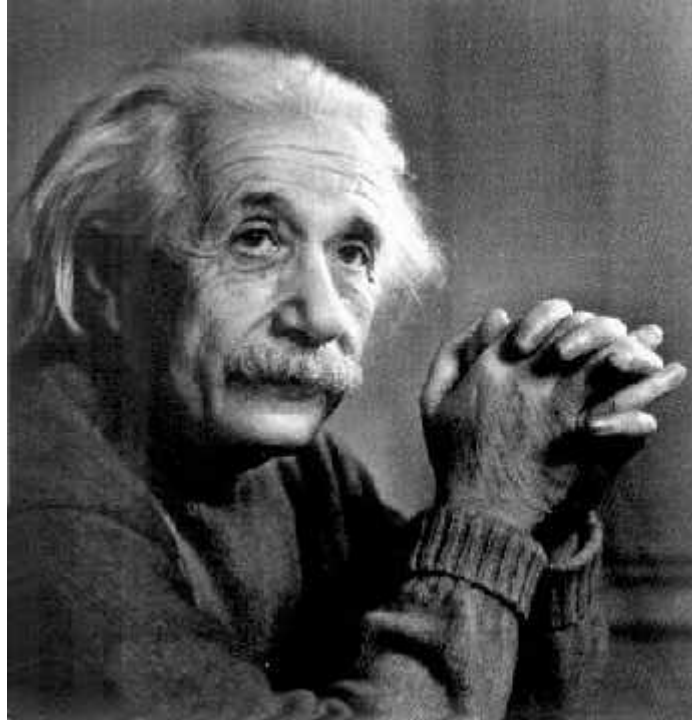


„Jeder intelligente Mensch kann, auch wenn er kein Fachmann ist, tief in die Probleme der modernen Physik eindringen.“

Albert Einstein



# Relativitätstheorie für Jedermann

Eine Einführung mit 98 handgezeichneten  
Abbildungen und wenig Mathematik

Detlef Amende

Dieses Manuskript wurde im Rahmen des Wissenschaftlichen Studenten-Wettstreites an der Pädagogischen Hochschule Erfurt im März 1982 erstellt und im Herbst 2000 inhaltlich, textlich und grafisch überarbeitet. Auf der Basis des Wissensniveaus der Realschule wird mit möglichst wenig Formalismus eine Einführung in die Spezielle und Allgemeine Relativitätstheorie Albert Einsteins gegeben.

Detlef Amende

Inhalt	Seite
<b>1. <u>Einführung</u></b>	<b>5</b>
<b>2. <u>Vorbetrachtung. Ein wichtiges, möglicherweise das schwierigste Kapitel, in dem der Leser etwas über die Mechanik Newtons erfährt.</u></b>	<b>6</b>
2.1. Einführung des Massebegriffes	6
2.2. Masse und Stoffmenge	10
2.3. Masse und Gewicht	11
2.4. Masse und Schwerfeld	15
2.5. Einführung des Begriffes „Energie“	17
2.6. An der Grenze der Newton'schen Mechanik	18
2.7. Ein Ausflug in die Elektromagnetik	21
2.8. Was man über das Licht wissen sollte	24
<b>3. <u>Wie die neue Theorie entstand. Ein Kapitel von den Ansichten über Raum, Zeit, Energie und Masse</u></b>	<b>27</b>
3.1. Philosophisches	28
3.2. Bezugssysteme und Addition von Geschwindigkeiten	30
3.3. Das klassische Relativitätsprinzip	34
3.4. Der klassische Zeitbegriff	35
3.5. Klassische Vorstellung über den Raum	36
3.6. Ein entscheidendes Experiment und seinen Folgen	38
3.7. Das relativistische Additionstheorem der Geschwindigkeiten und das spezielle Relativitätsprinzip	42
3.8. Der relative Charakter des Raumes	46
3.9. Wichtiges über die Gleichzeitigkeit	51
3.10. Die Impulsmasse	57
3.11. Die Masse-Energie-Beziehung	60
3.12. Zusammenfassung	62
<b>4. <u>Das zweite Stockwerk im Gebäude der Relativitätstheorie. Ein Kapitel, aus dem Erstaunliches über Schwerfeld und Kosmos zu erfahren ist.</u></b>	<b>66</b>
4.1. Klassisches über das Schwerfeld	66
4.2. Trägheit, Schwere und ein fundamentales Prinzip	72
4.3. Spezielles Relativitätsprinzip, beschleunigte Bezugssysteme und der endgültige Untergang des absoluten Raumes	81
4.4. Längenveränderung und Zeitdehnung im Schwerfeld	89
4.5. Wenn sich Parallelen schneiden...	95
4.6. Die ganze krumme Tour des Lichtes	105
4.7. Einsteins Universum	110

<b>5.</b>	<b><u>Beweise</u></b>	<b>116</b>
5.1.	Konstanz der Lichtgeschwindigkeit	117
5.2.	Längenveränderung	118
5.3.	Zeitdehnung	118
5.4.	Relativistische Massenzunahme	119
5.5.	Masse-Energie-Beziehung	120
5.6.	Äquivalenzprinzip	120
5.7.	Lichtablenkung im Schwerefeld	121
5.8.	Rotverschiebung im Schwerefeld	123
5.9.	Längenveränderung und Zeitdehnung im Schwerefeld	124
5.10.	Perihel-Drehung des Merkur	127
5.11.	Lichtgeschwindigkeit im Gravitationsfeld	128
5.12.	Gravitationswellen	128
<b>6.</b>	<b><u>Anhang</u></b>	<b>129</b>

## 1. Einführung

Wir alle lesen gern Bücher über Reisen durch weite, unerforschte Länder. Wer möchte nicht selbst einmal eine solche Reise durch ein unbekanntes Land unternehmen?

Viel spannender natürlich wäre eine Reise quer durch das Weltall. Ferne Welten entdecken, neueste Erkenntnisse sammeln, mit einem Spaceshuttle einmal bis zum nächsten Sonnensystem fliegen...

Ob ein Raumschiff uns wohl soweit tragen könnte? Ist im Weltall überhaupt alles genauso wie auf der Erde? Aber leider werden wir uns sicher noch lange damit begnügen müssen, einen Flug durch das Weltall nur in Gedanken unternehmen zu können oder vielleicht ein utopisches Buch zu lesen. Denn allein mit unseren Gedanken werden wir sicher nie herausfinden, wie es im Universum wirklich ist, oder?

In der utopischen Literatur liest man oft davon, dass photonengetriebene Raumschiffe nach jahrzehntelangem Flug zur Erde zurückkehren und sich die Raumfahrer kaum wieder einleben können, weil hier seit dem Start schon Jahrhunderte vergangen sind.

Phantasterei! Sollte es denn so etwas wirklich geben?

Ohne Phantasie jedoch kann man sich gar nicht vorstellen, was in der Natur alles möglich ist. „Was ist denn in der Natur alles möglich?“, wird der Leser fragen. Diese Frage zu beantworten, helfen uns die Wissenschaften. Von ihnen ist die Physik eine der allgemeinsten Disziplinen. Eines der modernsten Teilgebiete der Physik wiederum ist die von Albert Einstein aufgestellte Relativitätstheorie.

Diese Theorie beschreibt viele Naturvorgänge viel genauer und tiefgründiger, als dies vordem möglich war und beantwortet sehr umfassend die Frage, welche Prozesse in der Natur denkbar sind. Die Relativitätstheorie hilft heute und in der Zukunft den Wissenschaftlern, die Welt noch besser zu erkennen.

Können auf der Erde schon Jahrhunderte vergangen sein, wenn die Astronauten selbst bloß um Jahre gealtert sind?

Solche und viele andere Fragen, wie zum Beispiel: „Ist das Weltall unendlich?“, „Was versteht man unter Schwarzen Löchern, den Ungeheuern des Weltalls?“ oder „Wie kann man aus Masse Energie gewinnen?“, kann man nur beantworten, wenn man die Relativitätstheorie kennt.

Es sind darüber gelegentlich Artikel in Zeitschriften zu lesen. Manchmal erfährt der Leser vielleicht etwas ganz Interessantes über dieses Thema, vergisst es aber schnell, weil es schwer ist, alles einzuordnen oder weil in Beiträgen zu viele Fremdwörter und Formeln stören. „Das verstehe ich sowieso nicht!“ oder „Das ist alles viel zu hoch für mich!“, sind oftgehörte skeptische Worte. Die weit verbreitete Annahme, dass die Relativitätstheorie für jeden persönlich sowieso nicht von Bedeutung oder überhaupt nicht zu verstehen sei, ist jedoch ein Irrtum.

Jeder Mensch hat ein Weltbild, das sich auch auf grundlegende Ergebnisse der Wissenschaft stützt. Eine bestimmte Vorstellung von der Welt als Ganzes zu haben, ist ohne Kenntnis wichtiger Forschungsergebnisse kaum denkbar. Dazu aber liefert die Relativitätstheorie eine Fülle ausgezeichneter Möglichkeiten, die zu nutzen wir uns hier vorgenommen haben.

Viele Menschen vermuten gar nicht, wie einfach die Grundlagen der Relativitätstheorie sind und vor allen Dingen – wie interessant.

Vor uns liegt das Gebiet der Relativitätstheorie wie ein unbekannter, geheimnisvoller Kontinent, von dem wir mehr wissen wollen. Aber noch fehlt der Mut und so recht weiß man nicht, wo beginnen. Das Gute daran ist, dass wir weder Landkarte noch Gepäck benötigen, um diese Reise in „das Land der verrückten Ideen“ zu unternehmen. Das Einzige, ohne das der Leser nicht auskommen wird, ist ein wenig Interesse und eine ruhige Stunde, um diese kleine Schrift zu lesen. Sie soll nichts anderes als helfen, sich an eine Sache heran zu wagen, die im allgemeinen als sehr kompliziert eingeschätzt wird. Das Heft wird die ersten Pforten zum Fachgebiet aufstoßen und Anregungen schaffen, sich näher damit zu befassen.

Wir werden uns alles der Reihe nach ansehen und untersuchen, wie einige Probleme früher gelöst und wie sie danach noch einmal und besser behandelt wurden. Anregungen zu schaffen kann nur damit begonnen werden, einen Überblick zu geben und das Wesentliche in einfacher Form zu erläutern. Dabei wurde der Schwerpunkt auf verbale, d.h. wörtliche Herleitung gelegt, um den Leser bei der Beantwortung der Frage: „Wie kommt man darauf?“ zu unterstützen.

Albert Einstein sagte einmal: „Die Physik ist eine Erfahrungswissenschaft.“ Das bedeutet: Wenn über lange Zeiträume hinweg die Erfahrung gemacht worden ist, dass es kein Perpetuum mobile<sup>1</sup> gibt, dann macht der Wissenschaftler die Formel zur Beschreibung der Natur so, dass es laut diesen Formeln dann auch in der Theorie kein Perpetuum mobile geben kann.

Dementsprechend trifft Einsteins Relativitätstheorie ihre Aussagen auf eine ihr eigene Art und Weise, da in unzähligen Experimenten Erfahrungen gesammelt worden sind, die keine anderen Aussagen zulassen.

Wegen all dem ist die Relativitätstheorie auch von ihrem logischem Aufbau her eine schöne und harmonische Theorie, die es lohnt, in ihren Grundzügen verstanden zu haben.

## **2. Vorbetrachtung. Ein wichtiges, möglicherweise das schwierigste Kapitel, in dem der Leser etwas über die Mechanik Newtons erfährt.**

In der modernen Physik zeigt sich immer wieder, dass eine der grundlegendsten und auch interessantesten Größen die Masse ist. Schon der berühmte Physiker Isaac Newton (1643 – 1727) wusste, dass alle Körper die Eigenschaft der Trägheit besitzen. Die Masse als Maß für die Trägheit soll der Ausgangspunkt unserer Vorbetrachtung sein.

### 2.1. Einführung des Massebegriffs

Die Masse ist eine grundlegende Eigenschaft aller Körper. Anders kann man das so ausdrücken: Als physikalisch berechenbare Größen drückt sie eine besondere Eigenschaft aus. Nämlich die, dass jeder Körper träge ist, sich gewissermaßen dagegen sträubt, schneller oder langsamer zu werden. Jedes Objekt

---

<sup>1</sup> Eine Maschine, die ohne Energiezufuhr Arbeit verrichten kann.

ist „bemüht“, im Zustand relativer Ruhe zu verbleiben, d.h. sich bezüglich irgend eines Vergleichskörpers gleichmäßig schnell zu bewegen (bzw. nicht zu bewegen, also zum Vergleichskörper eine Geschwindigkeit von  $v = 0$  bei zu behalten).

Abb.1



Jede **Kraft**, die auf frei bewegliche Körper wirkt, stößt auf einen Widerstand, die **Masse m**.

Das kann kein Zufall sein, sicher ist das immer und überall so, also gesetzmäßig. Isaac Newton formulierte eine Aussage derart, dass sie mit dieser Erfahrung übereinstimmt und benutzte dann diese Aussage als Fundament der von ihm entwickelten, sogenannten „klassischen Physik“.

Es wird für den Leser einmal ganz interessant sein zu erfahren, wie Newton von der Beobachtung zur mathematischen Formel gelangte.

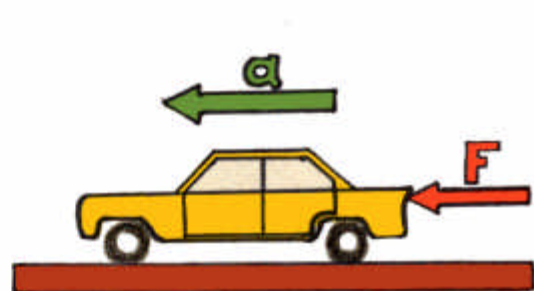
Er untersuchte die Einwirkung von Kräften auf Körper. Aber was ist das, eine „Kraft“? vielerorts wird von „Geisteskraft“ oder „Lebenskraft“ gesprochen. In der Physik versteht man unter dem Kraftbegriff etwas anderes.

Kräfte sind sehr eigentümliche Erscheinungen. Nirgends kann man sie sehen. Das heißt, man weist Kräfte und dass es sie überhaupt gibt, nur an ihren Wirkungen nach. Solche Wirkung kann Verformung sein (bei fest angebrachten Körpern) und kann Beschleunigung sein (bei frei beweglichen Körpern).

Abb.2

a) Kraft bewirkt Verformung

b) Kraft bewirkt Beschleunigung



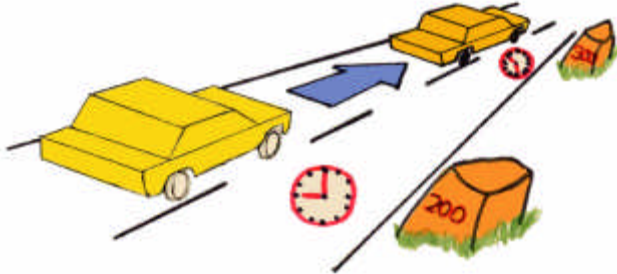
In der Praxis kommt meist beides zugleich vor.

Eine konstante Beschleunigung **a** ist dabei nichts anderes, als eine gleichmäßige Veränderung der Geschwindigkeit **v** im Laufe der Zeit:

$$a = \frac{dv}{dt}$$

Genauso ist übrigens die Geschwindigkeit  $v$  nichts anderes, als die Veränderung des Ortes im Laufe der Zeit, also eine Aussage über den jeweiligen Bewegungszustand.

Abb.3



Das Auto war eben noch bei Kilometerstein 200, jetzt ist es bei Kilometerstein 300. Es hat also während einer bestimmten Zeitspanne seinen Aufenthaltsort verändert. Man sagt dazu: „Das Auto hat sich mit einer bestimmten Geschwindigkeit  $v$  bewegt.“

Befand sich in einem Augenblick ein Körper im Punkt  $R_1$  und befindet er sich nach Ablauf einer gewissen Zeit im Punkt  $R_2$ , dann muss er sich ja wohl während dieser Zeit mit einer bestimmten Geschwindigkeit von  $R_1$  und  $R_2$  bewegt haben. Die Geschwindigkeit ist also eine Aussage über die Lageveränderung während eines bestimmten Zeitabschnittes und man schreibt das allgemein so auf:

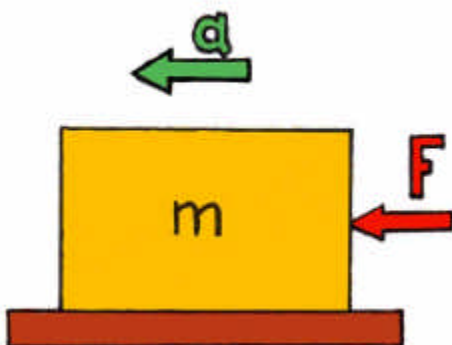
$$v = \frac{d r}{d t}$$

Dabei bedeutet  $d r$  die Lageänderung, also einen Weg  $s$  und  $d t$  drückt einen Zeitabschnitt aus, während dessen sich diese Lageveränderung vollzieht.

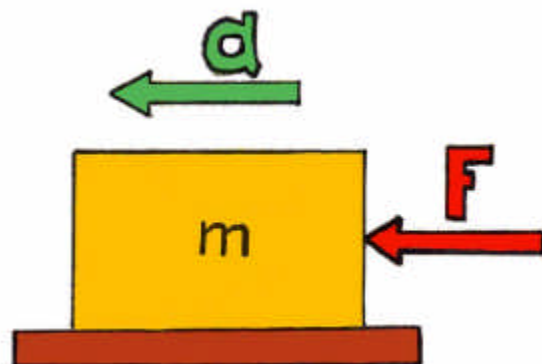
Am Beispiel eines frei beweglichen Körpers soll der Zusammenhang zwischen Kraft und Beschleunigung überlegt werden: Je größer die Kraft, desto größer die Beschleunigung, Geschwindigkeitsänderung:

Abb.4

a)



b)





Die genannte Beziehung heißt „direkte Proportionalität“ und wird geschrieben als:

$$F \sim a$$

<sup>2</sup>

Wenn wir den Zusammenhang zwischen der Kraft **F** und der Beschleunigung **a** an verschiedenen Körpern betrachten, können wir feststellen, dass für jeden einzelnen Körper die zugehörigen Quotienten aus **F** und **a** (**F/a**) konstant sind. „Ist das generell so?“, wird der Leser fragen.

Ja, jedes Mal, wenn sich eine Größe genauso verhält wie eine andere, ist der zugehörige Quotient konstant und heißt „Proportionalitätsfaktor“.

Jede Proportionalität besitzt ihren Proportionalitätsfaktor, der in diesem Fall die Masse ist und mit dem Symbol „**m**“ bedacht wurde.  $F \sim a$  wird dann üblicher Weise als

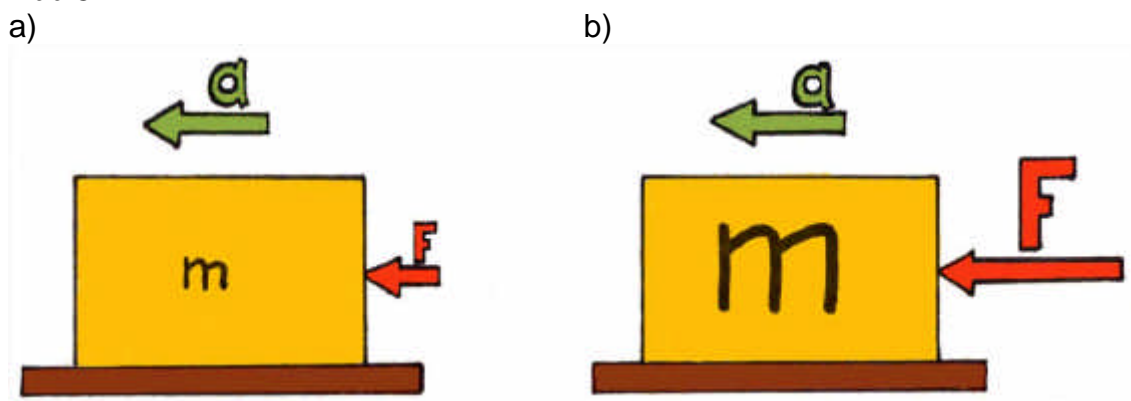
$$F = m \cdot a$$

geschrieben. Hat **m** einen bestimmten Wert, dann verhalten sich die Kraft **F** und die Beschleunigung **a** nach dieser Formel exakt so, wie es uns die Erfahrung lehrt.

Die Masse **m** ist eigentlich nichts anderes, als eine für jeden Körper spezifische Größe, eine Eigenschaft, die die Proportionalität zwischen der Kraft **F** und der Beschleunigung **a** bestimmt.

Man kann sich überlegen: Wenn wir einen Körper untersuchen, der sehr träge ist, d.h. eine große Masse hat, dann wird auch eine große Kraft gebraucht werden, um diesem Körper eine bestimmte Beschleunigung zu erteilen. Die Masse ist Ausdruck dafür, wie groß die aufzuwendende Kraft zu sein hat, also auch Ausdruck für den Widerstand gegen diese Kraft.

Abb.5



Um die gleiche Beschleunigung **a** beider Körper zu erreichen, muss die Kraft **F** um so höher sein, je größer die Masse **m** ist.

<sup>2</sup> Lies: F proportional zu a

Damit ist  $m$  nicht länger ein reiner Proportionalitätsfaktor, sondern hat einen physikalischen Inhalt,  $m$  wird zu einer ganz realen Größe mit dem Namen „Masse“ und der Einheit „Gramm“ (g). Das 1000fache dieser Einheit (kg) ist eine Basiseinheit im international gebräuchlichen Einheitssystem der Physik (SI).

Damit könnte man die Sache mit der Masse an und für sich schon auf sich beruhen lassen, wenn der Leser nach dieser Erklärung nicht unversehens in Schwierigkeiten kommen könnte, die im folgenden unsere ganze Aufmerksamkeit verlangen.

Die Schwierigkeit besteht darin, die Masse von anderen, aber ähnlichen physikalischen Größen gut zu unterscheiden, was durchaus nicht so leicht ist, wie es scheint.

## 2.2. Masse und Stoffmenge

Jeder Körper besteht aus einer Anzahl von kleinen Teilchen: Atomen oder Molekülen. Moleküle sind Atomgruppen, in denen mehrere Atome aneinander gebunden sind. Deshalb sprechen wir im weiteren der Einfachheit wegen bloß von Atomen.

Jeder Gegenstand besteht aus einem bestimmten Stoff, dessen Atome man zählen könnte. Jedenfalls rein theoretisch, denn praktisch würde nicht einmal ein Menschenalter dazu ausreichen, die Atome dieses Büchleins abzuzählen, selbst wenn jede Sekunde ein Atom gezählt würde. Es handelt sich also bei einem Körper um eine Menge von Atomen, die in einer bestimmten Weise angeordnet sind. Physikalisch ausgedrückt, heißt das:

Ein jeder Körper besteht aus einer Menge von Atomen eines Stoffes oder Stoffgemisches.

Vielleicht müsste man „Atommenge“ dazu sagen, aber das wäre nur ein anderes Wort. Entscheidend ist doch, was man damit meint. Und das wissen wir jetzt:

Das Symbol der Stoffmenge ist „ $n$ “ und ihre Einheit „mol“ ist eine reine Anzahl. 1 mol hat eine bestimmte Menge, und zwar  $6 \cdot 10^{23}$  Stück.<sup>3</sup> Ein Mol eines bestimmten Stoffes sind dementsprechend  $6 \cdot 10^{23}$  Atome. Besteht beispielsweise ein Körper aus  $N = 9 \cdot 10^{23}$  Atomen, dann sagt man, er habe eine Stoffmenge von  $n = N / L = 9 \cdot 10^{23} / 6 \cdot 10^{23} = 1,5$  mol.

Da aber in der Mechanik immer irgendwelche Körper behandelt werden, braucht man ein Symbol für den Begriff „Körper“. Dazu ist es nicht notwendig, einen neuen Buchstaben zu verwenden, die Größe Stoffmenge mit ihrem Symbol  $n$  bietet sich von ganz allein an, weil jeder Körper aus einer Stoffmenge besteht. Es hat sich aber eingebürgert, die physikalische Größe Masse zu verwenden, da man davon ausging, wo ein Körper ist, muss eine Masse sein und wo eine Masse ist, muss ein Körper sein. Die Masse als Symbolgröße des Körpers ist so eine „Angewohnheit“, die sich vielerorts in der Physik als nützlich

<sup>3</sup> Dieser Wert ist fest, heißt „Loschmidtsche Konstante“ und wird mit „ $L$ “ bezeichnet.

erweist. Dadurch werden bestimmte Berechnungen vereinfacht und wir wollen deshalb diese „Angewohnheit“ auch beibehalten.

Hauptsache aber ist, man verwechselt Masse und Stoffmenge nicht. Wir wissen jetzt:

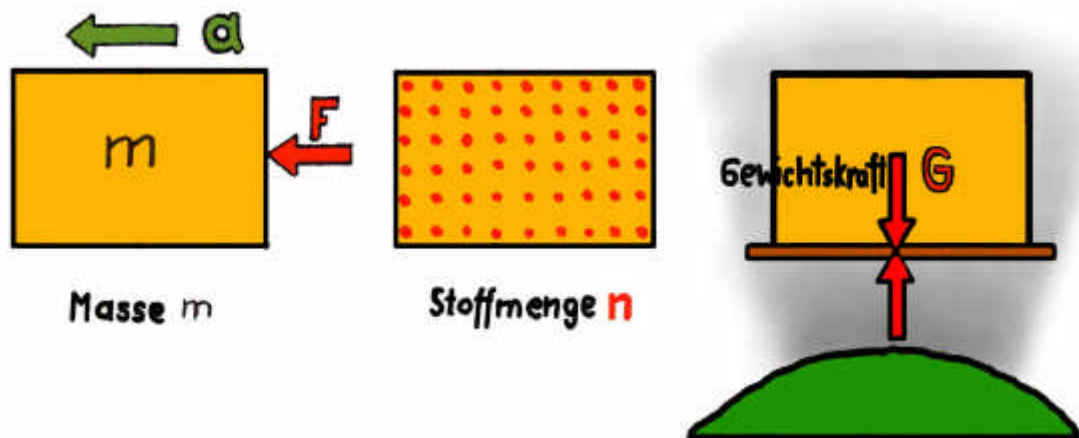
Die Stoffmenge trifft eine Aussage über die Anzahl der Atome eines Körpers und die Masse ist ein Maß für seinen Trägheitswiderstand gegenüber Beschleunigungen.

### 2.3. Masse und Gewicht

Die zweite, sich uns entgegenstellende Schwierigkeit werden wir genauso meistern. Jetzt sei der Leser dazu angehalten, nicht nur Masse und Stoffmenge, sondern auch Masse und Gewicht eines Körpers zu unterscheiden.

Masse, Stoffmenge und Gewicht sind drei völlig verschiedene Größen zur Beschreibung eines Körpers und erst weiter unten, wenn deutlich getrennt und unterschieden worden ist, dürfen wir aufdecken, dass Masse und Gewicht zusammen hängen.

Abb.6



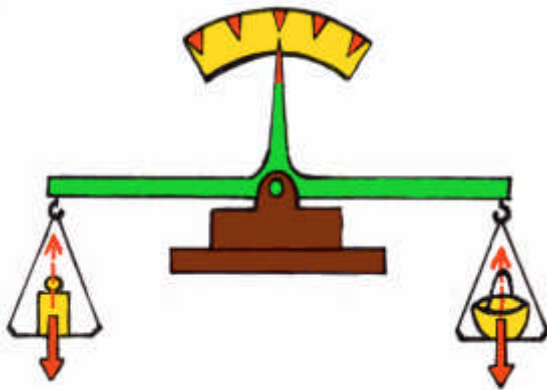
Doch zuerst sei der wesentliche Unterschied genannt. Zu diesem Zweck begehen wir uns in einen Tante-Emma-Laden, schauen der flinken Verkäuferin zu und staunen, wie schnell sie das, was die alte Waage anzeigt, in den Preis umrechnet. Und da wir so schön beim Überlegen sind, fragen wir uns in Gedanken: Was hat das Gerät mit den zwei Waagschalen und dem Zeiger eigentlich für einen Zweck?

Inzwischen finden wir es schon nicht mehr komisch, nach Sachen zu fragen, die jedem selbstverständlich erscheinen. Und so kommt uns sofort die Antwort in den Sinn: „Natürlich, physikalisch gesehen, ist das eine Messung.“ Die Frage ist bloß, was wird gemessen? Wenn der Leser jetzt antwortet: „Die Masse!“, dann beging er schon genau den Fehler, der hier vermieden werden soll.

Auf Waagen wird nichts anderes gemessen, als ein Gewicht, wenn auch meist die Einheit der Masse, **g** oder **kg** auf den Waagen steht. Warum das möglich ist, werden wir sehen.

Die Messung selbst führt man durch, indem man einen Körper mit unbekanntem Gewicht und Körper bekannten Gewichts miteinander vergleicht:

Abb.7



Bleibt bei dieser Balkenwaage der Zeiger in der Mitte des Skalenblattes stehen, so weiß man, dass das bekannte Gewicht (links) und das unbekannte Gewicht (rechts) genau gleich sind.

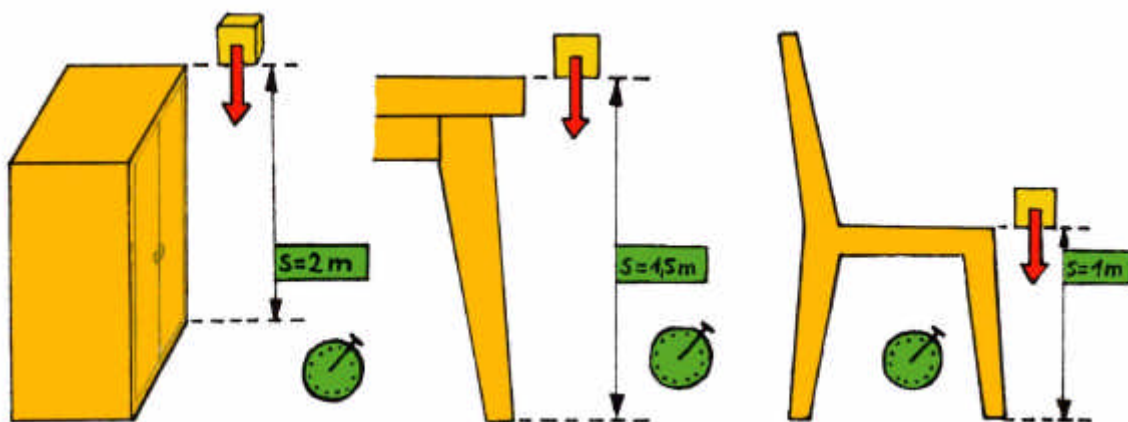
Aber was ist das eigentlich, das „Gewicht“? Es ist eine dieser seltsamen Erscheinungen, die wir „Kräfte“ nennen.

Damit dieser Fakt nicht der Gutgläubigkeit des Leser anvertraut wird, muss diese Behauptung natürlich sofort nachgeprüft werden. Das Beste ist, wir stellen eine Frage an die Natur, führen einen Versuch durch, von dem wir uns erhoffen, dass das durch ihn gewonnene Ergebnis unsere Behauptung bestätigen kann.

Wir nehmen dazu einen (unzerbrechlichen) Gegenstand, einen Gliedermaßstab sowie eine Uhr mit Sekundenzeiger zur Hand und führen folgendes Experiment durch:

Aus einer bestimmten Höhe, die mit dem Maßstab gemessen wird, und die wir für jeden Teilversuch ändern, wird der Gegenstand einfach fallengelassen. Dabei messen wir die Zeit vom Loslassen bis zum Auftreffen auf dem Fußboden:

Abb.8



Ein ähnliches Experiment hat Galileo Galilei schon vor Jahrhunderten am schiefen Turm von Pisa durchgeführt. Ebenso wie er werden wir unter genügender

Sorgfalt bei der Durchführung feststellen, dass sich die jeweils festgelegte Höhe, also der Fallweg **s** genauso verhält, wie das Quadrat der zum Fall benötigten Zeit **t**.

Abb.9 Eine Beispiel-Tabelle:

<b>s in m</b>	<b>t in s</b>	<b>t<sup>2</sup> in s<sup>2</sup></b>	<b>s/t<sup>2</sup> in m/s<sup>2</sup></b>
20	2,0	4,00	5,0
12	1,5	2,25	5,3
5	1,0	1,00	5,0

Nachdem  $t^2$  ausgerechnet wurde, bilden wir den Quotienten aus **s** und  $t^2$  (also  $s/t^2$ ) und stellen fest, dass dieser konstant ist<sup>4</sup>. Und das ist ein sicheres Zeichen dafür, dass **s** und  $t^2$  zu einander proportional sind:

$$s \sim t^2$$

Wieder suchen wir, wie schon vorhin, den Proportionalitätsfaktor, die konstante Größe. Dieses Mal jedoch entpuppt sich der Faktor als die Hälfte der Fallbeschleunigung, die etwa  $10 \text{ m/s}^2$  groß ist. Und das überrascht uns nicht, denn warum soll nicht auch hier das Grundgesetz der Mechanik gelten, eine beschleunigte Bewegung vorliegen?

Freie unbehinderte Fallbewegungen sind immer beschleunigte Bewegungen und wir können deshalb aufschreiben:

$$s = \frac{g}{2} \cdot t^2$$

Dabei bedeutet **g** die Fallbeschleunigung. Diese Gleichung drückt ein Gesetz der Mechanik aus, welches vielen Lesern aus ihrer Schulzeit bekannt sein wird. Wir benutzen bei jedem Versuch des Fallenlassens den selben Körper, veränderten **m** – die Masse – also nicht. Die Fallbeschleunigung war jedes mal die gleiche und wir können somit die Kraft berechnen, die den Körper nach unten treibt, wenn **g** (für **a**) und **m** in die Formel  $F = m \cdot a$  eingesetzt werden. Obwohl wir auf diese Weise zu dem Ergebnis kommen, dass die Kraft den Körper nach unten bewegt (nur die Einwirkung einer Kraft ruft eine beschleunigte

<sup>4</sup> Kleine Schwankungen sind dabei auf Messfehler zurückzuführen.

Bewegung hervor und die Fallbeschleunigung ist gemäß unserem Versuch eine beschleunigte Bewegung), sagt man vergleichsweise in der Umgangssprache richtig: „Das Gewicht bewegt den Körper nach unten.“ Und jetzt sind wir endlich dort, wo wir hin wollten:

Das Gewicht ist eine Kraft.

Wir werden aus bestimmten Gründen jetzt auch gleich vereinbaren, im weiteren nicht mehr von Gewicht, sondern von Gewichtskraft zu reden. Das Gewicht ist nichts anderes, als eine auf eine Unterlage ausgeübte Kraft: Fehlt diese Unterlage (wenn der Körper fällt), dann spricht man nicht von Gewichtskraft, sondern von der Schwerkraft.

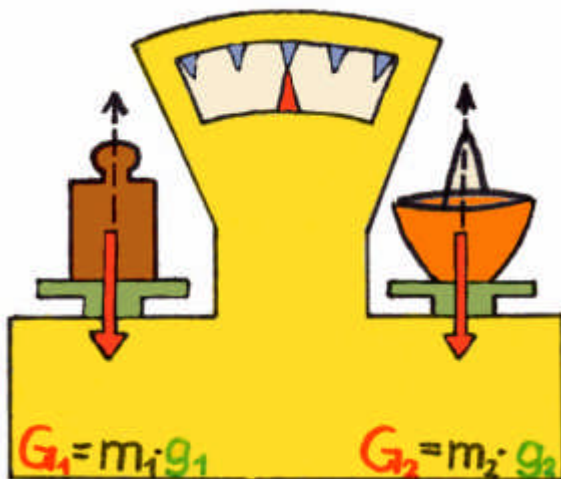
Indem wir jetzt darauf zurückkommen, dass das Gewicht eine Kraft ist, können wir den Vergleich Masse – Gewicht ganz leicht abschließen: Das Gewicht ist eine Kraft, die Masse ist der Proportionalitätsfaktor zwischen der Kraft und der Beschleunigung.

Masse und Gewichtskraft sind zwei völlig verschiedene Dinge.

Nachdem wir diesen Unterschied gemacht haben, soll noch vermerkt werden, dass die Fallbeschleunigung  $g$  eine spezielle Beschleunigung  $a$  ist und die Gewichtskraft  $G$  eine spezielle Kraft  $F$  ist. Deshalb dürfen wir die Formel  $F = m \cdot a$  auch aufschreiben als:

$$G = m \cdot g$$

Abb.10



Auf jeder Waage werden Gewichtskräfte gemessen. Wenn diese beiden Kräfte gleich sind ( $G_1 = G_2$ ), dann kann man nur deshalb, weil an beiden Waagschalen die Fallbeschleunigung gleich ist ( $g_1 = g_2$ ), darauf schließen, dass auch die beiden Massen gleich sind ( $m_1 = m_2$ ). So wird aus der Gewichtsmessung eine Massenbestimmung.

Die Gleichung  $G=m \cdot g$  gilt jedoch nur dort, wo bei Vorhandensein einer festen Unterlage auch ein Gewicht auftreten kann. Das ist aber nur in einem Schwerfeld der Fall. Im Weltraum, dort wo die Astronauten „gewichtlos“ (und nicht etwa „schwerelos“ !!!!) durch ihre Kabinen schweben, gilt diese Gleichung nicht mehr. Die Astronauten haben kein Gewicht oder anders gesagt: Sie üben keine Kraftwirkung auf den Fußboden ihres Raumschiffes aus. Auch auf dem Mond müsste man  $1/6$  der Fallbeschleunigung der Erde für  $g$  einsetzen, um die jeweils richtige Gewichtskraft zu errechnen. Aber warum ist das so?

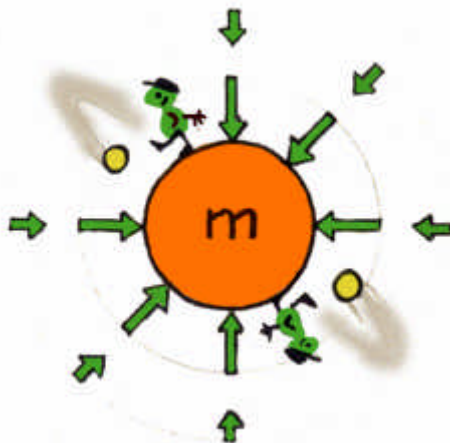
## 2.4. Masse und Schwerfeld

Es ist bekannt, dass sich alle Körper gegenseitig anziehen. Der Apfel fällt zur Erde aber gleichzeitig fällt auch die Erde zum Apfel. Nur weil der Apfel so klein ist und die Erde so groß, kann man die Fallbewegung der Erde zum Apfel hin nicht bemerken.

Die gegenseitige Anziehung heißt mit dem Fremdwort „Gravitation“. Ob nun die Masse oder etwas ganz anderes die Gravitation verursacht, weiß noch niemand genau. Aber auch hier wird die Masse  $m$  als Symbol für den Körper verwendet und dann sagt man: „Die Masse verursacht die Gravitation.“ Und man meint damit: „Der Körper verursacht die Gravitation.“

Jeder Körper hat ein Gravitationsfeld (man sagt auch „Schwerfeld“), also einen ihn umgebenden Raum, in dem die Anziehungskraft wirkt. Bringt man in diesen Raum einen frei beweglichen Körper (Probekörper), so fällt dieser zum Mittelpunkt des ursprünglichen Körpers hin.

Abb.11

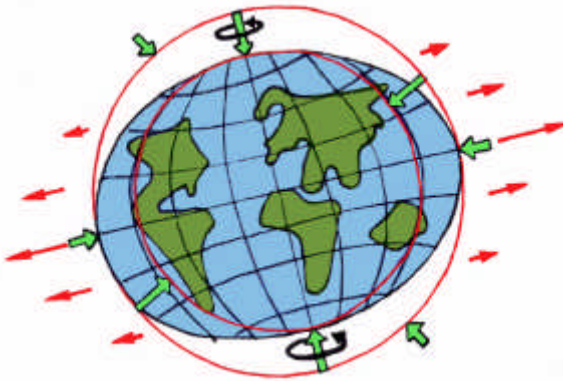


Wenn wir sagen, etwas fällt nach „unten“, dann meinen wir eigentlich, es fällt zum Zentrum des Schwerfeldes hin.

Im Raum um den Körper wirkt in jedem Punkt eine Fallbeschleunigung zum Körper hin. Und je weiter weg wir uns von diesem befinden, desto kleiner ist die Fallbeschleunigung, desto leichter werden wir. Das gilt auch für die Erde, die Fallbeschleunigung wird um so kleiner, je weiter wir uns vom Erdmittelpunkt entfernen.

Die Erde dreht sich bekanntlich um ihre eigene Achse und dadurch entstehen im Bereich des Äquators Fliehkräfte, die dort unseren Planeten dehnen. Die Folge davon ist, dass die Erde am Südpol und am Nordpol immer flacher wird.

Abb.12



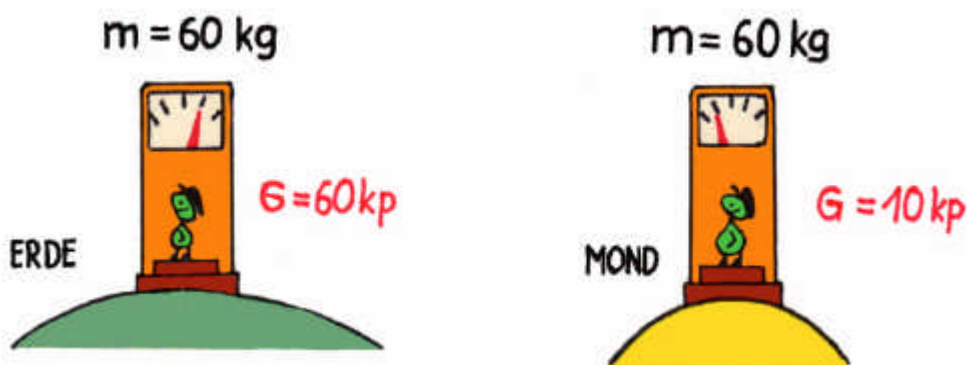
Hier wird deutlich, dass Körper der gleichen Masse  $m$  am Äquator ein geringeres Gewicht  $G$  haben als an den Polen, weil am Äquator zum einen die Fallbeschleunigung  $g$  kleiner ist und zum anderen der Gravitationskraft eine durch die Erdrotation entstehende Fliehkraft entgegen wirkt.

So ist die an der Erdoberfläche wirkende Fallbeschleunigung  $g$  am Äquator kleiner, weil dieser weiter vom Erdmittelpunkt entfernt ist, als Südpol und Nordpol. Dementsprechend war die Fallbeschleunigung für den Teilversuch im vergangenen Abschnitt, bei dem der Körper aus etwas größerer Höhe fallen gelassen wurde, ebenso etwas kleiner. Bei diesem kleinen Höhenunterschied von einigen Metern wirken sich diese Unterschiede jedoch fast gar nicht aus und unser Experiment behält natürlich seine Gültigkeit.

