig verstärken). Diese Interferenz macht sich durch ein Heller- oder Dunklerwerden des gebündelten Lichtstrahls bemerkbar.

Ende des 19. Jahrhunderts bauten Michelson und Morley den Versuch in einem Keller in Chicago auf. Durch Erschütterungen hätte das Ergebnis des Experimentes verfälscht werden können. Deshalb wurde sogar der gesamte Strassenverkehr in Chicago gestoppt. Dann der spannende Moment der Wahrheit: Michelson drehte das Interferometer und beobachtete den Lichtstrahl im Fernrohr.

Nichts passierte.

Damit war die gesamte Physik erschüttert. Dieses Experiment, das als „*Michelson-Morley-Versuch*“ in die Geschichte einging, hatte durch seinen negativen Ausgang bewiesen, dass das Licht parallel zur Erdbewegung genauso schnell ist wie senkrecht dazu. Damit war auch die Existenz eines Äthers und eines absoluten Raumes, in dem alles durch die Newtonschen Gesetze so schön geordnet und definiert war, widerlegt, da sich die gesamte Theorie darauf stützte.

Es zeigt, dass das Licht unabhängig vom Standpunkt und dessen Bewegung immer die Geschwindigkeit  $c = 299.792,458 \frac{km}{s}$  besitzt. Dieses Gesetz heißt „*Konstanz der Lichtgeschwindigkeit*“ und wurde durch spätere Versuche bestätigt.

[vgl. Sexl78, S.8ff. und BLex92NwT, Band I, S.199]

### **3 Konsequenzen der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit**

Anfang des 20. Jahrhunderts beschäftigte sich der deutsche Physiker *Albert Einstein* mit den Ergebnissen des Michelson-Morley-Versuchs und entdeckte Konsequenzen der

Konstanz der Lichtgeschwindigkeit, die für die heutige Physik von enorm großer Bedeutung sind. Er fasste seine Ergebnisse in der 1905 veröffentlichten *speziellen Relativitätstheorie* zusammen.

### 3.1 Die Zeitdilatation

Die *Zeitdilatation*, also die Verlangsamung der Zeitabläufe bewegter Körper ist eine Konsequenz, die sich leicht anschaulich herleiten lässt, sie soll daher als Beispiel gelten:

#### 3.1.1 Theorie

Angenommen, eine Lichtquelle sendet einen kurzen Lichtimpuls aus, der über einen Spiegel reflektiert wird. Neben der Lichtquelle sei ein Detektor, der den reflektierten Lichtimpuls registriert. Er löst dann einen neuen Lichtimpuls aus und erhöht den Stand eines Zählwerkes um eins. Dieses Gerät ist in der relativistischen Physik als

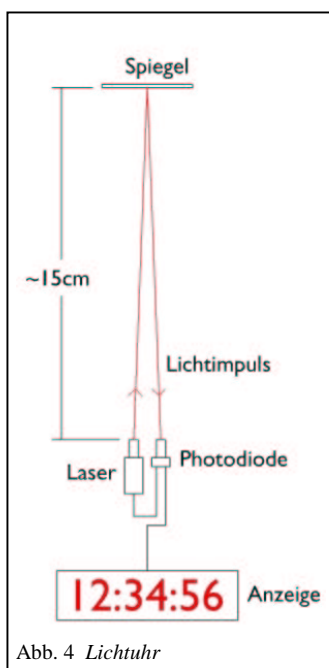


Abb. 4 Lichtuhr

Einsteinsche Lichtuhr bekannt geworden. Einstein selbst konnte zur Aufstellung seiner speziellen Relativitätstheorie im Jahre 1905 keine solche Uhr bauen, da die technischen Möglichkeiten zu beschränkt waren.