Die Fallbeschleunigung gibt also die Stärke des Gravitationsfeldes im jeweiligen Abstand zum Körper (Planet) an und wird deshalb auch als „Gravitationsfeldstärke“ bezeichnet.

Wenn wir uns weit genug vom Körper entfernt haben, sind wir praktisch gewichtslos. Und so können wir uns auch überlegen, dass die Fallbeschleunigung (Gravitationsfeldstärke) auf dem Mond sechsmal geringer ist, denn dieser hat ein sechsmal schwächeres Schwerfeld als die Erde, weil er sechsmal kleiner ist. Dementsprechend werden wir auf dem Mond nur ein Sechstel unseres Gewichts verspüren, obwohl wir immer noch die gleiche Masse besitzen.<sup>5</sup>

Abb.13



<sup>5</sup> Der Satz: „Man spürt sein Gewicht.“ ist eine umgangssprachliche Redewendung und sagt physikalisch nichts anderes aus, als: Wir spüren den Widerstand einer festen Unterlage, der nach dem Prinzip „Kraft gleich Gegenkraft“ genauso groß ist, wie die Schwerkraft, die uns ohne Unterlage zum Zentrum des Schwerfeldes hin beschleunigen würde. Ist keine Unterlage (fester Boden) vorhanden, dann bewegen wir uns im freien Fall und sind dabei gewichtslos, obwohl uns nach wie vor die Schwerkraft nach unten treibt. Diese Gedanken wird der Leser allerdings erst am Schluß des Heftes richtig verstehen können, trotzdem sei er hier schon einmal angeführt.



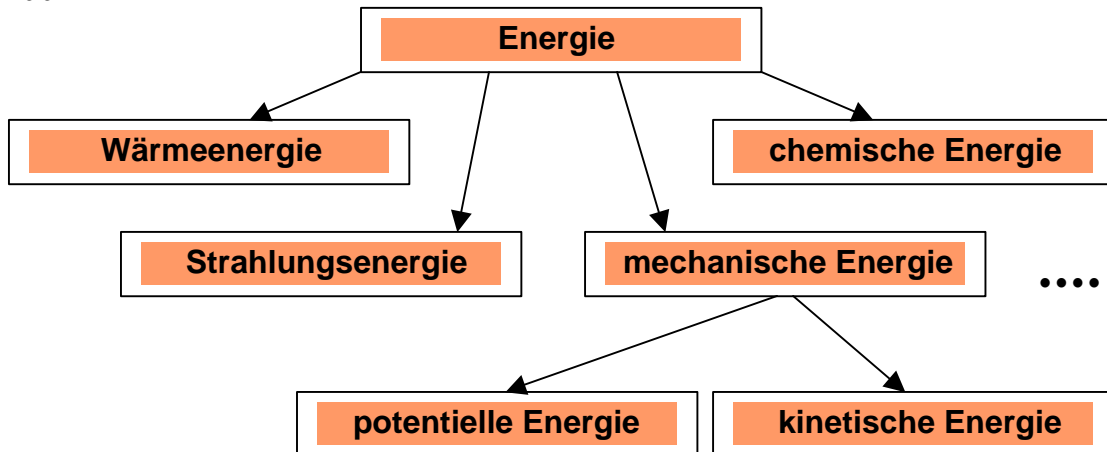
## 2.5. Einführung des Begriffes „Energie“

Was ist Energie? – In der Physik sagt man ganz allgemein: Energie ist die Fähigkeit, Arbeit zu verrichten. Diese Fähigkeit kann in unterschiedlichen Formen auftreten: Wärmeenergie, elektrische Energie, mechanische Energie usw. Insgesamt ist es aber unmöglich, dass sie aus dem Nichts heraus entsteht bzw. geschaffen wird oder umgekehrt wieder verschwindet. Die Gesamtenergie eines abgeschlossenen Systems bleibt immer gleich groß. Diese Aussage heißt „Energieerhaltungssatz“.

Nur die einzelnen Erscheinungsformen können sich ineinander umwandeln und das tun sie auch. Überall, wo Reibung auftritt<sup>6</sup>, wird mechanische Energie in Wärmeenergie umgewandelt. Deshalb ist auch der Satz „Reibung erzeugt Wärme.“ nicht exakt, denn erzeugt werden kann sie nicht. Man muss genauer sagen: „Reibung wandelt mechanische Energie in Wärmeenergie um.“

Uns interessiert aber vor allem die mechanische Energie. Sie kann noch einmal untergliedert werden in potentielle<sup>7</sup> und kinetische Energie. Letzteres ist eine andere Bezeichnung für „Bewegungsenergie“. Dass auch Bewegung Energie darstellt, wird spätestens deutlich, wenn jemand mit 200 km/h gegen einen Baum gefahren sind und dieser aus dem neuen Auto einen großen Blechhaufen gemacht hat. Dabei wurde im physikalischen Sinne selbstverständlich Arbeit verrichtet.

Abb.14



Wir wollen uns mit der kinetischen Energie näher befassen. Der Leser ist bestimmt nicht sehr erstaunt, wenn er erfährt, dass ein Körper mit großer Geschwindigkeit über eine hohe kinetische Energie verfügt. Der mathematische Zusammenhang kann folgendermaßen ausgedrückt werden:

$$W_{\text{kin}} \sim v^2$$

<sup>6</sup> Es gibt keinen mechanischen Vorgang, bei dem sie nicht mit im Spiel ist.

<sup>7</sup> Mit ihr könnte ein Körper durch sein Gewicht etwas zerdrücken, was natürlich ebenfalls Energie erfordert. Aber auch eine gespannte Feder kann Arbeit verrichten, in ihr ist also auch potentielle Energie gespeichert.

Gezielte Suche ergibt, dass der Proportionalitätsfaktor  $m/2$  ist:

$$W_{\text{kin}} = \frac{m}{2} \cdot v^2$$

Wir wollen im folgenden sehen, was es mit dieser Formel auf sich hat, die in der klassischen Physik, d.h. für kleine Geschwindigkeiten gültig ist.

## 2.6. An der Grenze der Newton'schen Mechanik

Wir wissen also jetzt, wie der Begriff „Masse“ am Anfang des 20. Jahrhunderts und auch schon früher verstanden wurde: Die Masse ist ein Maß für den Trägheitswiderstand eines Körpers gegenüber Beschleunigungen. Sie ist für einen Körper immer gleich groß, denn warum auch sollte der Körper einer beschleunigenden Kraft einmal diesen, einmal jenen Widerstand entgegensetzen? Außerdem haben wir erfahren, wie Newton zu der Formel  $\mathbf{F} = \mathbf{m} \cdot \mathbf{a}$  kam und wir erinnern uns daran, dass Masse, Stoffmenge und Gewichtskraft nicht miteinander verwechselt werden dürfen. Aber für die angestellten Überlegungen mussten doch Voraussetzungen erfüllt sein, die uns erst erlauben, so vorzugehen, wie wir es getan haben und wie Newton es schon im 17. Jahrhundert getan hat.

Solche Annahmen bzw. Voraussetzungen gibt es in der Tat. Wir haben sie zwar bis jetzt peinlich gemieden, wollen uns aber nicht darum drücken, auf sie einzugehen. Dabei soll eine Annahme der klassischen Mechanik besprochen werden, und anschließend wollen wir sehen, wie sie sich als falsch herausstellt.

Die Annahme der klassischen Mechanik, auf die wir jetzt eingehen wollen, ist folgende: Man war davon überzeugt, dass die Geschwindigkeit eines Körpers immer und immer größer werden kann.

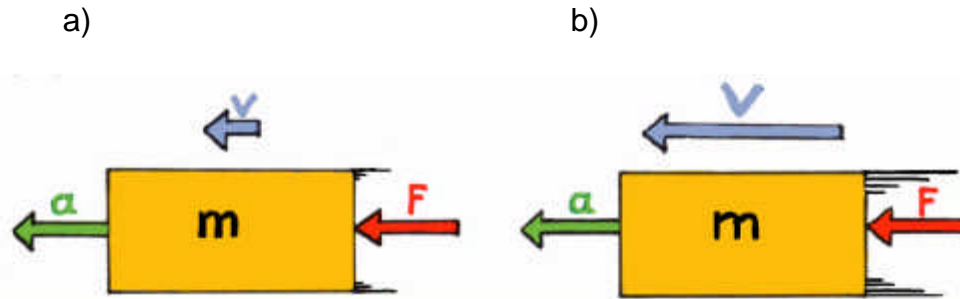
Wieso ist das eine Voraussetzung für Newtons Überlegung gewesen?

Ein Wissenschaftler trachtet grundsätzlich danach, solche Formeln aufzustellen und solche Aussagen zu treffen, die immer und überall gültig sind. So dachte auch Newton, dass seine Aussage: „Durch Einwirkung einer Kraft ändert jeder freibewegliche Körper seine Geschwindigkeit gemäß der Formel  $F = m \cdot a$ “<sup>8</sup> uneingeschränkt gültig sei. Aber dies konnte er nur denken, wenn er vorausgesetzt hatte, dass dieser Vorgang auch wirklich bei **JEDER** Geschwindigkeit so und nicht anders abläuft., wenn er also vorausgesetzt hatte, dass die Geschwindigkeit eines Körpers beliebig ansteigen kann. Newton konnte bloß auf Grund dieser Voraussetzung auf die vermeintliche Allgemeingültigkeit seiner Formel schließen.

---

<sup>8</sup> Die Beschleunigung  $a$  ist eine Änderung der Geschwindigkeit  $v$ .

Abb.15



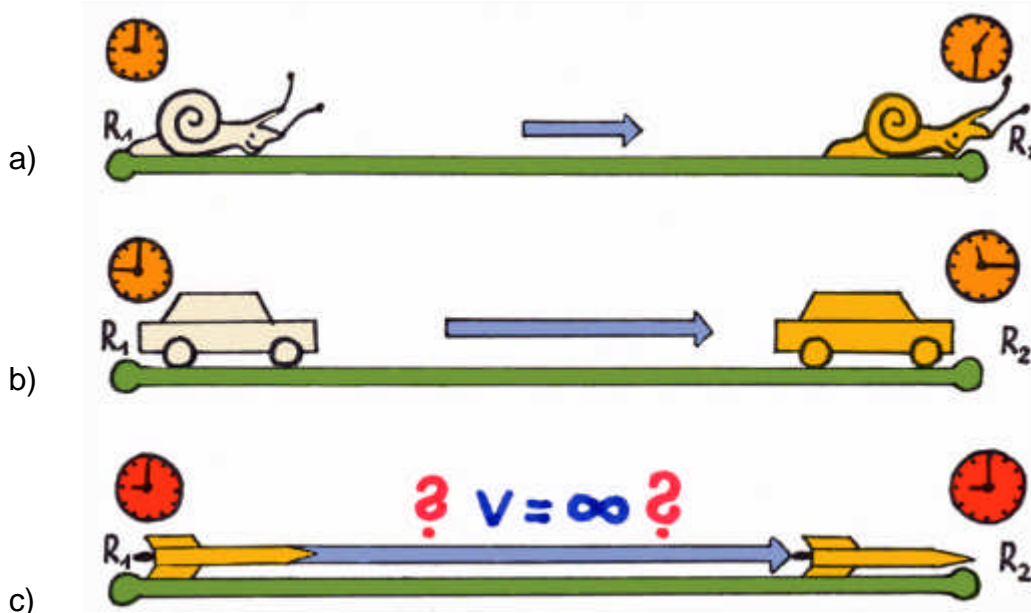
Ganz gleich, wie groß die Geschwindigkeit  $v$  ist: die gleiche Kraft  $F$  ruft bei ein und demselben Körper immer die gleiche Beschleunigung  $a$  hervor. So lautete eine Behauptung der klassischen Mechanik. Dazu musste man aber annehmen, dass es beliebig hohe Geschwindigkeiten gibt, ansonsten würde die Aussage an Allgemeingültigkeit verlieren.

Wirkt auf den Körper eine Kraft, so erfährt dieser eine Beschleunigung. Und die Beschleunigung ist ja nichts anderes, als eine Veränderung der Geschwindigkeit im Laufe der Zeit. Wirkt eine Kraft ständig in gleicher Richtung, so steigt  $v$ , die Geschwindigkeit immer mehr.

Nun stellen wir folgende Überlegung an: Der Abstand zwischen zwei Punkten  $R_1$  und  $R_2$  möge groß und konstant sein. Für den Weg  $s$  zwischen den Punkten braucht eine Schnecke wegen ihrer geringen Geschwindigkeit eine lange Zeit. Ein Auto mit großer Geschwindigkeit braucht dementsprechend nicht so lange. Allgemein kann man sagen: Je größer die Geschwindigkeit ist, um so weniger Zeit wird für den Weg gebraucht.

Wenn es aber in der klassischen Mechanik Geschwindigkeiten geben soll, die immer und immer größer werden können und auch unendlich groß sein dürfen, dann würde praktisch keine Zeit mehr vergehen zwischen dem Vorhandensein des Körpers im Punkt  $R_1$  und seinem Vorhandensein im Punkt  $R_2$ .

Abb.16



Das soll näher erklärt werden: Die Formel  $v = s / t$  (eine spezielle Form von  $v = dr / dt$ ) können wir leicht nach  $t$  umstellen:  $t = s / v$ . Durch die folgende Operation wollen wir einen Grenzfall dieser Gleichung untersuchen:

$$\lim_{v \rightarrow \infty} \frac{s}{v} = 0$$

In Worten ausgedrückt heißt das: Für den *Grenzfall*, dass die Geschwindigkeit unendlich groß *wäre, würde* der Quotient  $s/v$  ( $= t$ ) gleich Null sein (siehe Abb. 16 c). Diesen Grenzfall kann man sich auf die Art „Was wäre, wenn...“ überlegen, obwohl er selbst nie eintritt.

Warum kann dieser Grenzfall nie eintreten?

In diesem Fall würden wir beobachten, dass die in Abb.16c dargestellte Rakete im Punkt  $R_2$  in dem Moment auftaucht, in dem sie vom Punkt  $R_1$  noch gar nicht fort ist. Die Rakete muss bei unendlich großer Geschwindigkeit in beiden Punkten gleichzeitig sichtbar sein. Aber das ist, wie jeder weiß, völlig unmöglich.

Die anhand der Rakete durchgeführte Überlegung gilt aber nicht nur für stoffliche Materie, wie für diese Rakete, sondern auch für nichtstoffliche Materie, wie Wirkungen, Signale, Licht usw..

Bei keinem materiellen Objekt ist es möglich, dass für seine Bewegung von einem Ort zum anderen keine Zeit vergeht. Genau aus diesem Grunde ist es unmöglich, eine Strecke in unendlicher Geschwindigkeit zurückzulegen, der in Abb. 16 c) dargestellte Fall wird nie eintreten.

Diese Aussage steht in Übereinstimmung mit aller Erfahrung, die Wissenschaftler bisher je gesammelt haben. Unzählige Experimente deuteten immer wieder darauf hin, dass die Geschwindigkeit aller materiellen Objekte eine bestimmte Grenze nicht überschreitet.

An die Stelle der klassischen Ansicht „Körper können beliebig schnell sein.“ muss gemäß obiger Überlegung die Erfahrungstatsache gesetzt werden: „Es gibt eine endliche Höchstgeschwindigkeit für alle Objekte, Signale, Wirkungen usw..“.

Wie groß die ist, wollen wir im nächsten Abschnitt überlegen. Wenn dann von **der** Höchstgeschwindigkeit die Rede ist, soll nicht etwa die technisch bedingte Höchstgeschwindigkeit zum Beispiel eines Kraftfahrzeuges, sondern immer die physikalische Höchstgeschwindigkeit aller Objekte gemeint sein.

Somit hat sich erwiesen, dass eine wichtige Voraussetzung der klassischen Mechanik nicht mehr gültig ist.

<sup>1</sup> Lies: „Limes von  $s/v$  für  $v$  gegen unendlich ist gleich Null.“ „Limes“ (lim) ist dabei der mathematische Ausdruck für „Grenzwert“.

Nun muss auch danach gefragt werden, ob alles was darauf aufgebaut hatte, ebenfalls nicht mehr gültig ist. Die Antwort lautet : „Nein, nur zum Teil.“ Wäre ja auch schade, wenn wir uns die ganze Mühe bis hierher umsonst gemacht hätten.

Wir wollen sehen, welche Auswirkungen die Berücksichtigung einer endlichen Höchstgeschwindigkeit bei Energiebetrachtungen hat.

Die Einwirkung einer beschleunigenden Kraft auf Körper bedeutet Zufuhr von Energie. Erhöht sich auf diese Weise die kinetische Energie, wächst natürlich die Geschwindigkeit. Wir wissen aber, dass es irgendwo eine Grenze, eine Höchstgeschwindigkeit geben muss. Was geschieht, wenn ein beliebiger Körper die Höchstgeschwindigkeit erreicht hat und die Kraft wirkt weiterhin auf den Körper ein?

Falls die Energie auf der linken Seite der Gleichung  $W_{\text{kin}} = m/2 \cdot v^2$  weiter steigt und  $v^2$  auf der rechten Seite kann nicht mehr größer werden, weil die Höchstgeschwindigkeit erreicht ist, würde eine Ungleichung entstehen. Weil aber rechte und linke Seite einer Gleichung einander entsprechen müssen, bleibt bei angenommener weiterer Steigung von  $W_{\text{kin}}$  nur die Möglichkeit, dass der Faktor  $m/2$  jetzt größer wird.

So erstaunlich es sich auch anhören mag, die Masse wächst an, der Trägheitswiderstand gegenüber Beschleunigungen wird auf einmal größer! Wir müssen also feststellen:

Der eigentlich konstante Proportionalitätsfaktor zwischen der Kraft **F** und der Beschleunigung **a** - die Masse **m** - ist nicht konstant, sondern verändert sich in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit **v** .

Ob diese Überlegung richtig ist?

Sicher ist nur, und genau das sollte dem Leser hier gezeigt werden, dass sich unter Berücksichtigung der endlichen Höchstgeschwindigkeit völlig neue Aspekte ergeben. Vielleicht muss die Formel für die Energie geändert werden, vielleicht verändert sich die Masse tatsächlich.

Wir wollen probieren, ob uns eventuell die Elektromagnetik eine Antwort darauf geben kann, welche Korrektur die klassische Formel  $W_{\text{kin}} = m/2 \cdot v^2$  erfahren muss und wie die von uns vermutete Massenveränderung vor sich geht.

## 2.7. Ein Ausflug in die Elektromagnetik

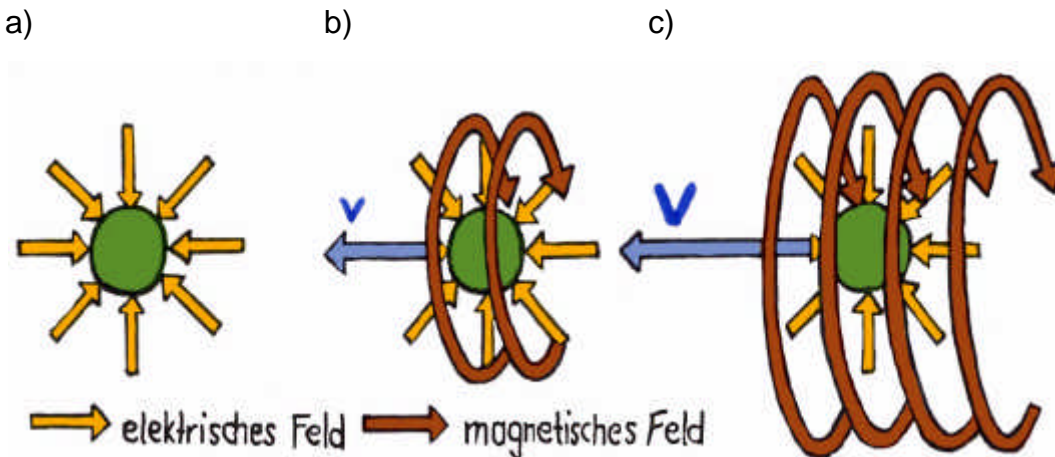
Um eine Antwort finden zu können, wollen wir uns ein wichtiges Elementarteilchen, das Elektron vornehmen und sein Verhalten bei zunehmender Geschwindigkeit untersuchen.

Elektronen finden wir in den Atomen. Hier bilden sie die sogenannte Hülle um den Atomkern, der seinerseits aus Protonen und Neutronen besteht. Aber wir treffen auch freie Elektronen an, die nicht an ein Atom gebunden sind.

Alle Elektronen sind bekanntlich mit einer (negativen) elektrischen Ladung versehen. Sie haben deshalb die interessante Eigenschaft, ein Magnetfeld hervorzurufen, wenn sie sich bewegen. (Alle elektrischen Ladungen erzeugen bei Bewegung ein Magnetfeld, ebenso wie alle magnetischen Ladungen bei Bewegung umgekehrt wieder ein elektrisches Feld aufbauen.)

Das Magnetfeld besitzt eine bestimmte Energie und wird um so stärker, je größer die Geschwindigkeit des Elektrons ist.

Abb.17



Wir lassen eine Kraft einwirken und beschleunigen das Elektron, d.h. wir führen ihm Energie zu.

Doch was ist das? – Die Energie, die bis zu einer bestimmten Geschwindigkeit reichen müsste, ist schon verbraucht, aber die gewünschte Geschwindigkeit noch nicht erreicht!

Da fällt uns ein, dass bei allen elektrisch aufgeladenen Teilchen die zugeführte Energie nicht nur in höherer Geschwindigkeit angelegt wird. Einen Teil verbraucht das Magnetfeld, das durch die Bewegung zwangsläufig entstanden ist. Gut, dann probieren wir es noch einmal, flitzen dem Elektron hinterher und führen ihm erneut Energie zu. Und zwar soviel, dass sie dieses Mal reichen müsste, um wieder die gleiche Geschwindigkeitsänderung wie eben erzielen zu können.

Aber das kann doch nicht sein! Erneut war es zu wenig!

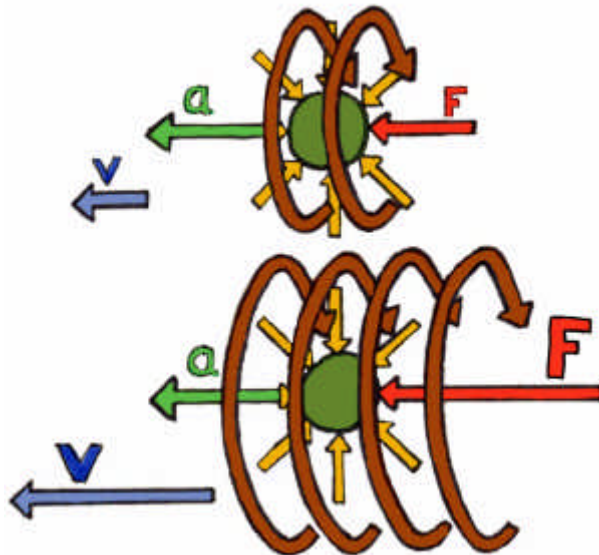
Aber ein Grund zum Verzweifeln sollte das noch nicht sein. Denken wir noch einmal darüber nach:

Vorhin war die Geschwindigkeit nicht so hoch, wie wir uns erhofft hatten, denn ein Teil der zugeführten Energie wurde für das Magnetfeld verwendet. Die Stärke des Magnetfeldes wird größer, wenn die Geschwindigkeit des Elektrons höher ist.

Als wir den zweiten Versuch unternahmen, bewegte sich das Elektron noch. Aber um das Magnetfeld entsprechend der schon vorhandenen Geschwindigkeit noch einmal zu vergrößern, wird von der beim zweiten Versuch zugefügten Energie für das Magnetfeld anteilmäßig mehr verbraucht, als vorhin beim ersten Versuch.

Es tritt der interessante Umstand ein, dass bei größerer Geschwindigkeit mehr Energie notwendig ist, um jeweils die gleiche Geschwindigkeitsänderung zu erzielen.

Abb.18



Kleine Geschwindigkeit bedeutet schwaches Magnetfeld. Die Kraft **F** führt zu einer Beschleunigung **a** des Elektrons.

Große Geschwindigkeit bedeutet starkes Magnetfeld. Die größere Kraft **F** wird dabei nicht nur in Beschleunigung **a** umgesetzt.

Die Energiezufuhr haben wir erreicht, indem wir auf das Elektron eine Kraft einwirken ließen.

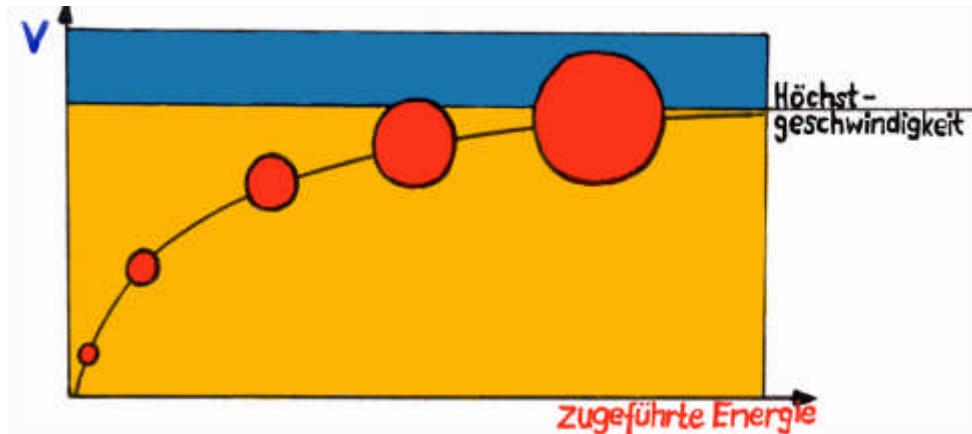
Bei steigender Geschwindigkeit ist eine immer größere Kraft notwendig, um dem Elektron jedes mal die gleiche Beschleunigung zu erteilen.

So darf unsere Überlegung auch formuliert werden, denn die Änderung der Geschwindigkeit war ja nichts anderes, als die Beschleunigung. Damit sind zwei Stichworte gefallen, die uns weiter vorn schon begegnet sind. Der Zusammenhang zwischen der Kraft **F** und der Beschleunigung **a** wird durch die Gleichung  $\mathbf{F} = \mathbf{m} \cdot \mathbf{a}$  zum Ausdruck gebracht. Nach dieser Formel würde aber obengenannter Sachverhalt bedeuten, dass die Masse immer größer werden muss. Soll jedes mal die gleiche Geschwindigkeitsänderung (Beschleunigung) erzielt werden, ist also  $\mathbf{a} = \text{konstant}$ , dann folgt gemäß  $\mathbf{F} = \mathbf{m} \cdot \mathbf{a}$  für solche Kräfte **F**, die mit der Geschwindigkeit immer größer werden, dass **m** (die Masse) ebenfalls mit der Geschwindigkeit immer größer wird:  $\mathbf{F}(\mathbf{v}) = \mathbf{m}(\mathbf{v}) \cdot \mathbf{a}$ .

Es kann daher formuliert werden:

Bei steigender Geschwindigkeit verhält sich das Elektron so, als würde seine Masse – sein Trägheitswiderstand – immer größer.

Abb.19<sup>1</sup>



Der oben beschriebene Effekt liegt aber ganz eindeutig in den elektromagnetischen Eigenschaften des Elektrons begründet. Das Elektron *verhält* sich nur so, als würde seine Masse größer werden. Aber wird sie wirklich größer? Und lässt sich nicht ein gewisser Zusammenhang erahnen zwischen der Energie (von der für eine konstante Beschleunigung dem Elektron bei steigender Geschwindigkeit immer mehr zugefügt werden musste) und dem Trägheitswiderstand des Elektrons, der bei steigender Geschwindigkeit scheinbar immer größer wird?

Wie die Schwierigkeiten an der Gültigkeitsgrenze der Newton'schen Mechanik überwunden werden können, konnte uns leider auch das Elektron nicht eindeutig zeigen. Deshalb bleibt keine andere Möglichkeit, als sich den eigentlichen Ursachen dieser Komplikationen noch einmal zuzuwenden.

## 2.8. Was man über das Licht wissen sollte

Die scheinbare Massenzunahme beim Elektron ist auf dessen elektromagnetischen Eigenschaften zurückzuführen. Mit Hilfe der Mechanik konnten wir diesen Sachverhalt nicht erklären. Im Gegenteil, die klassische Mechanik steht im Widerspruch zur Elektromagnetik. Deshalb liegt es nahe, im Bereich dieser Elektromagnetik nach jener endlichen Höchstgeschwindigkeit zu suchen, die uns all die angedeuteten Schwierigkeiten mit der Mechanik beschert hatte.

Zu den elektromagnetischen Erscheinungen in der Natur gehört auch das Licht. Ist nicht die Geschwindigkeit des Lichtes womöglich jene Höchstgeschwindigkeit?

Diese Vermutung liegt nahe und ist für uns Grund genug, uns dem Licht und seiner Ausbreitungsgeschwindigkeit zuzuwenden, um endlich einen Ausweg zu finden.

Im nächsten Kapitel behandeln wir einen Versuch, der die Frage beantwortet, ob unsere Vermutung richtig ist, d.h. ob die Geschwindigkeit des Lichtes tatsächlich jene Höchstgeschwindigkeit ist, die es gemäß unseren Überlegungen geben muss. Dieser Versuch wurde mit Lichtstrahlen durchgeführt und um die

<sup>1</sup> Massenzunahme hat nichts mit Volumenzunahme zu tun. Dies ist lediglich eine Veranschaulichung.



zugrundegelegten Gedanken dann verstehen zu können, muss etwas dazu gesagt werden, was es mit dem Licht auf sich hat.

Jeder weiß, dass man ohne Licht nicht sehen kann. Ja, mehr noch: Ohne das Licht hätte sich das Leben auf der Erde gar nicht entwickeln können. Es scheint so, als ob das Licht mit vielen Naturvorgängen verbunden sei und deshalb ist es schon seit langem Untersuchungsobjekt vieler Wissenschaftler.

Doch je eingehender man sich mit dieser Erscheinung beschäftigte, desto rätselhafter mutete sie an.

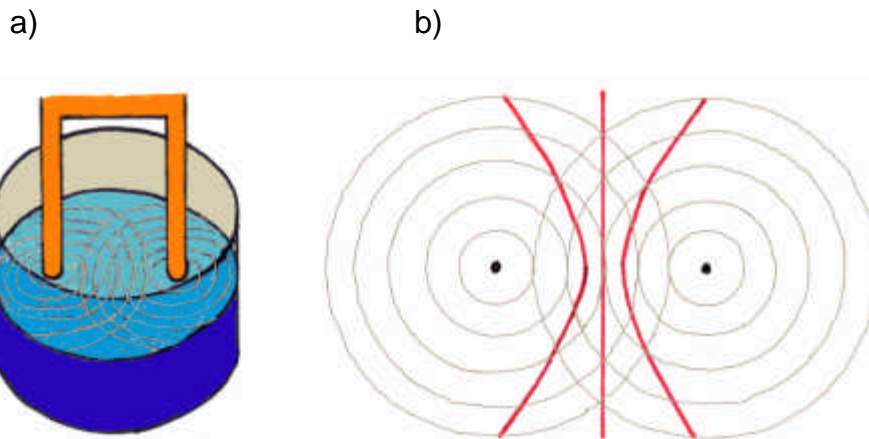
Interessant ist vor allen Dingen, dass es zwei verschiedene Möglichkeiten der Beschreibung gibt:

Die erste ist die, dass man einen Lichtstrahl als einen Strom von Lichtteilchen auffassen kann. Das wurde deshalb geschlussfolgert, weil ein Lichtstrahl die gleiche Eigenschaft zeigt, wie ein Strom von beispielsweise Elektronen, die ja bekanntlich ebenfalls kleine Teilchen sind. Demnach musste man feststellen:

Ein Lichtstrahl verhält sich wie ein Teilchenstrom.

Allerdings kam man in arge Bedrängnis, als sich herausstellte, dass Licht ausserdem die gleichen Eigenschaften besitzt, wie Wellen zum Beispiel an einer Wasseroberfläche. Diese Oberflächenwellen können sich nämlich überlagern, wodurch sie an bestimmten Stellen ausgelöscht, an anderen Stellen wiederum verstärkt werden. Diese Erscheinung nennt man „Interferenz“.

Abb.20



Experimente mit dem Licht zeigten den Wissenschaftlern, dass auch Lichtstrahlen sich überlagern können, wobei ebenfalls Auslöschung und Verstärkung auftreten. Also musste man jetzt noch hinzufügen:

Ein Lichtstrahl gleich einem Wellenbündel.

Aber das ist doch ein Widerspruch! Der Leser wird sich fragen: „Wie kann ein Strom von Teilchen eine Welle sein und umgekehrt?“

Aber diese Fragestellung ist nicht ganz korrekt. Es verhält sich viel mehr so, dass ein und die selbe Sache, die „Licht“ genannt wird, sich uns je nach Versuchsaufbau einmal als Teilchenstrom, ein anderes Mal als Welle zeigt. Jedoch ist die Vorstellung, ein Lichtteilchen bewege sich auf einer wellenförmigen Bahn, falsch. Das Licht ist **e n t w e d e r** ein Teilchenstrom, **o d e r** es tritt als Wellenvorgang auf.

Jetzt wird auch deutlich, dass beide Veranschaulichungen lediglich Denkmodelle sind. Beide werden gebraucht, um das Licht vollständig beschreiben zu können, aber im konkreten Fall darf man bloß eins von beiden Modellen anwenden.

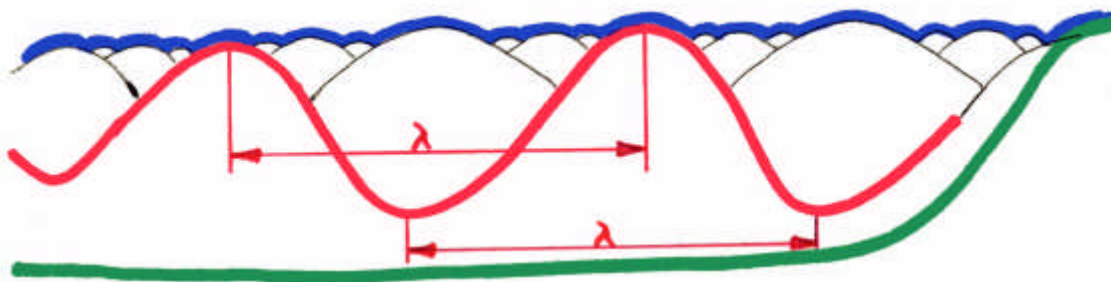
Das Licht ist keine Einzelercheinung, es hängt mit vielen anderen Dingen zusammen. Um dem Leser das Einordnen zu ermöglichen, sei erwähnt, dass Licht seinem Wesen nach das gleiche ist wie Röntgenstrahlung, die in der Medizin Anwendung finden, wie die Wärmestrahlung, die man an jeder Heizung deutlich spüren kann und schließlich das gleiche ist, wie die sogenannten „Hertz’schen Wellen“, die der Mensch zur Übertragung von Rundfunk- und Fernsehsendungen benutzt.

Röntgenstrahlen, Wärmestrahlen, Licht und Hertz’sche Wellen sind sowohl mit dem Teilchenmodell, als auch mit dem Wellenmodell beschreibbar. Das heißt, sie zeigen sich dem Physiker einmal als Teilchenstrom, einmal als Welle, aber nie offenbaren sich Teilcheneigenschaften und Welleneigenschaften gleichzeitig.

Die genannten Erscheinungen sind nur innerhalb des Wellenmodells elektromagnetischer Natur, weswegen für unsere Betrachtungen das Wellenmodell von besonderer Bedeutung sein wird.

Wenn sie nach dem Wellenmodell beschrieben werden, können wir diesen elektromagnetischen Erscheinungen eine „Wellenlänge“  **$\lambda$**  zuordnen, wie folgende Abbildung zeigt:

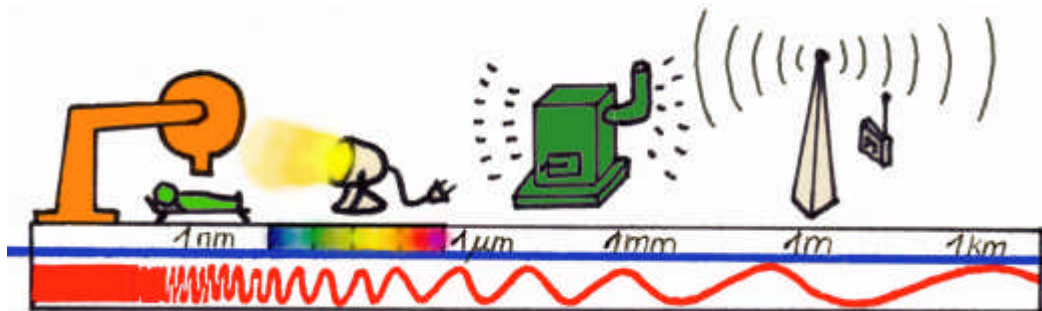
Abb.21



Der Abstand zwischen zwei Wellenbergen oder Wellentälern heißt „Wellenlänge“ und wird mit  **$\lambda$**  (Lambda) bezeichnet.

Trägt man die Wellenlänge auf einer Geraden ab, so ergibt sich eine Möglichkeit der Unterteilung, die verdeutlicht, wie wir das Licht einordnen müssen:

Abb.22



Licht(arten) sind **sowohl** mit dem Teilchenmodell, **als auch** mit dem Wellenmodell beschreibbar. Aber bei einem bestimmten Versuchs-Aufbau darf man **entweder** nur das Teilchenmodell **oder** das Wellen-Modell heranziehen.

Hieran sehen wir auch, dass rotes Licht der Wärmestrahlung sehr ähnlich ist, sie unterscheiden sich bezüglich der Wellenlänge nur unbedeutend, und blaues Licht grenzt an den Bereich der Röntgenstrahlung.

Zusammenfassend sei gesagt, was wir uns über das Licht merken wollen:

Licht ist nach dem Wellenmodell oder dem Teilchenmodell beschreibbar. Beide Modelle sind notwendig, schließen sich aber gegenseitig aus und dürfen deshalb nicht gleichzeitig angewendet werden. Licht ist der Wärmestrahlung (Infrarot-Bereich), der Röntgenstrahlung (Ultraviolett-Bereich) und den Hertz'schen Wellen (Radio und Fernsehen) wesensverwandt und setzt sich ebenso wie diese (aber nur innerhalb des Wellenmodells) aus elektrischen und magnetischen Feldern zusammen. Eine Welleneigenschaft des Lichtes ist die Interferenz, d.h. die Überlagerung von Licht-Wellen.

### 3. Wie die neue Theorie entstand. Ein Kapitel von den Ansichten über Raum, Zeit, Energie und Masse

Nachdem wir einige Vorbetrachtungen abgeschlossen haben, wollen wir uns nun der Relativitätstheorie zuwenden. Diese Theorie stellt eine Verallgemeinerung der klassischen Physik dar und überwindet die in den Vorbetrachtungen angedeuteten Schwierigkeiten. Innerhalb der klassischen Physik ist die Elektromagnetik nicht mit Hilfe der Mechanik erklärbar. Die Relativitätstheorie löst diesen Widerspruch auf, indem sie die Elektromagnetik beibehält und grundlegende klassische Vorstellungen der Mechanik korrigiert.

Die Tragweite der Folgen der neuen Theorie ist so groß, dass auch weltanschauliche Probleme nicht unberührt bleiben. Deshalb bietet es sich an, den

späteren Ausführungen einen Abschnitt voranzustellen, in dem einige heuristische<sup>9</sup> Aspekte Beachtung finden.

Später dann soll von klassischen Vorstellungen ausgegangen werden, um beim Erarbeiten der relativistischen Effekte auch die Art und Weise, d.h. die Methode der Relativitätstheorie andeuten zu können.

Der Leser hat sich bereits mit der Masse als einer wesentlichen Eigenschaft der Materie bekannt gemacht. Masse trifft man überall dort an, wo sich Materie befindet. Das Erstaunliche ist, dass es im gesamten Weltall keinen Ort gibt, an dem zu einem beliebigen Zeitpunkt keine Materie wäre. Hier stellt sich die Frage: „Was ist Materie?“

### 3.1. Philosophisches

Das Wort Materie ist das allgemeinste Wort für alles, was uns umgibt. Das Salz in der Suppe, die Luft, die wir atmen, die Sonne, das Milchstraßensystem, das Feuer im Ofen, das Licht und auch der Strom aus der Steckdose, all das, uns Menschen und alles Leben natürlich eingeschlossen, ist Materie.

Man unterscheidet zwei Formen: stoffliche und nichtstoffliche Materie. Jeder beliebige Gegenstand ist ein Beispiel für stoffliche Materie. Und das Licht, die Wärmestrahlung, der Strom aus der Steckdose? Auch diese Dinge sind ohne Zweifel objektiv real und werden unter nichtstofflicher Materie eingeordnet.

Objektiv real heißt, dass die aufgezählten Erscheinungen existieren, auch wenn wir Menschen nichts davon wissen.

Dass wir uns mit den bekannten Realitäten überhaupt auseinandersetzen können, wird erst dadurch möglich, dass wir Sinnesorgane besitzen, die es erlauben, Erfahrungen zu sammeln.

Eine wesentliche Erfahrung, die der Mensch im Laufe seiner Entwicklungsgeschichte gemacht hat, besteht darin, dass alle Materie sich immer wieder verändert, sich entwickelt, ihre Erscheinungsformen wechselt.

Wir waren vorhin zu dem Ergebnis gekommen, dass das Licht sowohl nach dem Wellenmodell als auch nach dem Teilchenmodell beschreibbar ist. Vom jeweiligen Versuchsaufbau hängt ab, ob sich das Licht dem Physiker als elektromagnetischer Wellenvorgang oder als Teilchenstrom darbietet.

Hier liegt demnach ein solcher Fall vor: Ein und derselbe Sachverhalt erscheint uns einmal in der Form von nichtstofflichen Feldern, ein anderes Mal als stofflicher Teilchen.

Jeweils miteinander aber auch untereinander kann stoffliche und nichtstoffliche Materie ihre Erscheinungsform wechseln. Der Leser mag beispielsweise darüber nachdenken, wohin das Stearin einer abrennenden Kerze „verschwindet“. Kohlendioxid, Wasser, Ruß, aber auch Wärmestrahlung, Licht usw. werden ihm einfallen.

Insgesamt kennen wir eine Unmenge solcher Dinge, die wir mit dem Begriff „objektive Realität“ bezeichnen.

---

<sup>9</sup> Heuristik: Lehre von der Erkenntnisgewinnung

Albert Einstein sagte einmal: „Wissenschaft ist der Versuch, die chaotische Mannigfaltigkeit der Sinneswahrnehmung mittels eines Denksystems zu beschreiben.“

Wie viele Denksysteme sind nötig, um all unsere Kenntnisse über die Welt systematisieren zu können! Betrachten wir nur ein Glas Wasser:

Am Gefäßrand ist die Flüssigkeit nach oben gewölbt und die Oberfläche des Wassers ist genau waagrecht. In der Flüssigkeit schwimmen mit Sicherheit unzählige Mikroben umher. Streuen wir Salz hinein, wird das Wasser elektrisch leitfähig und schauen wir durch das Glas hindurch, so stellen wir fest, dass es wie eine Lupe wirkt. Eine Fülle von Beobachtungen!