Heute stellt dies jedoch kein Problem mehr dar (Abb. 4). Ein Laser erzeugt den Lichtimpuls, der mit Hilfe einer Photodiode detektiert wird. Das Zählwerk wandelt die Anzahl der registrierten Lichtimpulse automatisch in eine Zeitanzeige um. Eine Idealisierung ist dennoch vorzunehmen: Das Signal vom Detektor zum Laser, das den nächsten Lichtimpuls initiiert, darf beim Durchlaufen des Kabels keine Zeit benötigen. Auch müssten Sender und Detektor genau in einem Punkt sein, sodass das Licht

senkrecht auf den Spiegel fällt. Ist dies alles der Fall und hat man den Spiegel vom Sender/Detektor in einem Abstand von genau  $l = 14,9896229\text{cm}$  installiert, so benötigt das Licht vom Aussenden bis zur Detektion eine Zeit von

$$t = \frac{2 \cdot l}{c} = \frac{0,299792458\text{m}}{299.792.458 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 1\text{ns}.$$

Sobald der Detektor einen Lichtimpuls registriert, ist also  $1\text{ns}$  vergangen.

Betrachten wir nun dieselbe Lichtuhr, jedoch während sie sich mit hoher Geschwindigkeit  $v = 150.000 \frac{\text{km}}{\text{s}}$  bewegt. Abbildung 5 zeigt eine Serie von Momentaufnahmen einer solchen Uhr. Nehmen wir an, die Uhr sei im Moment A auf

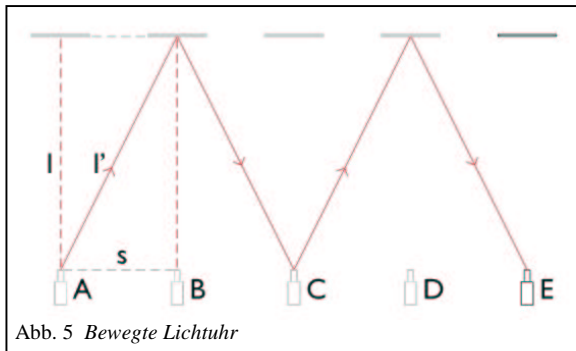


Abb. 5 Bewegte Lichtuhr

Null gestellt worden. Der gesendete Lichtimpuls erreicht den Detektor im Moment C. Nun zeigt die Uhr  $1ns$  an. Im Moment E kommt ein zweiter Lichtimpuls zurück, die Uhr zeigt  $2ns$  an. In dieser Zeit hat das Licht viermal die Strecke  $l'$  zurückgelegt. Aus Zeit

und Weg kann man nun also die Geschwindigkeit des Lichtes in dieser Uhr berechnen:

$$v_{\text{Licht}} = \frac{l'}{t} = \frac{\sqrt{l^2 + s^2}}{t} = \frac{\sqrt{l^2 + (v \cdot t)^2}}{t} = \frac{\sqrt{(15\text{cm})^2 + (150.000 \frac{\text{km}}{\text{s}} \cdot 0,5\text{ns})^2}}{0,5\text{ns}} = 335.000 \frac{\text{km}}{\text{s}}$$

In einer bewegten Lichtuhr soll sich das Licht also etwa 11% schneller fortpflanzen als in einer unbewegten Uhr. Dies steht in einem klaren Widerspruch zu dem bewiesenen Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit.

Damit  $v_{\text{Licht}}$  wieder gleich  $c$  wird, müsste also entweder  $l'$  kleiner sein als berechnet oder  $t$  größer sein als angezeigt wird. Die Berechnung der Länge ist jedoch fehlerfrei, wie man anhand der Abbildung leicht einsehen kann. Demnach müsste die Zeit nicht die sein, die von der Uhr angezeigt wird. Eigentlich auch eine komische Vorstellung, doch wird sich diese als der richtige Ansatz erweisen.

Wir erweitern das Experiment aus Abbildung 5 um drei nicht bewegte Uhren (Abb. 6).

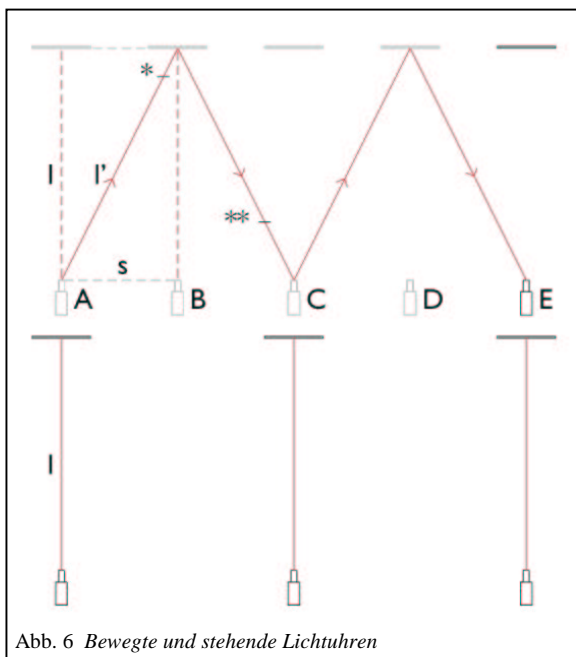


Abb. 6 Bewegte und stehende Lichtuhren

Im Moment A, wenn die bewegte Lichtuhr an der linken unbewegten vorbeikommt, werden alle vier Uhren gleichzeitig auf Null gestellt (synchronisiert), indem die linke Uhr ein Lichtsignal in Richtung der anderen beiden Uhren aussendet. Wenn die mittlere Uhr dieses Signal empfängt stellt sie sich nicht auf Null, sondern auf die Laufzeit, die das Licht für den Abstand der linken und mittleren Uhr benötigt hat. Analoges gilt für die rechte Uhr. Streng genommen sind die Uhren

also nicht zum selben Zeitpunkt auf Null gestellt worden, da aber die bewegte Uhr nur halb so schnell wie das Synchronisationssignal ist, wird sie die mittlere und rechte Uhr

so vorfinden, als wäre es gleichzeitig geschehen. Idealisiert gedacht senden nun also alle vier Uhren gleichzeitig einen Lichtimpuls in Richtung ihres Spiegels. Wenn die Lichtimpulse der drei stehenden Uhren den Spiegel erreichen, ist der Impuls der bewegten Uhr kurz vor dem Spiegel (\*), weil er einen längeren Weg bei gleicher Geschwindigkeit zurücklegen muss.

Die bewegte Uhr kommt nun genau in dem Augenblick bei der mittleren Uhr vorbei, wenn sie grade von *0ns* auf *1ns* umspringt. Die mittlere stehende Uhr zeigt aber längst *1ns* an und hat auch schon ihren zweiten Lichtimpuls gesendet. Als sie umsprang, befand sich der Lichtimpuls der bewegten Uhr erst kurz vor dem Detektor (\*\*). Erweitern wir das Experiment um sehr viele ruhende Uhren und beobachten die Uhren über einen längeren Zeitraum, so ergibt sich eine immer größere Abweichung der bewegten Uhr von den ruhenden Uhren. Zweifelsohne geht die bewegte Uhr langsamer als die nicht bewegten. Es läßt sich auch ohne weiteres eine Formel dafür aufstellen, wozu allerdings noch ein kleines Gedankenexperiment notwendig ist:

Angenommen wir befinden uns mit der bewegten Uhr in einem Raumschiff, das durch den Weltraum an den ruhenden Uhren vorüberfliegt. Wir verdunkeln nun alle Fenster, sodass wir nicht nach draußen sehen können. Jetzt können wir nicht mehr feststellen, ob sich das Raumschiff bewegt, denn um das sagen zu können, brauchen wir einen Bezugspunkt, z.B. die Erde. Weil wir also keine Hinweise auf eine Bewegung unseres Raumschiffes finden können, sagen wir, es sei in Ruhe. Da aber unsere mitgenommene Uhr fest im Raumschiff eingebaut ist, können wir sagen, dass auch sie in Ruhe ist. Nun muss der Lichtimpuls der Uhr genau die Länge  $l$  zurücklegen, damit die Uhr *1ns* anzeigt und es gilt  $v_{Licht} = c$ . Somit wäre also innerhalb des Raumschiffes „die Welt in Ordnung“.

Nun haben wir aber auf der Erde eine Reihe von guten Bekannten, die mit Recht behaupten, sie stehen an den ruhenden Uhren und das Raumschiff bewegt sich an ihnen vorbei. Da unsere Uhr allerdings noch immer fest im Raumschiff eingebaut ist, werden die Beobachter behaupten, auch die Uhr bewege sich.

Selbstverständlich werden wir die Beobachter der Lüge bezichtigen, bis sich ein nicht-geostationärer Satellit einmischt und behauptet, er befände sich in Ruhe, aber sowohl das Raumschiff mit seiner Uhr als auch die Beobachter auf der Erde mit ihren Uhren seien in Bewegung.