Solche und unzählige andere Erfahrungen hat der Mensch gemacht und sich dabei im Laufe von Jahrhunderten einerseits immer allgemeineren Zusammenhängen zugewandt und andererseits das Einzelne immer genauer analysiert.

Jedes mal waren dazu irgendwelche Denkmodelle notwendig. Untersucht man, warum das Wasser elektrisch leitfähig wird, wenn man Salz hineinstreut, dann kann man keine Rücksicht auf vorhandene Mikroorganismen nehmen. Untersucht man die Mikroorganismen, dann interessiert erst mal nicht, warum das Wasser am Gefäßrand gewölbt ist.

Auf diese Weise sind verschiedene Zweige der Naturwissenschaft entstanden: Mathematik, Chemie, Physik, Biologie usw. Jede Wissenschaft hat ihre eigenen Denkmodelle und wir dürfen bei allen Unterschieden nicht vergessen, dass „ursprünglich“ alle Erscheinungen der Welt zusammenhängen, auch wenn uns manche Beziehung noch soweit hergeholt erscheint.

Der Glaube an diese „ursprüngliche Bedingtheit“ aller Naturgesetze, aller Objekte war ein Leitmotiv Albert Einsteins, das ihn dazu veranlasste, nach immer umfassenderen Zusammenhängen zu suchen.

Da jede Wissenschaft ihre eigenen Denkmodelle besitzt, wird klar, dass ein jedes in gewisser Weise eine Einschränkung darstellt.

Als Beispiel sei aus der Physik der Begriff „Atommodell“ genannt. Es gibt unterschiedliche Atommodelle und mit jedem kann man nur eine bestimmte Gruppe von Erfahrungen erklären. Für eine andere Beobachtung am gleichen Objekt „Atom“ wird wieder ein anderes Modell gebraucht. Außerdem gibt es in der Chemie ein weiteres Atommodell, bei dem nicht physikalische Dinge im Vordergrund stehen, sondern das zur Erklärung chemischer Dinge dient.

So sind in allen Naturwissenschaften die unterschiedlichsten Modelle entstanden, die aber alle nur ein Ziel verfolgen: Mit ihrer Hilfe sollen die mannigfaltigen Umwandlungen der Materie von einer Erscheinungsform in eine andere erklärt und beschrieben bzw. eine Ausgangsbasis zur Suche nach neuen Erkenntnissen geschaffen werden.

Was nützen uns aber alle Denkmodelle, wenn wir mit ihnen nicht auch das erfassen können, was - abgesehen von der Materie - noch existiert?!

Die objektive Realität erschöpft sich nicht in der Materie. Zwei ganz wesentliche Dinge haben wir bisher außer acht gelassen: **Raum** und **Zeit**. Schon die Philosophen der Antike haben viel über diese Probleme nachgedacht und dazu die unterschiedlichsten Auffassungen vertreten.

Raum und Zeit werden aber nicht nur von der Philosophie, sondern auch von der Physik untersucht. Wir wollen in diesem Kapitel sehen, welche Vorstellung

man hierzu im Rahmen der klassischen Physik hatte und wie sie durch die Relativitätstheorie ganz entscheidend verändert, modernisiert wurden.

Auch Raum und Zeit sind objektiv real, d.h. sie existieren außerhalb und unabhängig vom menschlichen Bewusstsein.

Das Thema Raum und Zeit ist so allgemein und vielschichtig, dass es sich nicht vermeiden lassen wird, nur auf grundlegende Gedanken einzugehen und zu Beginn in den Ausführungen dazu etwas weiter auszuholen.

### 3.2. Bezugssysteme und Addition von Geschwindigkeiten

Aus der Newton'schen Physik ist uns eine wichtige Grundvorstellung bekannt. Man nennt sie das „klassische Additionstheorem der Geschwindigkeiten“.

Was hat es damit auf sich?

Vielleicht ging es dem einen oder anderen Leser schon einmal so, dass er sich an Bord eines Ausflugsbootes befand, dem vorbeiziehenden Ufer nachblickte und es mehr oder weniger den Anschein erweckte, nicht das Schiff, sondern das Ufer bewege sich.

So widersinnig sich das vielleicht auch anhören mag, dieser Gedanke ist völlig richtig!

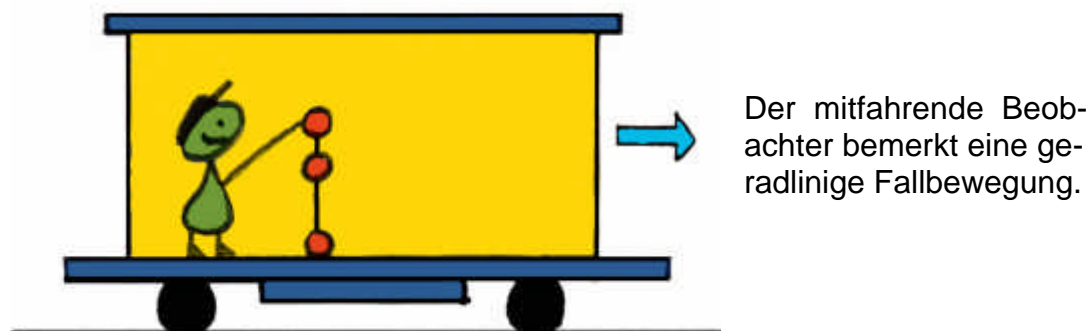
Man könnte sich nun mit einem Ausflugspartner darüber streiten, was sich in „Wirklichkeit“ bewegt, Schiff oder Ufer. Solche Streitereien hätten allerdings wenig Zweck, wenn man sich nicht vorher darüber einigen würde, welches Bezugssystem gewählt werden soll.

Daraus ist zu ersehen, dass zu jeder Angabe einer Bewegung sofort die Angabe eines anderen Objektes gehört, auf das die Bewegung bezogen wird. Dieses Objekt ist dann das zugehörige Bezugssystem.

Es muss erst eine Einigung darüber erzielt werden, was Bezugssystem und was Objekt der Untersuchung sein soll, bevor man eine Aussage über Bewegung oder Nichtbewegung trifft. Darüber hinaus sind auch das Wie und Wie viel von der Wahl des Bezugssystems abhängig.

Zur Verdeutlichung sei ein Beispiel angeführt: Der Leser fährt mit dem Zug eine geradlinige Strecke und lässt im Wagen einen Stein fallen. Er wird beobachten, dass sich der Stein geradlinig nach unten bewegt.

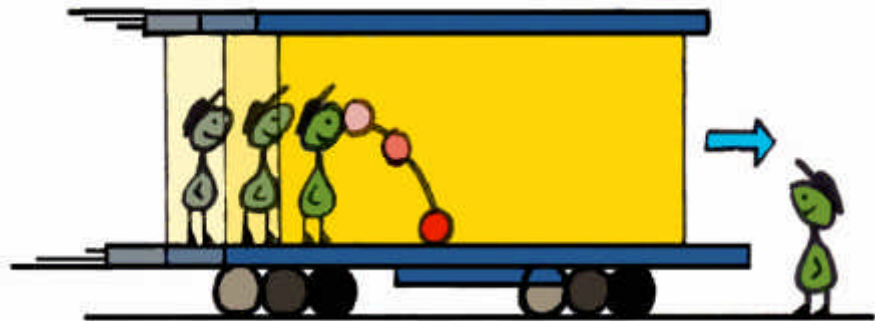
Abb.23



Ein Beobachter, der diese Übeltat vom Bahnsteig aus mitverfolgt, wird feststellen, dass der Stein eine Kurve beschreibt, wie dargestellt:

Abb.24

Der außenstehende Beobachter bemerkt eine gekrümmte Fallbewegung.



Von beiden Standorten aus erscheint ein und derselbe Vorgang unterschiedlich. Hieran erkennen wir noch einmal ganz deutlich die Notwendigkeit der Angabe eines Bezugssystems.

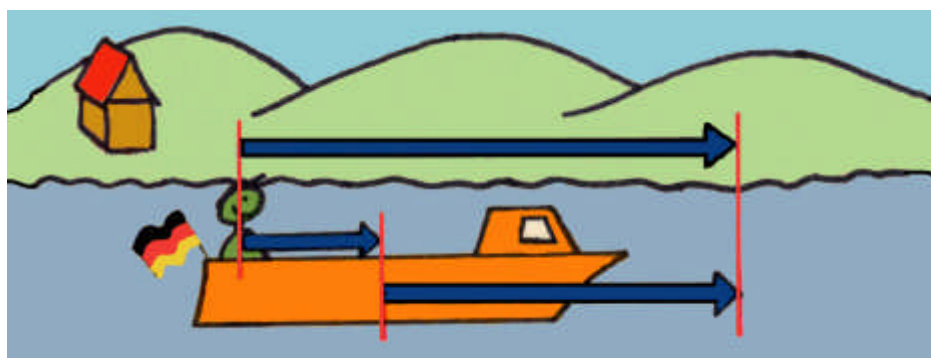
Bevor ein zweites Beispiel näher erwähnt wird, muss noch ein kleiner, aber wesentlicher Unterschied gemacht werden:

Spezielle Bezugssysteme nennt man „Inertialsysteme“. Darunter versteht man alle Objekte, die sich selbst gleichförmig, d.h. unbeschleunigt bewegen, oder auf die eine gleichförmige Bewegung bezogen wird. Inertialsysteme zeichnen sich also durch das Fehlen jeglicher Trägheitskräfte aus, weil sie selbst eine Trägheitsbewegung ausführen.

Wollen wir beschreiben, wie das erwähnte Ausflugsboot in Bezug auf die Erde (man sagt auch: „relativ zur Erde“) beispielsweise schneller wird, dann verwenden wir den Begriff des Bezugssystems und „befestigen“ es am Ufer. Das Boot ist jetzt das Objekt der Untersuchung. Wollen wir dagegen eine gleichförmige Bewegung darstellen, dann gebrauchen wir den Begriff „Inertialsystem“. Wird das Ufer als ein solches vorausgesetzt, so kann die uns interessierende Bewegung des Schiffes nur unbeschleunigt sein. Diesen Fall betrachten wir:

Die unbeschleunigte Bewegung des Schiffes möge sich relativ zum Ufer mit einer Geschwindigkeit von  $v = 50 \text{ km/h}$  vollziehen. Spaziert indessen eine Person auf dem Schiff unbeschleunigt mit  $v = 5 \text{ km/h}$  nach vorn, d.h. in Bewegungsrichtung des Schiffes, werden wir feststellen, dass sich die Person relativ zu unserem Beobachtungsstandort „Inertialsystem Ufer“ mit  $55 \text{ km/h}$  bewegt.

Abb.25



Dabei wurde die Geschwindigkeit der Person auf das Schiff bezogen. Anschliessend haben wir dieses Inertialsystem „Schiff“ verlassen und uns in das neue Inertialsystem „Ufer“ begeben, in dem vorher die Bewegung des Schiffes untersucht worden ist.

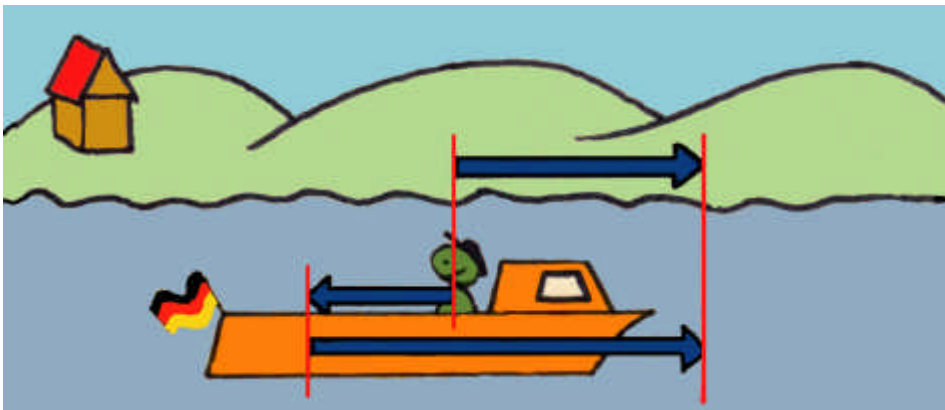
Hier addieren sich demnach die Geschwindigkeiten und wir schreiben diese sicher leicht einzusehende Tatsache auf:

$$v = v_1 + v_2$$

Dabei ist  $v$  die gesuchte Geschwindigkeit von 55 km/h des Fahrgastes im Inertialsystem „Ufer“,  $v_1$  seine Geschwindigkeit von 5 km/h in Bezug auf das Schiff und  $v_2$  ist die Relativgeschwindigkeit<sup>10</sup> des einen Inertialsystems „Schiff“ zum anderen Inertialsystem „Ufer“.

Verhält sich alles genauso, bloß die Person läuft nach hinten, d.h. entgegengesetzt zur Bewegungsrichtung des Schiffes, dann wird sie relativ zum Ufer eine Geschwindigkeit von  $v = 45$  km/h haben.

Abb.26



Der Wechsel des Inertialsystems (Schiff zu Ufer) geht wieder reibungslos vonstatten und die Formel lautet jetzt:

$$v = v_1 - v_2$$

Da ansonsten kein Unterschied zwischen beiden Fällen besteht, können wir die Gleichungen zusammenfassen zu:

$$v = v_1 \pm v_2$$

<sup>10</sup> Das ist eine Bezeichnung für Geschwindigkeiten, die auf etwas bezogen sind. Eigentlich ist jede Geschwindigkeit eine Relativgeschwindigkeit, denn zu jeder Bewegung gehört ein Bezugssystem.



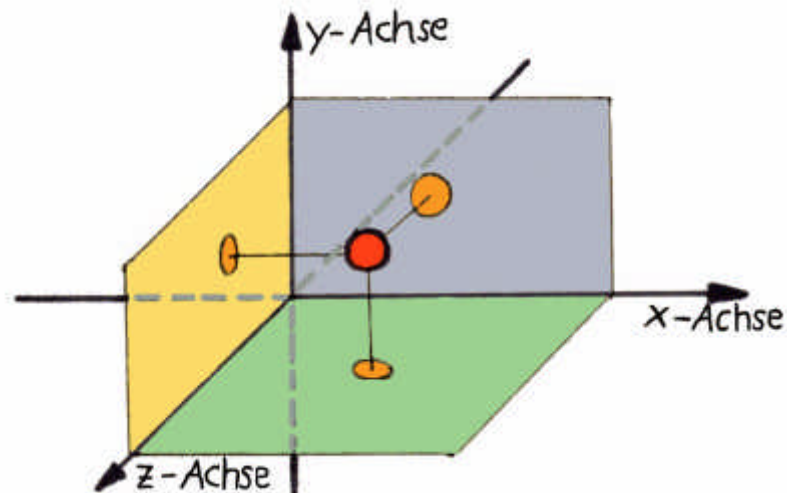
Es wird aber nicht generell subtrahiert, wenn sich zwei Objekte zueinander in entgegengesetzter Richtung bewegen. Entscheidend ist doch, ob sie das im gleichen Inertialsystem tun oder nicht.

Für den Fall, dass zwei Autos auf der Autobahn (beide relativ zur Erde) mit jeweils 100 km/h in entgegengesetzter Richtung fahren, hat das eine Fahrzeug in Bezug auf das jeweils andere eine Relativgeschwindigkeit von  $v = 200$  km/h.

Es erscheint nun sinnvoll, zum Schluss dieses Abschnittes noch auf die drei folgenden Gedanken aufmerksam zu machen:

1. Um die Möglichkeit zu haben, beliebige Bezugssysteme zu betrachten, erweist es sich als günstig, diese von irgend welchen Vergleichskörpern losgelöst zu betrachten. Ein von Körpern losgelöstes und beliebig wählbares Bezugssystem stellt man sich als ein Kreuz aus drei rechtwinklig aufeinander stehenden, beliebig langen Meßlatten vor. Die mathematische Bezeichnung dafür stammt aus der Geometrie und lautet: „rechtwinkliges Koordinatensystem“.

Abb.27



Ein Koordinatensystem besteht zwar nicht aus Meßlatten, sondern einfach aus Geraden, aber in der Physik sind Meßlatten erlaubt, weil man mit ihnen gleich eine Entfernung bestimmen kann. Eine „Koordinate“ ist dann der Abstand des Objektes bis zu einer der drei Ebenen, die von jeweils zwei Meßlatten aufgespannt werden.

2. Handelt es sich um eine unbeschleunigte Bewegung, so ist es gleichgültig, welches der möglichen Objekte man als Inertialsystem wählt. Wird es nicht angegeben, so sollte man es aber zumindest kennen. Oft bestehen darüber Unklarheiten, weil man unbewusst und stillschweigend die Erde als Inertialsystem voraussetzte. Das hat sich im Laufe der Geschichte entwickelt und ist auch durchaus möglich, oft sogar zweckmäßig. Man muss aber wissen, dass es auch anders geht.

3. Fahren zwei Autos in gleicher Richtung nebeneinander her und haben sie die gleiche Relativgeschwindigkeit zur Erde, so ist die Relativgeschwindigkeit zwischen ihnen gleich Null und ihre gemeinsame Geschwindigkeit zur Erde gleich  $v$ . Der Streit, ob sich die Fahrzeuge bewegen oder nicht, ist ähnlich dem der beiden Ausflugspartner auf dem Schiff und lohnt sich nicht. Die Frage: „Wie ist

es wirklich?“ ist unsinnig. Eine wahre oder falsche Aussage diesbezüglich kann bloß unter Hinzuziehung eines Bezugssystems getroffen werden und ist dabei reine Vereinbarungssache.

### 3.3. Das klassische Relativitätsprinzip

Wenn wir im vorangegangenen Abschnitt noch einmal nachlesen, dann fällt auf, dass bei der Berechnung der Geschwindigkeit der Person zwei Dinge eingingen: Die Geschwindigkeit der Person relativ zum Schiff und die Geschwindigkeit des Schiffes relativ zum Ufer. Wir wechselten dabei das Inertialsystem und dachten gar nicht daran zu überlegen, ob das auch erlaubt sei.

Genau das ist der Inhalt des klassischen Relativitätsprinzips: Es ist erlaubt!

Wenn wir das Inertialsystem gerade dort annehmen können, wo es sich für die jeweilige Betrachtung als am günstigsten erweist, dann muss eine Voraussetzung hierzu doch sein, dass die Veränderung des Inertialsystems keine Veränderungen der Gesetze der Mechanik nach sich zieht, denn die Gesetze der Mechanik sollen ja allgemeingültig sein, d.h. sie sollen in jedem beliebigen Bezugssystem die gleiche Form annehmen.

Ob wir das Schiff oder das Ufer als Inertialsystem benutzen - es gilt in beiden Systemen nach wie vor beispielsweise das allgemeine Gesetz der gleichförmigen Bewegung  $\mathbf{v} = d\mathbf{r}/dt$ .

Nicht nur die Geschwindigkeit kann von einem Inertialsystem in ein anderes übertragen werden, sondern auch der Weg. Die Zeit ist in beiden Inertialsystemen die gleiche.

Legt die Person auf dem Schiff den Weg  $\mathbf{s}'$  zurück und bewegt sich das Schiff relativ zum Ufer um den Weg  $\mathbf{s}''$  ( $= \mathbf{v} \cdot t^{11}$ ) weiter, so bewegt sich die Person in Bezug zum Ufer entsprechend dem Additionstheorem der Geschwindigkeit um den Weg

$$\begin{aligned} \mathbf{s} &= \mathbf{s}' + \mathbf{s}'' \\ \mathbf{s} &= \mathbf{s}' + \mathbf{v} \cdot t \end{aligned}$$

weiter. Die zweite Gleichung heißt „Transformationsgleichung“ und wurde nach Galileo Galilei benannt, da er zuerst diesen Zusammenhang entdeckte. Sie ist ein Symbol dafür, dass das Inertialsystem gewechselt wird.

Diese Formel darf nicht auf beliebige Bezugssystem angewendet werden, sondern nur auf Inertialsysteme.

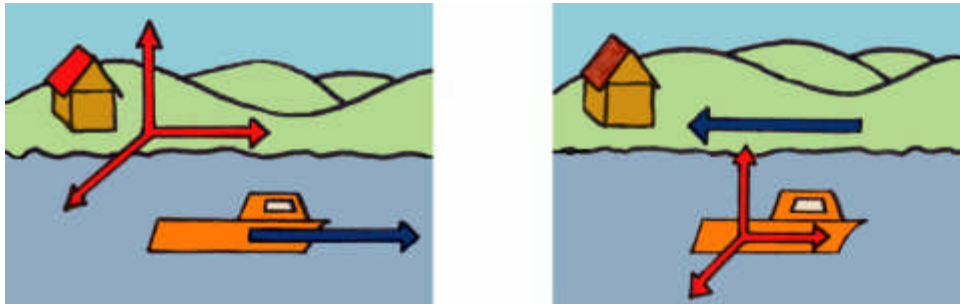
Jetzt sind wir in der Lage, das klassische Relativitätsprinzip exakt zu formulieren:

---

<sup>11</sup>  $v = s/t \rightarrow s = v \cdot t$ ,  $s'$  und  $s''$  wurden bloß zur Unterscheidung beider Wege eingeführt.

Die Gesetze der Mechanik bleiben beim Wechsel des Inertialsystems unverändert. Man sagt dazu auch, „sie seien gegenüber der Galilei-Transformation invariant“ .

Abb.28



Bis jetzt war bloß von Geschwindigkeiten, Längen, bewegten Körpern usw. die Rede. All das gehört in das Gebiet der Mechanik.

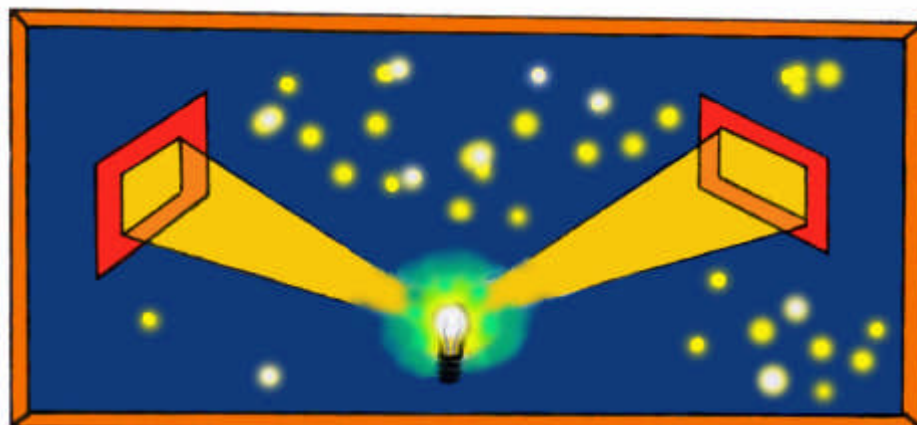
Es ist also wichtig zu erkennen, dass das so formulierte Relativitätsprinzip noch keinen allgemeinen Charakter besitzt, es ist ein Prinzip der klassischen Physik und gilt nur für die Mechanik. Ob wir diesem Prinzip wohl noch mehr Allgemeingültigkeit verleihen können?

### 3.4. Der klassische Zeitbegriff

Es soll und kann hier nicht der Versuch unternommen werden, den Begriff „Zeit“ philosophisch exakt zu erklären, das wäre ziemlich schwierig. Aber wir wollen ihn etwas näher erfassen.

Zu diesem Zweck stellen wir sogleich ein Gedankenexperiment an: Irgendwo im Weltall, in zwei voneinander entfernten und fest verankerten Punkten sind Bildschirme aufgestellt, die sich relativ zueinander nicht bewegen. In einem dritten Punkt, der von beiden Bildschirmen gleichweit entfernt ist, befindet sich eine Lichtquelle. Wir beobachten alles von der Lichtquelle aus, schalten diese ein und stellen fest, dass beide Bildschirme im gleichen Moment hell werden.

Abb.29



Es sind zwei Ereignisse zum gleichen Zeitpunkt eingetreten. Wie weit beide Schirme auch voneinander entfernt sein mögen, unter den beschriebenen Umständen werden sie immer gleichzeitig aufleuchten.

So gelangte man zu der Auffassung, dass ein gegebener Augenblick das gesamte Weltall umspannt.

Es liegt ein einheitlicher Zeitstrom vor, der jeden Punkt des Alls durchdringt und der überall gleichschnell voran kommt. Demnach ist es nicht notwendig, für die Zeitmessung irgendein Vergleichsnormale anzugeben, an allen Orten des Weltalls wird den zu einem bestimmten Augenblick eintretenden Ereignissen der gleiche Zeitpunkt zugeordnet. Man meinte:

Die absolute Zeit ist vom Ort unabhängig, sie bleibt von der räumlichen Lage der Dinge und vom physikalischen Geschehen unbeeinflusst.

Vielleicht wird an dieser Stelle besonders deutlich, dass der Begriff der Zeit ohne Vorgänge oder Ereignisse seinen Sinn verliert. Bis zu dieser Erkenntnis gelangte schon die klassische Physik, obwohl diese annahm, dass **e i n e** irgendwo fest verankerte Uhr zur Beschreibung **a l l e r** Naturvorgänge ausreicht.

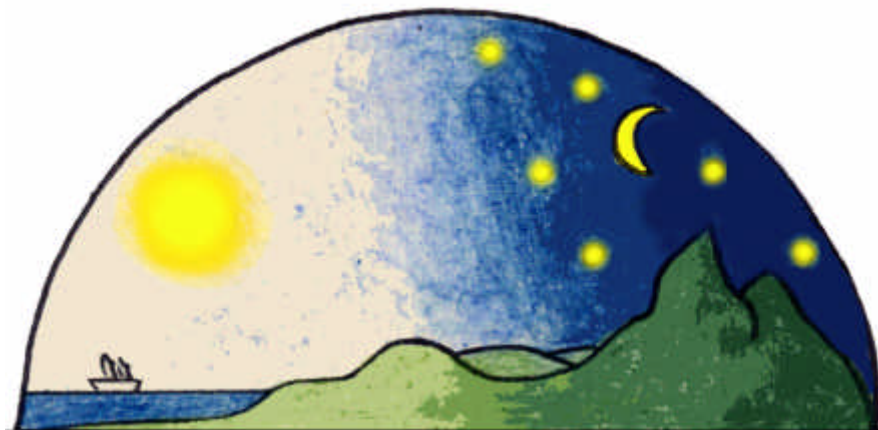
### 3.5. Klassische Vorstellungen über den Raum

Wie schon in 3.1. gesagt wurde, darf der Raum nicht völlig losgelöst von der Materie betrachtet werden. Es muss Materie im Raum vorhanden sein, die irgend einer Veränderung unterworfen ist.

Eine solche Veränderung oder Entwicklung wird in der Philosophie „Bewegung“ genannt, womit man aber nicht allein „Ortsveränderung“ meint. Natürlich ist die Ortsveränderung eine spezielle philosophische Bewegung, und zwar eine leicht untersuchbare, weshalb wir bei ihr noch verweilen wollen. Aber physikalische Bewegung (Ortsveränderung) und philosophische Bewegung (Entwicklung) dürfen nicht miteinander verwechselt werden.

In der Antike ging man von der absolut ruhenden Erde und von Grenzen des absolut ruhenden Weltalls aus.

Abb.30



Dadurch war man in der Lage, eine physikalische Bewegung zu definieren: Ein Körper bewegt sich, wenn er sich entweder der Erde oder der Grenze des Weltalls nähert. Diese Art Bewegung trug absoluten Charakter, denn die Bezugssysteme waren ja völlig fest und unveränderlich. So gelangten die alten Griechen zum Begriff des absoluten Raumes, in dem sie sagten: „Alle Orte, zu denen sich ein Körper hinbewegen kann, sind Elemente des Raumes. Der Raum ist die Gesamtheit dieser Orte.“

In Anbetracht des absoluten Charakters der Bezugspunkte „Erde“ und „Grenze des Weltalls“ nahmen der Begriff der Bewegung und damit auch der Raum-Begriff absolute Eigenschaften an.

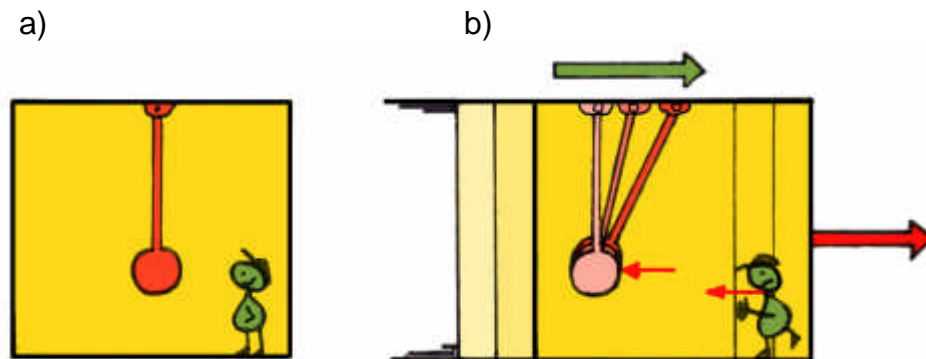
In der Newton'schen Mechanik wurde der umgekehrte Weg beschritten. Hier erklärte man zuerst eine absolute Bewegung. Doch woran wollte man erkennen, ob sich ein Körper absolut bewegt?

Darüber sollte der Ablauf der *inneren Vorgänge* eines Körpers oder eines Systems entscheiden.

Aber was versteht man unter inneren Vorgängen?

Der Leser stelle sich eine Kabine ohne Fenster vor. Kein Blick gelangt nach außen und ein darin befindlicher Beobachter muss darüber entscheiden, ob sich die Kabine bewegt. Er schaut sich um, bemerkt aber noch nichts von einer Bewegung. Da plötzlich drückt ihn eine Kraft mit sanfter Gewalt zur Seite. Erst jetzt lässt sich die Aussage treffen: „Die Kabine ist beschleunigt worden. Sie muss sich demnach entweder bewegen oder gerade noch bewegt haben.“ Die Kraft, auf Grund derer der Beobachter so entscheiden konnte, folgt aus der Trägheit und soll „Trägheitskraft“ genannt werden. (Man findet auch den Namen „Inertialkraft“ dafür. Das ist aber etwas verwirrend, da Inertialkräfte – d.h. Trägheitskräfte – gerade diejenigen sind, die in Inertialsystemen *n i c h t* auftreten. Dazu aber im nächsten Kapitel mehr.)

Abb.31



In der klassischen Mechanik spricht man aber nicht nur dann von absoluter Bewegung, wenn solche Trägheitskräfte auftreten, sondern auch dann, wenn sie ausbleiben. Trägheitskräfte treten nur in beschleunigt bewegten Bezugssystemen auf, aber auch eine unbeschleunigte Bewegung zweier Systeme zueinander musste sich ja in das Konzept der absoluten Bewegung einordnen lassen. In diesem Fall sollte das **NICHT**-Auftreten der Trägheitskräfte ein inneres Anzeichen für das **NICHT**-Vorhandensein einer absoluten Bewegung, also ein inneres Anzeichen für den Zustand der absoluten Ruhe der Kabine sein. Der Begriff

„**absolute** Ruhe“ würde hierbei dann bedeuten, dass dieser Zustand des Verrharrens bezogen wird auf etwas „**absolut** Unbewegtes“.

So die Überlegung Newtons, die wir derart zusammenfassen können, dass in der von ihm aufgestellten klassischen Mechanik alle Bewegungen als absolut eingeordnet wurden.

Soviel erst einmal zu den inneren Vorgängen.

Liegt eine absolute Bewegung vor, dann ist es möglich, den Weg zu beschreiben, den ein Körper während einer absoluten Bewegung zurücklegt.<sup>12</sup> Auf dieser Bahn werden Punkte markiert, die fest und unveränderlich sind, wenn die Bewegung absolut ist.

Daraufhin sagte man: „Der Raum ist die Menge aller unveränderlichen Punkte, zwischen denen eine absolute Bewegung möglich ist.“ „Raum“ ist damit nichts anderes, als das leere Vakuum, dieses seltsame „absolut Unbewegte“, auf das sich die absolute Bewegung bezieht.

Auf diese Weise erhielt der Raumbegriff in der klassischen Mechanik absoluten Charakter, ohne dass feste Bezugspunkte erklärt werden mussten. Deshalb bestand die Möglichkeit, auf so etwas wie „die Grenze des absolut ruhenden Weltalls“ zu verzichten, man sah jetzt den Raum als unbegrenzt, als unendlich an.<sup>13</sup>

### 3.6. Ein entscheidendes Experiment und seine Folgen

Im vorangegangenen Kapitel machten wir uns etwas mit der Erscheinung „Licht“ vertraut, um ein mit seiner Hilfe durchgeführtes Experiment verstehen zu können, das uns Aufschluss über die modernen Ansichten von Raum und Zeit geben soll. Dazu sei noch einmal an folgendes erinnert:

Das klassische Relativitätsprinzip sagt aus, dass beim Betrachten mechanischer Vorgänge das Inertialsystem beliebig gewechselt werden darf, ohne dass dabei eine Veränderung der Naturgesetze auftritt. Die Geschwindigkeit eines Objektes im neuen Inertialsystem lässt sich nach der Formel  $\mathbf{v} = \mathbf{v}_1 + \mathbf{v}_2$  berechnen. Dies lehrte uns das klassische Additionstheorem der Geschwindigkeiten.

Außerdem wissen wir, dass es für alles sich Bewegende eine physikalische Höchstgeschwindigkeit gibt, die möglicherweise die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ( $c = 3 \cdot 10^8$  m/s = 300 000 km/s) sein könnte.

Jetzt begeben wir uns wieder an Bord unseres Ausflugsbootes, das uns so gute Dienste geleistet hat, als wir das klassische Additionstheorem kennen lernten. Spaziert auf dem sich relativ zum Ufer bewegenden Schiff eine Person, dann können wir ohne Probleme deren Geschwindigkeit zum Ufer bestimmen.

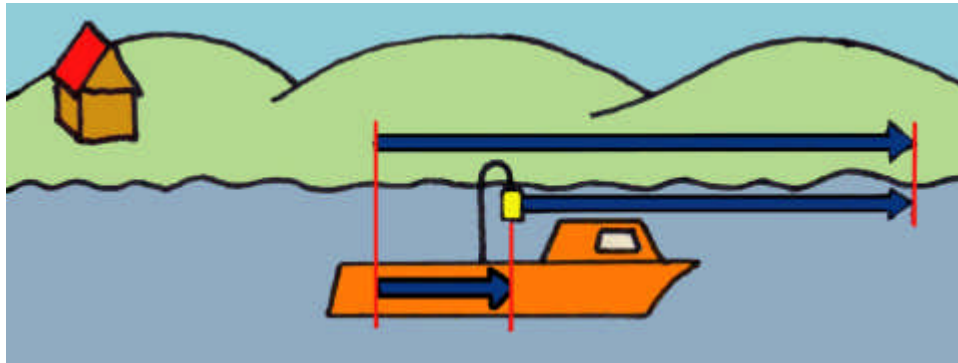
---

<sup>12</sup> Dabei wird als Bezugssystem generell das „absolut Unbewegte“ benutzt. Deshalb war im Rahmen dieser Überlegung die Notwendigkeit der Angabe eines Bezugssystems nicht gegeben.

<sup>13</sup> Die Begriffe „Unbegrenztheit“ und „Unendlichkeit“ müssen eigentlich unterschieden werden. Dies tut man aber in der klassischen Mechanik noch nicht.

Wie verhält es sich aber, wenn statt einer Person ein Lichtstrahl untersucht wird, der von einer Lampe auf dem Schiff ausgeht?

Abb.32



Hier müsste nach dem klassischen Additionstheorem die Geschwindigkeit des Lichtstrahls relativ zum Ufer ( $v$ ) gleich der Summe aus Lichtstrahlengeschwindigkeit auf dem Schiff ( $c$ ) und Geschwindigkeit des Schiffes zum Ufer ( $v_2$ ) sein. Aber damit ergibt sich doch  $v = c + v_2 > c$  ! Das wäre doch ein Widerspruch zu unsere Vermutung?!

Man gerät in eine problematische Situation, will man die Gesetze der Mechanik auf Licht anwenden. Doch nicht genug dieser Schwierigkeiten, die Physiker standen vor einem nächsten Problem:

Glaubte man doch lange Zeit, dass sich Licht im Vakuum allein gar nicht zu bewegen vermag, sondern dass überall ein Stoff vorhanden sein müsse, durch den sich das Licht ausbreiten kann, ähnlich der Luft, ohne die sich die Schallwellen nicht überall hin ausbreiten können.<sup>14</sup> Gäbe es einen solchen Stoff, der natürlich absolut unbewegt den Raum ausfüllen müsste, dann könnte er als absolutes Bezugssystem für jede Bewegung dienen. Diese Überlegung passt gut in das klassische Konzept vom absoluten Raum.

Aber niemand war es bisher gelungen, diesen Stoff zu entdecken, geschweige denn, seine Eigenschaften herauszufinden. Die Wissenschaftler sind ja mit dem Erreichten nie zufrieden. Man musste endlich Klarheit darüber bekommen, ob es jenen seltsamen Stoff wirklich gibt. Und wie so oft, sollte auch hier die Natur selbst diese Frage beantworten.

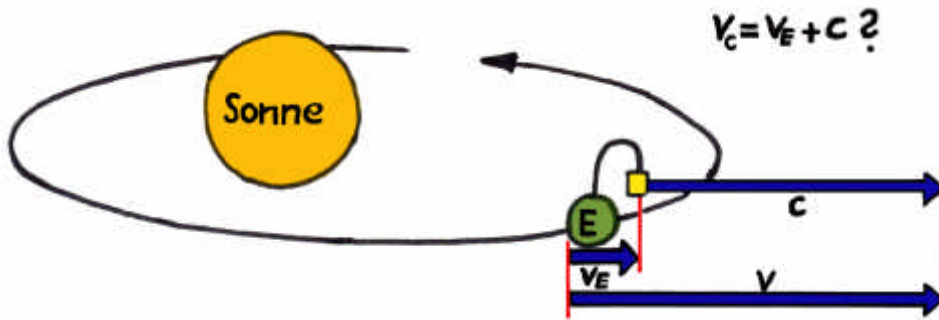
Der entscheidende Versuch wurde von Abraham Michelson (1852 – 1931), einem amerikanischen Wissenschaftler, das erste Mal im Jahr 1881 durchgeführt. Welche Überlegungen hatte Michelson zugrunde gelegt?

Geht man davon aus, dass es einen solchen, absolut ruhenden „Licht-Ausbreitungsstoff“ (auch „Äther“ genannt) gibt, dann muss er sich, wie eben erwähnt, auch als Bezugssystem eignen und hätte etwa die gleiche Funktion, wie in unserem Gedankenexperiment „Ausflugsboot“ das Ufer. Das Schiff selbst möge die Erde sein, die bekanntlich mit etwa 30 km/s die Sonne umkreist.

<sup>14</sup> Schallwellen können sich auch in Festkörpern und Flüssigkeiten ausbreiten. Zur Veranschaulichung lässt sich der zur Lichtausbreitung angeblich notwendige Stoff allerdings gut mit Gasen, wie der Luft vergleichen.

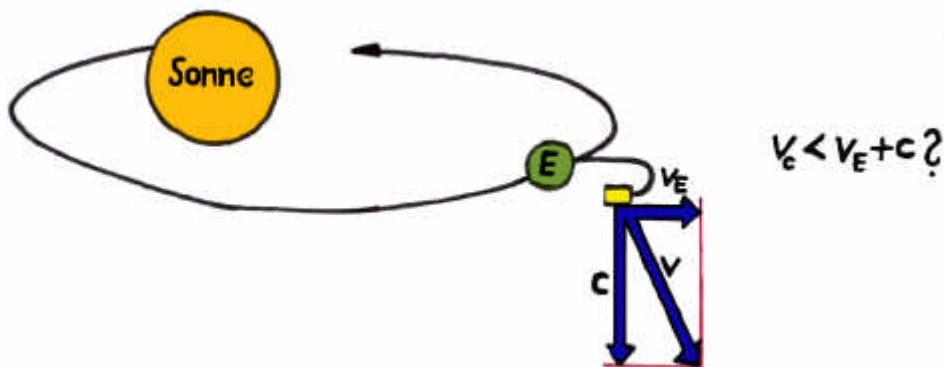
Beobachten wir nun einen Lichtstrahl in Bewegungsrichtung der Erde, dann müssten sich also die Geschwindigkeit der Erde (bezüglich des Äthers) und die Geschwindigkeit des Lichtes (relativ zur Erde) addieren und man bekäme eine Lichtgeschwindigkeit von 300 030 km/s (bezüglich des Äthers) heraus.

Abb.33



Untersucht man zum Vergleich einen Lichtstrahl, der quer zur Bewegungsrichtung der Erde verläuft, dann addieren sich die Geschwindigkeiten anders, die Geschwindigkeit des Lichtstrahls relativ zum Äther ist dann kleiner als die Summe aus Geschwindigkeit der Erde zum Äther und Geschwindigkeit des Lichtes bezüglich der Erde.

Abb.34

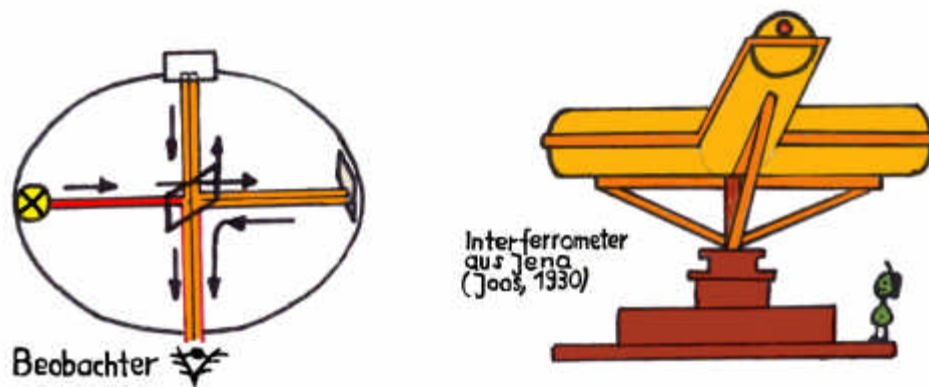


Es müssten also zwei unterschiedliche Lichtgeschwindigkeiten relativ zum Äther auftreten, zum einen  $v_{\text{Gesamt}} = c + v$  und zum anderen  $v_{\text{Gesamt}} < c + v$ . Aber wie kann man das herausbekommen?

Michelson baute einen Apparat, in dem ein Lichtstrahl durch einen halbdurchlässigen Spiegel in zwei Teilströme aufgeteilt wird. Beide verlaufen rechtwinklig zueinander, der eine in Bewegungsrichtung der Erde, der andere quer dazu. Beide Teilstrahlen müssen den gleichen Weg zurücklegen, sie werden durch Spiegel reflektiert und kommen anschließend zur Überlagerung. Michelson nutzte also die Welleneigenschaft „Interferenz“ des Lichtes aus. Dabei entsteht ein sogenanntes „Interferenzbild“. Auslöschung und Verstärkung lassen sich gut beobachten, wenn sie auf einem Bildschirm sichtbar gemacht werden. Den gesamten Versuchsaufbau nennt man „Interferrometer“.

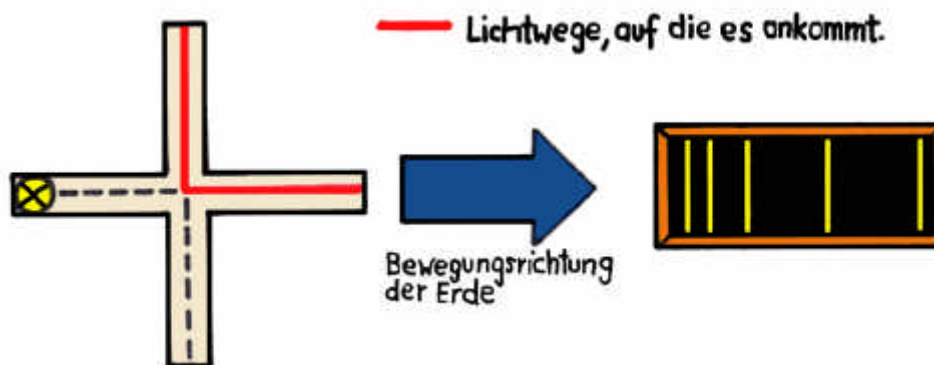


Abb.35



Wenn beide Teilstrahlen den gleichen Weg mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten zurücklegen (so lautet die Behauptung, falls es den Äther gibt), dann werden sie mit einem Zeitunterschied<sup>15</sup> am Bildschirm angekommen, es entsteht ein ganz bestimmtes Interferenzbild.

Abb.36



Dreht man aber den Versuchsaufbau derart, dass beide Teilstrahlen unter einem Winkel von jeweils  $45^\circ$  zur Bewegungsrichtung der Erde verlaufen, dann liegen für beide die gleichen Verhältnisse, die gleichen Geschwindigkeiten zum Äther vor und man beobachtet dieses Mal ein verschobenes Interferenzbild, weil beide Teilstrahlen dieses Mal ohne Unterschied am Bildschirm ankommen.

Abb.37



<sup>15</sup> Man sagt hierbei auch „Phasendifferenz“.

Auf diese Weise kann man die Geschwindigkeiten der beiden Teilstrahlen relativ zum Äther miteinander vergleichen.

Doch was ist das? Michelson drehte sein Interferrometer hin und her und nichts veränderte sich! Unter jedem Winkel das gleiche Interferenzbild!

Ein schwieriges Problem, man stand vor einem Rätsel. Viele Wissenschaftler der damaligen Zeit beteiligten sich an der Suche nach einer einleuchtenden Erklärung. Aber so unterschiedliche Meinungen es auch gab, das Ergebnis des Michelson-Versuches musste man anerkennen.

Die Natur ist unbestechlich und so konnte aus der Tatsache, dass sich das Interferenzbild bei der Drehung nicht veränderte, nur ein einziger Schluss gezogen werden:

Beide Teilstrahlen beim Michelson-Versuch sind gleichschnell, also ist die Lichtgeschwindigkeit unabhängig vom Inertialsystem konstant.

Aber warum ist das so? Gibt es etwa noch unbekannte Gesetzmäßigkeiten, die dafür sorgen?

Doch bevor wir uns den Erklärungen des Versuchsergebnisses widmen, dürfen wir den möglichen Schlussfolgerung hieraus nicht aus dem Wege gehen.

Was ist nun mit dem Äther, diesem rätselhaften „Licht-Ausbreitungsstoff“? Und was ist mit der Überlichtgeschwindigkeit von 300 030 km/s, die wir vorhin ausgerechnet hatten?

Fragen über Fragen, deren sicher interessante aber auch komplizierte Beantwortung Gegenstand des nächsten Abschnittes sein soll.

### 3.7. Das relativistische Additionstheorem der Geschwindigkeiten und das spezielle Relativitätsprinzip

Wir haben zwei klassische Prinzipien der Mechanik kennen gelernt: das Relativitätsprinzip und das Additionstheorem. Dabei traten noch keine Schwierigkeiten auf, beide Prinzipien vertrugen sich miteinander.

Anders dagegen beim Licht, das nicht in die Mechanik gehört, sondern im Rahmen des Wellenmodells ein elektromagnetischer Sachverhalt ist. Hier zeigt sich nach all dem, was wir bereits wissen, eine entscheidende Schwierigkeit: Rechnen wir mit dem klassischen Additionstheorem, dann erhalten wir Überlichtgeschwindigkeiten, was der Erfahrungstatsache aus Kapitel 2 widersprechen würde. Andererseits wäre es auch möglich, dass das Relativitätsprinzip für Licht nicht mehr gültig ist, der Wechsel des Inertialsystems hierbei nicht erlaubt und somit das Additionstheorem auf Licht nicht mehr anwendbar ist.

Albert Einstein erkannte, dass das Prinzip der Relativität allgemeingültig ist und demzufolge auch auf Licht anwendbar sein muss.

Das auf elektromagnetische Vorgänge erweiterte Relativitätsprinzip ist allgemeingültiger, als das klassische Relativitätsprinzip.

Wir wollen diesbezüglich im weiteren Text vom „speziellen Relativitätsprinzip“ sprechen, weil seine Gültigkeit zwar auf elektromagnetische Prozesse erweitert ist, sie sich aber nach wie vor nur auf spezielle Bezugssysteme, auf Inertialsysteme erstreckt.

Diese Verallgemeinerung des klassischen Relativitätsprinzips ist ein handfestes Resultat des Michelson-Experiments und anderer Versuche. Betrachtet man die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit als ein Gesetz, bedeutet das, dass beim Wechsel des Inertialsystems nicht nur die Gesetze der Mechanik, sondern auch die Gesetze der Elektromagnetik (besser: „Elektrodynamik“) unverändert bleiben.

Damit ist das Relativitätsprinzip also für Licht gültig, das klassische Additionstheorem der Geschwindigkeiten muss demnach falsch sein.

Jetzt stand Einstein vor der Aufgabe, eine neue Formel zu suchen, mit der man auch bezüglich des Lichtes die Geschwindigkeit beim Wechsel des Inertialsystems richtig berechnen kann.

Er fand folgenden Zusammenhang:

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

16

Diese Gleichung nennt man das „relativistische Additionstheorem der Geschwindigkeiten“.

Sicher ist der Leser mittlerweile sehr vorsichtig geworden und erkennt nicht von vornherein jede Behauptung als richtig an.

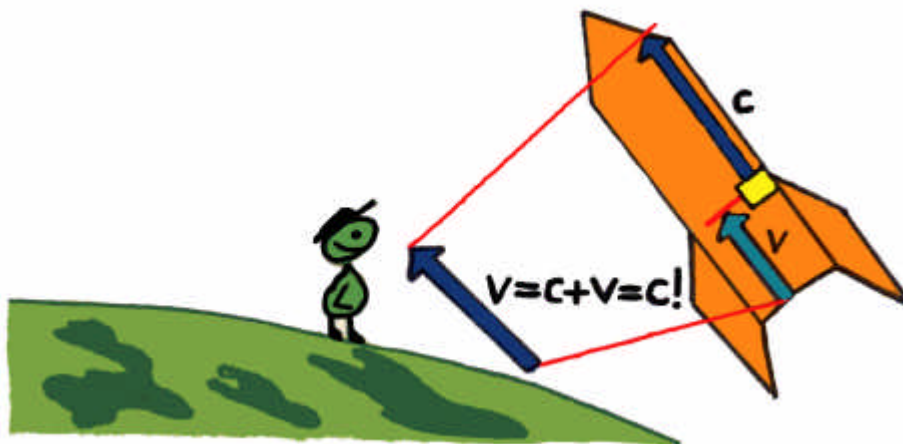
Also überprüfen wir die Gleichung: Sind die Geschwindigkeiten  $v_1$  und  $v_2$  sehr klein (d.h. sehr viel kleiner als die Lichtgeschwindigkeit), dann wird  $v_1 \cdot v_2 / c^2$  rund Null und man kann den Nenner etwa gleich 1 setzen. In dem Fall steht nichts anderes da, als das uns schon bekannte klassische Additionstheorem in der Form  $v = v_1 + v_2$ . Es ist jetzt zu einem Spezialfall des allgemeineren, relativistischen Additionstheorems geworden. Sind aber  $v_1$  und  $v_2$  beide möglicherweise = 200000 km/s, was ja durchaus erlaubt ist, dann ergibt sich als Ergebnis nicht  $v = 400000$  km/s, sondern  $v = 276923,08$  km/s. Also liefert diese Gleichung einen Wert, der kleiner ist als  $c = 300000$  km/s und damit stimmt das Ergebnis mit unseren Überlegungen überein.

Wenn wir uns diesen Tatbestand jedoch verdeutlichen, dann wird klar, dass er dem sogenannten „gesunden Menschenverstand“ völlig widerspricht:

---

<sup>16</sup> Diese Formel gilt nicht nur für Licht, sondern für alle physikalischen Prozesse. Hauptsächlich für solche, bei denen sehr große Geschwindigkeiten auftreten, die mit der Lichtgeschwindigkeit vergleichbar sind. Also ist diese Formel schon verallgemeinert. Für den in der nachfolgenden Abb. 38 dargestellten Fall ist  $c$  für  $v_1$  oder  $v_2$  eingesetzt worden.

Abb.38



Der Beobachter auf dem Planet wird die Geschwindigkeit des Lichtes von der schnell bewegten Quelle wieder bloß mit  $c$  bestimmen können, und nicht etwa mit  $c+v$  !!

In dem Raumschiff ist die Geschwindigkeit des Lichtstrahls  $= c$ . Aber wie schnell das Raumschiff auch fliegt, der Beobachter im Inertialsystem „Planet“ wird die Lichtgeschwindigkeit wieder bloß mit  $c$  bestimmen können! Das klingt zwar paradox, ist aber eine Tatsache, die durch das Experiment von Michelson bewiesen und bestätigt ist.

Das relativistische Additionstheorem der Geschwindigkeiten ist die erste Schlussfolgerung, die gezogen werden musste. Die zweite ist nicht so kompliziert und bezieht sich auf den Äther, den „Lichtausbreitungsmittel“, der angeblich das ganze Weltall gleichmäßig und unbewegt ausfüllen soll.

Es ist ganz leicht: Es gibt diesen Äther überhaupt nicht! In der Fachsprache sagt man dazu:

Elektromagnetische Wellen benötigen kein Trägermedium.

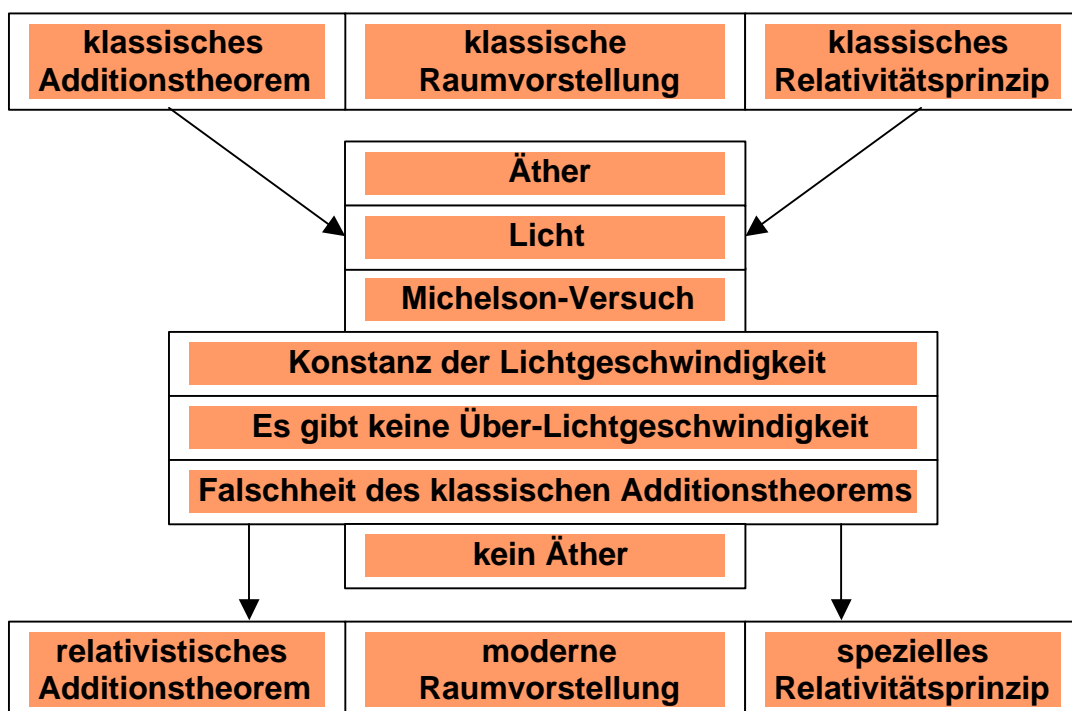
Gäbe es ein Trägermedium (Äther), so würde jede Bewegung darauf zu beziehen sein und dann besäße das klassische Additionstheorem der Geschwindigkeiten auch für Licht Gültigkeit. Doch der Michelson-Versuch überzeugte uns vom Gegenteil. Er erbrachte, dass die Lichtgeschwindigkeit konstant ist, wogegen das Vorhandensein des Äthers zusammen mit der Bewegung der Erde unterschiedliche Lichtgeschwindigkeiten ergeben müsste, was nicht zutrifft.

Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit und dass es keinen Äther gibt, war ein schwerer Schlag für die Vertreter des absoluten Raumes. Das Experiment des Physikers Michelson brachte die gesamten klassischen Vorstellungen vom absoluten Raum zu Fall.

Merken wir uns dazu die folgenden, zusammenfassenden Punkte:

- 1.) Zur Aufrechterhaltung der klassischen Raumvorstellungen nahm man an, dass es einen Äther gebe, der das gesamte Weltall absolut ruhend ausfüllt und der Ausbreitung des Lichtes diene.
- 2.) Bei der Untersuchung von Licht kommen zwei klassische Prinzipien in Widerspruch zueinander.
- 3.) Der Michelson-Versuch, der klären sollte, ob es den Äther gibt oder nicht, zeigte, dass die Lichtgeschwindigkeit konstant ist.
- 4.) Wenn in allen Inertialsystemen die gleiche Lichtgeschwindigkeit gilt, dann besitzt das Relativitätsprinzip auch für Licht Gültigkeit, dann bleibt das Gesetz von der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit beim Wechsel des Inertialsystems erhalten.
- 5.) Wenn das Relativitätsprinzip für Licht gültig ist, dann muss das klassische Additionstheorem falsch sein. Das relativistische Additionstheorem der Geschwindigkeiten haben wir genannt.
- 6.) Die Nicht-Anwendbarkeit des klassischen Additionstheorems auf Licht zeigt, dass kein bevorzugtes Bezugssystem existiert. Es gibt keinen Äther und damit ist die klassische Vorstellung vom Raum hinfällig.

Abb. 39



An dieser Stelle, lieber Leser, ergibt sich jetzt endlich die Möglichkeit, unsere Vermutung aus Abschnitt 2.7. zu überprüfen.

Betrachtungen an der Gültigkeitsgrenze der Newton'schen Mechanik stellten uns vor die Notwendigkeit, die Existenz endlicher Höchstgeschwindigkeiten für alle materiellen Objekte zu erklären. Dies gelang aber im Rahmen der Newton'schen Mechanik nicht, weswegen wir auf dem Gebiet der Elektrodynamik nach Erklärungen weiterforschten. Die Untersuchung eines Elektrons bestätigte zwar

unsere Gedanken, lieferte aber ebenfalls keine eindeutige Erklärung. Da jedoch das Licht im Rahmen des Wellenmodells elektromagnetischer Natur ist, gelangten wir zu der Vermutung, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes genau jene endliche Höchstgeschwindigkeit sein könnte.

Diese Vermutung kann also jetzt folgendermaßen bestätigt werden:

Gemäß dem Michelson-Experiment ergibt sich für den Teilstrahl, der entsprechend dem klassischen Additionstheorem eine Geschwindigkeit größer als  $c$  haben müsste, wieder bloß  $c$ .

Diesem Beobachtungsergebnis wird prinzipielle Bedeutung beigemessen. Die beobachtete Konstanz der Lichtgeschwindigkeit findet eine einfache Erklärung darin, dass es in der Natur eben keine Geschwindigkeiten größer als  $c$  gibt.

Die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum  $c = 300000 \text{ km/s}$  ist genau die vorhin begründete endliche Höchstgeschwindigkeit für alle materiellen Objekte.

Damit wird dem Leser jetzt klar, dass sich nichts schneller als das Licht im Vakuum bewegen kann.

Im jetzt folgenden Abschnitt wird darauf eingegangen, wie die beobachtete Konstanz der Lichtgeschwindigkeit zum Prinzip erhoben wurde und was für unglaubliche Konsequenzen dies haben wird.

### 3.8. Der relative Charakter des Raumes

In diesem Abschnitt ist es also soweit, es geht um die modernen Ansichten über den Raum.

Um diese jetzt verstehen zu können, mussten wir alle schwierigen Gedankengänge nachvollziehen, die Wissenschaftler wie Michelson anstellten. Wir mussten ebenso wie sie jene Umwege gehen, um zu unserem Ziel zu kommen und um verstehen zu lernen, wie widerspruchsvoll sich Wissenschaft manchmal entwickelt. Albert Einstein sprach in diesem Zusammenhang manchmal vom „Drama der Ideen“.

Wir wissen etwas über das Wesen des Lichts, und kennen den Versuch von Michelson, der mit Hilfe von Lichtstrahlen durchgeführt wurde und letztendlich zum Sturz der klassischen Raum-Auffassung führte.

Einstein verfiel nicht der Denkgewohnheit, eine Theorie schaffen zu wollen, mit der man das Versuchsergebnis von Michelson einleuchtend erklären könnte. Er fragte nicht: „Warum ist die Lichtgeschwindigkeit konstant?“, sondern er überlegte viel allgemeiner: „Wie muss eine Theorie beschaffen sein, damit sie u.a. die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit beinhaltet, aber darüber hinaus noch mehr Zusammenhänge aufdeckt und damit die ‚alte‘ Theorie als Spezialfall enthält?“

Der niederländische Physiker Hendrik Lorentz (1853 – 1928) war bezüglich der Begriffe „Raum“ und „Zeit“ noch den alten Ansichten verhaftet, ein Vertreter der Äther-Vorstellung. Er wollte die Tatsache, dass die Lichtgeschwindigkeit immer und überall gleich groß ist, so erklären, dass er auf den Äther nicht verzichten brauchte. Eigens zu diesem Zweck äußerte er eine Vermutung, die nur dazu

diente, das Michelson-Experiment zu erklären und darüber hinaus keinen weiteren Verwendungszweck hatte. Außerdem musste er hierfür noch eine zusätzliche Bedingung aufstellen.

Einstein war mit dieser Art und Weise nicht einverstanden. Seiner Meinung nach ist eine wissenschaftliche Theorie nur dann brauchbar, wenn sie mit mehreren Problemen in Zusammenhang gebracht werden kann und nicht nur ein einziges Experiment erklären soll. In diesem Sinne ist die Lorentz'sche Vermutung natürlich unbefriedigend.

Was hatte Lorentz denn behauptet?

Er hatte die ganz verrückt klingende Idee des Physikers Fitzgerald weiter verfolgt, dass jeder Körper, der sich absolut bewegt, eine seltsame Veränderung erfährt: Der Körper *verkürzt* sich in Bewegungsrichtung.

„Wie denn das?“, wird der Leser fragen. Aber zunächst einmal soll auf die Frage eingegangen werden: „Wozu denn das?“.

Nun, wird durch die Bewegung im Äther der in Bewegungsrichtung der Erde verlaufende Arm des Michelson-Interferrometers kürzer, dann kann man folgendes sagen:

Der in Bewegungsrichtung der Erde verlaufende Teilstrahl braucht mehr Zeit als der andere Teilstrahl, weil der Äther einen Einfluss auf die Geschwindigkeit hat. Der Äther lässt sich nur deshalb nicht nachweisen, weil er gleichzeitig die Verkürzung des entsprechenden Interferrometer-Armes bewirkt. Die durch den Äther entstandene Vergrößerung der Differenzzeit dieses Teilstrahles wird durch die ebenfalls vom Äther herrührende Verkürzung des Weges gegenüber dem anderen Teilstrahl genau ausgeglichen.

So könnten trotz der Existenz des Äthers beide Teilstrahlen in jeder Stellung des Interferrometers gleichzeitig am Bildschirm ankommen.

Diese zwei Effekte sollen sich also nach Lorentz' Meinung genau ausgleichen. Die Einwirkung des Äthers auf den Versuchs-Apparat führt demnach dazu, dass man trotz unterschiedlicher Lichtgeschwindigkeiten keine Verschiebung der Interferenz-Bilder beobachten kann.

So war Lorentz in der Lage, unter Hinzunahme der zusätzlichen Bedingung: „Der Äther beeinflusst die Länge sich absolut bewegender Körper.“ die beobachtete Konstanz der Lichtgeschwindigkeit erklären zu können, ohne dass er auf die Äther-Vorstellung verzichten brauchte.

Wie sich seiner Meinung nach die Länge eines Körpers durch den Äther verändern sollte, sagt folgende Gleichung aus (  $W( )$  bedeutet „Wurzel“):

$$L' = L \cdot W(1 - (v^2/c^2))$$

Dabei bezeichnet  $L$  die Länge eines Objektes, wenn es sich relativ zum Äther nicht bewegt,  $v$  ist die absolute Geschwindigkeit des Objektes und  $L'$  seine im Bewegungszustand verkürzte Länge.

Lorentz setzte diese Gleichung in den mathematischen Ansatz des Michelson-Versuchs ein und bekam tatsächlich das heraus, was man auch beobachtete, nämlich keinen Laufzeitunterschied der beiden Teilstrahlen.

Damit war Hendrik Lorentz sehr zufrieden – hatte er doch den Äther noch einmal retten können, oder?

Einige Zeit später veröffentlichte Einstein eine wissenschaftliche Arbeit, in der er auf das Problem einging und eine viel bessere Lösungsvariante anbot: Er verallgemeinerte das Relativitätsprinzip, woraus folgt, dass es keinen Äther geben kann. Damit waren Lorentz' Bemühungen einfach gegenstandslos geworden.

Einstein erhob die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit zum **Prinzip**.

So banal und einfach, wie diese Aussage vielleicht klingen mag, ist sie aber nicht. Es ist auch nicht so, dass der Wissenschaftler sich die Sache damit sehr leicht gemacht hätte, im Gegenteil. Das Einfache ist oft das Beste, aber man sucht häufig im Komplizierten nach der Lösung eines schwierigen Problems. Es bedurfte schon eines solchen Genies, wie Einstein, um diese Idee in eine wissenschaftliche und exakte Theorie umsetzen zu können.

Die Grundannahme dieser Theorie ist das Ergebnis eines Versuches und alles andere wird daraus abgeleitet.

Ganz erstaunlich ist nun aber auf den ersten Blick, dass sich in der Einstein'schen Theorie diese recht merkwürdige Längen-Verkürzung ebenfalls ergibt!!

Sie wird jedoch aus der Grundvoraussetzung **c = konstant** abgeleitet und dient nicht deren Erklärung.

Aber hatten wir nicht eben erst gesagt, dass dieser Lorentz'sche Versuch zur Rettung des Äthers zum Scheitern verurteilt war?

Genau, dabei bleibt es auch. Lorentz hatte zwar die richtige Formel gefunden, aber für ihn war die Anwendung dieser Formel nur ein mathematischer Trick ohne physikalischen Inhalt. Obendrein besaß die Lorentz'sche Längen-Verkürzung ja absoluten Charakter, sie war auf den Äther bezogen.

Die Einstein'sche Längenverkürzung dagegen ist nunmehr eine Folgerung. Dieser rein theoretische Schluss ist ganz natürlich und bedarf keiner weiteren Bedingung, wie bei Lorentz.

Formelmäßig unterscheiden sich die Einstein'sche und die Lorentz'sche Längenverkürzung nicht.

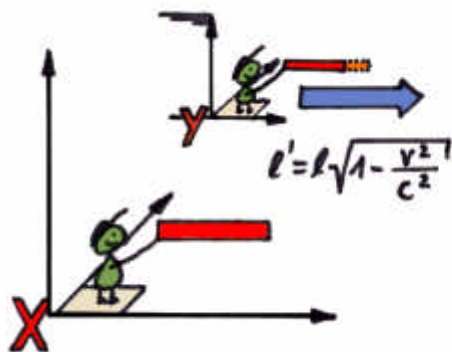
Das Wesentliche und Neue ist jedoch, dass in der Einstein'schen Theorie die Längenverkürzung nicht durch den Äther hervorgerufen wird. Diesen Begriff hatte Einstein einfach abgeschafft, weil er zur Beschreibung oder zur Erklärung der Natur nicht notwendig ist. Die Längenverkürzung trägt deshalb auch keinen absoluten Charakter mehr.

Wie kann man sich nun diesen schwer vorstellbaren Tatbestand veranschaulichen?

Befindet sich ein Beobachter **X** in dem einen Inertialsystem und relativ zu diesem bewegt sich ein Beobachter **Y** im anderen Inertialsystem, dann werden beide behaupten, dass der jeweils andere in Bewegungsrichtung verkürzt sei. Verdeutlichen wir uns das am Beispiel der Länge eines Stabes:

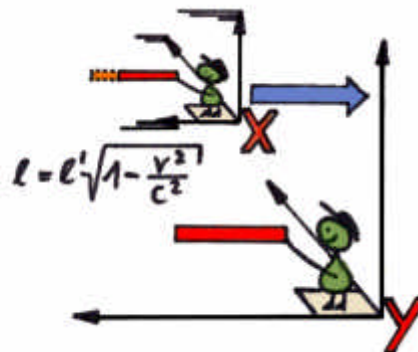


Abb.40 a)



Aus der Sicht des Beobachters X

b)



Aus der Sicht des Beobachters Y

Die Abbildung soll folgendes klarmachen:

Die Längenverkürzung ist nicht absolut, sondern relativ, d.h. sie ist von der Relativgeschwindigkeit abhängig. Es muss dabei berücksichtigt werden, von welchem Beobachtungspunkt aus man den zu untersuchenden Körper betrachtet. Die Längenverkürzung ist wechselseitig. Beobachter Y in Abb.40 a) hält den Stab seines Kollegen X nicht für länger als seinen eigenen, etwa weil im Vergleich dazu sein eigener Stab von X aus kürzer scheint. Vielmehr wird umgekehrt auch Beobachter Y den Stab des Herrn X als verkürzt wahrnehmen (40 b).

An dieser Stelle sei noch einmal daran erinnert, dass dieser Effekt nicht etwa in unserer alltäglichen Praxis beobachtbar ist. Er macht sich erst dann bemerkbar, wenn sehr, sehr große Relativgeschwindigkeiten untersucht werden.

Nun soll der Leser aber nicht auf die Idee kommen, sich in ein Raumschiff zu setzen und nach Erreichen sehr hoher Geschwindigkeiten beobachten zu wollen, wie ein mitgeführter Stab in Bewegungsrichtung immer kürzer wird, je schneller das Raumschiff fliegt. Dann läge ja ein innerer Vorgang vor, anhand dessen man ohne äußeres Bezugssystem eine absolute Bewegung feststellen könnte.

Dem ist nicht so. Die Längenverkürzung des Stabes, ebenso wie aller anderen Körper an Bord bzw. des ganzen Raumschiffes ist nur beispielsweise durch eine fotografische Moment-Aufnahme von einem *anderen* Bezugssystem aus feststellbar, relativ zu dem sich das Raumschiff schnell bewegt.

Im eigenen Inertialsystem kann ein Beobachter die Längenverkürzung nicht nur schwach oder gar nicht feststellen, sondern sie ist schlechthin nicht vorhanden, denn unser Beobachter bewegt sich ja nicht im eigenen Raumschiff so schnell.

Wir wollen jedoch zu unserem eigentlichen Anliegen in diesem Kapitel zurückkehren: Um die moderne Raum-Auffassung herzuleiten, schließen wir von der Relativität der Länge auf die Relativität des Raumes.

Ohne Zweifel ist jede Länge eine räumliche Entfernung, sie bringt den räumlichen Abstand zweier Punkte zueinander zum Ausdruck.

Wir erinnern uns: In der klassischen Physik war der Raum definiert worden als Menge aller Punkte, zwischen denen sich eine absolute Bewegung vollziehen kann. Ob eine absolute Bewegung oder ein absoluter Ruhezustand vorliegt,

darüber sollten laut Newton die inneren Vorgänge in einem System entscheiden.

Wir wissen bereits, dass jede Bewegung auf ein Objekt oder Koordinatensystem bezogen werden muss, dass es also keine absolute, sondern nur relative Bewegungen gibt.

Selbst wenn man als inneren Vorgang die Lichtausbreitung in einem System betrachtet, so gibt uns auch das keinerlei Hinweis auf den Bewegungszustand des Systems, denn für Licht ist ja das Relativitätsprinzip ebenfalls gültig.

Daraus folgt nun, dass es keine absoluten Bewegungen gibt. Welchen Sinn hat es dann aber mit ihnen den Begriff „Raum“ definieren zu wollen?

Es hat keinen Sinn. Und diese Tatsache steht in engem Zusammenhang mit der Relativität der Länge:

Es gibt keine von vornherein festgelegten Entfernungen zwischen Punkten des Raumes. Welche Entfernungen ein Beobachter messen kann, hängt davon ab, mit welcher Relativgeschwindigkeit er sich zu den interessierenden Punkten bewegt.

Eine Geschwindigkeit jedoch kann nur ein materielles Objekt besitzen. Daran wird deutlich, in welcher enger Beziehung diese Objekte und ihre Relativgeschwindigkeiten zu den räumlichen Abmessungen der Dinge stehen.

Abmessungen im Raum werden bestimmt durch die Relativgeschwindigkeiten materieller Objekte. Damit sind Raum und Materie in einen gewissen Zusammenhang gebracht.

Fassen wir noch einmal zusammen:

Im vergangenen Abschnitt beschäftigten wir uns mit dem Michelson-Experiment und seinen Folgen. Wir verstanden, wie aus der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit folgte: Es gibt keinen Äther. Es wurde deutlich, wie der Michelson-Versuch die Unzulänglichkeit der klassischen Raum-Vorstellungen an's Tageslicht brachte.

In diesem Abschnitt gingen wir von der Gegenüberstellung der Lorentz'schen und Einstein'schen Ansicht aus. Wir bewerteten den Versuch Lorentz', mittels eines mathematischen Tricks trotz der Ergebnisse des Michelson-Experiments die überholte Äther-Vorstellung aufrecht zu erhalten.

Eine wesentlich vollkommener Lösung fand Albert Einstein. Er setzte lediglich voraus, dass die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum eine Naturkonstante ist (und damit unabhängig vom Inertialsystem und dessen Relativgeschwindigkeit).

Die von Lorentz gefundene, aber von ihm physikalisch falsch gedeutete Formel für die Längenverkürzung (man sagt auch „Längenkontraktion“<sup>17</sup>) dient nunmehr nicht länger zur Erklärung der Vorgänge beim Michelson-Versuch, sondern folgt durch mathematische Überlegungen aus der Tatsache, dass **c = konstant** ist.

---

<sup>17</sup> kontrahieren.....zusammenziehen

Die Längenkontraktion erhält damit physikalisch realen Inhalt. Sie ist wechselseitig und selbstverständlich im eigenen Bezugssystem nicht vorhanden. So folgt aus der Relativität der Länge (als räumlichen Abstandes zwischen zwei Punkten des Raumes) die Relativität des Raumes, der dadurch seinen absoluten Charakter verliert.

An der Stelle wurde deutlich, dass jegliche Entfernung im Raum von den Relativgeschwindigkeiten abhängt, mit denen sich Bezugssysteme (hier speziell: Inertialsysteme) gleichförmig zueinander bewegen. Raum und Materie sind damit in einen Zusammenhang gebracht.

### 3.9. Wichtiges über die Gleichzeitigkeit

Nachdem wir unter 3.6. das Michelson Experiment kennen lernten, folgten im Abschnitt 3.7. Gedanken zum relativistischen Additionstheorem der Geschwindigkeiten und anschließend, im Abschnitt 3.8., machten wir uns mit der wohl erstaunlichsten Folgerung der Relativitätstheorie, der Längenkontraktion bekannt. All diese Überlegungen ergaben sich aus der Tatsache, dass die Lichtgeschwindigkeit im leeren Raum<sup>18</sup> grundsätzlich unabhängig von der Wahl des Inertialsystems, also immer konstant ist.

Wenden wir uns nunmehr einer weiteren hochinteressanten Schlussfolgerung dieser Tatsache zu: Die Überschrift verrät es schon - es geht um die Gleichzeitigkeit zweier Ereignisse.

Fast jeder Mensch besitzt eine Uhr, man weiß eigentlich immer, „wie spät es ist“. Jedoch wird der Leser feststellen, dass es sehr schwer ist, auf die scheinbar so banale Frage: „Was ist Zeit?“ eine exakte Antwort zu finden.

Schon im Altertum dachten berühmte Gelehrte darüber nach und kamen zu Ansichten, die im Abschnitt „Der klassische Zeitbegriff“ kurz angedeutet wurden.

Warum ist es jetzt erneut erforderlich, über den Begriff der Zeit nachzudenken?

Im ersten Kapitel hieß es: „Die Geschwindigkeit ist also eine Aussage über die Lageänderung während eines bestimmten Zeitabschnittes...“. Bewegungen definieren sich immer über den Zusammenhang zwischen der zurückgelegten Entfernung und der dazu benötigten Zeitspanne. Bewegungen haben wir als Relativ-Bewegungen verstehen gelernt, Entfernungen haben sich ebenfalls als relativ erwiesen. Muss dann nicht auch die Zeit relativ sein? Unterliegen auch Zeitabschnitte bei großen Geschwindigkeiten der Relativität?

Bevor wir jedoch an die Beantwortung dieser Fragestellung herangehen, sei noch einmal darauf hingewiesen, dass ein unbekanntes Wissensgebiet nicht immer mit herkömmlichen Methoden erschlossen werden kann. Uns wird es nichts mehr nützen, nur von bekannten, als richtig hingenommenen Voraussetzungen auszugehen und aus ihnen neues Wissen ableiten zu wollen.

Machen also auch wir uns die Methode zu eigen, mit der schon Einstein bei der Aufstellung der Relativitätstheorie die bis zu Beginn des 20. Jahrhunderts gesammelten Erkenntnisse einer kritischen Überprüfung unterzog. Zweifeln wir

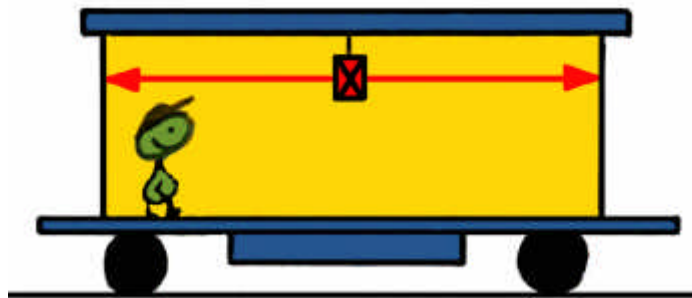
---

<sup>18</sup> Wirklich leeren Raum gibt es nicht. Selbst in den entferntesten Winkeln des Weltalls kommen noch Reste verdünnter Gase vor. Das ändert aber nichts an der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit.

am scheinbar Selbstverständlichen, denken wir ohne Vorurteile noch einmal über Gewöhnliches nach, als sei es uns völlig neu. Mit dieser Methode können wir uns die modernen Auffassungen über den Ablauf der Zeit erschließen.

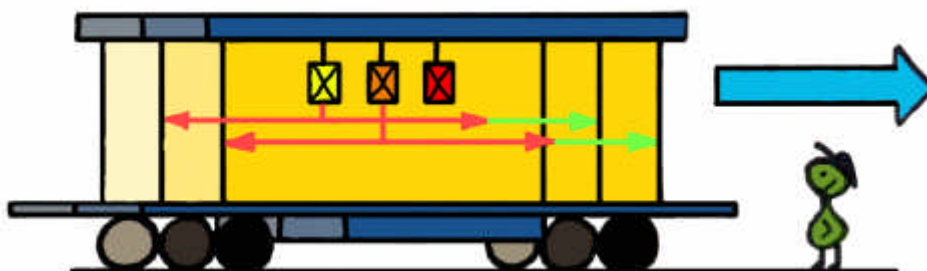
Ein Gedankenexperiment soll uns dabei helfen. Es wurde von Einstein, der sehr um die Popularisierung seiner Theorie bemüht war, selbst angeführt: Der Leser stelle sich einen Eisenbahnwagen vor, in dessen Mitte sich eine Lichtquelle befindet und der sich mit der Relativgeschwindigkeit  $v$  bewegt. Beobachter  $X$ , der sich im Wagon befindet und dort die Lampe einschaltet, wird feststellen, dass das Licht die hintere und vordere Wagonwand gleichzeitig erreicht.

Abb.41



Für den Beobachter Y, der sich nicht mitbewegt, sondern vom ruhenden Bahnsteig aus die Geschehnisse verfolgt, stellen sich die Vorgänge dagegen so dar: Während der Ausbreitung des Lichtes rückt der Wagon ein Stück weiter. Dadurch muss ein im Augenblick des Einschaltens ausgesandter Lichtstrahl in Bewegungsrichtung (also nach vorn) einen etwas längeren Weg – dagegen ein Lichtstrahl entgegengesetzt zur Bewegungsrichtung (also nach hinten) einen etwas kürzeren Weg zurücklegen.

Abb.42



Dem nach vorn verlaufenden Lichtstrahl eilt die Wagonwand davon, dem nach hinten verlaufenden Lichtstrahl eilt die Rückwand entgegen. Damit kommt der ruhende Beobachter Y zu dem Ergebnis, dass das Licht die vordere und hintere Wagonwand nicht gleichzeitig, sondern die Rückwand früher erreicht.

Weil sich Beobachter **X** im bewegten, aber Beobachter **Y** im ruhenden Inertialsystem befanden, deshalb hängt das Beobachtungsergebnis von der Wahl des Inertialsystems ab.<sup>19</sup>

Somit hat sich der Begriff der absoluten Gleichzeitigkeit, der im Rahmen der klassischen Zeit-Auffassung vertreten wurde, als falsch herausgestellt.

Nennen wir das Auftreffen eines Lichtstrahls auf die Wagonwand ein „physikalisches Ereignis“, so können wir formulieren:

Ob zwei physikalische Ereignisse gleichzeitig stattfinden oder nicht, ist abhängig vom Inertialsystem, von dem aus die Ereignisse betrachtet werden. Damit erhält der Begriff der Gleichzeitigkeit relativen Charakter.

Auch hier ist die Frage: „Wie ist es denn nun wirklich?“ zwecklos. Unterschiedlich schnell bewegte Beobachter kommen zu unterschiedlichen Ergebnissen und beide haben in vollem Umfang recht.

An der Stelle soll eine kurze Ausführung über den weltanschaulichen Hintergrund unseres Vorgehens Platz finden.

Unser Ausgangspunkt war nicht die überholte Vorstellung von der absoluten Gleichzeitigkeit, sondern wir durchdachten das Problem erneut und ohne Vorurteile anhand des beschriebenen Gedankenexperiments. Diese Methode führte uns zu einem neuen Ergebnis, indem die (gedachten) Beobachtungen der Personen **X** und **Y** zur Erkenntnis verallgemeinert wurden. Diesen Schluss von einer einzelnen Tatsache zu einer allgemeinen Aussage nennt man „induktiven Schluss“. Jedoch bedürfen induktiv gewonnene Erkenntnisse der experimentellen Bestätigung, weil man sich vergewissern muss, ob diese Verallgemeinerung auch der Wirklichkeit entspricht. Diese experimentelle Bestätigung soll neben einigen anderen noch im letzten Kapitel beschrieben und erklärt werden.

Doch zurück zum Begriff der Gleichzeitigkeit. Er trägt also relativen Charakter. Aber was bedeutet das?

Es bedeutet, dass im Bereich extrem hoher Relativgeschwindigkeiten zu jeder Äußerung über Gleichzeitigkeit oder Nichtgleichzeitigkeit die Angabe eines Beobachtungsstandortes gehört.

Es ergibt sich so die Möglichkeit, unsere Frage: „Trägt auch die Zeit relativen Charakter?“ zu beantworten.

Also vergleichen wir die Beobachtungen der zwei Personen **X** und **Y**. Person **X**, die sich im Wagon befindet, kennt den Weg **s** von der Lampe bis zur vorderen Wagonwand und weiß, dass die Lichtgeschwindigkeit konstant ist. Hieraus lässt sich die Zeit berechnen, die der Lichtstrahl von der Lampe bis zur vorderen Wagonwand braucht.

Für die am Bahnsteig stehende Person **Y** aber hat das Licht nach vorn einen längeren Weg zurückzulegen (Abb.42), obschon auch hier die gleiche Lichtgeschwindigkeit gilt.

---

<sup>19</sup> Beobachter **X** mit der Lampe kann sich auch im ruhenden Inertialsystem befinden, denn das Relativitätsprinzip ist gültig. Dabei würden sich zwar die Beobachtungsergebnisse vertauschen, doch der Unterschied zwischen ihnen bleibt erhalten.

Jeder weiß aber: Einen längeren Weg mit der gleichen Geschwindigkeit zurückzulegen, heißt: Es wird mehr Zeit benötigt. Und so muss Person **Y** am Bahnsteig feststellen: Vom ruhenden Inertialsystem aus gesehen vergeht mehr Zeit, bis der Lichtstrahl die vordere Wagonwand erreicht hat.

Aber ist das nicht paradox?

**X** und **Y** sind ebenfalls überrascht. Zur Kontrolle nehmen beide eine Stoppuhr zur Hand und messen noch einmal nach. Person **X** stoppt genau und liest (beispielsweise) 2 s ab. Aber Person **Y** ist auch nicht ungeschickter. Für sie vergehen bis zum Auftreffen des Lichtstrahls 3 s, weil der Weg des Strahls von hier aus gesehen länger, aber seine Geschwindigkeit die gleiche ist, wie die, die Beobachter **X** zugrunde legen muss.

Soweit, sogut – aber nun müssen wir unseren Gedanken einfach nur noch konsequent zuende denken: Wenn Person **Y** am Bahnsteig zwischen zwei physikalischen Ereignissen mehr Zeiteinheiten zählt, als Person **X** im Wagon, dann ist das gleichbedeutend damit, dass für **Y** die Zeit schneller vergeht, als für **X**. Die Uhr am Bahnsteig muss schneller gelaufen sein, weil sie zwischen diesen beiden Ereignissen mehr Zeiteinheiten gezählt hat.