Wir können dieses Spielchen nun unendlich weiter spielen, denn wir werden immer wieder einen Beobachter finden, für den sich alle bisherigen Beobachter bewegen. Dieses Prinzip nennt man *Relativitätsprinzip* und gibt jedem Beobachter das Recht zu

behaupten, er befände sich in Ruhe und alle anderen bewegten sich relativ zu ihm. Damit fällt auch die Vorstellung eines absoluten Bezugssystems (absoluter Raum), also eines Systems, das, egal von welchem Beobachter aus betrachtet, immer in Ruhe ist. Dies ist ja auch schon im Michelson-Morley-Versuch experimentell bestätigt worden.

Eine zweite Folgerung daraus ist, dass es keine absolute Zeit gibt. Da wir immer wieder einen Beobachter finden, für den sich eine ruhende Uhr bewegt, können wir von keiner Uhr sagen, sie gehe von jedem Beobachtungspunkt aus gleich schnell. Die absolute Zeit erfordert aber genau so eine Uhr.

Da es die absolute Zeit nicht gibt, haben wir es in unserem Experiment mit zwei verschiedenen, aber gleichberechtigten Zeitsystemen zu tun.

Wie bereits erklärt, legt das Licht für uns im Raumschiff in der Zeit  $t_B$  die Strecke  $l$  zurück. Für die Beobachter auf der Erde legt das Licht in der längeren Zeit  $t_R$  die längere Strecke  $l'$  zurück.

Die Zeit der ruhenden Uhren bezeichnen wir also mit  $t_R$ , die der bewegten mit  $t_B$ . Die Strecken  $l$ ,  $l'$  und  $s$  (vgl. Abb. 6) können nun folgendermaßen berechnet werden:

$l = c \cdot t_B$	$l' = c \cdot t_R$	$s = v \cdot t_R$
Die vom Raumschiff aus betrachtete Strecke in der im Raumschiff gemessenen Zeit.	Die von der Erde beobachteten Strecken in der von der Erde gemessenen Zeit.	

Wichtig bei der Aufstellung der Formeln ist, dass sowohl beobachtete Länge und gemessene Zeit immer aus demselben Bezugssystem stammen.

Mit Hilfe des Satzes des Pythagoras kann man nun die Zeit der bewegten Uhr aus der Zeit der ruhenden Uhren berechnen:

$$\begin{aligned}
 l^2 + s^2 &= l'^2 \\
 c^2 \cdot t_B^2 + v^2 \cdot t_R^2 &= c^2 \cdot t_R^2 \\
 c^2 \cdot t_B^2 &= c^2 \cdot t_R^2 - v^2 \cdot t_R^2 \\
 t_B^2 &= t_R^2 \cdot (c^2 - v^2) \cdot \frac{1}{c^2} \\
 t_B^2 &= t_R^2 \cdot \left( \frac{c^2}{c^2} - \frac{v^2}{c^2} \right) \\
 t_B &= t_R \cdot \sqrt{1 - v^2/c^2}
 \end{aligned}$$

Mit dieser Theorie hat Einstein die Vorstellung über die Zeit (und auch die des Raumes) grundlegend geändert. Früher war man davon ausgegangen, alle Ereignisse in ein Koordinatensystem eintragen zu können (den absoluten Raum), das dann das Geschehen des gesamten Universums beschreibt. Die Relativitätstheorie zeigt jedoch, dass es unendlich viele derartiger Koordinatensysteme gibt, die auch alle das Geschehen

des gesamten Universums beschreiben, aber aus unterschiedlicher Sichtweise. Jedes System lässt sich jedoch in ein anderes umrechnen.

[vgl. Sexl78, S.31ff.]

### 3.1.2 Experimentelle Nachweise

Im Jahre 1959, also 54 Jahre nach Aufstellung der speziellen Relativitätstheorie, begann man im *Europäischen Kernforschungszentrum CERN* (Genf) ein Experiment mit Myonen vorzubereiten. Myonen sind den Elektronen ähnliche Elementarteilchen, die jedoch instabil sind und nach den Gesetzen des radioaktiven Zerfalls innerhalb einer Halbwertszeit von  $\tau = 1,52\mu s$  in andere Elementarteilchen (ein Elektron und zwei Neutrinos) zerfallen.