Diese Überlegungen sind logisch völlig richtig und das paradoxe Ergebnis nicht von der Hand zu weisen:

**Tatsächlich vergeht die Zeit im schnellbewegten Inertialsystem langsamer, als im ruhenden Inertialsystem.**

Somit hat sich unsere phantastisch scheinende Vermutung bestätigt und zusammenfassend halten wir fest:

Aus dem Zusammenhang zwischen konstanter Lichtgeschwindigkeit und dem relativen Charakter der Länge (des „Weges“) als räumlicher Abmessung leiteten wir die Frage ab, ob der Ablauf der Zeit daraufhin ebenfalls relativ sein müsse, d.h. auf bestimmte Inertialsysteme bezogen werden muss.

Bei der Beantwortung bedienten wir uns eines Gedankenexperimentes. Dadurch kamen wir zu dem Ergebnis, dass für den ruhenden Beobachter der vom Lichtstrahl zurückzulegende Weg länger ist und demzufolge zwischen Aussenden und Auftreffen mehr Zeiteinheiten gezählt werden, als für den mitbewegten Beobachter. Das ist gleichbedeutend damit, dass am Bahnsteig die Zeit schneller vergeht, als im Wagon.

Aber da wir alles kritisch überprüfen wollen, scheut sich der Leser nicht, noch einmal zu zweifeln: „Ist es nicht etwa bloß die Uhr des Herrn **X**, deren Gang durch die hohe Geschwindigkeit irgendwie beeinflusst werden könnte?“

Nein, nicht die Uhren unterscheiden sich und die Zeit selber vergeht gleichmäßig, sondern es ist tatsächlich die Zeit, deren Ablauf durch die Relativbewegung der beiden Inertialsysteme beeinflusst wird. Dazu kann man sich auch vorstellen, dass **X** und **Y** als Zeiteinheiten nicht unbedingt die auf der Stoppuhr ablesbaren Sekunden, sondern eben so gut beispielsweise ihre Herzschläge

zählen könnten (vorausgesetzt sie hätten im *gleichen* Inertialsystem auch den *gleichen* Puls.) Sie werden auf diese Weise zum selben Ergebnis kommen.<sup>20</sup>

Zum Schluss wollen wir uns noch kurz mit einem abenteuerlichen, aber durchaus richtigen Gedanken beschäftigen, den der Leser sicher schon einmal gehört hat. Bekannt als „Zwillingsparadoxon“, handelt es sich dabei um folgendes: Von einem Zwillingpaar startet der eine zu einer Weltraumfahrt. Sein Raumschiff jagt mit 99,99% der Lichtgeschwindigkeit durch's All. Alles verläuft normal, unser Held kann keine Veränderungen des Zeitmaßstabes feststellen, weder an der Uhr, noch an sich selber. Sein Pulsschlag, Schlafbedürfnis, Hungergefühl etc. stellen sich regelmäßig ein.

Nach Bordzeit ist ein Jahr vergangen und unser Held kehrt zur Erde zurück, um sich von seinem zurückgebliebenen Zwillingbruder bejubeln zu lassen.

Doch es ist kaum zu fassen: Wer ihm entgegen kommt, ist ein 90jähriger Greis! Er erkennt seinen Zwillingbruder fast nicht wieder, auf der Erde sind 70 Jahre wie im Flug vergangen!

So schwer es dem Leser womöglich auch fällt, diese unheimlichen Geschehnisse für wahr zu halten: Physikalisch gesehen ist die Richtigkeit solcher Gedanken nicht von der Hand zu weisen.

Der durch das All gereiste Zwillingbruder befand sich in einem Bezugssystem, das relativ zur Erde sehr schnell bewegt war. Wenden wir unser bereits erworbenes Wissen über die Zeitdehnung hier an, so müssen wir sagen, dass im Raumschiff (als schnell bewegtem Bezugssystem) die Zeit langsamer verging, als auf der Erde und somit der hier verbliebene, weniger reisefreudige Zwillingbruder schneller alterte.

Auf diese Weise findet ein phantastischer Gedanke seine anerkannte theoretische Begründung.

„Aber könnte nicht auch der auf der Erde verbliebene Zwillingbruder jung bleiben und der Raumfahrer schneller alt werden?“

So wird der Leser fragen, wenn er an das Relativitätsprinzip denkt, wonach ja alle Inertialsysteme gleichberechtigt, also ‚vertauschbar‘ sind.

„Könnte man nicht mit vollem Recht das Raumschiff als ‚ruhend‘ annehmen und die Erde als ‚schnell bewegt‘?“

---

<sup>20</sup> Dieser Umstand wird auch durch eine andere Überlegung noch bestätigt: Jeder Zeitablauf ist gekennzeichnet durch eine unumkehrbare Reihenfolge einmaliger Zeitpunkte. Jeder Zeitpunkt aber erhält seinen physikalischen Inhalt nur durch den Vergleich mit entsprechenden Zeitpunkten, die durch den Gang von Uhren festgelegt werden. Zum Beispiel verbirgt sich hinter der Aussage: „Es ist 10 Uhr.“ nichts anderes als der Vergleich (also eine Aussage über die Gleichzeitigkeit) zwischen dem gemeinten Zeitpunkt des physikalischen Geschehens der Umgebung und dem Augenblick, in dem die Zeiger des Meßinstrumentes „Uhr“ die 10-Uhr-Stellung erreichten.

Die vielfältigen, ungleichmäßigen physikalischen Prozesse der Umgebung werden verglichen mit dem gleichmäßigen Gang (Schwingung einer Unruhe oder eines Quarzes) einer (ruhenden) Uhr. Mit der Aussage „14 Uhr begann es zu regnen.“ meint man nämlich, dass es genau in dem gleichen Zeitpunkt zu regnen begann, in dem die Uhrzeiger „14 Uhr“ anzeigten.

An diesen Beispielen wird deutlich, dass eine Aussage über die Zeit immer eine Aussage über die Gleichzeitigkeit zweier physikalischer Ereignisse ist. Das Ereignis „Die Zeiger der Uhr erreichen die 14-Uhr-Stellung.“ und das Ereignis „Es beginnt zu regnen.“ fanden gleichzeitig statt. Wenn wir uns aber über den relativen Charakter der Gleichzeitigkeit im klaren sind, können wir sofort und ohne Umwege auf den relativen Charakter des Zeitablaufes selbst schließen.

Inertialsysteme sind spezielle Bezugssysteme, die nur zur Beschreibung von gleichförmigen, d.h. unbeschleunigten Bewegungen herangezogen werden. Da aber das Raumschiff sowohl bei Start und Landung, als auch am Umkehrpunkt seines Fluges beschleunigte Bewegungen ausführt, darf das Relativitätsprinzip, wonach alle **Inertialsysteme** gleichberechtigt sind, hierbei nicht ohne weiteres angewendet werden.<sup>21</sup>

Nun bietet sich zum Schluss die Frage an: Was wissen wir überhaupt über jenes physikalische Phänomen, dessen Fortgang man mit einer Uhr mißt?

Was wir „Zeit“ nennen, ist untrennbar mit der Materie verbunden. Dachte man früher, dass Raum und Zeit übrig blieben, nähme man die Materie fort, so muss man heute sagen, dass in diesem Fall mit der Materie auch Raum und Zeit verschwinden würden.

So hatte Einstein diesen Zusammenhang einmal vereinfacht beschrieben. Natürlich wusste er, dass man nichts „verschwinden“ lassen kann, aber dieses Gedankenspiel verdeutlicht die enge Beziehung zwischen Raum, Zeit und Materie.

Vergleichen wir also die heutigen Erkenntnisse mit denen der klassischen Physik: Man glaubte früher, dass ein einheitlicher Zeitstrom vorliegt, der überall gleichschnell vorankommt und dass einem beliebigen Ereignis, wo und wie immer es auch stattfinden möge, ein und derselbe Zeitpunkt zugeordnet werden muss.

Dem ist jedoch nicht so.

Wir wissen, dass die Zeit nicht einfach so unberührt dahinfließt, sondern dass ihr Ablauf sehr wohl von den physikalischen Geschehnissen beeinflusst wird. Nicht nur der Gang der Uhren, sondern tatsächlich die Zeit selber vergeht in zueinander bewegten Systemen unterschiedlich schnell. Deshalb gehört im Bereich hoher Geschwindigkeiten zur Angabe, wie lange ein Zeitabschnitt dauert, auch die zusätzliche Information, mit welcher Relativgeschwindigkeit sich (der diese Aussage treffende) Beobachter bewegt.

Es sei noch kurz erwähnt, wie sich der Ablauf der Zeit  $t$  in Abhängigkeit von der Relativgeschwindigkeit  $v$  verändert ( $W(\ )$  bedeutet „Wurzel“):

$$t' = \frac{t}{W(1 - (v^2/c^2))}$$

Dabei bezeichnet  $t'$  die gesuchte Dauer des Zeitabschnittes im bewegten Inertialsystem<sup>22</sup> und  $t$  den entsprechenden Zeitabschnitt im eigenen, ruhenden Inertialsystem.

Ist die Relativgeschwindigkeit  $v$  sehr viel kleiner als die Vakuumlichtgeschwindigkeit  $c$ , dann wird der Nenner des rechten Terms  $\approx 1$ , und  $t' \approx t$  gibt uns den Hinweis, dass jetzt die Zeit in beiden Systemen etwa gleichschnell vergeht.

<sup>21</sup> Auf der Erde verändert sich im Gegensatz zum Raumschiff nichts, also sind die physikalischen Verhältnisse nicht gleich und demnach auch nicht vertauschbar.

<sup>22</sup> Man sagt auch „Eigenzeit des Systems“, häufig wird  $t'$  auch mit „Tau“ bezeichnet.



Die Anwendung des Relativitätsprinzips führt auch bei dem Effekt der Zeitdehnung („Zeitdilatation“) ebenso wie bei der Längenkontraktion dazu, dass jeder Beobachter dem jeweils anderen „die Schuld in die Schuhe schieben will“. Die Zeitdilatation ist ebenfalls wechselseitig, d.h. es gilt sowohl

$$t' = \frac{t}{W(1 - (v^2/c^2))}$$

als auch

$$t = \frac{t'}{W(1 - (v^2/c^2))}$$

und außerdem ist die Zeitdilatation naturgemäß im eigenen Bezugssystem nicht vorhanden.

Wir wollen uns merken:

Jedes Inertialsystem verfügt über seinen eigenen Zeitablauf. Ob und wie dieser sich von einem anderen unterscheidet, hängt von der Relativgeschwindigkeit ab. Materielle Objekte existieren nur dann im selben Zeitablauf, wenn sie sich im gleichen Inertialsystem befinden, d.h. ihre Relativgeschwindigkeit gleich Null ist. Die „Zeit schlechthin“ gibt es nicht, sie verliert ihren absoluten Charakter. Zeit und Materie verschmelzen zu einer Einheit, sie bedingen einander.

### 3.10. Die Impulsmasse

Soweit wie bis jetzt beschrieben, wurden die Begriffe „Raum“ und „Zeit“ von Einstein einer kritischen Überprüfung unterzogen und es stellte sich ihr relativer Charakter heraus. Wenden wir uns nunmehr einer interessanten *Folge* der Relativität der Gleichzeitigkeit zu.

Am Beispiel der klassischen Mechanik haben wir erkannt, dass die Raum- und Zeit-Vorstellungen wesentliche Grundlagen der Physik darstellen. Nachdem aber von der speziellen Relativitätstheorie die klassischen Raum-Zeit-Vorstellungen korrigiert wurden, musste jetzt danach gefragt werden, inwieweit auch andere Zusammenhänge abzuändern sind, damit eine in sich geschlossene, eine in sich widerspruchsfreie Theorie entstehen kann.

Die im Abschnitt 2.7. („Ein Ausflug in die Elektromagnetik“) behandelte, scheinbare Massenzunahme beim Elektron konnte – das wissen wir bereits – nicht mit Hilfe der Mechanik erklärt werden. Und genau diese Schwierigkeit wird jetzt, mit den neuen, relativistischen Raum-Zeit-Ansichten überwunden.

Warum nun ausgerechnet der Newton'sche Masse-Begriff einer Korrektur unterworfen ist, macht der Gedanke verständlich, dass allein schon die Berücksichtigung einer endlichen Höchstgeschwindigkeit zu Widersprüchen bezüglich des klassischen Masse-Begriffes führt. Die Relativität der Zeit hilft uns die Frage zu beantworten, ob und wie die Masse tatsächlich gemäß unserer Vermutung von der Geschwindigkeit abhängig ist.

Da im Rahmen dieser Schrift auf mathematische Ansätze verzichtet werden soll, sei zur Begründung der unten stehenden Formel lediglich gesagt, dass die nach Lorentz benannte Transformationsgleichung  $t' = t / W(1 - (v^2/c^2))$  im Grundgesetz der Mechanik Berücksichtigung findet und man so nach Einsetzen und Umformen der Gleichungen zu dem Ergebnis gelangt:

$$m = \frac{m_0}{W(1 - (v^2/c^2))}$$

Das Symbol  $m_0$  bezeichnet dabei die Masse des Körpers, wenn dieser sich in relativer Ruhe (zu unserem Inertialsystem) befindet und heißt deshalb „Ruhemasse“. Wohingegen  $m$  ab jetzt „Impulsmasse“ heißt und ein Maß für den mit steigender Geschwindigkeit immer größer werdenden Trägheitswiderstand des Körpers ist.

Einem eventuellen Missverständnis soll an dieser Stelle gleich entgegen getreten werden: Die Berücksichtigung einer endlichen Höchstgeschwindigkeit in der Formel  $W_{\text{kin}} = m / 2 \cdot v^2$  sollte den Leser lediglich an die Vermutung heranzuführen, dass mit irgendeiner Geschwindigkeits-Abhängigkeit der Masse im folgenden würde zu rechnen sein müssen. Der aus diesen Gedanken vielleicht gezogene Schluss, dass die Massenzunahme erst *nach* Erreichen der Höchstgeschwindigkeit einsetzt, wäre jedoch falsch. Das kann anhand der oben angeführten Gleichung für die sogenannte „relativistische Massenzunahme“ sogleich bewiesen werden:

Mit zunehmender Annäherung der Relativgeschwindigkeit  $v$  des Körpers an die Lichtgeschwindigkeit  $c$  wird der gesamte Nenner des Bruches auf der rechten Seite der Formel immer kleiner und damit insgesamt der Wert des Bruches (d.h. die Impulsmasse  $m$ ) immer größer. Aus diesem Grund ist das Anwachsen des Trägheitswiderstandes des Körpers *nach* dessen Erreichen der Höchstgeschwindigkeit ein Ding der Unmöglichkeit, denn schon beim Eintreten des Falles  $v = c$  würde der Nenner gleich Null sein. Eine Grenzbetrachtung liefert die Aussage, dass für den Fall, dass  $v = c$  wäre, die Impulsmasse des Körpers unendlich groß *würde*. Dieser Fall steht aber in Widerspruch zu aller physikalischen Erfahrung.

Kein Körper kann jemals die Geschwindigkeit eines gewöhnlichen Lichtstrahles im Vakuum erreichen.<sup>23</sup>

<sup>23</sup> In Wasser oder Glas ist  $c$  kleiner als im Vakuum und kann übertroffen werden. Nur die Vakuum-Lichtgeschwindigkeit kann niemals übertroffen bzw. von Körpern überhaupt erreicht werden.

Halt !!! - Bestätigt sich an dieser Stelle nicht schier unerwartet noch einmal unsere Vermutung, dass eben die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum gerade jene endliche Höchstgeschwindigkeit ist, von der schon oft die Rede war?

Richtig! Wir wussten bisher zwar, dass die Lichtgeschwindigkeit unabhängig von der Wahl des Inertialsystems immer gleich groß ist, aber dass es sich mit ihr gerade um diese endliche Höchstgeschwindigkeit handelt, blieb bis jetzt eine mehr oder weniger fundierte Vermutung.

Diese Vermutung findet ihre endgültige Bestätigung in den Lorentz-Gleichungen, die schon für  $v = c$  absurde Ergebnisse liefern und deshalb den Fall  $v > c$  völlig ausschließen.

Fassen wir zusammen:

Die Berücksichtigung endlicher Höchstgeschwindigkeiten bei Energie-Betrachtungen führte uns zu der Vermutung, dass der Trägheitswiderstand jeglicher Körper irgendwie von der Geschwindigkeit abhängig sein muss. Diese Vermutung konnte bestätigt werden, als die (gemäß der Lorentz-Transformation) korrigierte Zeit-Vorstellung in das Grundgesetz der Mechanik eingearbeitet wurde. Das Ergebnis ist die Formel für die relativistische Massenzunahme.

Außerdem fanden wir die endgültige Bestätigung dafür, dass die Vakuum-Lichtgeschwindigkeit die für alle materiellen Objekte gültige Maximal-Geschwindigkeit ist.

Bevor wir uns im nächsten Abschnitt der wohl populärsten Folgerung der speziellen Relativitätstheorie zuwenden, sollen die Lorentz-Transformationen

$$m = \frac{m_0}{W(1 - (v^2/c^2))} \quad t' = \frac{t}{W(1 - (v^2/c^2))} \quad L' = L \cdot W(1 - (v^2/c^2))$$

anhand eines Beispielen in ihrem Zusammenwirken erklärt werden. Um bei dieser kurzen Untersuchung nicht an irgendwelche Objekte gebunden zu sein, verwenden wir dabei auch durchgängig den abstrakten Begriff des „Bezugssystems“.

Ein Beobachter der sich im Inertialsystem **A** befindet, sieht in seinem eigenen System die Gesetze der Newton'schen Mechanik auf's Beste bestätigt. Nun wendet **A** seine Aufmerksamkeit einem, an ihm sehr schnell vorbeibewegtem Inertialsystem **B** zu. In Übereinstimmung mit den bisher behandelten relativistischen Effekten stellt der Beobachter **A** fest: Das Inertialsystem **B** ist in Bewegungsrichtung verkürzt, der Zeitablauf in **B** ist verlangsamt und der von **A** aus gestartete Versuch, das System **B** zu beschleunigen, stößt auf einen erhöhten Trägheitswiderstand.

Im gleichen Moment wird dagegen Beobachter **B** an sich selbst wiederum die klassische Mechanik bestätigt und von sich aus gesehen in **A** die relativistischen Effekte vorfinden.

Den Zusammenhang, dass die Masse des Inertialsystems **B** *sowohl* gleich der Ruhemasse (Betrachtung von **B** an sich selbst), *als auch* gleich der erhöhten Impulsmasse (**A** betrachtet **B**) ist, d.h.: dass im eigenen System sowohl die Newton'sche Physik gilt, als auch von einem dazu sehr schnell bewegten, anderen System aus betrachtet die relativistische Physik gilt, diesen Zusammenhang bezeichnet man als „**Korrespondenz-Prinzip**“.

### 3.11. Die Masse – Energie – Beziehung

Das Elektron reagiert schon bei verhältnismäßig kleinen Geschwindigkeiten so, als würde seine Masse ansteigen. Dies ist ein rein elektrodynamischer Effekt, soweit waren wir im Abschnitt 2.7. gekommen.

Jetzt wissen wir, dass der Trägheitswiderstand jeglicher Objekte bei hohen Relativgeschwindigkeiten einen Zuwachs erfährt.

Beide Effekte sind völlig unabhängig voneinander. Die scheinbare Massenzunahme des Elektrons bei schon verhältnismäßig geringen Geschwindigkeiten ist auf dessen elektromagnetische Eigenschaften zurückzuführen, wohingegen die relativistische Massenzunahme aller Objekte (bei mit der Lichtgeschwindigkeit vergleichbaren Relativgeschwindigkeiten) auch in der Mechanik eintritt. Damit wird deutlich, dass sich beim Elektron der elektromagnetische und der relativistische Effekt überlagern.

Wir stellen nun erneut einmal ein Gedanken-Experiment an: Ein Körper habe eine sehr große Relativgeschwindigkeit. Unter dieser Annahme zeigt sich vom relativ dazu ruhenden Standort aus, dass der Körper dabei sowohl über eine hohe (kinetische) Energie verfügt, als auch weiteren Beschleunigungen einen großen Trägheitswiderstand entgegensetzt.

Hier stellt sich die Frage: „Was ist eigentlich der Unterschied zwischen Energie und Masse?“

Man könnte nun im Rahmen der klassischen Physik auf diese Frage antworten und wird dabei als Definition dieser Begriffe ganz unterschiedliche Formulierungen akzeptieren müssen: Energie ist die Fähigkeit, Arbeit zu verrichten und Masse ist ein Maß für den Trägheitswiderstand eines Körpers gegenüber beschleunigenden Kräften.

Doch ohne sich von diesen, scheinbar wesensfremden Formulierungen beirren zu lassen, ging Einstein ganz folgerichtig Schritt für Schritt vor und stellte zunächst erst einmal fest:

Große Relativgeschwindigkeiten gehen immer sowohl mit großen Energien, als auch mit großen Massen einher.

Daraus lässt sich ganz eindeutig die Schlussfolgerung ziehen, dass sich Energie und Masse proportional zueinander verhalten:

$$W \sim m$$

24

Der Quotient  $W / m$  muss demnach – das ist uns nicht mehr fremd – einem Proportionalitätsfaktor gleichen, der für alle Relativgeschwindigkeiten konstant ist.

Die Lichtgeschwindigkeit ist ja tatsächlich unabhängig von der Relativgeschwindigkeit zwischen Inertialsystemen immer konstant. Ist etwa sie es, die etwas mit dieser Proportionalität zu tun hat?

Fast richtig! Mathematische Überlegungen zeigen, dass es das Quadrat der Lichtgeschwindigkeit sein muss:

$$\frac{W}{m} = c^2$$

Durch Multiplikation mit  $m$  erhält man dann jene, so berühmt gewordene Formel Einsteins, die als „Masse-Energie-Beziehung“ in die Geschichte der Physik einging:

$$E = m \cdot c^2$$

25

Abschließend erweist sich noch eine kurze Bemerkung zum Verhältnis zwischen Masse und Energie als notwendig:

Wenn beispielsweise beim Grundgesetz der Newton'schen Mechanik der Quotient  $F / a$  konstant ist und dieser Quotient – die Masse – mit  $m$  bezeichnet wird, so ist aus der resultierenden Gleichung  $F = m \cdot a$  lediglich ablesbar, dass sich Kraft und Beschleunigung proportional zueinander verhalten. Ebenso ist es bei vielen anderen Proportionalitäten.

Anders dagegen bei der Masse-Energie-Beziehung:

Zwar übt die Konstante  $c^2$  die Funktion eines mathematischen Proportionalitätsfaktors aus, doch handelt es sich ja bei der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum im Rahmen der speziellen Relativitätstheorie um eine absolute Naturkonstante – und nicht um eine Größe wie  $m$  (in  $F / a = m$ ), die laut klassischer Mechanik für einen Körper zwar konstant ist, für verschiedene Körper natürlich aber variieren kann.

---

<sup>24</sup> Bei dem Symbol  $m$  handelt es sich hier um die von der Relativgeschwindigkeit abhängige Impulsmasse!

<sup>25</sup> Früher wurde die Energie nicht mit dem Buchstaben  $W$ , sondern mit  $E$  geschrieben.

Dies gibt uns den Hinweis darauf, dass es sich bei  $W / m = c^2$  nicht nur um eine schlichte Proportionalität handelt, sondern um eine sogenannte „Äquivalenz“! Das heißt, dass die Energie  $W$  tatsächlich nichts anderes ist als die Masse  $m$ !

Trägheitswiderstand und Energieinhalt eines Körpers sind wesensgleich, es sind verschiedene Erscheinungsformen ein und derselben Sache.

Deshalb spricht man in diesem Zusammenhang manchmal auch von der „Trägheit der Energie“.

### 3.12. Zusammenfassung

Der Leser hat sich nun bereits mit der Masse als einer wesentlichen Eigenschaft der Materie bekannt gemacht. Masse, d.h. Trägheitswiderstand (Energie) trifft man überall dort an, wo sich Materie befindet.

Das Erstaunliche ist, dass es im gesamten Weltall nicht einen Ort gibt, an dem zu einer beliebigen Zeit keine Materie ist.

Wir untersuchten die Frage, was man unter Materie versteht, erfuhren, dass sie in mannigfaltigen Erscheinungsformen existiert – auch wenn wir nichts davon wissen.

Doch vom Menschen geschaffene Denkmodelle ermöglichen es uns, die Welt zu erkennen.

Vom klassischen Modell ausgehend erarbeiteten wir uns eine Vorstellung über den Begriff Masse. Die Masse als Maß für den Trägheitswiderstand der Körper gegenüber beschleunigenden Kräften muss man heute als Maß für den Energieinhalt der materiellen Objekte verstehen. So offenbarte sie sich als eine der wesentlichsten Eigenschaften der Materie.

Doch die angestellten Überlegungen hatten uns anfänglich in Widersprüche geführt, die nur durch Korrekturen an den klassischen Ansichten von Raum und Zeit überwunden werden konnten. Die modernen Raum-Zeit-Vorstellungen erarbeiteten wir uns folgendermaßen:

Was sind Bezugssysteme und wie haben wir Geschwindigkeiten zu addieren, wenn wir das Bezugssystem wechseln?

Bei der Beantwortung in Abschnitt 3.2. machte sich der Leser mit dem klassischen Additionstheorem der Geschwindigkeiten bekannt und lernte, dass Inertialsysteme spezielle Bezugssysteme sind, die sich gleichförmig, d.h. unbeschleunigt zueinander bewegen.

Dass diese Inertialsysteme untereinander alle gleichwertig sind, und beim Wechsel vom einen zum anderen die Formulierungen der Gesetze der Newton'schen Mechanik erhalten bleiben, lehrt das klassische Relativitätsprinzip, das Galileo Galilei als erster erkannte.

Mit diesem Wissen ausgerüstet, wandten wir uns den klassischen Ansichten über Raum und Zeit zu. Man nahm an, dass in der Welt ein einheitlicher Zeitstrom unberührt von den physikalischen Geschehnissen dahinfließt, dass der Ablauf der Zeit vom jeweiligen Beobachtungsort völlig unabhängig sei.

Das, *worin* sich alles bewegt, heißt Raum und trägt ebenfalls absoluten Charakter. In der klassischen Physik deklarierte man eine absolute Bewegung und damit wurde der Raum definiert als die Gesamtheit aller derjenigen Orte, zwischen denen eine solche absolute Bewegung möglich ist. Ob eine absolute Bewegung vorliegt oder nicht, darüber sollten sogenannte „innere Vorgänge“ (Trägheitserscheinungen) Aufschluss geben. So wurde der Raum zu etwas „absolut Unbewegtem“, zu einem starren Behältnis der materiellen Objekte.

An dieser Stelle unseres Gedankenganges im Kapitel 3 fand ein weiteres Mal Anwendung, was bereits in Kapitel 2 Objekt unserer Untersuchung war. Zur Vorbereitung des Abschnittes 3.6. „Ein entscheidendes Experiment und seine Folgen“ (und zum besseren Verständnis der modernen Raum-Zeit-Vorstellungen) hatte sich der Leser mit einer Erscheinung etwas näher bekannt gemacht, die jedem von uns tagtäglich unerlässlich ist, aber doch so viele Geheimnisse in sich birgt: dem Licht.

Durch den Vergleich mit anderen Formen der Materie erhielten wir ein widersprüchliches Bild vom Licht: Es verhält sich unter bestimmten Versuchsbedingungen genauso wie ein Teilchenstrom – unter bestimmten anderen Bedingungen wiederum musste man feststellen, dass ein Lichtstrahl einem Wellenbündel gleicht („Welle-Teilchen-Dualismus“).

Anschließend folgten jene Abschnitte, in denen wir die oben erwähnten klassischen Vorstellungen auf Licht anzuwenden versuchten.

Die Wissenschaftler bemühten sich gegen Ende des 19. Jahrhunderts, das Licht in das Gebäude der klassischen Physik einzuordnen. Dabei nahm man an, dass sich ein Lichtstrahl nur mit einem Trägermedium, dem sogenannten „Äther“ ausbreiten könne. Da dessen Eigenschaften aber nicht festgestellt werden konnten, entbrannten heiße Diskussionen darüber, ob es diesen „Lichtausbreitungsstoff“ nun gebe oder nicht. Bis 1881 der Physiker Michelson einen Versuch durchführte, dessen erstaunliches Ergebnis war: Die Lichtgeschwindigkeit ist unabhängig vom Inertialsystem immer gleich groß. Damit war der Beweis erbracht, dass der Äther nicht existiert. Der bei der Anwendung auf Licht (stellvertretend für alle anderen, sehr schnell bewegten Objekte) auftretende Widerspruch zwischen den klassischen Prinzipien fiel zugunsten des Relativitätsprinzips aus, das dadurch auf elektromagnetische Prozesse erweitert werden konnte. Dementsprechend musste eine neues Additionstheorem für Geschwindigkeiten gefunden werden.

Das Ergebnis des Michelson-Versuches stand wie eine dunkle Wolke am sonst heiteren Himmel der klassischen Physik. Eine wesentliche Stütze der klassischen Raum-Vorstellung – der absolut ruhende Äther – war seiner Existenzberechtigung beraubt.

Doch wie nun weiter?

Diese Frage führte uns zu der Erkenntnis, dass mit herkömmlichen Methoden hier nichts mehr auszurichten ist. Das Problem musste jetzt vom Kopf auf die Füße gestellt werden.

Einstein vollbrachte das in genialer Art und Weise. Er nahm an, dass die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit ein Prinzip, eben ein immer und überall gültiges Naturgesetz ist und konnte unter dieser Voraussetzung aus den (bis zum Michelson-Experiment) gesammelten Erkenntnissen solche Schlussfolgerungen ziehen, die der Physik zu neuen und moderneren Ansicht über Raum und Zeit verhalfen.

Mit dem Gedankenexperiment des bewegten Eisenbahnwagens haben wir die Überlegungen nachvollzogen, die zur Relativität der Gleichzeitigkeit führten. Bis zu der Erkenntnis, dass es die Zeit selber ist, die in schnellbewegten Inertialsystemen tatsächlich langsamer vergeht, war es dann nur noch ein kleiner Schritt. Doch bevor wir diesen als „Zeit-Dilatation“ bezeichneten Effekt behandelten, wandten wir uns der „Längen-Kontraktion“ zu.

Lorentz hatte die von Fitzgerald geäußerte Vermutung, durch Einwirkung des Äthers würden sich alle Körper in Bewegungsrichtung verkürzen, aufgegriffen und näher untersucht und konnte mit dieser Vermutung unter Beibehaltung der klassischen Ansichten das Ergebnis des Michelson-Versuches scharfsinnig erklären. Doch seine Erklärung trug deutlich den Charakter einer Zusatzhypothese<sup>26</sup>, was auf die Dauer nicht befriedigen konnte. Die Einstein'sche Theorie dagegen stellte eine wesentlich bessere Lösungsvariante dar.

Paradox ist aber, dass die mathematischen Formeln der Relativitätstheorie Lösungen besitzen, die ebenfalls auf eine Längen-Kontraktion schließen lassen. Diese hat aber jetzt nichts mehr mit dem überflüssig gewordenen Begriff des Äthers zu tun, sondern trägt relativen Charakter, d.h. sie ist ebenso wie die Zeit-Dilatation und die relativistische Massen-Zunahme wechselseitig und naturgemäß im eigenen Bezugssystem nicht vorhanden.

An der Stelle soll noch eine Bemerkung zum Verhältnis zwischen klassischer und relativistischer Mechanik Platz finden.

Insgesamt erweist sich die Newton'sche Mechanik als ein Spezialfall der allgemeineren relativistischen Mechanik. Am Beispiel der Masse wird das deutlich:

Die Impulsmasse ist praktisch der klassischen Ruhemasse gleich, wenn sich der betrachtete Gegenstand mit Geschwindigkeiten bewegt, die gegenüber der Lichtgeschwindigkeit sehr, sehr gering sind, d.h. unseren alltäglichen Größenordnungen entsprechen. So verhält es sich auch mit anderen Gleichungen.

Die Newton'schen Formeln sind für den Alltag durchaus „noch“ geeignet, und es wäre nutzloser Aufwand, im industriell-technischen Bereich überall mit den komplizierteren, relativistischen Formeln zu arbeiten. Letztere werden erst beispielsweise bei Kernspaltungsprozessen, für Elementarteilchen-Beschleuniger, in der Grundlagen-Forschung oder für die Raumfahrt-Technologie unabdingbar. Wenn aber die relativistischen Gleichungen in der Praxis der Menschen kaum eine Rolle spielen, warum sind sie dann so wichtig?

Nachdem von der Quantenmechanik<sup>27</sup> die Existenz von Anti-Teilchen vorausgesagt wurde, sind sie später tatsächlich gefunden worden. Jedes Elementar-Teilchen unterscheidet sich von seinem Anti-Teilchen durch Symmetrie und Ladung. So gibt es zu fast jedem Teilchen ein entsprechendes „Gegenstück“.

Es ist nun durchaus denkbar, sich nicht nur Atome aus diesen Anti-Teilchen aufgebaut vorzustellen („exotische Atome“), sondern sogar ganze Körper. Ein Körper aus Anti-Materie ließe sich äußerlich durch nichts von seinem gewöhnlichen Vorbild unterscheiden. Brächte man beide aber zusammen, würden sie unter einer fürchterlichen Explosion vollständig in Energie zerstrahlen. Außer einem Gemisch verschiedenster Lichtarten bliebe von beiden Körpern tatsächlich nichts mehr übrig.

Was hat die Wichtigkeit relativistischer Gleichungen nun mit einer solchen Explosion zu tun?

---

<sup>26</sup> Eine „Hypothese“ ist eine wissenschaftliche Vermutung, die nicht bewiesen ist.

<sup>27</sup> Teilgebiet der Physik, das sich mit den Gesetzen im Mikro-Kosmos beschäftigt



Ganz einfach: Der vorher noch vorhandene Trägheitswiderstand der Körper hätte sich bei einem solchen Vorgang vollständig in Strahlungsenergie verwandelt!

Während eines solchen Zerstrahlungsprozesses (auch „Annihilation“ genannt) könnte schon bei wenigen Kilogramm eines beliebigen Stoffes eine derart große Energiemenge abgegeben werden, die die gesamte Erde über Jahrzehnte hinweg mit Elektroenergie im Überfluss versorgen würde.

Das sei nur angeführt, um die praktische Bedeutung und die tatsächliche Wirkung physikalischer Grundlagenforschung auf die Industriegesellschaft zu verdeutlichen. Technischer Fortschritt, an dem wir alle teilhaben, basiert immer auch auf theoretischen Überlegungen, wie wir sie beim Kennen lernen der Speziellen Relativitätstheorie nachvollzogen haben.

Nach diesem kleinen Ausflug in die Quantenmechanik soll abschließend eine Übersicht unsere Zusammenfassung beenden.

Abb. 43

	<b>klassische Physik</b>	<b>relativistische Physik</b>
<b>Raum</b>	starr und unveränderlich, trägt absoluten Charakter, Längen sind unveränderlich	relativ, wird beeinflusst durch die Materie, Entfernungen hängen von der Relativgeschwindigkeit ab, Längenkontraktion gemäß: $L' = L \cdot W(1 - (v^2/c^2))$
<b>Zeit</b>	das gesamte All umfassender, einheitlicher Zeitstrom, absolute Gleichzeitigkeit, Zeitablauf bleibt unbeeinflusst durch die Materie	Gleichzeitigkeit ist relativ, Zeitfluss ist abhängig von Relativgeschwindigkeit, Zeitdilatation gemäß: $t' = \frac{t}{W(1 - (v^2/c^2))}$
<b>Relativität</b>	Gesetze der klassischen Mechanik bleiben beim Wechsel des Inertialsystems unverändert.	Beim Wechsel des Inertialsystems bleiben sowohl die Gesetze der Mechanik, als auch die Gesetze der Elektrodynamik unverändert.
<b>Addition von Geschwindigkeiten</b>	$v = v_1 + v_2$	$v = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 \cdot v_2}{c^2}}$
<b>Licht</b>	Trägermedium Äther	Kein Trägermedium
<b>Masse</b>	Maß für den Trägheitswiderstand gegenüber Beschleunigungen, für einen bestimmten Körper immer konstant	Maß für den Trägheitswiderstand und für den Energieinhalt des Körpers, von der Relativgeschwindigkeit abhängig gemäß: $m = \frac{m_0}{W(1 - (v^2/c^2))}$
<b>Grundgleichung</b>	$F = m \cdot a$	$W = m \cdot c^2$

#### 4. Das zweite Stockwerk im Gebäude der Relativitätstheorie. Ein Kapitel, aus dem Erstaunliches über Schwerefeld und Kosmos zu erfahren ist.

Nun haben wir gemeinsam die erste Hälfte unseres Weges durch das „Land der verrückten Ideen“ hinter uns gebracht. Die in der klassischen Physik neben einander existierenden Begriffe Raum, Zeit und Materie sind in einen gewissen Zusammenhang gebracht.

Längst sind Längen-Kontraktion und Zeit-Dilatation für uns keine unverständlichen Worte mehr und was man unter relativistischer Massenzunahme verstehen muss, wissen wir auch.

Doch Einstein war mit seiner Arbeit noch nicht zufrieden.

Ausgangspunkt aller Überlegungen war das Relativitätsprinzip gewesen. In der klassischen Physik sagt es aus, dass alle mechanischen Vorgänge in gleichförmig zueinander bewegten Systemen den gleichen Gesetzen gehorchen.

Wir haben uns sogar schon seine Erweiterung auf elektromagnetische Prozesse angeschaut, auch Licht unterliegt diesem Relativitätsprinzip.

Aber was ist mit Bezugssystemen, die sich nicht nur gleichförmig, sondern auch beschleunigt zueinander bewegen?

Bisher waren unsere Gedanken speziell für Inertialsysteme gültig, weshalb man dieses Teilgebiet unseres Themas auch als „Spezielle Relativitätstheorie“ bezeichnet.

Im Folgenden wenden wir uns der „Allgemeinen Relativitätstheorie“ zu. Aufgrund der neuen, interessanten Vorgänge, die uns in beschleunigten Bezugssystemen begegnen werden, wird (wie wir gleich sehen) die Allgemeine Relativitätstheorie auch „Einstein'sche Gravitationstheorie“ genannt.

Deshalb soll zunächst ein Abschnitt folgen, der die unter Abschnitt 2.4. begonnenen Gedanken zur klassischen Vorstellung vom Schwerefeld aufgreift und fortsetzt.

##### 4.1. Klassisches über das Schwerefeld

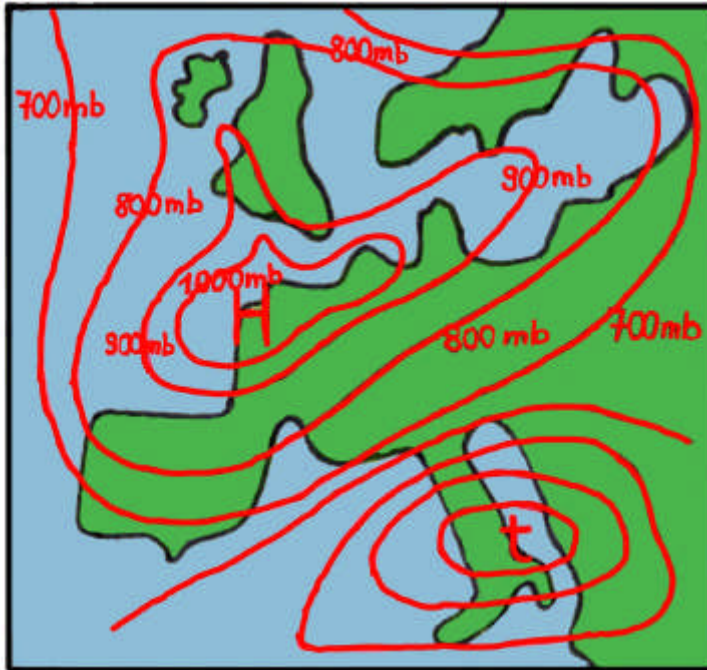
Zu Beginn muss der Begriff „Feld“ definiert werden. Darunter versteht man einen Bereich des Raumes, in dem jedem Ort zu jedem Zeitpunkt ein bestimmter Wert einer physikalischen Größe zugeordnet wird.

So lässt sich unser Wohnzimmer beispielsweise als ein Temperatur-Feld auffassen: Die Luft hat an jedem Ort im Raum zu jedem Zeitpunkt eine bestimmte Temperatur, am Heizkörper vielleicht 23°C, am Fenster womöglich nur 21°C.

Genauso lässt sich auch ein Druckfeld der Erdatmosphäre angeben: Wenn von den Meteorologen eine Wetterkarte angefertigt wird, dann muss von jedem Ort der Luftdruck bekannt sein und die Punkte mit gleichem Luftdruck werden durch Linien miteinander verbunden.

Eine solche Wetterkarte gilt nur für eine bestimmte Uhrzeit, da sich das Druckfeld schnell verändern kann.

Abb.44



Die Linien verbinden Orte gleichen Luftdruckes. Das Bild gehört aber zu einer bestimmten Höhe, in der sich das Wetter abspielt. In größeren Höhen ist der Luftdruck insgesamt niedriger.

Generell unterscheidet man zwei Arten von Feldern: Die physikalische Größe, deren Wert zu einem Zeitpunkt einem Ort im Raum zugeordnet wird, kann ein sogenannter „Vektor“ sein oder nicht. Nichtvektorielle Größen heißen „Skalare“. Was versteht man nun aber unter einem Vektor?

Diesen Namen tragen alle diejenigen Größen, die nicht nur über einen bestimmten Betrag verfügen, sondern außerdem in eine bestimmte Richtung hin orientiert sind, sodass man sie sich in einem Koordinatensystem durch Pfeile veranschaulichen kann.

Ein Körper bewegt sich nicht nur schlechthin, sondern er bewegt sich in eine gewisse Richtung. Die Geschwindigkeit  $\mathbf{v}$  ist ein Vektor. Auch die Kraft  $\mathbf{F}$  und die Beschleunigung  $\mathbf{a}$  sind unter vielen anderen physikalischen Größen Vektoren.

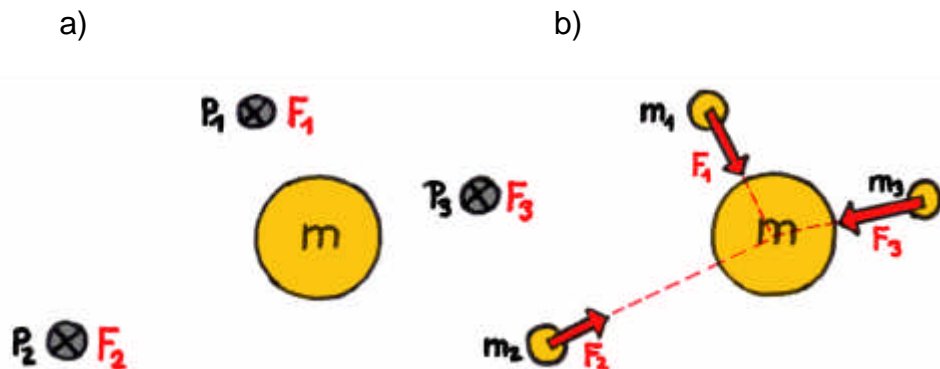
Dagegen ist die Temperatur eine skalare Größe, sie hat keine Richtung. Das oben erwähnte Temperaturfeld unseres Wohnzimmers ist demnach ein Skalarfeld.

Wenden wir uns wieder dem Schwerfeld (Gravitationsfeld) zu. Es ist ein spezielles Vektorfeld. Allen Punkten im Raum um einen Körper wird ein bestimmter Wert der Kraft zugeordnet, die auf einen eventuell vorhandenen Probekörper anziehend wirken würde (Abb.45 a).

Die Kraft ist ein Vektor, d.h. sie verfügt über einen gewissen Betrag und sie wirkt in eine bestimmte Richtung. Deshalb gehört das Schwerfeld zu den Vektorfeldern.

Damit es nicht zu Verwechslungen kommt, wollen wir die im Gravitationsfeld wirkende Kraft „Gravitationskraft“ nennen, ihre Richtung ist genau bestimmt: Sie wirkt immer zum Zentrum des Körpers hin.

Abb.45



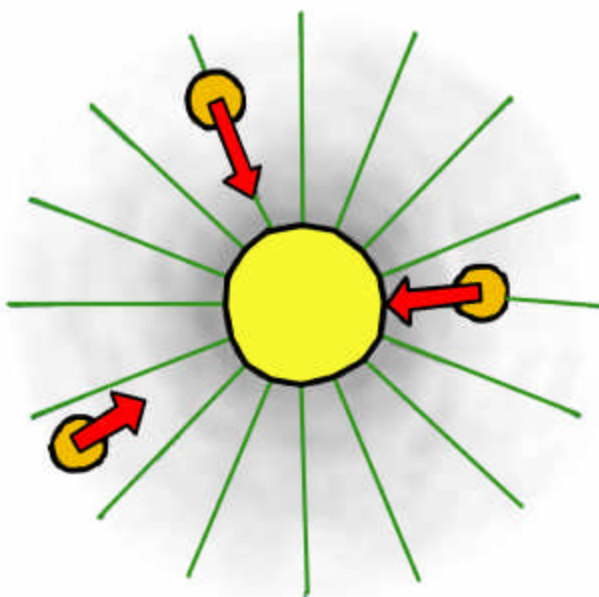
Aber woran erkennt man das Gravitationsfeld, wenn sich kein Probekörper in ihm befindet?

Dazu muss gesagt werden: Genauso wie jedes andere Feld lässt sich auch das Gravitationsfeld nur an seiner Wirkung auf Probekörper nachweisen. Dennoch sind die Anziehungskräfte in diesem Raumbereich existent, auch wenn gerade kein Probekörper zur Hand ist, sie sind nachgewiesenermaßen Bestandteil unserer Umwelt.

Deshalb bietet es sich an, ein Modell zur Beschreibung des Gravitationsfeldes anzuwenden, um deutlich zu machen, dass es auch dann vorhanden ist, wenn sich kein Nachweiskörper im Feld befindet.

Man veranschaulicht sich das Gravitationsfeld durch die gedachten Verlängerungen der Wirkungsrichtung der Gravitationskräfte. Diese gedachten Verlängerungen heißen „Feldlinien“.

Abb.46

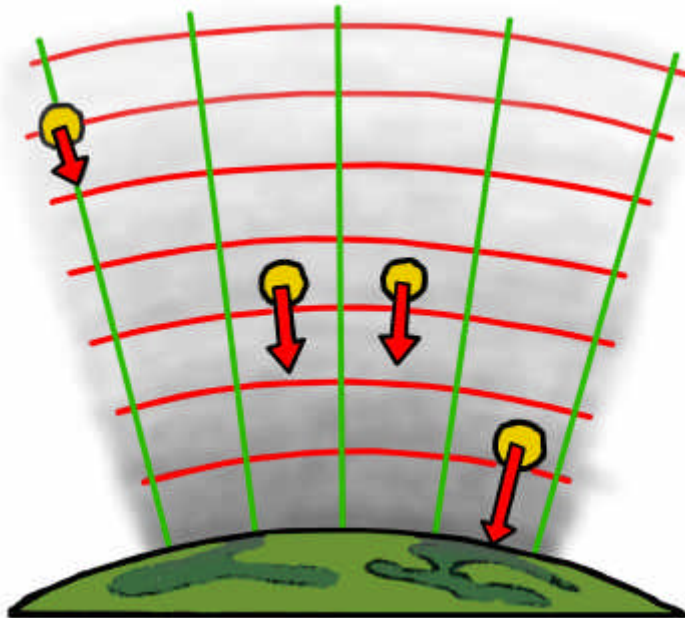


Die Feldlinien (grün) kann man sich beliebig dicht nebeneinander denken. Die Gravitationskräfte wirken immer nur entlang der Feldlinien zum Körper hin.

Dabei lässt sich die Dichte der Feldlinien als Maß für die Gravitationsfeldstärke deuten.

Wie bei jedem Feld erweist es sich auch beim Gravitationsfeld als günstig, alle Orte, an denen auf ein und denselben Körper die gleiche Kraft wirkt, durch Linien miteinander zu verbinden. Diese Linien heißen „Äquipotential“-Linien<sup>28</sup>.

Abb.47



Auch die Äquipotential-Linien liegen beliebig dicht. Das Gravitationsfeld lässt sich nur durch Probekörper nachweisen. Um darauf nicht angewiesen zu sein, beschreibt man das Feld mit dem Modell „Feldlinien“. Das ist möglich, weil das Feld immer existiert, auch wenn es nicht ständig durch Probekörper nachgewiesen wird.

— Äquipotential-Linien  
— Feldlinien

Abb.47 soll ebenfalls verdeutlichen, dass die Feldlinien immer senkrecht auf den Äquipotentiallinien stehen.

Übrigens sind die Verbindungen aller Orte mit gleicher Kraftwirkung nur in ebenen Zeichnungen Kreise. In Wirklichkeit handelt es sich natürlich nicht um Kreise, sondern um Kugeloberflächen.

An jeder Stelle einer solchen gedachten Kugeloberfläche wirkt auf ein und den selben Körper immer die gleiche Kraft.

Aber wie stark ist diese Kraft? Wovon hängt sie ab?

Es muss die Möglichkeit geben, sie zu berechnen – die entsprechende Formel fand Newton. Sie lautet:

$$F = \gamma \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

Dabei symbolisieren  $m_1$  und  $m_2$  die Massen der beiden sich gegenseitig anziehenden Körper und  $\gamma$  ist ein Proportionalitätsfaktor mit dem Namen „Gravitationskonstante“. Außerdem erkennen wir, dass die Kraft  $F$  mit größer werdendem Abstand  $r$  rasch kleiner wird.

Wir wissen, dass eine Kraft, die auf einen frei beweglichen Körper wirkt, ihm eine Beschleunigung erteilt. Beim Schwerefeld ist das die Fallbeschleunigung, die

<sup>28</sup> Äqui....gleich, potential....Wirkung

auch den exakteren Namen „Gravitationsfeldstärke“ trägt, denn sie gibt an, wie *stark* die Kraftwirkung des *Gravitationsfeldes* auf den Probekörper am jeweiligen Ort ist.

Die Gravitationsfeldstärke (Fallbeschleunigung) wird mit zunehmender Entfernung vom Körper kleiner. Das ist ein Anzeichen dafür, dass mit zunehmender Entfernung die Kraftwirkung des Schwerfeldes auf Probekörper schwächer wird, aber erst in unendlich großem Abstand verschwinden würde, d.h. mehr oder weniger überall vorhanden ist. Deshalb gibt es im gesamten Weltall praktisch keinen Ort, an dem sich nicht irgendein Gravitationsfeld nachweisen ließe, auch wenn es noch so schwach ist.

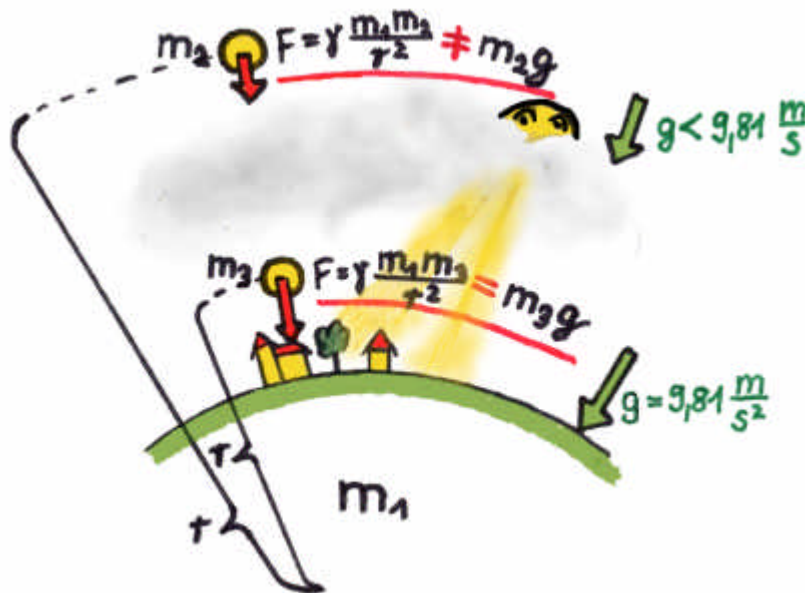
Doch zurück zur Gravitationskraft. Welche Bedeutung kommt ihr zu?

Es ist die Kraft, mit der alle Körper im Schwerfeld eines anderen angezogen werden und damit erweist sich die Gewichtskraft eines (beispielsweise an der Erdoberfläche befindlichen) Körpers, die der auf eine feste Unterlage ausübt, als eine Gravitationskraft.<sup>29</sup>

Freilich kann die Gewichtskraft als eine Gravitationskraft auch nach der Formel  $\mathbf{G} = \mathbf{m} \cdot \mathbf{g}$  berechnet werden. Doch diese Gleichung liefert nur für solche Körper exakte Ergebnisse, die sich an der Erdoberfläche befinden. Das liegt daran, dass die Gravitationsfeldstärke  $\mathbf{g}$  (Fallbeschleunigung) mit zunehmender Entfernung immer kleiner wird (Abhängigkeit der Kraft vom Abstand) und dadurch bei größeren Abständen das Rechenergebnis verfälscht.<sup>30</sup>

Newtons allgemeinere Formel für die Gravitationskraft dagegen gilt für jeden Abstand und für alle Körper bzw. Planeten oder Fixsterne.

Abb.48



Der Abstand  $r$  aus Newtons Formel für die Gravitationskraft ist immer auf den Mittelpunkt der Körper bezogen. Hier ist  $m_1$  die Masse der Erde und  $m_2$  bzw.  $m_3$  die Massen der Probekörper. Die Fallbeschleunigung  $\mathbf{g} = 9,81 \text{ m/s}^2$  ist ganz speziell auf die Erdoberfläche bezogen.

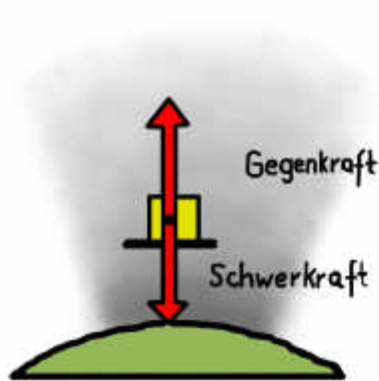
<sup>29</sup> Was es mit dem Gewicht auf sich hat, kann in Abschnitt 2.4. nachgelesen werden.

<sup>30</sup> Der Wert  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$  gilt nur für einen bestimmten Abstand vom Erdmittelpunkt, nämlich „Normal Null“ (Meeresspiegelhöhe).

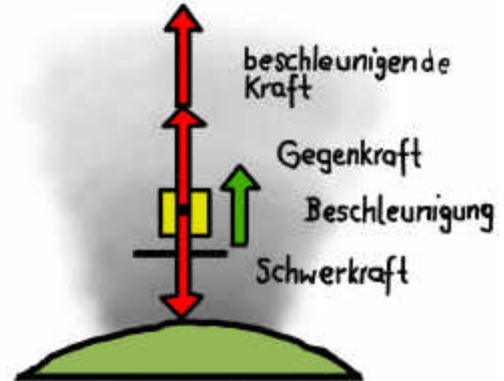
Um einen Körper in der Schwebelage zu halten, muss man der Gravitationskraft eine gleichgroße Gegenkraft entgegen setzen (Abb.49 a):

Abb.49

a)



b)



Um den Körper jedoch anzuheben, muss zusätzlich Energie aufgewendet werden (Abb.49 b). Die dabei gegen das Gravitationsfeld zu verrichtende Hubarbeit erhöht die potentielle Energie des Körpers. Diese steckt allerdings nicht – wie man mutmaßen könnte – im Körper selbst, sondern wurde im Gravitationsfeld zwischen Körper und Erde gespeichert. Damit können wir festhalten, dass das Gravitationsfeld Träger von Energie ist, was seinen materiellen Charakter nochmal unterstreicht.

Über die eigentliche Ursache der gegenseitigen Anziehung der Körper ist noch wenig bekannt. Die klassische Physik nimmt an, dass die Gravitation immer an das Vorhandensein eines Körpers gebunden ist, der durch seine Masse charakterisiert wird. So kann man die Masse des Körpers als Ursache seines Schwerfeldes ansehen. Dabei wollen wir vorerst auch (noch) bleiben.

Zusammenfassend sei folgendes festgehalten:

Unter dem Schwerfeld eines Körpers versteht man den ihn umgebenden Raum, in dem jedem Ort zu jedem Zeitpunkt ein bestimmter Wert der vektoriellen Größe „Kraft“ zugeordnet wird.

Das Schwerfeld gehört zu den Vektor-Feldern, es wird beschrieben mit dem Modell „Feldlinie“. Orte gleicher Kraftwirkung auf ein und denselben Probekörper bilden Äquipotentialflächen (Kugelschalen), auf denen die Feldlinien senkrecht stehen (Modell-Vorstellung).

Die Kraft, mit der sich die Körper gegenseitig anziehen, wird berechnet nach der Formel

$$F = \gamma \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

Das Gravitationsfeld besitzt unendliche Reichweite und es ist Träger von Energie.

Das klassische Bild der Gravitation ist Bestandteil der gesamten klassischen Physik und fügt sich gut in sie ein.

Die Kraftwirkung des Schwerfeldes sollte augenblicklich mit dem Vorhandensein eines Körpers auftreten, man nahm eine unendlich große Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schwerkraftwirkung an. Diese Vorstellung stützte auch den Gedanken von der absoluten Gleichzeitigkeit, die ja nur bei unendlich großen Geschwindigkeiten einen Sinn hätte.

Uns ist mittlerweile bekannt, dass es eine endliche Höchstgeschwindigkeit für die Ausbreitung von Signalen oder Wirkungen bzw. für die Bewegung von Objekten gibt, wodurch – und das hat der Leser sicherlich schon erkannt – diese klassische Ansicht von der Gravitation (als sofort und augenblicklich eintretende Fernwirkung) in's Wanken gerät.

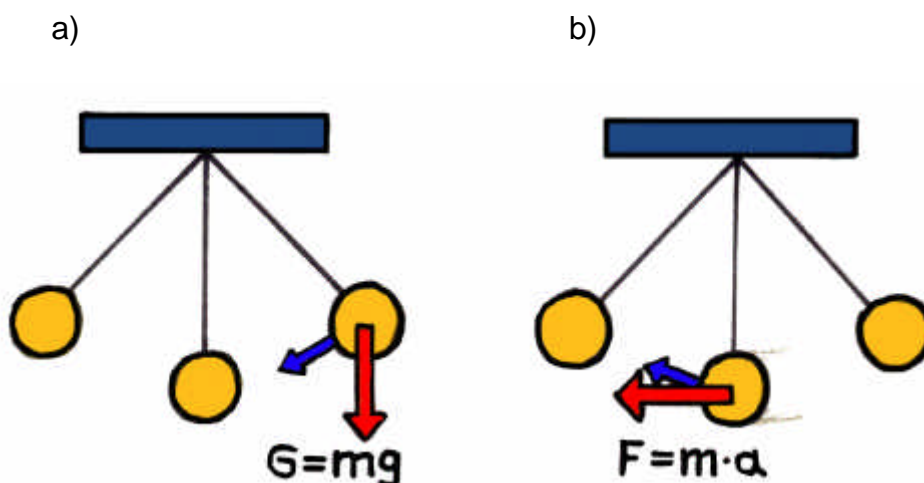
#### 4.2. Trägheit, Schwere und ein fundamentales Prinzip

Wir erinnern uns an folgende Überlegung: Die Masse eines Körpers ist ein Maß für seinen Trägheitswiderstand gegenüber Beschleunigungen. Sie darf nicht mit der Stoffmenge und der Gewichtskraft verwechselt werden. Im voran gegangenen Abschnitt ist noch einmal hervorgehoben worden, dass die Gewichtskraft eine Aussage darüber trifft, wie stark die Kraftwirkung eines Schwerfeldes auf einen Körper ist.

Wir wollen uns im folgenden Abschnitt mit dieser Kraftwirkung des Schwerfeldes und dem Trägheitswiderstand der Körper etwas näher befassen:

Ein Pendel wird ausgelenkt und schwingt gleichmäßig hin und her, bis es durch den Luftwiderstand und die an der Aufhängung wirkende Reibung zum Stillstand kommt. Doch was bewirkt, dass sich das seitlich angehobene Pendel zurückbewegt? Und wie kommt es, dass es über die senkrechte Ausgangsstellung, in der es sich vorher befand, hinaus zur anderen Seite getrieben wird? Die Antwort ist nicht schwer: Das seitlich angehobene Pendel fällt zurück, d.h. das Schwerfeld der Erde bewirkt die Bewegung zurück bis zur senkrechten Ruhelage. Darüber hinaus wird es zur anderen Seite durch seine Trägheit getrieben.

Abb.50

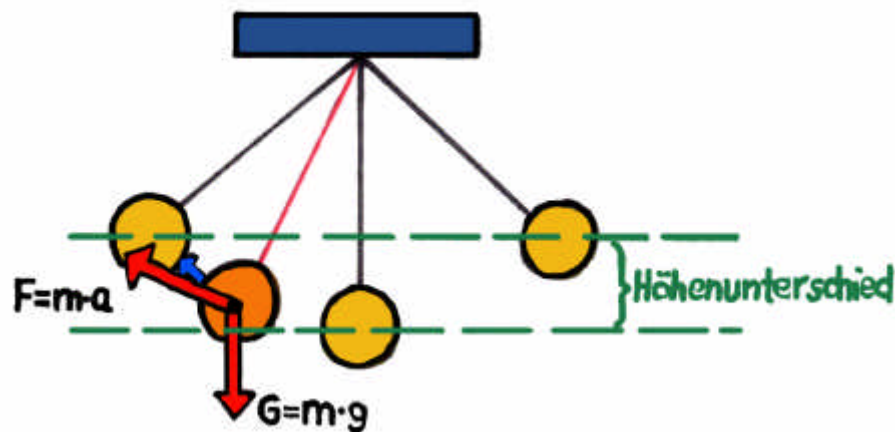




Der Pendelkörper „versucht“, im Zustand der Bewegung zu verharren, den er im Punkt der ehemaligen senkrechten Ruhelage jetzt innehat (Abb.50 b). Der Körper bewegt sich auf Grund seiner Trägheit in die andere Richtung weiter, bis ihn das Schwerfeld erneut zurückfallen lässt und er sich aufgrund seiner Trägheit erneut über den Ausgangspunkt hinaus bewegt.

Interessant ist nun vor allem, dass in der Phase, in der der Körper über die Ausgangslage hinauspendelt, er mit seiner Trägheit dem Schwerfeld entgegen wirkt.

Abb.51



In dieser Phase des Bewegungsablaufes verfügt der Pendelkörper noch über soviel kinetische Energie, dass er trotz ständig wirkender Schwerkraft (nach „*actio = reactio*“ mit  $G = m \cdot g$  berechenbar) in der Lage sein wird, den Höhenunterschied aufgrund seiner Trägheit zu überwinden (Reibung wird hier mal vernachlässigt).

Daran kann man folgendes erkennen: Einerseits wird der Körper durch das Schwerfeld angezogen, wir wollen dazu sagen: „Er besitzt die Eigenschaft der Schwere.“<sup>31</sup> Andererseits vermag der Körper, sich entgegengesetzt zur Wirkungsrichtung des Schwerfeldes nach oben zu bewegen, weil er die Eigenschaft der Trägheit besitzt.

Das Maß der Trägheit ist die Masse  $m$ , die in der Formel  $F = m \cdot a$  vorkommt. Und das Maß der Schwere? Sollte es die Masse  $m$  sein, die in der Gleichung  $G = m \cdot g$  enthalten ist?

„Masse bleibt Masse!“, wird der Leser jetzt vielleicht denken, „sie kann nicht das eine Mal das Maß der Trägheit und das andere Mal das Maß der Schwere sein!“

Das Symbol  $m$ , das die Masse darstellt, steht aber nun einmal in beiden Gleichungen, in der für die Trägheit ( $F = m \cdot a$ ) **und** in der für die Schwere ( $G = m \cdot g$ ). Von der Richtigkeit beider Formel hatten wir uns im Kapitel 2 überzeugt.

Wie also ist das Problem zu lösen?

<sup>31</sup> Die Schwere ist eine physikalische Eigenschaft aller Körper. Wir verwenden diesen Begriff vorerst anstelle der uns bekannten Gewichtskraft. Die Schwere ist aber – das klären wir später – selbst keine Kraft, sondern die Ursache einer Kraft.

Wenn die Masse in beiden Fällen formelmäßig eine Rolle spielt, d.h. als **eine** physikalische Größe das Maß **zweier** unterschiedlicher physikalischer Eigenschaften sein soll, dann muss sie eben unterteilt werden: in die sogenannte „träge Masse“  $m_t$  und die sogenannte „schwere Masse“  $m_s$ .

Die moderne Mechanik brachte an's Tageslicht, dass die Körper im wesentlichen über zwei Eigenschaften verfügen: Die Körper sind träge und sie sind schwer. Das Maß für die Trägheit gegenüber Beschleunigungen heißt „träge Masse“ und wird mit  $m_t$  bezeichnet und das Maß der Schwere im Gravitationsfeld heißt „schwere Masse“ und wird als  $m_s$  geschrieben.<sup>32</sup>

Der Leser möge sich aber nicht durch die Namen „träge Masse“ und „schwere Masse“ irreführen lassen, sondern immer daran denken: Die träge Masse bringt zum Ausdruck, wie groß das Verharrungsbestreben des Körpers gegenüber beschleunigenden Kräften ist und die schwere Masse verdeutlicht gewissermaßen die Empfindlichkeit gegenüber Schwerefeldern.

Es ist weiter nichts geschehen, als dass ein Begriffssystem der klassischen Mechanik durch ein neues, zweckmäßigeres und genaueres Begriffssystem ersetzt wurde.

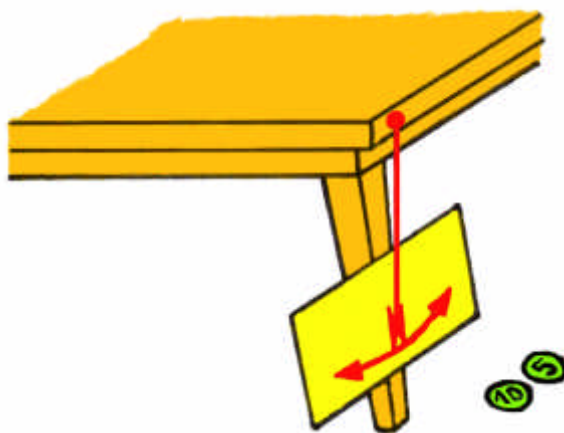
Aber wieso sind die Begriffe „träge Masse“ und „schwere Masse“ zweckmäßiger?

Das wird klarer, wenn der Leser folgendes kleine Experiment durchführt:

Wir fertigen ein Pendel, an dem unterschiedlich schwere Körper befestigt werden können. Schnell ist ein Bindfaden durch eine Wäscheklammer gezogen, verknotet und mit einer Reißzwecke an einer geeigneten Stelle befestigt. Hinter dem Pendel wird anschließend ein Blatt Papier (mit fester Unterlage) angebracht und schon ist unser Versuchsaufbau fertig.

Als unterschiedlich schwere Körper sind unterschiedlich viele Münzen, die sich leicht festklammern lassen, gut geeignet.

Abb.52



<sup>32</sup> Das bedeutet, dass im Newtonschen Gravitationsgesetz eigentlich die „schweren Massen“ der beiden, sich anziehenden Körper gemeint sind.

Wenn das Pendel ganz ruhig hängt, kennzeichnen wir seine Ruhe- bzw. Ausgangsstellung mit einem Stift auf dem Papier. Dann kommt ein Geldstück in die Klammer, das Pendel wird leicht ausgelenkt und wir markieren genau die Stelle, an der wir es loslassen werden. Möglichst rasch wird jetzt auf der anderen Seite der Umkehrpunkt gesucht und ebenfalls eingezeichnet.

Abschließend führen wir das gleiche Experiment mit mehr Geldstücken in der Klammer auf die gleiche Art noch einmal durch. Die Ruhestellung wird wieder dieselbe sein. Dabei ist es gleichgültig, ob bei einem der Teilversuche das Pendel etwas mehr oder weniger ausgelenkt wird. Wichtig ist aber, dass der gesuchte Umkehrpunkt gleich bei den ersten Schwingungen eingezeichnet wird, weil sonst der Luftwiderstand zu Verfälschungen führt.

Abb.53

Das Pendel wird nach links ausgelenkt und losgelassen, der rechte Umkehrpunkt ist dann gesucht.



Nun wollen wir an die Auswertung unseres Experimentes gehen. Was also ist dabei herausgekommen?

Wenn das Pendel nach links ausgelenkt wurde, dann „fiel“ es von **A** nach **O** zurück. Dieser Bewegungsablauf wird, das ist uns jetzt bekannt, durch die Schwere des Pendels hervorgerufen. Das Weiterschwingen von **O** nach **B** bewirkt die Trägheit.

Wie aber mit dem Lineal nachgemessen werden kann, ist die Strecke **[A,O]** gleich der Strecke **[O,B]** – das Pendel schwingt nach beiden Seiten (unter Vernachlässigung der Reibung) gleichweit.

Wir können daraus den wichtigen Schluss ziehen, dass die Wirkung der Trägheit genauso groß ist, wie die Wirkung der Schwere. Sind beide Wirkungen gleich, dann müssen auch Trägheit und Schwere selbst einander gleich sein.

Die Schwere eines Körpers im Gravitationsfeld ist gleich seiner Trägheit gegenüber beschleunigenden Kräften.<sup>33</sup>

Wir müssen uns nunmehr daran erinnern, dass die Trägheit der Körper gegenüber beschleunigenden Kräften durch die träge Masse charakterisiert wird und die Fähigkeit der Körper, Gravitationswirkungen zu erfahren oder hervorzubrin-

<sup>33</sup> Eigentlich handelt es sich dabei um eine Proportionalität. Die Gleichheit entsteht erst durch die Wahl geeigneter Maßeinheiten.

gen, in der schweren Masse ihren Ausdruck findet<sup>34</sup>, um die Schlussfolgerung ziehen zu können:

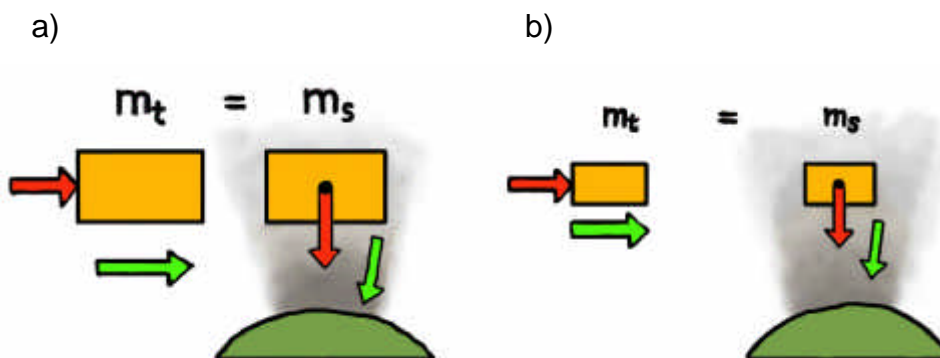
Unter Verwendung geeigneter Maßeinheiten ist für jeden beliebigen Körper seine träge Masse gleich seiner schweren Masse, es gilt:  $m_t = m_s$ .

Außerdem lässt sich anhand dieser Überlegung, dass Trägheitskräfte die gleichen Wirkungen hervorrufen wie gleich große Gravitationskräfte, ein gewisser Zusammenhang zwischen den (für das Wirken von Trägheitskräften erforderlichen) beschleunigten Bewegungen und den (für das Wirken von Gravitationskräften notwendigen) Gravitationsfeldern erahnen.

Die Gleichheit von träger und schwerer Masse wollen wir uns anhand der Abb.54 noch einmal verdeutlichen.

Je größer die Trägheit eines Körpers gegenüber einer Geschwindigkeitsänderung, d.h. je größer seine träge Masse ist, desto größer ist auch seine schwere Masse, d.h. desto schwerer ist er im Gravitationsfeld.

Abb.54



Das erscheint uns richtig, denn einen leichten Körper aus seiner Bahn zu drücken, ist mit weniger Kraftaufwand verbunden, als dies bei einem schweren Körper der Fall ist.

Isaac Newton hatte schon zu seiner Zeit diesen Gedanken geäußert, aber ihm fehlte jede Erklärung.

Vom Standpunkt der klassischen Physik aus ist die Gleichheit von träger und schwerer Masse nicht erklärbar.

Als Albert Einstein seine Relativitätstheorie auf beschleunigte Bezugssysteme erweitern wollte, dachte auch er sehr viel über die Trägheit der Körper nach.

<sup>34</sup> Neuere Überlegungen auf diesem Gebiet legen darüber hinausgehend sogar nahe, auch die schwere Masse  $m_s$  noch einmal (methodisch) zu untergliedern in einen aktiven und einen passiven Teil. Dabei soll die „aktive schwere Masse“ verantwortlich sein für die Fähigkeit des Körpers, ein eigenes Gravitationsfeld hervorzubringen und die „passive schwere Masse“ soll verantwortlich sein für die Fähigkeit des Körpers, auf Gravitationsfelder anderer Körper empfindlich zu reagieren. „Hervorbringung“ und „Empfindlichkeit“ müssen nicht a priori gleich sein.

Der große Naturwissenschaftler beschäftigte sich ebenfalls mit der Gleichheit von träger und schwerer Masse. Weil dieser Zusammenhang von der klassischen Physik mit Hilfe der in ihr bekannten Gesetzmäßigkeiten nicht begründet werden konnte, nahm er an, dass jene Gleichheit nicht zufälliger Art, sondern die zwangsläufige Folge eines noch unbekanntes, allgemeineren Naturgesetzes ist.

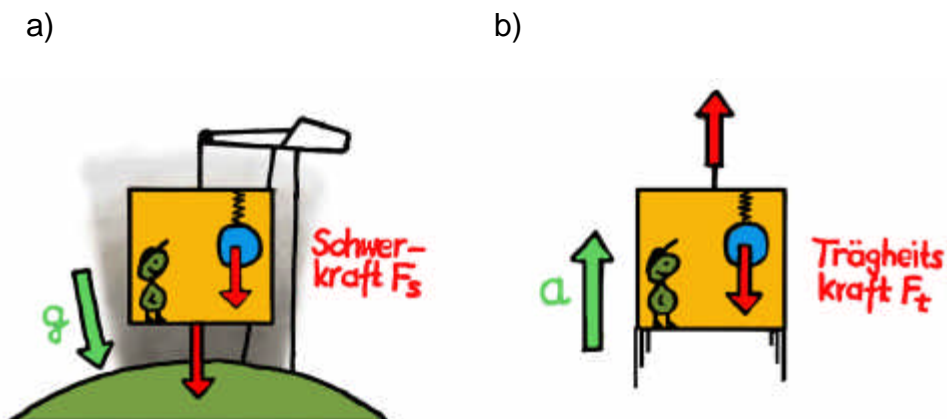
Sechs Jahre waren seit der Veröffentlichung der Speziellen Relativitätstheorie vergangen, als der damals 32jährige Einstein im Jahr 1911 mit dem „Äquivalenzprinzip“ großes Aufsehen unter den Forschern seiner Zeit erregte.

Der Kerngedanke dieses Prinzips ist gerade die Lösung unseres Problems. Der große Wissenschaftler hatte auf geniale Art und Weise jenes, bis dahin unbekanntes Naturgesetz gefunden, aus dem die Gleichheit von träger und schwerer Masse folgt.

Das von ihm zugrunde gelegte Gedankenexperiment soll im folgenden erläutert werden. Doch vorher müssen wir uns daran erinnern, was im Abschnitt 3.5. zur Trägheitskraft gesagt worden ist. Der Leser möge an dieser Stelle ruhig einmal zurückblättern. Für den beschleunigten Beobachter in Abb.31 treten scheinbar Kräfte auf, die sein Probe-Pendel nach links auslenken. Der außen stehenden Beobachter dagegen erkennt, dass die scheinbare Auslenkung des Pendels durch nichts anderes als sein Beharrungsvermögen, d.h. durch seine Trägheit entsteht. Daher heißen die in solchen beschleunigten Bezugssystemen für den mitbeschleunigten Beobachter auftretenden Kräfte auch „Trägheitskräfte“.

Doch nun zu dem von Einstein angestellten Gedankenexperiment: Wir denken uns einen Physiker in einer Kabine ohne Fenster eingeschlossen. Er beobachtet eine größere Kugel, die mit einer Feder an der Decke der Kabine befestigt ist. Die gesamte Kabine soll im ersten Fall an einem Seil bewegungslos im Schwerfeld (beispielsweise der Erde) hängen und im zweiten Fall möge die Kabine im nahezu gravitationsfreien Raum mit Hilfe des Seiles auf eine uns gleichgültige Art und Weise beschleunigt werden.

Abb.55



Die entscheidende Frage lautet jetzt: Gibt es für den Physiker in der Kabine eine Unterscheidungsmöglichkeit zwischen diesen beiden Fällen? Kann er irgendwie feststellen, ob die Kabine bewegungslos im Schwerfeld hängt oder außerhalb des Schwerfeldes beschleunigt wird?

Die Antwort lautet: „Nein!“ Der Physiker wird keinerlei Unterscheidungsmöglichkeit finden!

Im ersten Fall (Abb.55 a) führt die Schwere der Kugel im Gravitationsfeld zur Dehnung der Feder und im zweiten Fall (Abb.55 b) erreicht die Trägheit der Kugel dasselbe Resultat. Wir kommen zu dem Ergebnis:

Vom mitbeschleunigten Bezugspunkt aus gesehen, sind Trägheitskraft und Gravitationskraft (räumlich begrenzt) nicht unterscheidbar.<sup>35</sup>

Aber nicht nur die Kräfte sind für den Physiker in der Kabine in beiden Fällen die gleichen: Er wird überhaupt keinen physikalischen Vorgang finden, der ihm einen Unterschied zeigen könnte.

Beispielsweise rollt im ersten Fall (Kabine bewegungslos im Schwerfeld) eine kleinere Kugel die geneigte Ebene herab, weil sie über die Eigenschaft der Schwere verfügt und deshalb durch die Gravitationskraft „nach unten“ angezogen wird.

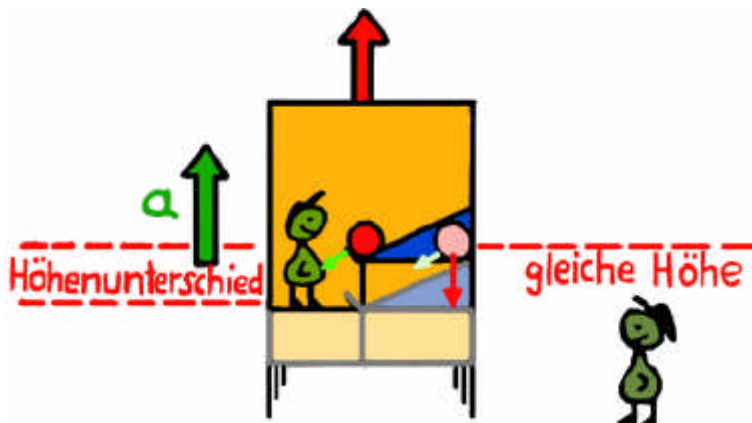
Abb.56



Die Gravitationskraft führt zur Abwärtsbewegung der Kugel, weil diese die Eigenschaft besitzt, schwer zu sein.

Im anderen Fall (beschleunigte Kabine außerhalb eines Schwerfeldes) wird die Kugel (bei gleichen Kräften) mit der gleichen Geschwindigkeit die geneigte Ebene herabrollen.

Abb.57



Was der außen stehende Beobachter als Trägheit wahrnimmt, wird der mitbeschleunigte Physiker als Wirkung einer nach „unten“ gerichteten Kraft einschätzen.

<sup>35</sup> Was es mit dieser „räumlichen Begrenzung“ auf sich hat, klärt der nächste Abschnitt.

Der außen stehende Beobachter weiß aber, dass der Bewegungsablauf dieses Mal dadurch hervorgerufen wird, dass die Kugel auf der gleichen „Höhe“ verharren „möchte“ und deshalb die Bewegung an das linke Ende der geneigten Ebene mit (Trägheits-)Widerstand „in Kauf nimmt“.

Demnach gibt es für den in der Kabine eingeschlossenen Physiker auch hinsichtlich der geneigten Ebene keine Unterscheidungsmöglichkeit zwischen beiden, geschilderten Fällen.

So gelangte Einstein durch Verallgemeinerung zu dem schon erwähnten Äquivalenzprinzip:

Kein physikalischer Vorgang zeigt dem in einer Kabine eingeschlossenen Physiker, ob sich sein Kabine *außerhalb* von Schwerfeldern **beschleunigt** bewegt, oder ob sie sich *innerhalb* von Schwerfeldern **gleichförmig** bewegt.

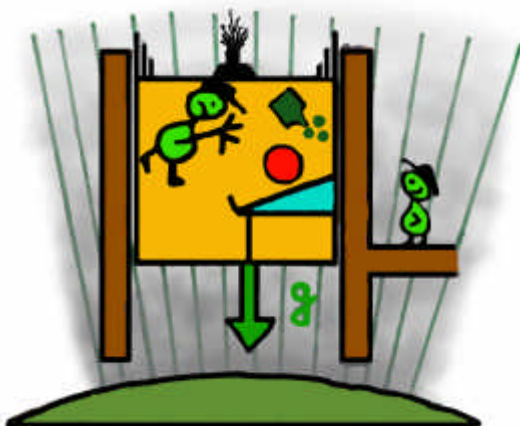
Gravitationsfeld und beschleunigte Bewegung sind (räumlich begrenzt) einander völlig gleichwertig, sie sind zwei verschiedene Erscheinungsformen ein und der selben Sache.

Was diese Aussage bedeutet, können wir uns auch überlegen, indem wir uns die Situation in einem Fahrstuhl vorstellen, dessen Seil gerissen ist und der sich im freien Fall beschleunigt nach unten bewegt (Eine ausgeklügelte Auffang-Vorrichtung soll ein Unglück natürlich verhindern!).

Im Fahrstuhl tritt Gewichtslosigkeit ein, ein losgelassenes Buch schwebt aufgeblättert in der Luft, ein Wassertropfen verharrt als Kugel an seinem Ort (mitbeschleunigter Beobachter). Daran ist zu ersehen, dass eine beschleunigte Bewegung wie der freie Fall (räumlich begrenzt) ein Gravitationsfeld lokal ausgleicht (kompensiert), wenn Gravitationswirkung und Beschleunigung gleich groß und gleich gerichtet sind.

Der ruhende Beobachter aber spürt nach wie vor das Schwerfeld (er hat ein Gewicht) und sieht „lediglich“ den Fahrstuhl mitsamt allen Inhaltes aufgrund des Schwerfeldes fallen.

Abb.58

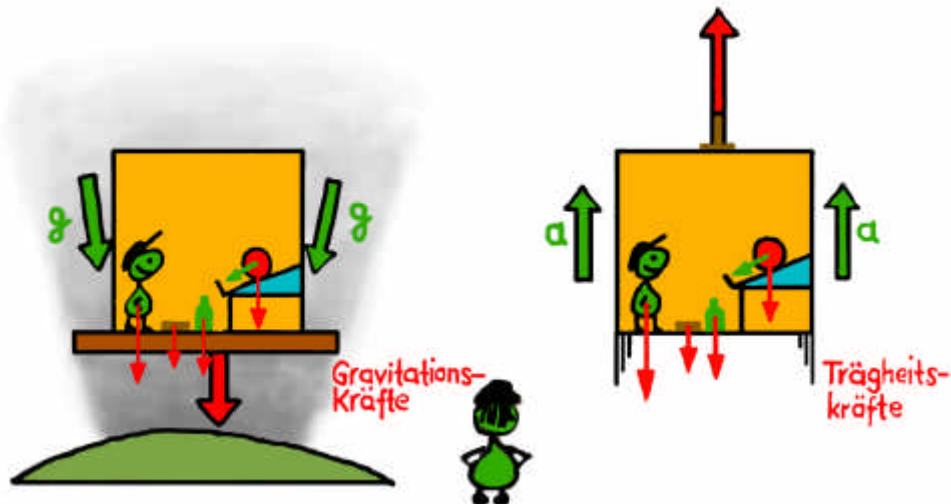


Im Fahrstuhl-Inneren ist für den mitbeschleunigten Beobachter das Schwerfeld durch die beschleunigte Fallbewegung kompensiert.

Für den ruhenden Beobachter wirkt das Schwerfeld aber nach wie vor, ja mehr noch: es ist gerade die Ursache der Fallbewegung.

Sind dagegen Schwerkraftwirkung und Beschleunigung entgegengesetzt gerichtet, so wird in beiden Fällen keine Gewichtlosigkeit herrschen, es fehlt für den internen Beobachter jede Unterscheidungsmöglichkeit. Der außen stehende Beobachter aber kann – wie besprochen – beides wohl voneinander unterscheiden.

Abb.59



Nachdem wir jetzt das Äquivalenzprinzip kennen gelernt haben, sind wir in der Lage, Newtons Behauptung zu untermauern – besser noch: die aus seiner Sicht nicht begründbare Vermutung zu bestätigen und zu erklären: Es erscheint nunmehr die Gleichheit von träger und schwerer Masse wie eine Selbstverständlichkeit, wenn wir bedenken, dass „beschleunigte Bewegung“ ( $m_t$ ) und „Schwerefeld“ ( $m_s$ ) nur zwei verschiedene Namen ein und desselben Sachverhaltes sind. Träge und schwere Masse müssen gleich sein, denn sie sind miteinander identisch.

Durch diese Erkenntnis wird jetzt auch klar, warum das vorhin neu eingeführte Begriffssystem sehr zweckmäßig war. Es reicht nämlich jetzt aus, von „der Masse“ eines Körpers zu sprechen. Man muss nur ein Bezugssystem angeben und dazusagen, ob der **ausenstehende** Beobachter ein Schwerfeld oder eine beschleunigte Bewegung als Ursache physikalischer Vorgänge wahrnimmt.