Man kann nun eine bestimmte Anzahl von Myonen in einen „Behälter“ füllen und einen Geigerzähler daran halten. In der Halbwertszeit werden dann (statistisch gesehen) die Hälfte dieser Myonen in die drei Elementarteilchen zerfallen, von denen das Elektron eine elektrische Entladung im Geigerrohr auslöst. Nach der Halbwertszeit kann man die Messung von vorn beginnen und wird selbstverständlich nur noch die Hälfte der in der ersten Messung ausgelösten Entladungen messen (aufgrund der kurzen Halbwertszeit gestaltet sich die reale Umsetzung der Messung allerdings etwas schwieriger).

Im CERN beschleunigte man die negativ geladenen Myonen mit Hilfe eines starken Magnetfeldes auf einer 14 Meter durchmessenden Kreisbahn auf die Geschwindigkeit  $v = 0,99942 \cdot c$ . Anschließend hatte man die Zeit gemessen, in der die Hälfte der Myonen zerfallen sind. Diese ist mit  $44,6\mu s$  29,4 mal größer als die Halbwertszeit ruhender Myonen ( $1,52\mu s$ ). Dies ist ein eindeutiger Beweis für die Richtigkeit der Zeitdilatation.

Wenn aus der Sichtweise der Myonen die Zeit  $\tau_B = 1,52\mu s$  vergangen ist, ist die Hälfte der Teilchen zerfallen. Da sich die Myonen aber bewegen, geht ihre „Uhr“ langsamer, sie befinden sich in einem anderen Bezugs- und damit auch Zeitsystem, sodass man von ihrem in unser „ruhendes“ Zeitsystem umrechnen muss:

$$\tau_R = \frac{\tau_B}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{1,52\mu s}{\sqrt{1 - (0,99942 \cdot c)^2/c^2}} = \frac{1,52\mu s}{0,03405383385171} = 44,6\mu s$$

Daher misst man nach  $44,6\mu s$  noch die Hälfte bewegter Myonen, während von 134 Millionen ruhenden Myonen nur noch eines übrig wäre.

Ein ähnliches Experiment führten B. Rossi und D. Hall bereits 1941 durch. In höheren Luftschichten entstehen Myonen durch Wechselwirkungen zwischen den dort

vorhandenen Elementarteilchen und kosmischer Strahlung. Die Myonen dürften wegen ihrer kurzen Lebensdauer (fast) nie auf der Erdoberfläche ankommen. Dennoch konnten die beiden Physiker erstaunlich viele Myonen in ihren Messstationen registrieren. Dieses Phänomen ist ebenfalls nur dadurch zu erklären, dass sich die Lebenszeit der Myonen aufgrund der Zeitdilatation stark verlängert.

[vgl. Sex178, S.43ff.]

### 3.2 Weitere Konsequenzen

Die Zeitdilatation ist bei weitem nicht die einzige Konsequenz, die Einstein in der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit sah. Aus Platzgründen möchte ich sie hier aber nur aufzählen und nicht ausführlich herleiten:

*Relativität der Gleichzeitigkeit:* Zwei Ereignisse, die für einen ruhenden Beobachter gleichzeitig stattfinden, können für einen bewegten Beobachter zeitversetzt passiert sein. [vgl. BLex92NwT, Band I, S.199f.]

*Längenkontraktion:* Wegen der Relativität der Gleichzeitigkeit erscheint einem ruhenden Beobachter ein Objekt in seiner Bewegungsrichtung gestaucht. Ein Stab mit der Länge  $l_R$  scheint in Bewegung die kürzere Länge  $l_B = l_R \cdot \sqrt{1 - v^2/c^2}$  zu haben. [vgl. BLex92NwT, Band I, S.200]