Nebenbei bemerkt: Eine damit zusammenhängende Folge des Äquivalenzprinzips ist auch die Tatsache, dass im luftleeren Raum alle Körper gleichschnell fallen, ganz gleich, wie groß sie sind und aus welchem Material sie bestehen.<sup>36</sup>

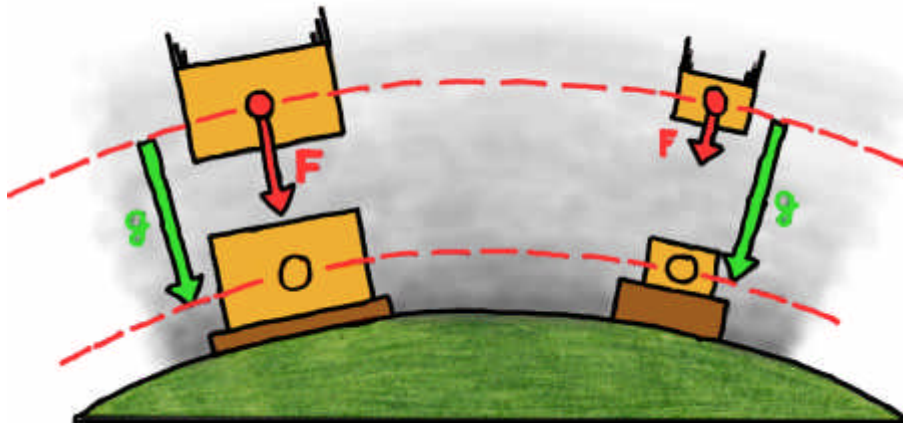
Auf einen großen Körper wirkt zwar wegen seiner großen Schwere eine große Gravitationskraft, aber aufgrund der Gleichheit von träger und schwerer Masse setzt dieser Körper der großen Gravitationskraft auch einen großen Trägheitswiderstand entgegen.

<sup>36</sup> „Gleichschnell“ meint hier: mit derselben Durchschnittsgeschwindigkeit im Vergleich zueinander.

Vielleicht erinnert sich der Leser auch an den Versuch des Physik-Unterrichtes, bei dem in einer Vakuum-Röhre eine Vogelfeder und eine Bleikugel fallengelassen wurden und beide Körper im selben Moment unten ankamen.



Abb. 60



Beiden Körpern auf gleicher Höhe wird die gleiche Beschleunigung  $g$  erteilt.

Auf den kleinen Körper wirkt nur eine kleine Gravitationskraft, allerdings kann er auch nur mit einem kleinen Trägheitswiderstand aufwarten.<sup>37</sup>

Aus diesem Grunde erteilt ein Schwerfeld allen Körpern auf gleicher Höhe die gleiche Beschleunigung und sie treffen im gleichen Zeitpunkt auf der Oberfläche (beispielsweise eines Planeten) auf.<sup>38</sup>

Am Schluss dieses Abschnittes angelangt, versteht der Leser auch, was zu Beginn des Kapitels 4 nur eine Behauptung war: Die Theorie der beschleunigten Bezugssysteme muss auch eine Theorie der Gravitation sein.

So wollen wir uns jetzt – ausgerüstet mit dem Wissen über das Äquivalenzprinzip – einen weiteren Schritt nach vorn wagen und uns der Relativität der beschleunigten Bezugssysteme zuwenden.

#### 4.3. Spezielles Relativitätsprinzip, beschleunigte Bezugssysteme und der endgültige Untergang des absoluten Raumes

Der Leser hat erfahren, dass die Theorie der beschleunigten Bezugssysteme eine Theorie der Gravitation sein muss. Deshalb stellt sich nun die Frage, welchen Einfluss die Gravitationsfelder auf Bezugssysteme ausüben.

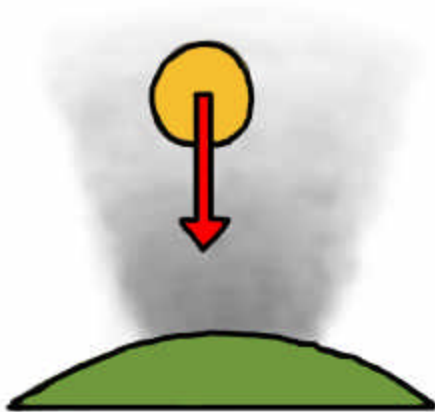
<sup>37</sup> Wir gehen hierbei von gleicher Dichte der beiden zu vergleichenden Körper aus. Die unterschiedliche Darstellungsgröße soll die unterschiedlich großen Massen veranschaulichen.

<sup>38</sup> Die Aussage über das gleichzeitige Auftreffen bezieht sich hier auf den ruhenden Beobachter, der diese Geschehnisse vom Planeten aus verfolgt. Wir wissen, dass für einen anderen Beobachter, der in einem Raumschiff an diesem Planeten mit großer Geschwindigkeit vorbeifliegt, die Körper trotz gleicher Ausgangshöhe und Beschleunigung unter Umständen zu verschiedenen Zeitpunkten auftreffen können (Relativität der Gleichzeitigkeit). Außerdem heißt „gleiche Höhe“ hier: „gleiche Höhe der Massenmittelpunkte“, an denen die Kräfte angreifen. Dementsprechend bedeutet „gleichzeitiges Auftreffen“ hier: „gleichzeitiges Erreichen einer Höhe durch die Massenmittelpunkte“.

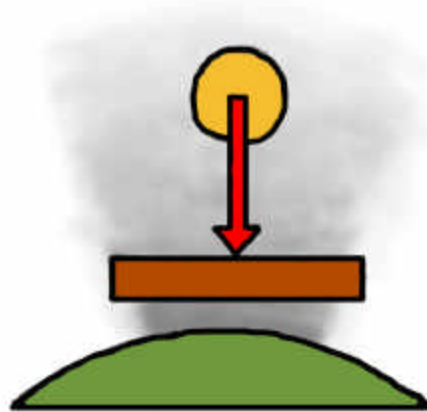
Die Schwerefelder besitzen nicht nur, wie im Abschnitt 4.1. erwähnt, unendliche Reichweite, sondern außerdem noch die Eigenart, dass sie sich durch nichts abschirmen lassen.

Abb.61

a)



b)



Dies bedeutet, dass *jegliche* Bezugssysteme Gravitationsfeldern ausgesetzt sind. Da aber in jedem Gravitationsfeld auf Probekörper eine Kraft wirkt und jede auf einen frei beweglichen Probekörper wirkende Kraft diesem eine Beschleunigung erteilt, muss folgendes Zwischenergebnis festgehalten werden:

Bedingt durch die unendliche Reichweite und Nichtabschirmbarkeit der Gravitationsfelder – deren Kraftwirkungen frei beweglichen Bezugssystemen Beschleunigungen erteilen – gibt es (streng genommen) keine frei beweglichen Bezugssysteme, die sich relativ zu dem das Schwerefeld hervorrufenden Körper gleichförmig, d.h. unbeschleunigt bewegen.

Selbstverständlich finden wir in unserer Umgebung viele Bezugssysteme, die sich gleichförmig relativ zur Erde bewegen. Aber diese sind nicht frei beweglich, weil sie an bestimmte Höhen gebunden sind (z.B. gleichförmig fahrender ICE). Sobald ein System freibeweglich ist, wird es im Schwerefeld der Erde zu einem beschleunigten System (z.B. ein geworfener Ball).

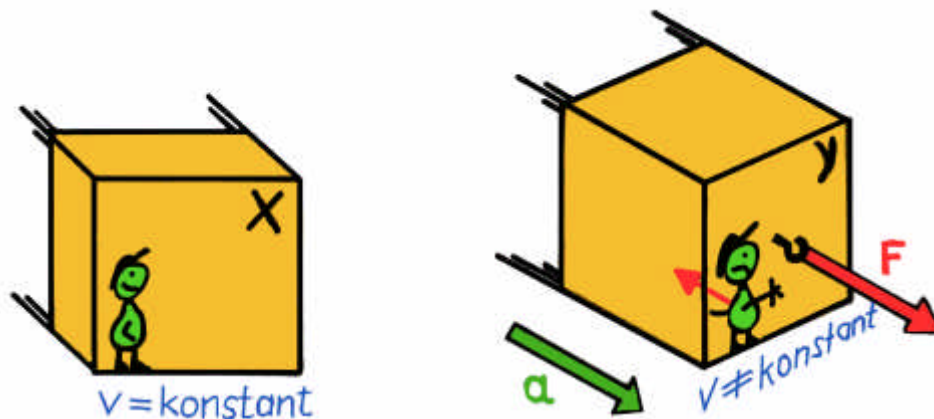
An diesen Überlegungen ist zu erkennen, dass in der Natur am häufigsten *beschleunigte* Bezugssysteme vorkommen und wir uns deshalb mit ihnen näher befassen müssen.

Eine wichtige Frage lautet: „Welche Naturgesetze wirken in beschleunigten Bezugssystemen?“

Bisher ist uns ja lediglich bekannt, dass in solchen beschleunigten Systemen sogenannte Trägheitskräfte auftreten, die mechanische Prozesse sicherlich beeinflussen und dadurch eventuell anders ablaufen lassen, als in vergleichbaren Inertialsystemen. Wir formulieren diese Problematik deshalb etwas genauer und fragen: „Wirken in beschleunigten Bezugssystemen die gleichen Naturgesetze wie in Inertialsystemen?“

Wenngleich die Inertialsysteme *nicht* frei beweglich sind<sup>39</sup>, so kennen wir doch die Gesetzmäßigkeiten, die in ihnen wirken, aus der Speziellen Relativitätstheorie. Lassen sich diese Gesetzmäßigkeiten auf beschleunigte Bezugssysteme übertragen, obwohl in ihnen zusätzliche Trägheitskräfte vorkommen? Also überlegen wir uns, ob der Physiker **X** im Inertialsystem und der Physiker **Y** im beschleunigt bewegten Bezugssystem die gleichen Naturgesetze feststellen können:

Abb. 62

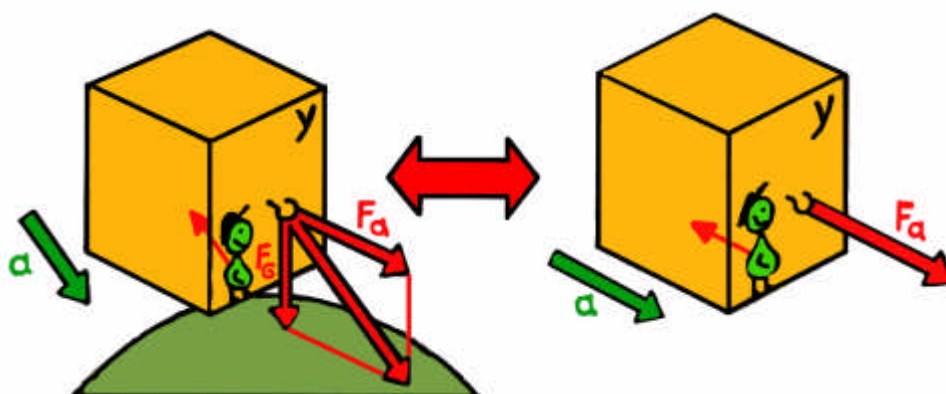


Stellen **X** und **Y** die gleichen Naturgesetze fest ?

Von beiden Bezugssystemen ist bekannt, dass sie der Wirkung der Gravitation unterliegen. Allerdings wird die Gravitation für das beschleunigte System eine untergeordnete Rolle spielen:

Ist das beschleunigte System frei beweglich, dann kommt zwar im Fall einer Gravitationswirkung zur beschleunigenden Kraft  $F_a$  eine zusätzliche Kraft (nämlich die Gravitationskraft  $F_G$ ) hinzu, doch ändert sich dadurch an der Bewegungsart des Systems nichts.

Abb. 63

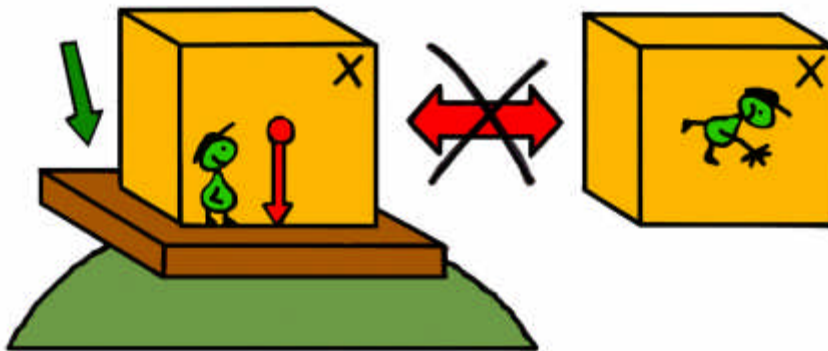


<sup>39</sup> Alle in diesem Abschnitt nachfolgend behandelten Inertialsysteme werden als *nicht* frei beweglich vorausgesetzt, sollen sich also trotz der überall vorhandenen Gravitationswirkungen tatsächlich gleichförmig bewegen.

Demnach kann das beschleunigte Bezugssystem trotz der unendlichen Reichweite der Gravitationsfelder so betrachtet werden, als würde es von den Schwerfeldern nicht beeinflusst.

Dieser Gedankengang, der sich auf die Gleichberechtigung aller Raumrichtungen stützt, gilt aber für das Inertialsystem  $X$  nicht, da sich in ihm die Vernachlässigung der Gravitationswirkung nicht nur in einer Richtungsänderung der angreifenden Kraft äußert, sondern in einer für den Physiker  $X$  nicht ohne Folgen bleibenden Betragsänderung.<sup>40</sup>

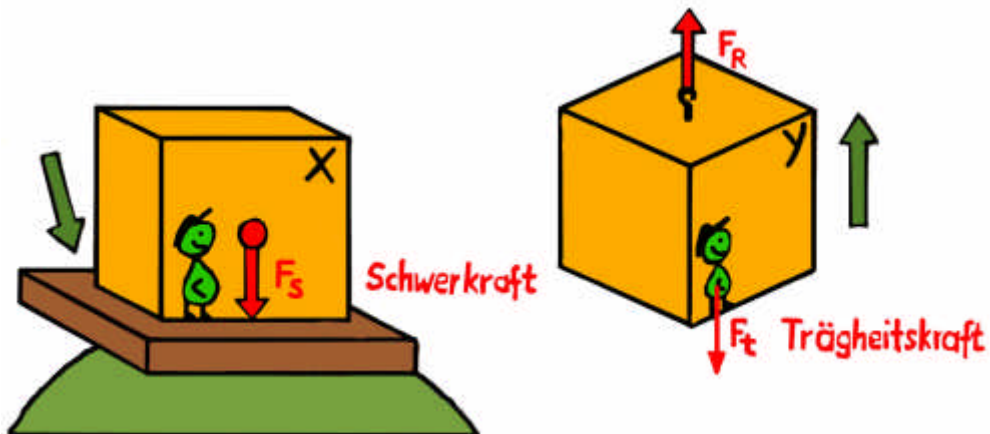
Abb.64



Für das Inertialsystem  $X$  darf die Wirkung der Schwerkraft nicht außer acht gelassen werden.

Der Einfluss der Gravitationsfelder auf Inertialsysteme und beschleunigte Bezugssysteme muss also genau beachtet werden und wir stellen die Frage nach den Naturgesetzen unter Berücksichtigung dieser Tatsache noch einmal: Wir wollen wissen, ob der Physiker  $X$  in einem vom Schwerfeld angezogenen **Inertial-system** die gleichen Naturgesetze feststellen kann, wie der Physiker  $Y$  in einem vom Schwerfeld nicht beeinflussten **beschleunigten Bezugssystem**.

Abb.65



$F_R$  resultierende beschleunigende Kraft

<sup>40</sup> Ob im Inertialsystem eine Kraft (Schwerkraft) wirkt oder nicht, ist von entscheidender Bedeutung. Dagegen spielt die Richtung der im beschleunigten System angreifenden Kraft (Resultierende aus  $F_a$  und  $F_G$ ) keine Rolle, denn alle Raumrichtungen sind gleichberechtigt, man sagt: „Der Raum ist isotrop.“

Da fällt uns auf, dass die zwei in Abb.65 dargestellten Bezugssysteme ja durch das Äquivalenzprinzip miteinander verknüpft sind!

Schwerefeld und beschleunigte Bewegung sind nämlich (räumlich begrenzt) einander völlig gleichwertig, hatten wir festgehalten. Gravitationskräfte und Trägheitskräfte sind wesensgleich.

Diese Aussage nun gibt dem Physiker **Y** die Möglichkeit, die in seiner beschleunigt bewegten Kabine auftretenden Trägheitskräfte auch als Gravitationskräfte irgend eines Schwerfeldes deuten zu können und von den Gravitationskräften ist uns bekannt, dass sie *jegliche* Bezugssysteme beeinflussen. Damit stellt das Auftreten von Trägheitskräften im beschleunigten System keinen Unterschied zum unbeschleunigten Inertialsystem dar, denn im letzteren wirken ebenfalls diese Kräfte (wenngleich hier als Gravitationskräfte, was der Physiker **X** aber auch nicht eindeutig feststellen kann, wenn er von seiner Außenwelt wirklich abgeschlossen ist).

Auf diese Weise verschwindet der Unterschied zwischen den Inertialsystemen im Schwerfeld und den beschleunigten Systemen außerhalb der Gravitation und es kann uns nichts mehr daran hindern festzustellen:

Im beschleunigten Bezugssystem fern von Schwerfeldern stellen sich uns die Naturgesetze in der gleichen Form dar, wie in Inertialsystemen, die von Schwerfeldern angezogen werden.

Nunmehr kommt der Gedanke, dass die Gravitationswirkungen auf die Bewegungsart des beschleunigten Systems keinerlei Auswirkungen haben, noch einmal zum Tragen. Vorhin berücksichtigten wir diese Gravitationseinflüsse nicht (um die für die Anwendung des Äquivalenzprinzips nötigen Randbedingungen zu erfüllen) und dabei traten keine, für Beobachter **Y** bemerkbaren Veränderungen auf (Abb.63). So können wir jetzt – wiederum ohne Auswirkungen – die Gravitationseinflüsse auf das beschleunigte System wieder hinzunehmen, ohne dass dadurch nachträglich die Gleichheit der Verhältnisse für Physiker **X** und Physiker **Y** in Frage gestellt wird.

Damit brauchen wir nun nicht mehr von speziellen beschleunigten Bezugssystemen – nämlich denen fern von Schwerfeldern – zu sprechen, sondern können ganz allgemein sagen:

Die physikalischen Gesetze stellen sich in allen beschleunigt bewegten Bezugssystemen in der gleichen Form dar, wie auch in Inertialsystemen.

Diesen Sachverhalt formuliert man üblicher Weise so:

Alle beliebig zueinander bewegten Bezugssysteme sind zur Beschreibung des Naturgeschehens gleichberechtigt, denn beim Übergang von einem System zum anderen bleibt die Form der Naturgesetze erhalten.

Im mathematischen Apparat der Allgemeinen Relativitätstheorie erkennt man das daran, dass die einem Standortwechsel unterworfenen (z.B.) Bewegungsgleichungen eines Körpers wieder die gleichen Bewegungen darstellen, wie die Ausgangsgleichungen.<sup>41</sup>

Verschaffen wir uns noch einmal einen Überblick: Wir waren von der Fragestellung ausgegangen: „Lassen sich die in Inertialsystemen auftretenden Formen der Naturgesetze auf beschleunigte Bezugssysteme übertragen, obwohl in denen zusätzliche Trägheitskräfte wirken?“

Diese Frage war die Frage nach der Gültigkeit des Relativitätsprinzipes. Von solchen Bezugssystemen, für die das Relativitätsprinzip gültig ist (bisher waren es ja nur die Inertialsysteme), wissen wir, dass *die* sich hinsichtlich der Formulierungen der in ihnen auftretenden Naturgesetze *nicht* unterscheiden. Demnach musste untersucht werden, ob der Gültigkeitsbereich des Relativitätsprinzips auf beliebige Bezugssysteme erweitert werden kann.

Diese Frage konnten wir nach Anwendung des Äquivalenzprinzipes bejahen und das so auf *beliebige* Bezugssysteme erweiterte Relativitätsprinzip nennt man auch „Allgemeines Relativitätsprinzip“<sup>42</sup>

Bevor eine Zusammenfassung diesen verhältnismäßig schwierigen Abschnitt beendet, müssen wir allerdings noch einige Einschränkungen vornehmen. Für die von uns getroffene Aussage zur Relativität muss die Voraussetzung erfüllt sein, dass sich alle Einflüsse der Umgebung auf die betrachteten Systeme abschirmen oder ausgleichen lassen, dass die Beobachter vollständig von ihrer Außenwelt isoliert sind.

Neben den meisten anderen abschirmbaren Umgebungseinflüssen lassen sich Schwerfelder nicht abschirmen – aber wir konnten sie unter Anwendung des Äquivalenzprinzips für den von uns betrachteten Beobachter durch entsprechend gewählte Beschleunigungen seines Systems als ausgeglichen annehmen. Allerdings führt die räumliche Begrenztheit in der Wesensgleichheit von Trägheits- und Gravitationskräften dazu, dass auch unser Allgemeines Relativitätsprinzip nur von lokaler Gültigkeit ist.

Warum aber gelten beide Prinzipien nur räumlich begrenzt?

Obwohl wir unter Anwendung des Äquivalenzprinzipes einen wesentlichen Unterschied zwischen beschleunigt bewegten und gleichförmig bewegten Bezugssystemen beseitigen konnten, gibt es aber dennoch zwei Schwierigkeiten, denen wir nicht aus dem Wege gehen dürfen.

---

<sup>41</sup> Man sagt dazu auch: „Form-Invarianz der Gleichungen gegenüber Koordinaten-Transformationen“.

<sup>42</sup> Es soll nicht verschwiegen werden, dass es viele verschiedene Formulierungen des Relativitätsprinzipes gibt, von denen sich einige teilweise überschneiden. Außerdem unterscheidet man sogenannte „globale“, „lokale“ und „infinitesimale“ Formen. Unsere Formulierung entspricht der lokalen Form, da Bezugssysteme endlichen Ausmaßes betrachtet wurden. Hierbei muss als Voraussetzung jedoch erfüllt sein, dass prinzipiell alle Einflüsse der Umgebung auf das betrachtete System abgeschirmt oder ausgeglichen werden können. D.h. man muss die Beobachter als von ihrer Außenwelt isoliert annehmen. Warum diese Voraussetzung erfüllt sein muss, wird im folgenden noch erwähnt.

Die eine Schwierigkeit zieht später in ihrer Überwindung Konsequenzen grosser Tragweite nach sich, weswegen ihr ein eigener Abschnitt (4.5.) gewidmet wird.

Die andere, sich uns entgegenstellende Schwierigkeit besteht in folgendem: Wir haben uns im Abschnitt 4.1. ein Gravitationsfeld durch das Modell „Feldlinie“ veranschaulicht. Dabei handelte es sich aber um ein Gravitationsfeld, das seinerseits durch keine Einflüsse gestört wird. Die Gravitationsfeldstärke eines solchen Feldes nimmt ganz regelmäßig nach allen Seiten mit größer werdender Entfernung rasch ab – der das Feld verursachende Körper wurde ebenfalls als von seiner Umgebung völlig isoliert angenommen. Ein solches, kugelsymmetrisches Feld könnte man als „regulär“ bezeichnen.

Betrachten wir nun große Raumbereiche, dann dürfen wir uns der Tatsache, dass ein jeder Fixstern, ein jeder Planet, ein jeder Körper ein Schwerefeld besitzt, nicht entziehen.

Da Schwerefelder unendliche Reichweite besitzen, müssen wir also berücksichtigen, dass sich in jedem Punkt des Raumes genaugenommen viele Gravitationsfelder überlagern. Sie beeinflussen sich gegenseitig und sind deshalb nicht regulär. Weil nun das Äquivalenzprinzip und – in folgedessen auch – das Allgemeine Relativitätsprinzip nur für reguläre Gravitationsfelder erklärt wurden, können sich die Gültigkeitsgrenzen beider Prinzipien nicht auf die betrachteten großen Raumbereiche, sondern nur auf solche kleineren Bereiche erstrecken, in denen man die dort wirkenden Gravitationsfelder (ohne wesentliche Fehler zu begehen) als störungsfrei, regulär ansehen kann.

Soviel zur Frage der lokalen Gültigkeit des Allgemeinen Relativitätsprinzipes. Allerdings haben wir noch nicht geklärt, *warum* nun für die lokale Form des Relativitätsprinzipes auch noch die Voraussetzung erfüllt sein muss, dass die Beobachter von ihrer Außenwelt abgeschlossen sein müssen:

Um eine, in einer bestimmten Richtung wirkende Trägheitskraft als Gravitationskraft deuten zu können, muss der mitbeschleunigte Beobachter annehmen, ein Gravitationsfeld existiere derart, dass auch mit ihm die auftretenden Trägheitserscheinungen eine Erklärung finden können. Da aber nicht nur auf der Erde, sondern im gesamten Weltall die (an bestimmten Punkten wirkenden) Gravitationskräfte durch die momentane Verteilung von Planeten, Fixsternen, Körpern usw. genau bestimmt ist, kann der mitbeschleunigte Beobachter die eben genannte Annahme (genau in Wirkungsrichtung der Kräfte befände sich das Zentrum eines Schwerefeldes) nur dann zugrunde legen, wenn er eben die momentane Massenverteilung *nicht* kennt, d.h. *nicht* weiß, ob in der betreffenden Richtung tatsächlich ein Gravitationsfeld vor ihm liegt.

Nur unter dieser Bedingung bleibt dem Beobachter zur Erklärung bestimmter Vorgänge die Wahl zwischen „beschleunigter Bewegung“ und „Gravitation“.

Doch zurück zum Allgemeinen Relativitätsprinzip. Die Überschrift hat es schon verraten: Unter Beachtung der eben behandelten Einschränkungen bzw. Bedingungen können wir eine Schlussfolgerung ziehen, die den Begriff des absoluten Raumes betrifft.

Die anhand der Längenkontraktion aus der Speziellen Relativitätstheorie eingeführte Relativierung des Raumes entkräftet noch nicht das Argument, dass die Trägheitserscheinungen als „innere Anzeichen absoluter Bewegungen“ den Begriff des absoluten Raumes in gewisser Weise rechtfertigen. Man braucht – so

lautete die Behauptung der klassischen Physik – kein anderes Bezugssystem angeben, relativ zu dem sich eine Kabine bewegt. Denn um eine Aussage über den Bewegungscharakter der Kabine treffen zu können, würde schon die Beobachtung der in ihr auftretenden Trägheitserscheinungen ausreichen. Der Begriff des absoluten Raumes erhielt seinen Sinn durch die Sonderstellung solcher Bezugssysteme, in denen keine Trägheitserscheinungen wahrgenommen werden können und die deshalb als „absolut unbeschleunigt“ bezeichnet wurden.

Wir wissen aber, dass generell alle Bezugssysteme gleichberechtigt sind (lokal begrenzt, Beobachter isoliert). Trägheitskräfte sind keine inneren Anzeichen absoluter Bewegungen, weil sie als Gravitationskräfte gedeutet werden können und damit auch Trägheitserscheinungen keine eindeutigen Aussagen mehr zulassen, wenn das Bezugssystem fehlt.<sup>43</sup>

Der Raum selber kann demnach nicht als absolut ruhendes Koordinatensystem dienen, damit verliert er nun endgültig seinen absoluten Charakter.

Zusammenfassung:

Die Spezielle Relativitätstheorie mit allen ihr eigenen Effekten bezieht sich auf Inertialsysteme. Aufgrund der unendlichen Reichweite der Gravitationsfelder gibt es aber streng genommen keine frei beweglichen Inertialsysteme, weswegen Einstein nach Vollendung der speziellen Theorie mit seiner Arbeit noch nicht zufrieden war und eine Erweiterung der Theorie auf beschleunigt bewegte Bezugssysteme vornehmen musste.

Ein Pendel-Experiment zeigte uns den Zusammenhang zwischen beschleunigter Bewegung und der Wirkung der Schwerefelder. Die Eigenschaften „Trägheit“ und „Schwere“ eines Objektes sind einander gleich, die träge Masse ist bei geeigneten gewählten Maßeinheiten gleich der schweren Masse. Daraus schlossen wir anhand eines Gedankenexperimentes auf die lokale Ununterscheidbarkeit von Trägheits- und Gravitationskräften für den mitbeschleunigten und von seiner Außenwelt isolierten Beobachter. Die Verallgemeinerung dieser Tatsache formulierten wir in dem als „Äquivalenzprinzip“ bekanntem Satz, dass Gravitation und beschleunigte Bewegung (lokal) von gleichem Wesen sind. Mit

---

<sup>43</sup> Für den besonders interessierten Leser: Um die Ursachen dieser Gravitationskräfte aufzuzeigen, nimmt man entsprechend einem von dem Physiker Ernst Mach (1838-1916) formulierten Postulat (Forderung) an, sie seien eine Art (von der Relativgeschwindigkeit des Bezugssystems abhängige) Gravitationskräfte der fernen kosmischen Massen (Fixsterne). Ein rotierendes System kann so entsprechend dem Allgemeinen Relativitätsprinzip als ruhend betrachtet werden, wenn die in ihm auftretenden Trägheitskräfte (Fliehkräfte) als beschleunigungsabhängige Gravitationskräfte des nunmehr rotierenden Fixsternhimmels aufgefasst werden. Auf diese Weise lassen sich ohne Verletzung von Äquivalenzprinzip und Allgemeinem Relativitätsprinzip zwei Probleme klären: Zum ersten braucht der in einer Kabine befindliche Beobachter nicht mehr von seiner Außenwelt abgeschlossen zu sein. Zwar kann er sich durch einen Blick nach d'raußen Klarheit über den Bewegungszustand seiner Kabine verschaffen, doch hat er damit sofort den Fixsternhimmel als Bezugssystem genutzt.

Zum zweiten steht die Mach'sche Forderung auch in Übereinstimmung mit der aus dem Äquivalenzprinzip resultierenden Tatsache, dass nicht nur die trägen Massen, sondern auch die schweren Massen und damit auch die Gravitationskräfte geschwindigkeitsabhängig sind.

(In der speziellen Relativitätstheorie ist nur die Trägheit der Körper geschwindigkeitsabhängig, wohingegen in der Allgemeinen Relativitätstheorie – bedingt durch das Äquivalenzprinzip – sowohl die Trägheit als auch die Schwere eines Körpers beschleunigungsabhängig werden.)

Diese kosmische Interpretation geht über die lokale Gültigkeit von Äquivalenzprinzip und Allgemeinem Relativitätsprinzip hinaus.



Hilfe dieses Satzes beantworteten wir die Frage, ob die Naturgesetze sich nicht nur beim Wechsel von einem Inertialsystem zum anderen (wie aus der Speziellen Relativitätstheorie bekannt), sondern vielleicht auch beim Wechsel von einem beschleunigten System zum anderen in der *gleichen* Form aufschreiben lassen. Trotz des Auftretens von Trägheitserscheinungen konnten wir diese Frage bejahen und feststellen: Auch bezüglich beschleunigter Bezugssysteme gilt das Relativitätsprinzip, bleibt die Form der Naturgesetze beim Wechsel des Beobachtungsstandortes unverändert. Das gab uns die Möglichkeit, die in Inertialsystemen gültigen Formulierungen der Naturgesetze auf beschleunigte Bezugssysteme zu übertragen. So konnten wir als Allgemeines Relativitätsprinzip festhalten, dass alle beliebig zueinander bewegten Bezugssysteme zur Beschreibung des physikalischen Geschehens gleichberechtigt sind.

Als nächstes soll untersucht werden, ob die Gesetzmäßigkeiten „Längen-Kontraktion“ und „Zeit-Dilatation“ auch tatsächlich in beschleunigt bewegten Bezugssystemen auftreten.

#### 4.4. Längenveränderung und Zeitdehnung im Schwerefeld

Die Grundlage der Allgemeinen Relativitätstheorie ist das Äquivalenzprinzip. Mit seiner Hilfe waren wir in der Lage, das Relativitätsprinzip auf beliebige Bezugssysteme zu erweitern.<sup>44</sup> Die Notwendigkeit, dies tun zu müssen, ergab sich aus unserer Erkenntnis, dass frei bewegliche Bezugssysteme aufgrund der unendlichen Reichweite der Gravitation immer beschleunigte Bezugssysteme sein müssen und deshalb die Beschränkung der Relativitätstheorie auf Inertialsysteme nicht zufrieden stellen kann.

Es ergibt sich jetzt die Frage, ob und wie die Gesetzmäßigkeiten der Speziellen Relativitätstheorie – erlaubt wäre das durch die verallgemeinerte Gültigkeit des Relativitätsprinzips – zu erweitern sind und was sich ggf. für Schlussfolgerungen daraus ziehen lassen.

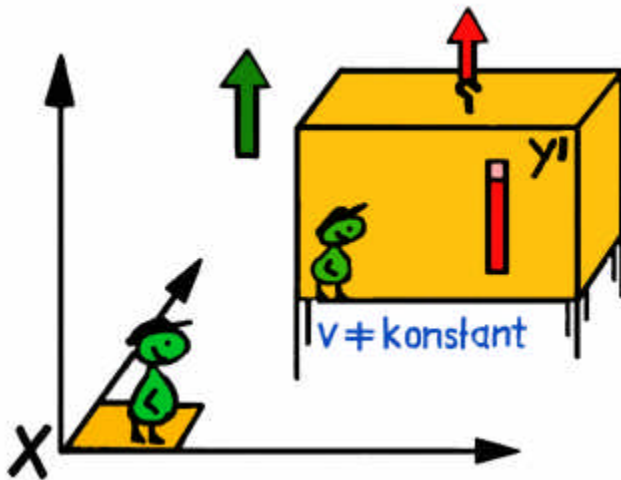
Am interessantesten erscheinen die Zusammenhänge, die uns in der speziellen Theorie zum relativen Charakter von Raum und Zeit führten.

Längenkontraktion und Zeitdilatation traten für uns bisher nur bei gleichförmigen Relativbewegungen zwischen Bezugssystemen auf. Es sollen sich jedoch gemäß dem Allgemeinen Relativitätsprinzip gleichförmig bewegte und (gleichmäßig) beschleunigt bewegte Bezugssysteme durch nichts unterscheiden. Daraus folgt:

Für den nicht mitbewegten Beobachter wird in einem bewegten Bezugssystem die Zeit auch dann langsamer vergehen und sich die Abmessung eines Körpers in Bewegungsrichtung auch dann verkürzen, wenn die Bewegung des Systems eine beschleunigte Bewegung ist.

<sup>44</sup> Es ist auch möglich, unter Annahme „allgemeiner Relativität“ umgekehrt zum Äquivalenzprinzip zu gelangen.

Abb.66



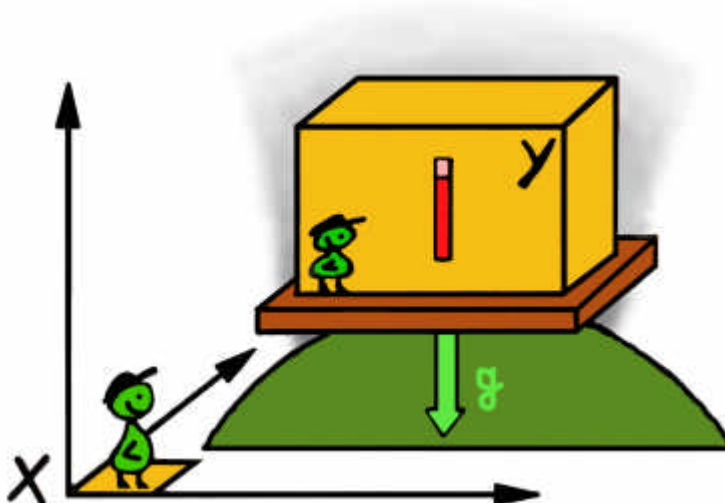
Am Beispiel der Längenkontraktion soll verdeutlicht werden, dass die Effekte der Speziellen Relativitätstheorie auch an beschleunigt bewegten Bezugssystemen zu beobachten sind.

Die in den Formeln  $t' = \frac{t}{\gamma(1 - (v^2/c^2))}$  und  $L' = L \cdot \gamma(1 - (v^2/c^2))$

enthaltene Geschwindigkeit  $v$  ist jetzt eben nicht mehr konstant, wie das für Inertialsysteme der Fall war, sondern veränderlich. Die Gültigkeit von Längenkontraktion und Zeitdilatation für beschleunigt bewegte Beobachter ist also eine einfache Folge des Allgemeinen Relativitätsprinzips.

Doch was geschieht, wenn unter Anwendung des Äquivalenzprinzips der beschleunigt bewegte Beobachter  $Y'$  (Abb.66) durch den im Schwerfeld ruhenden Beobachter  $Y$  ersetzt wird?

Abb.67



Eine der Schwerkraft entgegengesetzte, jedoch gleich große Gegenkraft gewährleistet, das  $Y'$  tatsächlich ein Inertialsystem ist. Doch nach wie vor wirkt die Gravitationsfeldstärke  $g$ . Bleiben die Effekte der Speziellen Relativitätstheorie auch hier gültig?

Wir stoßen auf ein überraschendes Ergebnis: Wenn Längenkontraktion und Zeitdilatation – so wie wir das gefordert hatten – auch für beschleunigte Bezugssysteme Gültigkeit besitzen und wenn sich nach dem Äquivalenzprinzip eine beschleunigte Kabine ohne Auswirkungen durch eine im Schwerfeld ruhenden

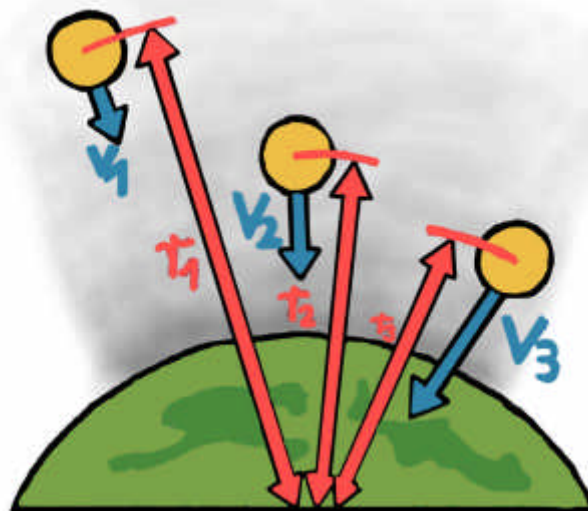
de Kabine ersetzen lässt<sup>45</sup>, dann müssen Längenkontraktion und Zeitdilatation auch in der Kabine auftreten, die im Schwerfeld ruht!

Die Frage ist nur, wovon die im ruhenden System auftretenden Effekte denn abhängen. Es ist zu vermuten, dass hier die Stärke des Gravitationsfeldes eine Rolle spielt. Dies kann durch die folgende Überlegung untermauert werden:

Längenänderung und Zeitdehnung sind bei Inertialsystemen von der Relativgeschwindigkeit zwischen den Systemen abhängig. Dieser – für Inertialsysteme gleichbleibenden – Relativgeschwindigkeit entspricht bei beschleunigten Systemen die sich ständig ändernde momentane Relativgeschwindigkeit (Augenblicksgeschwindigkeit). Wenn sich also nach dem Allgemeinen Relativitätsprinzip Inertialsysteme und beschleunigte Bezugssysteme nicht unterscheiden dürfen, dann muss die in den Lorentz-Transformationen auftretende Geschwindigkeit  $v$  für beschleunigte Bezugssysteme gerade als diese, sich von Augenblick zu Augenblick ändernde Momentangeschwindigkeit aufgefasst werden. Damit ergeben sich für solche Momentangeschwindigkeiten, die durch beschleunigende Kräfte immer größer werden, auch immer stärker werdende Längenänderung und Zeitdehnung. Als Folge des Äquivalenzprinzips sind aber ein beschleunigtes System (mit einer bestimmten Momentangeschwindigkeit) und ein an einem bestimmten Ort im Gravitationsfeld (ruhendes) System völlig gleichwertig<sup>46</sup>.

Warum aber ist der Abstand vom Zentrum des Schwerfeldes, in dem das zum beschleunigt bewegten System äquivalente System ruhen soll, genau bestimmt? Das ist deshalb so, weil alle in einem Schwerfeld frei fallenden Objekte eine um so größere Momentangeschwindigkeit besitzen, je kleiner die Entfernung zum Zentrum wird.

Abb.68

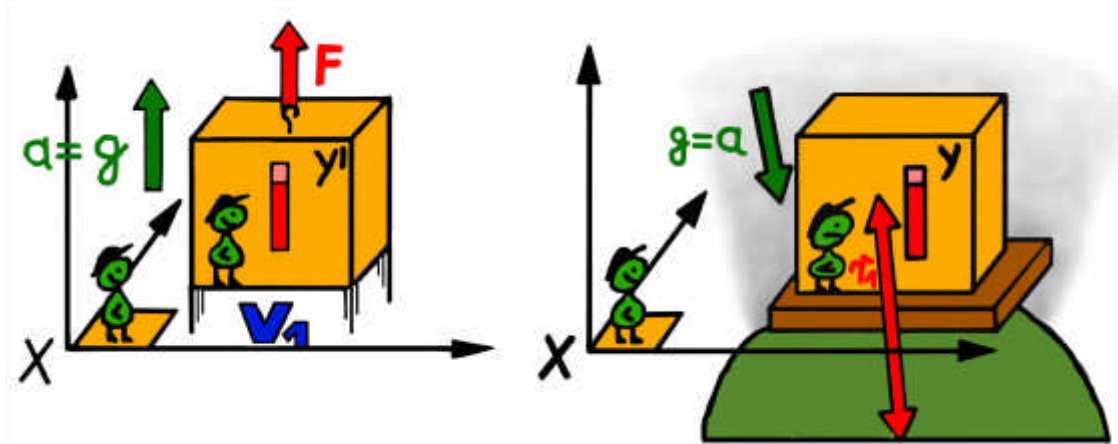


<sup>45</sup> Eine ruhende Kabine ist ein Inertialsystem mit der Relativgeschwindigkeit Null.

<sup>46</sup> Das ergibt sich aus der Überlegung, dass eine gleichmäßige Beschleunigung nichts anderes als die gleichmäßige zeitliche Veränderung einer bestimmten Momentangeschwindigkeit ist, und dass eine gleichbleibende Geschwindigkeit nichts anderes als die gleichmäßige zeitliche Änderung eines bestimmten Ortes ist. Deshalb sind nicht nur gleichmäßig beschleunigte und gleichförmig (d.h. mit konstanter Geschwindigkeit) bewegte Bezugssysteme einander äquivalent, sondern auch beschleunigte Systeme mit einer bestimmten Momentangeschwindigkeit und an bestimmten Orten im Schwerfeld ruhende Systeme.