*Äquivalenz von Masse und Energie:* Beschleunigt man einen Körper mit einer konstanten Kraft, so sollte seine Beschleunigung ebenfalls konstant sein. Bei hohen Geschwindigkeiten verlangsamt sich jedoch für den ruhenden Beobachter der Zeitablauf des beschleunigten Körpers, sodass er weniger schnell beschleunigt erscheint. Da die Kraft auf den Körper jedoch konstant ist, wird der ruhende Beobachter schließen, dass sich die Masse des Körpers erhöht (es gilt schließlich  $a = F/m$ ). Tatsächlich erscheint

eine Masse  $m_R$  in Bewegung als die Masse  $m_B = \frac{m_R}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$ . Durch Vergleichen der

Massenzunahme  $\Delta m = m_B - m_R$  mit der kinetischen Energie  $W_{kin}$  ergibt sich die Beziehung  $\Delta m = W_{kin}/c^2$ . Einstein vermutete, dass diese Beziehung nicht nur für kinetische Energie gelte und stellte seine berühmte Formel auf:  $W = m \cdot c^2$ . Diese Vermutung wurde durch die Atombombe bestätigt, denn diese gewinnt ihre enorme Zerstörungskraft aus der Energie, die bei einer Kernspaltung frei wird. Die Masse aller Bruchstücke ist um  $W/c^2$  geringer als die des Ausgangskerns und des Spaltneutrons. [vgl. BLex92NwT, Band I, S.201f.]

*Die Lichtgeschwindigkeit als Grenzgeschwindigkeit:* Hat ein Körper die Lichtgeschwindigkeit erreicht, so ist seine Masse unendlich groß und er kann nicht weiter beschleunigt werden. Einstein postulierte, dass kein Signal schneller als das Licht sein kann. Daraus folgt (was auch experimentell bestätigt worden ist), dass sich z.B. die elektrische Spannung oder der Impuls nur mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten können.

#### 4 Albert Einstein und Isaac Newton

Albert Einstein und Isaac Newton – auf den ersten Blick zwei Gegner im Kampf um die Wahrheit. Newton hatte seiner Zeit ein komplettes System von Gleichungen aufgestellt, mit deren Hilfe man die gesamte Mechanik erklären konnte. Daher zweifelten viele Wissenschaftler an der Richtigkeit der Einsteinschen Theorie, da sie auf den ersten Blick zur Newtonschen im Widerspruch stand.

So gilt nach dem Newtonschen Grundgesetz der Mechanik, dass die Beschleunigung, die ein Körper durch Krafteinwirkung erfährt, sich durch  $a = F/m$  berechnen lässt.

Einstein postulierte jedoch die Äquivalenz von Energie und Masse, wodurch sich die Masse erhöht, wenn dem Körper kinetische Energie hinzugefügt wird. Daraus folgt, dass die Beschleunigung, die ein Körper durch Krafteinwirkung erfährt, auch von seiner

Geschwindigkeit abhängt:  $a = \frac{F \cdot \sqrt{1 - v^2/c^2}}{m_R}$  ( $m_R$ : Ruhemasse des Körpers)

Dies ist jedoch in der Newtonschen Gleichung nicht der Fall und führt zu folgendem Widerspruch: Angenommen, auf einen mit  $v = 200.000 \frac{km}{s}$  bewegten Körper mit der Masse  $m = 1kg$  wirke die Kraft  $F = 1N$ . Nach der Newtonschen Gleichung beträgt seine Beschleunigung  $a_N = 1N/1kg = 1 \frac{m}{s^2}$ . Nach der Einsteinschen Gleichung gilt jedoch  $a_E = 1N \cdot 0,745/1kg = 0,745 \frac{m}{s^2}$ .

Da die Newtonsche Mechanik als zweifellos bewiesen galt, war man geneigt, die Einsteinsche Relativitätstheorie schlichtweg als Unsinn abzutun.

Ein genaueres Betrachten der Gleichungen ergibt jedoch einen interessanten Zusammenhang zwischen der Newtonschen und der Einsteinschen Gleichung. Setzt man nämlich in die Einsteinsche Gleichung kleinere Geschwindigkeiten ein, so erhält man beispielsweise für  $v = 50.000 \frac{km}{s}$  die Beschleunigung  $a_E = 0,986 \frac{m}{s^2}$ . Die Beschleunigung nähert sich für kleinere Geschwindigkeiten immer mehr der Beschleunigung nach der Newtonschen Gleichung an. Für Geschwindigkeiten, mit denen man im Alltag zu tun hat, ist der Unterschied zwischen Newtonscher und

Einsteinscher Gleichung verschwindend gering: Für  $v = 50 \frac{km}{h} = 0,014 \frac{km}{s}$  ist  $a_E = 0,9999999999999989 \frac{m}{s^2}$ , der Unterschied macht sich also erst in der 15. Stelle hinter dem Komma bemerkbar.

Die Newtonsche Mechanik kann also als Grenzfall der relativistischen Mechanik angesehen werden. Das heißt: Für geringe Geschwindigkeiten ist die Newtonsche Mechanik korrekt, die relativistische ist lediglich unnötig exakter; für hohe Geschwindigkeiten liefert die Newtonsche Mechanik falsche Ergebnisse, hier gelten nur

die Gleichungen der relativistischen Mechanik:  $\lim_{v \rightarrow 0} \frac{F \cdot \sqrt{1 - v^2/c^2}}{m} = \frac{F}{m}$

Einstein selbst schrieb 1916: „Es ist das schönste Los einer physikalischen Theorie, wenn sie selbst zur Aufstellung einer umfassenden Theorie den Weg weist, in welcher sie als Grenzfall weiterlebt.“ [Ein16, S.47]

## 5 Zusammenfassung

Noch vor gut 100 Jahren war man der festen Überzeugung, den Bereich „Mechanik“ vollständig zu kennen. Die Erde war Teil eines riesigen Aquariums, dem absoluten Raum, und das einzige, was noch als nachzuweisen galt, war die Flüssigkeit des Aquariums, der Äther. In dieser Flüssigkeit pflanzte sich das Licht mit einer bestimmten Geschwindigkeit  $c$  fort. Albert Michelson konnte in einem überzeugenden Experiment nachweisen, dass es genau diesen Äther und den absoluten Raum nicht gab. Er zeigte, dass von jedem Beobachtungsstandpunkt aus das Licht immer dieselbe Geschwindigkeit besitze. Dadurch ergaben sich Konsequenzen für die Vorstellung von Raum und Zeit, wie z.B. das Langsamergehen bewegter Uhren, die höhere Masse bewegter Körper oder die Tatsache, dass es keine für jeden Punkt des Universums gültige Zeit gibt. Diese Konsequenzen wurden von Albert Einstein in der Relativitätstheorie zusammengefasst. Bald wird die Mechanik (zumindest auf dem Gebiet der Festkörper) wieder als abgeschlossen gelten. Vielleicht wird dann wieder ein spektakuläres Experiment unsere Weltanschauung ins Wanken bringen, wie z.B. das Nimtz-Experiment, das 1992 von Prof. Günter Nimtz, Universität Köln, ausgeführt wurde und großes Aufsehen erregt hat. Er behauptete, Signale mit 4,7facher Lichtgeschwindigkeit übertragen zu haben. Nach Einsteins Theorie eigentlich unmöglich und, wie sich später auch herausstellte, im Kernpunkt ein Interpretationsfehler. Dennoch ist das Experiment bis heute – wie damals die Relativitätstheorie – heftig umstritten und wer weiß, vielleicht wird [nach Ein16] die Relativitätstheorie das Los erhalten, zur Aufstellung einer umfassenden Theorie den Weg zu weisen, in welcher sie als Grenzfall weiterlebt.

# Literaturverzeichnis

BLex92

Bertelsmann Lexikothek 1992: Bertelsmann Lexikon  
ersch. 1992 im Bertelsmann Lexikothek Verlag GmbH, Gütersloh

BLex92NwT

Bertelsmann Lexikothek 1992: Naturwissenschaften und Technik  
ersch. 1992 im Bertelsmann Lexikothek Verlag GmbH, Gütersloh

DB86

Prof. Friedrich Dorn und Prof. Dr. Franz Bader: Physik Oberstufe Gesamtband 12/13  
ersch. 1986 im Schroedel Schulbuchverlag, Hannover

Ein16

Albert Einstein: Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie (gemeinverständlich)  
verfasst 1916; ersch. 1972 im Friedr. Vieweg + Sohn Verlag, Braunschweig; 22. Auflage  
Universitätsbibliothek: (CvO) phy 491 RL 1579,22

SDP74

Schüler-Duden Physik  
hrsg. 1974 vom Bibliographischen Institut, Mannheim

Sex178

Roman U. Sexl und Herbert Kurt Schmidt: Raum – Zeit – Relativität  
ersch. 1978 im Rowohlt Taschenbuch Verlag, Reinbek bei Hamburg  
Universitätsbibliothek: (CvO) phy 490 AL 2287

Anmerkung zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit durch Ole Römer:

Zu diesem Thema finden sich viele Quellen, die sich allerdings meist – teilweise sogar in sich selbst – widersprechen:  
„[...] Römer beobachtete, dass die Verfinsterung des Planeten Jupiter als Folge seines Eintritts in den Schatten der Erde nicht zu genau jenen Zeiten erfolgte, die errechnet worden waren. Sie traten früher ein, wenn der Jupiter der Erde nahe, und später, wenn er der Erde fern war. [...] Der Zeitunterschied betrug etwa 22 Minuten. Der Unterschied der Wege, die das Licht in beiden Fällen zurücklegen musste, entsprach dem Durchmesser der Erdbahn um die Sonne. Da dieser bekannt war, konnte Römer die Lichtgeschwindigkeit berechnen. Er erhielt 307200 Kilometer in der Sekunde. [...]“ [BLex92NwT, Band I, S.46].  
Durchmesser der Erdbahn: 299.200.000 km [Alexander Weltatlas, ersch. 1982 im Ernst Klett Schulbuchverlag, Stuttgart]  
 $299.200.000 \text{ km} / 22 \text{ min} = 226.666,667 \text{ km/s}$   
Durchmesser der Erdbahn nach [BLex92NwT]: 405.504.000 km

Eine Veränderung des Abstandes zweier Verfinsterungen des Jupiters durch die Erde, was höchstens einmal im Jahr geschehen kann, würde aufgrund der langsamen Umlaufgeschwindigkeit des Jupiters und der daraus resultierenden langsamen Entfernungs- bzw. Annäherungsgeschwindigkeit zur Erde Jahrzehnte (oder Jahrhunderte) dauern. Zudem entspricht der Unterschied zwischen minimalem und maximalem Abstand von Jupiter und der Erde, wenn sie mit der Sonne auf einer Linie liegen und die Sonne nicht zwischen ihnen ist (nur so kann die Erde Jupiter verfinstern), nicht genau dem Erdbahndurchmesser.

„Römer, Ole [...] bestimmte 1975 die Lichtgeschwindigkeit aus den Verfinsterungszeiten der Jupitermonde. [...]“ [BLex92, Band 12, S.263].

„Römer beobachtete über eine Reihe von Jahren hinweg die Verfinsterung eines der Jupitermonde, [...]“ [SDP74, S.243].

„[...] Die Lichtgeschwindigkeit ergibt sich dann aus der Beziehung:  $\text{Geschwindigkeit} = \text{Weg}/\text{Zeit}$  zu  $c = 299\,000 \text{ km/s}$ . [...]“ [SDP74, S.244].

Im Internet finden sich viele Webseiten zu diesem Thema (die ich nicht alle im Literaturverzeichnis aufgeführt habe). Dort werden auch Geschwindigkeiten von 225.000 km/s als die von Römer gemessene veröffentlicht.

Da in [BLex92NwT] die oben genannten logischen Fehler auftreten, habe ich im Text zu Ole Römer in dieser Facharbeit aus [BLex92, Band 12, S.263 und SDP74, S.243f.] und aus meiner Erinnerung an den Physikunterricht „gemittelt“ und widersprüchliche Berechnungen ausgelassen. So sollte das für die Facharbeit relevante Geschehen möglichst realitätsnah, übersichtlich und dabei allgemeinverständlich wiedergegeben werden.

## Schlusswort:

Ich habe die vorliegende Facharbeit selbstständig angefertigt, keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt und wörtliche und sinngemäße Übernahmen aus anderen Quellen als solche kenntlich gemacht. Verwendete Informationen aus dem Internet sind der Lehrkraft mit Angabe der Internet-Adresse zur Verfügung gestellt worden.

Ich bin damit einverstanden, dass meine Arbeit für den Fall, dass sie mit mindestens 10 Punkten bewertet wird, der Schulöffentlichkeit zugänglich gemacht wird.