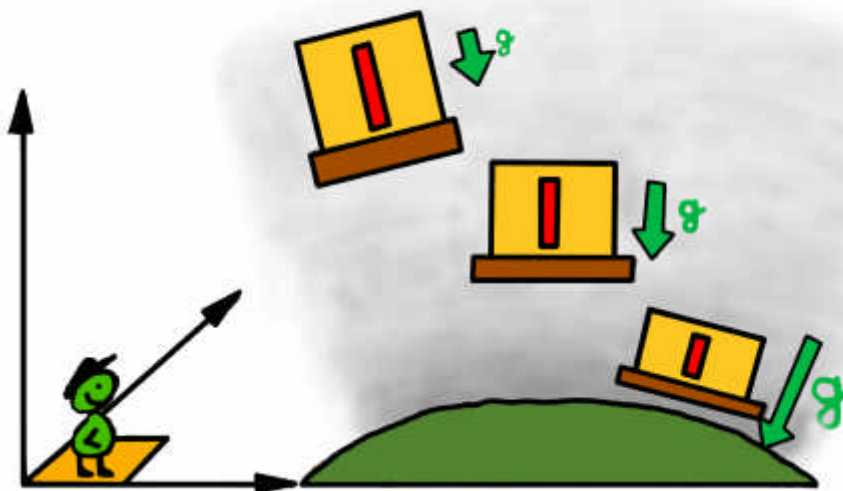
So muss ein Bezugssystem, das zu dem beschleunigten System mit der Momentangeschwindigkeit  $v_1$  äquivalent sein soll, genau in dem Abstand  $r_1$  vom Zentrum des Schwerfeldes ruhen, für den die Fallbeschleunigung (Gravitationsfeldstärke) genau so groß ist, wie die Beschleunigung des ursprünglichen Systems.

Abb.69



Also ergeben sich immer stärker werdende Längenkontraktion und Zeitdilatation nicht nur für immer größer werdende Momentangeschwindigkeiten eines beschleunigt bewegten Bezugssystems, sondern (nach dem Äquivalenzprinzip), auch für kleiner werdende Entfernungen des am jeweiligen Ort im Schwerfeld ruhenden Bezugssystems.

Abb.70



Nunmehr ist es uns ein leichtes, den letzten Schluss zum Beweis unserer Behauptung zu ziehen:

Wenn für reguläre Gravitationsfelder – von denen wir ausgegangen sind – die Gravitationsfeldstärke nach allen Seiten hin mit wachsender Entfernung abnimmt und mit eben dieser wachsenden Entfernung die Effekte „Längenänderung“ und „Zeitdehnung“ kleiner werden, dann ruft also eine kleine Gravitations-

feldstärke geringe Effekte und dementsprechend eine höhere Gravitationsfeldstärke größere Effekte hervor.

Daraus ergibt sich auch die – bislang sicher phantastisch anmutende – Tatsache, dass in einem Bezugssystem die Zeit um so langsamer vergeht, je stärker ein einwirkendes Gravitationsfeld ist!

Zur besseren Übersicht seien die bisherigen Gedanken dieses Abschnittes noch einmal kurz dargestellt:

Damit das Allgemeine Relativitätsprinzip seine Gültigkeit behalten kann, muss gefordert werden, dass Längenkontraktion und Zeitdilatation auch an beschleunigt bewegten Bezugssystemen beobachtbar sein müssen. Setzt man dies voraus, dann führt das Äquivalenzprinzip dazu, dass schon in ruhenden, der Gravitation unterworfenen Bezugssystemen dem (nicht im Schwerfeld befindlichen!) Beobachter der Zeitablauf verlangsamt und die Länge der Körper – in Richtung der Gravitationsfeldstärke – verkürzt erscheinen. Dabei ist der Ablauf der Zeit um so langsamer und die Verkürzung der Länge um so deutlicher, je größer die Gravitationsfeldstärke in dem betreffenden Bezugssystem ist.

Der Leser erkennt damit auch, dass dieser Zusammenhang zwischen Gravitationswirkungen und den Effekten, die Raum und Zeit relativiert haben, weitgehend unabhängig ist vom Bewegungszustand des jeweiligen Beobachters. Damit können wir eine der wichtigsten Schlussfolgerungen der Allgemeinen Relativitätstheorie, gelassen formulieren:

Die Gravitationsfelder beeinflussen Raum und Zeit, unabhängig vom Bewegungszustand irgendeines Beobachters.

(Relativbewegungen beobachtender Dritter führen zu zusätzlichen, überlagernden Effekten.)

Allerdings muss beachtet werden, dass zwischen den durch Gravitationswirkungen und den durch Relativbewegungen hervorgebrachten Längenkontraktionen ein Unterschied besteht: Es hat sich nämlich herausgestellt, dass der durch Relativbewegungen hervorgerufene Effekt sich einem Beobachter als „Verdrehung“ der äußeren Formen eines Körpers darbieten müsste. Diese „Torsion“ führt bei einem zylindrischen Stab tatsächlich zu einer Kontraktion gemäß der Lorentz’schen Formel. Eine ruhende Kugel dagegen wird bei solcherlei Torsion vom schnell bewegten Beobachter wieder als Kugel wahrgenommen – und nicht etwa als Ei (Rotationsellipsoid)!

Im Gegensatz dazu ist der durch die Gravitation hervorgerufene Effekt wirklich eine lineare Kontraktion der in Richtung der wirkenden Gravitationsfeldstärke gemessenen Längen gemäß Lorentz’scher Formel.

Es soll an dieser Stelle jedoch noch einmal auf zwei wichtige Aspekte hingewiesen werden:

1. Die durch schnelle Relativbewegungen hervorgerufenen Torsionen sind naturgemäß im eigenen Bezugssystem nicht vorhanden und gravitativ bedingte lineare Kontraktionen naturgemäß am eigenen, im Schwerfeld ruhenden System nicht beobachtbar, da alle Maßstäbe der gleichen Veränderung unterliegen, wie das Messobjekt selber.
2. In der Speziellen Relativitätstheorie gilt, dass die Effekte der Längenkontraktion (Torsion) und Zeitdilatation erst für solche Relativgeschwindigkeiten  $v$  messbar groß werden, die mit der Vakuumlichtgeschwindigkeit  $c$  vergleichbar sind. Die in unserer Umgebung vorkommenden Relativgeschwindigkeiten sind aber im Verhältnis zur Lichtgeschwindigkeit so klein, dass die durch sie bedingten relativistischen Effekte vernachlässigbar gering bleiben.  
Ähnlich verhält es sich auch in der Allgemeinen Relativitätstheorie: Das Gravitationsfeld der Erde ist im Vergleich zu den im Kosmos wirkenden Gravitationsfeldern so schwach, dass man die durch unser Schwerfeld hervorgerufene Längenkontraktion auch von einem nicht im Schwerfeld der Erde befindlichen Bezugssystem aus praktisch nicht nachweisen kann. Anders dagegen im Schwerfeld der Sonne: Der Leser wird weiter unten noch einen besonderen Effekt der Allgemeinen Relativitätstheorie kennen lernen, der am Beispiel der Sonne mit astronomischen Mitteln tatsächlich auch beobachtbar ist.

Somit erweist sich die zur Erhaltung der Gültigkeit des Allgemeinen Relativitätsprinzips gestellte „Forderung“ nach Längenkontraktion und Zeitdilatation an beschleunigt bewegten Bezugssystemen, nicht mehr nur als „Forderung“ sondern als physikalisch reale Tatsache, auch wenn es zur Zeit noch Schwierigkeiten mit dem Nachweis der Längenkontraktion gibt. Die Zeitdilatation im Schwerfeld der Erde ist mit Hilfe der Lebenserwartung bestimmter Elementarteilchen exakt nachgewiesen.

Wir haben eben festgestellt, dass die Gravitationsfelder durch die von ihnen hervorgerufene Längenkontraktion und Zeitdilatation Raum und Zeit unabhängig vom Bewegungszustand irgend eines Beobachters beeinflussen. Allerdings wird der Raum nicht nur *relativiert*, sondern ein noch engerer Zusammenhang zwischen der Gravitation und dem physikalischen Raum wird offenbar, wenn wir im folgenden Abschnitt die zweite Schwierigkeit, die bei der Anwendung des Äquivalenzprinzips – weiter oben schon einmal – auftrat, überwinden werden.

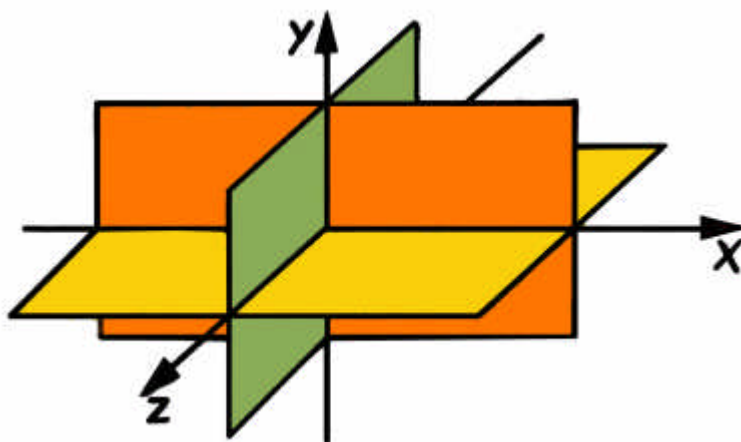
#### 4.5. Wenn sich Parallelen schneiden ...

Der wesentliche Unterschied zwischen gleichförmig bewegten und beschleunigt bewegten Bezugssystemen – nämlich das Auftreten von Trägheitskräften in beschleunigten Systemen – erwies sich unter Anwendung des Äquivalenzprinzips nicht mehr als Unterschied, weswegen wir die Gesetzmäßigkeiten der Speziellen Relativitätstheorie auf beschleunigte Bezugssysteme übertragen konnten. Jedoch ist dies nur lokal begrenzt möglich, da sich in größeren Raumbereichen Gravitationsfelder gegenseitig beeinflussen und überlagern.

Aber auch lokal begrenzt kann der von seiner Außenwelt isolierte Beobachter immer noch ohne Angabe eines Bezugssystems Aussagen über seinen Bewegungszustand treffen. Dieser letzte, auftretende Unterschied zwischen beschleunigten und unbeschleunigten Bezugssystemen muss ausgeglichen werden können, wenn wir die Gültigkeit des Allgemeinen Relativitätsprinzips aufrecht erhalten wollen.

Der Leser wird nicht daran zweifeln, dass wir uns alle – beliebig zueinander bewegten Bezugssysteme – durch Koordinatensysteme veranschaulichen können. Solche Koordinatensysteme sind aufgebaut aus drei senkrecht aufeinander stehenden Geraden, von denen jeweils zwei eine der drei möglichen Ebenen aufspannen.

Abb.71

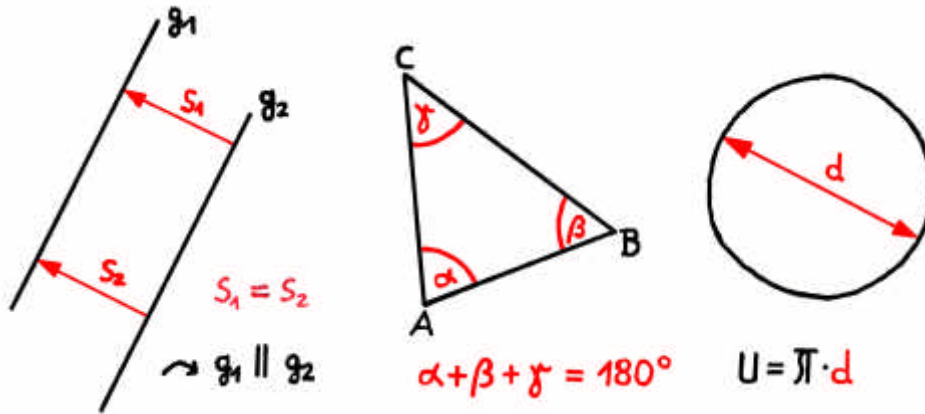


An jeder der z.B. in den Abschnitten 4.3. oder 4.4. untersuchten Kabinen kann man sich ein solches Koordinatensystem befestigt vorstellen.

Die zugrundeliegende Geometrie wurde von dem Gelehrten Euklid (300 v.u.Z.) begründet.

Diese sogenannte „Euklid’sche Geometrie“ ist die uns allen sehr gut bekannte Geometrie, nach der beispielsweise zwei Geraden genau dann parallel sind, wenn sie in jedem Punkt den gleichen Abstand zueinander haben. Wir erinnern uns auch daran, dass die Summe aller Innenwinkel im Dreieck  $180^\circ$  beträgt und der Umfang eines Kreises gleich dem Produkt aus der Zahl Pi und dem Durchmesser des Kreises ist.

Abb.72



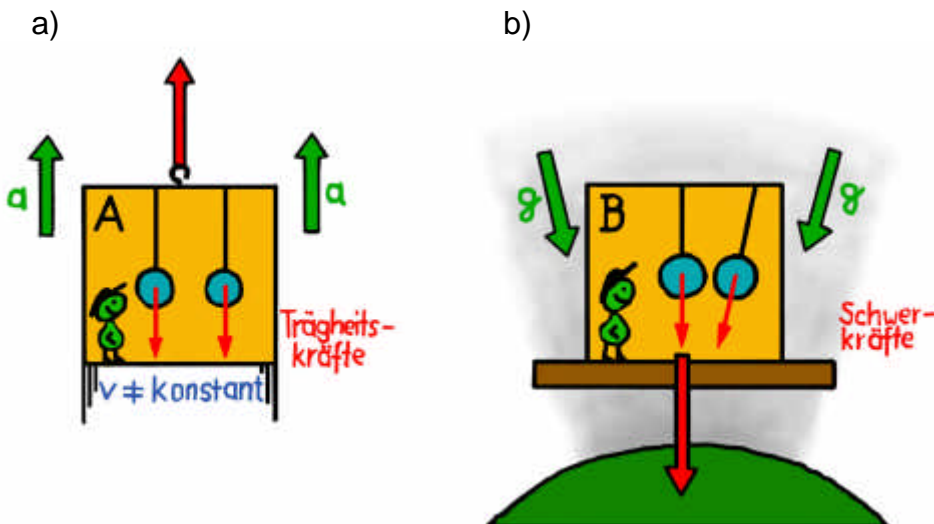
Alle diese genannten, einfachen Zusammenhänge gehören zur Euklid'schen Geometrie, die uns allen wohlbekannt und auch tagtäglich von Nutzen ist.

Aber wenden wir uns nun der schon erwähnten, zweiten Schwierigkeit zu, die sich bei der Anwendung des Äquivalenzprinzipes offenbart hatte.

Die erste Schwierigkeit, die durch Störungen der Schwerfelder bedingt war, konnte dadurch überwunden werden, dass wir die Ausmaße der untersuchten Bezugssysteme soweit einschränkten, dass die auf sie wirkenden Schwerfelder im Rahmen bestimmter Fehlergrenzen als regulär angesehen werden konnten. Um zu zeigen, dass beide Problematiken unabhängig voneinander sind, gehen wir im folgenden von solchen ungestörten, regulären Schwerfeldern aus.

Das uns jetzt interessierende Hindernis wollen wir uns wieder durch einen Vergleich zweier Kabinen (Bezugssysteme) veranschaulichen, von denen die eine außerhalb von Schwerfeldern beschleunigt werden möge und die andere im Schwerfeld ruhen soll. In beiden Kabinen sind zwei nebeneinander hängende, mit gleichen Körpern versehene Fäden angebracht:

Abb. 73



Wir wissen, dass nach dem Allgemeinen Relativitätsprinzip beide Systeme völlig gleichberechtigt zur Beschreibung des Naturgeschehens sind, denn die in dem beschleunigt bewegten System auftretenden Trägheitskräfte kann der in



der Kabine eingeschlossene Beobachter auch als eine – auf sein in diesem Fall dann ruhendes System wirkende – Gravitationskraft deuten. Zur Erhaltung der Relativität darf es kein inneres Kriterium geben, das dem von seiner Umgebung isolierten Beobachter den Unterschied zwischen beiden Fällen zeigen könnte.

Aber plötzlich hat Physiker **B** in Abb.73 eine Idee:

Er nimmt ein Lineal zur Hand und misst an verschiedenen Stellen den Abstand zwischen den zwei Fäden und stellt zu seiner Überraschung fest, dass sie nicht parallel zueinander verlaufen (Abb.73 b).

Da fällt ihm ein, was er über das Schwerfeld weiß: Ein jedes Schwerfeld besitzt ein Zentrum und die – die Fäden spannenden – Gravitationskräfte wirken immer zum Zentrum hin, ihre Wirkungslinien können demnach nicht parallel zueinander verlaufen.

Auch die beiden aufgehängten Fäden sind nicht parallel zueinander. Deshalb kommt der Physiker **B**, ohne ein Bezugssystem angegeben zu haben, zu der Überzeugung, dass er sich nicht beschleunigt bewegt, sondern sich mitsamt seiner Kabine im Schwerfeld gleichförmig bewegt (oder auch in ihm ruht).

Aber genauso wie der eben noch überraschte Physiker ahnt sicher auch der Leser schon erste Bedenken:

Soll das Relativitätsprinzip erhalten bleiben, so darf der eingeschlossene Beobachter auch **diese** Möglichkeit **nicht** haben, über den Bewegungszustand seiner Kabine ohne Angabe eines äußeren Bezugssystems Aussagen treffen zu können. Dies würde doch die überholte Vorstellung vom absoluten Raum (als absolut ruhendem Bezugssystem) – die wir schon mehrfach widerlegen konnten – noch einmal rechtfertigen.

Doch im Widerspruch dazu hat der eingeschlossene Physiker scheinbar diese – nach dem Relativitätsprinzip verbotene – Möglichkeit dennoch: Es wirken die (die Fäden spannenden) Gravitationskräfte in Kabine **B** (Abb.73 b) nicht parallel zueinander und die (ebenfalls die Fäden spannenden) Trägheitskräfte in Kabine **A** (Abb.73 a) – die sich beschleunigt bewegt – wirken parallel zur Richtung der Beschleunigung, also auch parallel untereinander.<sup>47</sup>

Wie ist das Problem zu lösen? Sollte sich jetzt, nachdem wir schon mehrfach die klassischen Vorstellungen erfolgreich mit dem Prinzip der Relativität ihrer Unzulänglichkeiten überführen konnten – sollte sich jetzt alles als falsch herausstellen?

Aber jeder Gedanke baute doch auf der vorhergehenden Überlegung auf und viele der bislang behandelten, neuen Zusammenhänge sind doch experimentell auch schon gesichert !?

Also bringt uns an dieser Stelle wohl nur noch der Mut, alle Überlegungen konsequent zuende zu führen, aus diesem Dilemma heraus. Denken wir ohne Rücksicht auf den Verlust selbstverständlich gewordener Ansichten zielgerichtet weiter und rechnen wir mit neuen, ganz verrückt scheinenden Folgen.

Wenn sich die eben erwähnten Bezugssysteme nach dem Allgemeinen Relativitätsprinzip in keiner Weise unterscheiden dürfen, dann muss eben für die im Schwerfeld ruhende Kabine irgendeine mit dem Begriff der Parallelität zusammen hängende Voraussetzung abgeändert werden, so dass auch der im Schwerfeld ruhende Beobachter die zwei Fäden als parallel bezeichnen darf.

---

<sup>47</sup> Diese Tatsache gilt nur für beschleunigte Translationsbewegungen (geradlinige Bewegungen), nicht für Rotationen (Drehungen). Auf Rotationen wird zum Schluß dieses Abschnittes noch einmal kurz eingegangen.

Die Aufrechterhaltung des Allgemeinen Relativitätsprinzipes zwingt dazu, eine mit der Parallelität zusammenhängende Voraussetzung (unserer Überlegungen für den im Schwerfeld ruhenden Beobachter) zu korrigieren. Und zwar derart, dass die zu einem Zentrum hin, d.h. nicht parallel wirkenden Gravitationskräfte von diesem Beobachter als parallel wirkend eingeschätzt werden können.

Die Voraussetzung, um die es sich handelt, ist aber nichts anderes, als die Gültigkeit bzw. Anwendbarkeit der Euklid'schen Geometrie, an die die uns bekannte Definition der Parallelität gebunden ist.

Es ergibt sich die Notwendigkeit, die Euklid'sche Geometrie für den im Gravitationsfeld befindlichen Beobachter durch eine andere, nicht-Euklid'sche Geometrie zu ersetzen.

Solche nicht-Euklid'schen Geometrien sind schon im 19. Jahrhundert, d.h. vor Aufstellung der Relativitätstheorie u.a. von den Mathematikern Riemann (1826 – 1866) und Lobatschewski (1792 – 1856) in Erwägung gezogen und daraufhin auch entwickelt worden. Allerdings hatten diese Geometrien damals keinerlei physikalischen Hintergrund.

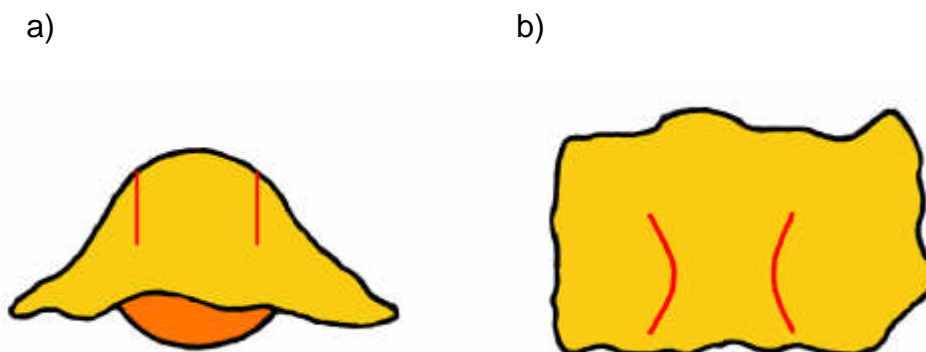
Wodurch unterscheiden sich die nicht-Euklid'schen Geometrien von der Euklid'schen Geometrie?

Wir stellen folgende Überlegung an: In einer Euklid'schen Ebene liegen zwei nicht-parallele Geraden, der Abstand zwischen beiden Geraden ist in jedem Punkt ein anderer. Welche Veränderung muss an dieser Euklid'schen Ebene vorgenommen werden, damit die beiden Geraden *parallel* erscheinen?

Die Antwort kann nur lauten: Die Ebene muss zu einer Kugeloberfläche gekrümmt werden!

Daraus ziehen wir den Schluss, dass dementsprechend in einer Euklid'schen Ebene liegende *parallele* Geraden genau dann *nicht mehr parallel* verlaufen, wenn die ebene Fläche wieder durch eine gekrümmte Fläche ersetzt wird.

Abb. 74



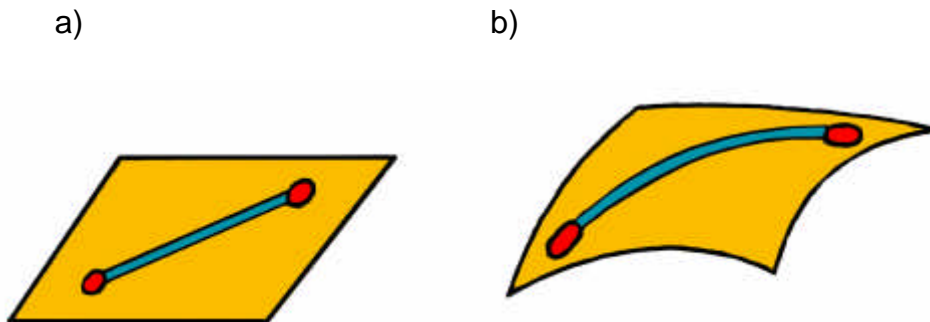
Ein genügend großes Stück eines Luftballons wird über einen Ball gespannt, dann zeichnet man zwei parallel scheinenden Geraden darauf (a). Spannt man das Gummi anschließend eben auf, dann erweisen sich die eingezeichneten Geraden als nicht parallele Linien (b).

In der Euklid'schen Geometrie bestimmen zwei Punkte eine Gerade, zwei Geraden eine Ebene und zwei Ebenen einen Raum. Dementsprechend wird in den nicht-Euklid'schen Geometrien z.B. eine „gekrümmte Ebene“ durch zwei „gekrümmte Geraden“ bestimmt. Allerdings kann man eine „gekrümmte Ebene“ nicht mehr im eigentlichen Sinne als „Ebene“ bezeichnen. Es wird daher der Begriff der „gekrümmten Fläche“ verwendet. Genauso ist eine „gekrümmte Gerade“ keine „Gerade“ im eigentlichen Sinne mehr. Hier spricht man von einer „geodätischen Linie“ oder einfacher von einer „Geodäte“.

Wie hat man sich eine Geodäte vorzustellen?

Die kürzeste Entfernung zwischen zwei Punkten einer Ebene ist in der Euklid'schen Geometrie eine Gerade (Abb.75 a).

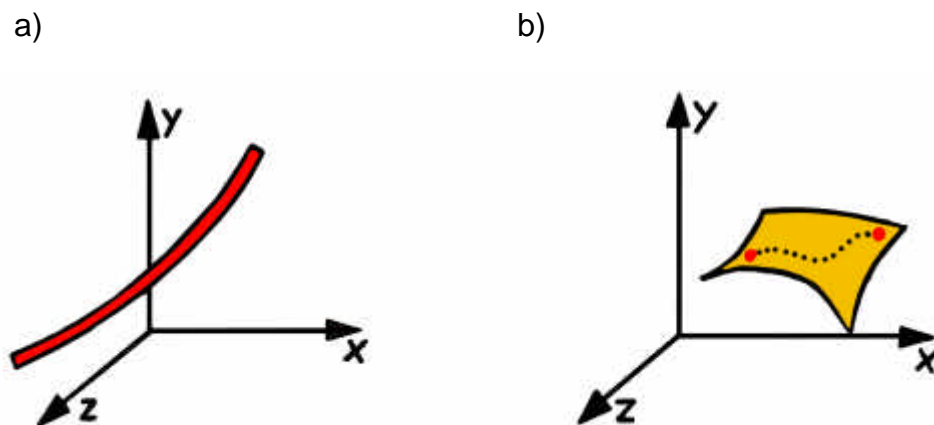
Abb.75



Dagegen ist gemäß der nicht-Euklid'schen Geometrien die kürzeste Verbindung zwischen zwei Punkten einer gekrümmten Fläche eine Geodäte (Abb.75 b).

Geodätische Linien können wir uns aufgrund unserer Euklid'schen Anschauungsweise nur in einer Ebene liegend oder im Raum verlaufend vorstellen. Ebenso ist eine gekrümmte, zweidimensionale Fläche gemäß unseren Euklid'schen (nicht gekrümmten) Vorstellungen nur als im dreidimensionalen, nicht gekrümmten Raum befindlich zu verdeutlichen.

Abb.76



Doch wie soll man sich einen dreidimensionalen, gekrümmten Raum veranschaulichen? Hierbei versagt ganz eindeutig unsere menschliche Vorstellungskraft, der Versuch sich einen gekrümmten Raum vorzustellen, muss misslingen. Wir können ab dieser Stelle nur noch mit unseren bereits erworbenen Anschauungen theoretisch weiterarbeiten und wo eine bildliche Darstellung notwendig

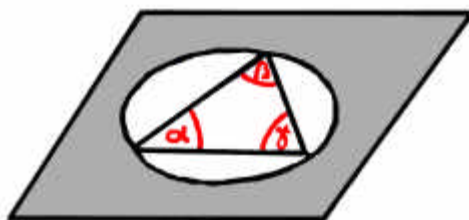
ist, werden wir die Probleme des gekrümmten, nicht-Euklid'schen *Raumes* auf entsprechende Sachverhalte in gekrümmten, nicht-Euklid'schen *Flächen* zurückführen, die sich zeichnen und darstellen lassen.

Ein weiterer Unterschied zwischen Euklid'schen und nicht-Euklid'schen Verhältnissen, der sich gut veranschaulichen lässt, sei hier noch angeführt:

In der Euklid'schen Ebene ist prinzipiell die Summe aller Innenwinkel eines Dreieckes gleich  $180^\circ$ . Dieser Lehrsatz gilt jedoch für gekrümmte Flächen nicht mehr.

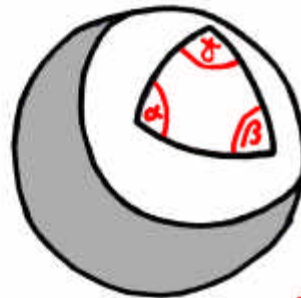
Abb.77

a) Euklid'sche Fläche



$$\alpha + \beta + \gamma = 180^\circ$$

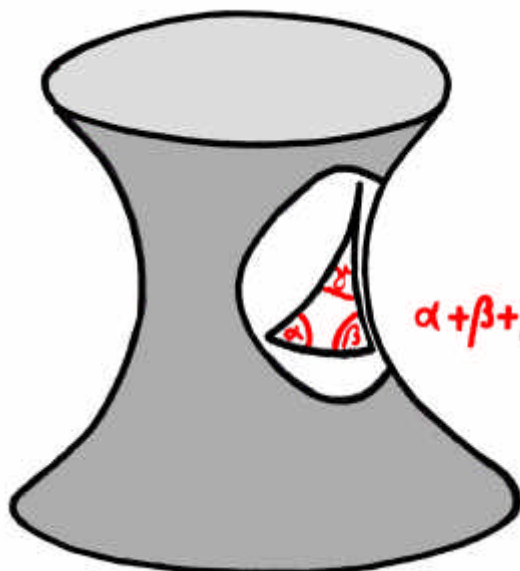
b) sphärisch gekrümmte Fläche nach Riemann



$$\alpha + \beta + \gamma > 180^\circ$$

In einer anderen, nicht-Euklid'schen Geometrie wiederum sind die Flächen so gekrümmt, dass die Summe aller Innerwinkel eines Dreieckes kleiner als  $180^\circ$  ist:

Abb.78



$$\alpha + \beta + \gamma < 180^\circ$$

Hyperbolisch gekrümmte Fläche nach Lobatschewski

Nachdem der Leser nun eine erste Vorstellung von den nicht-Euklid'schen Geometrien erhalten hat und erfuhr, warum sie mit dem physikalischen Geschehen zusammenhängen, soll jetzt gezeigt werden, **wie** die Verwendung nicht-Euklid'scher Geometrien für die Physik unser Problem zu lösen hilft und was sich für Schlussfolgerungen daraus ergeben.

Zur Erinnerung: Gemäß dem Allgemeinen Relativitätsprinzip unterscheiden sich die Bezugssysteme hinsichtlich der Formulierungen der Naturgesetze nicht. Der Widerspruch entstand, als wir uns überlegten, dass der in einer Kabine eingeschlossene Physiker aufgrund der Parallelität oder Nicht-Parallelität zweier nebeneinander aufgehängter Fäden auch ohne Angabe eines äußeren Bezugssystems Aussagen über den Bewegungszustand seiner Kabine treffen kann. Sind die Fäden parallel zueinander, liegt eine beschleunigte Bewegung des Systems außerhalb von Gravitationsfeldern vor – sind sie nicht parallel, bewegt sich das System im Schwerfeld gleichförmig.

Behalten wir aber die Gültigkeit des Allgemeinen Relativitätsprinzipes bei, weil es anderweitig schon experimentell bestätigt wurde, dann müssen wir der vorhin gestellten Forderung Rechnung tragen und formulieren:

Die Wirkung des Schwerfeldes muss die Gültigkeit nicht-Euklid'scher Geometrien mit sich bringen.

Was hätten wir mit dieser Formulierung gewonnen?

Der in der geradlinig beschleunigten und nicht der Gravitation unterworfenen Kabine eingeschlossene Physiker unterliegt nach wie vor der uns vertrauten, Euklid'schen Geometrie, die Fäden verlaufen parallel.

Der im Gravitationsfeld ruhende Beobachter muss die gleiche Feststellung treffen können. Das wird dadurch gewährleistet, dass die mit der Gravitation einhergehende Krümmung des Raumes die (unseren „Euklid'schen Anschauungen“ zufolge *nicht parallel* verlaufenden) Fäden *parallel* erscheinen lässt.

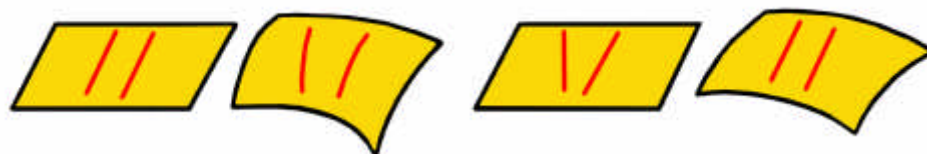
Dem Leser wird jetzt deutlicher, **wie** die Verwendung nicht-Euklid'scher Geometrien für die Physik den Unterschied zwischen beiden Kabinen ausgleicht.

Zwei Geraden, die im Euklid'schen Raum parallel zueinander verlaufen, werden im gekrümmten Raum zu nicht-parallelen, geodätischen Linien (Abb.79 a). Umgekehrt erscheinen zwei zueinander nicht parallele Geraden des Euklid'schen Anschauungsraumes als parallele geodätische Linien, wenn der Euklid'sche Raum durch einen nicht-Euklid'schen Raum bestimmter Krümmung ersetzt wird (Abb.79 b).

Abb.79

a)

b)



Der Sachverhalt wird hier auf zweidimensionale Anschauung reduziert.

Dementsprechend sind die unter Euklid'schen Bedingungen nicht-parallelen Fäden für den im Schwerfeld ruhenden Beobachter parallel, wenn der Euklid'sche Raum durch einen nicht-Euklid'schen Raum bestimmter Krümmung ersetzt wird.

Auf diese Art „verschwindet“ der letzte Unterschied zwischen den zwei betrachteten Kabinen.

Wenn die Wirkung der Gravitationsfelder mit der Krümmung des Raumes einhergeht, dann behält das Allgemeine Relativitätsprinzip seine Gültigkeit.

Dass vom Allgemeinen Relativitätsprinzip nicht mehr abgegangen werden kann, zeigen die vielen, experimentellen Bestätigungen des mit ihm in engem Zusammenhang stehenden Äquivalenzprinzipes (beispielsweise hinsichtlich der Gleichheit von träger und schwerer Masse). Diese Bestätigungen werden damit zu einer experimentellen Grundlage der Anwendung nicht-Euklid'scher Geometrien in der Physik.

Damit, lieber Leser, könnte man die Sache an und für sich schon auf sich beruhen lassen. Die zweite (sich uns bei der Behandlung des Äquivalenzprinzipes weiter oben entgegenstellende) Schwierigkeit ist nun überwunden, wenn auch auf Kosten der uns so vertrauten Euklid'schen Geometrie. Auf wie viele scheinbare „Selbstverständlichkeiten“ wir doch „verzichten“ mussten, um „Relativität“ konsequent zuende zu denken!

Allerdings ist zu erwarten, dass nun aus unserem Ergebnis noch Schlussfolgerungen gezogen werden können.

Die Wirkung der Schwerfelder geht mit der Krümmung des Raumes einher.

Diese Formulierung liefert den Ansatzpunkt – erinnern wir uns an die Definition des Schwerfeldes: Darunter verstanden wir einen Bereich des Raumes, in dem jedem Ort zu jedem Zeitpunkt ein bestimmter Wert der vektoriellen Größe „Kraft“ zugeordnet wird.

Das Gravitationsfeld ist der Bereich des Raumes um einen Körper und dieser Raum muss nach unseren Überlegungen ein gekrümmter Raum sein.

Dieser enge Zusammenhang brachte Einstein auf die Idee, die Gravitation mit den geometrischen Eigenschaften des Raumes gleichzusetzen. Das kann man anders so ausdrücken:

Gravitation ist nichts anderes, als die Krümmung des Raumes um einen Körper.

Der Leser wird vielleicht denken: „Das wird ja immer schöner – jetzt soll das, was beobachtbare, physikalische Vorgänge (z.B. die Fallbewegung eines Projektils) verursacht, nur eine geometrische Eigenschaft des Raumes sein!?“

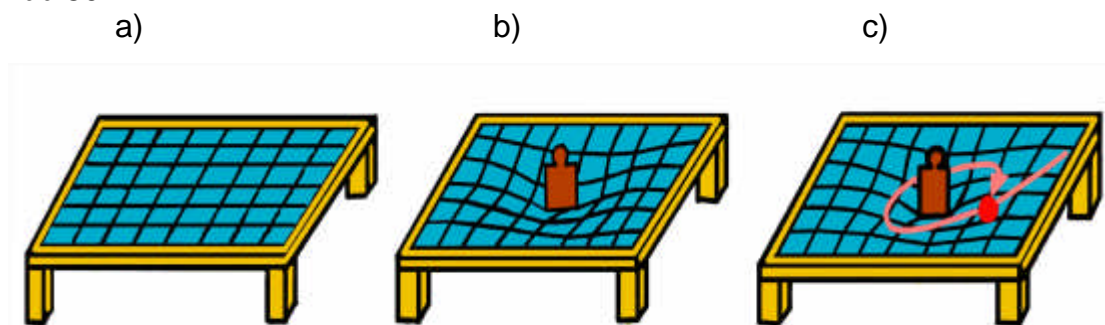
So paradox es auch klingen mag: Diese Vermutung ist genau richtig! Die zwei Formulierungen: „Im Raum um einen Körper wirkt ein Gravitationsfeld.“ und „Der Raum um den Körper ist gekrümmt.“ beschreiben ein und denselben Sachverhalt.

Nun stellt sich allerdings die Frage, woher denn die gegenseitige Anziehungskraft zwischen den Körpern kommt.

Sie hat ihre Ursache in der geometrischen Struktur des Raumes und ist letztendlich durch das Vorhandensein des Körpers selbst bedingt.

Anhand der folgenden Abbildung wollen wir uns die Wesensgleichheit von Gravitation und geometrischer (nicht-Euklid'scher) Struktur des Raumes am konkreten Beispiel noch einmal veranschaulichen. Dabei ist der Raum durch die zweidimensionale Fläche (eine eben aufgespannte Gummi-Matte) symbolisiert.

Abb.80



In Abb.80 a sieht der Leser sozusagen ein gehöriges Stück leeren Weltalls, in dem keine nennenswerten Körper enthalten sind. Nun denken wir uns in diesem Raum einen Fixstern, der aufgrund seiner großen Masse ein nicht unerhebliches Schwerfeld verursacht (Abb.80 b). Damit ist nichts anderes gemeint, als dass der Fixstern (symbolisiert durch das Wägestück) durch seine Masse den ihn umgebenden Raum krümmt (verdeutlicht durch die gekrümmte Fläche). Rollt man nun eine kleine Kugel tangential an die so entstandene Senke, so wird sie sich auf einer ellipsenförmigen Bahn um das Wägestück (Fixstern) bewegen und symbolisiert so einen sich um den Fixstern bewegendem Planeten (Abb.80 c).

Auf diese Weise wird deutlich, dass die ellipsenförmigen Planetenbewegungen um einen Fixstern durch die Krümmung des Raumes um diesen Fixstern zustande kommen<sup>48</sup>. Die Planetenbewegungen sind nicht länger Bewegungen im Kräftegleichgewicht zwischen Gravitation und rotationsbedingter Fliehkraft, sondern sie sind Trägheitsbewegungen auf den vom Fixstern gekrümmten geodätischen Linien.

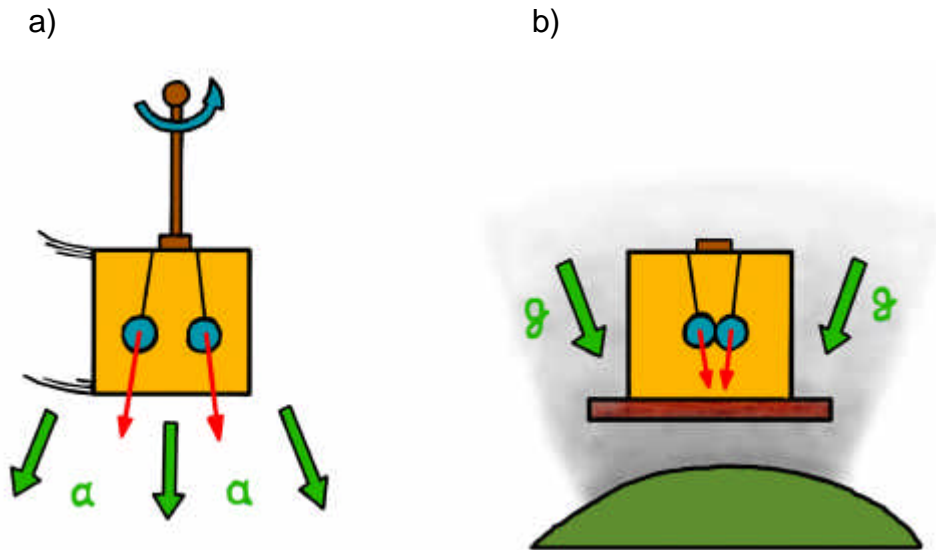
Zur Erläuterung ein kleiner Exkurs:

Rotationen als beschleunigte Bewegungen ziehen ebenfalls nicht-parallele Trägheitskräfte (Fliehkkräfte) nach sich. Diese sind den Gravitationskräften

<sup>48</sup> Für den besonders interessierten Leser: Was unter Annahme der Euklid'schen Geometrie in der klassischen Mechanik auf die Wirkung einer Gravitationskraft zurückgeführt wird, erscheint nunmehr als Folge der Krümmung des Raumes. Damit werden zum einen die Trägheitskräfte und zum anderen die Gravitationskräfte auf die geometrische Struktur (Metrik) des Raumes zurückgeführt.

ebenfalls äquivalent, wenn man annimmt, dass Rotationen auch eine Krümmung des Raumes mit sich bringen – allerdings eine (zu der dem Schwerfeld entsprechenden) entgegengesetzte Krümmung.

Abb.81



Diese Annahme wird bestätigt durch den Tatbestand, dass die auf einen Planeten wirkende „positive“ Raumkrümmung (Gravitation) durch die von der Rotation um den Fixstern hervorgerufene „negativen“ Raumkrümmung (Fliehkraft) genau ausgeglichen wird und damit für den Planeten lokal die Verhältnisse der Euklid'schen Geometrie zum tragen kommen. Das Schwerfeld des Planeten selbst würde dabei einer geringen „Nicht-Euklidizität“ entsprechen.

Soviel zu der im wesentlichen richtigen Modellvorstellung in Abb.80, die aufgrund der Nichtdarstellbarkeit dreidimensionaler gekrümmter Räume allerdings auf das Schwerfeld der Erde angewiesen ist und insofern die tatsächlichen Verhältnisse nur annähernd exakt wider gibt.

Zum Ende dieses Abschnittes soll eine zweite Schlussfolgerung aus unseren Überlegungen zur Geometrie des Raumes gezogen werden, die in philosophischer Hinsicht von größter Bedeutung ist.

Die Spezielle Relativitätstheorie erbrachte eine Relativierung von Raum und Zeit, die allein durch die gleichförmigen Relativbewegungen der Körper bedingt war. So gelangten wir zu einem gewissen Zusammenhang zwischen Raum, Zeit und Materie.

Nachdem wir den Grundgedanken der Allgemeinen Relativitätstheorie behandelt hatten, konnten wir zu beschleunigt bewegten Bezugssystemen übergehen. Damit war infolge des Äquivalenzprinzipes der Zusammenhang zur Gravitation hergestellt und Längenänderung und Zeitdehnung im Schwerfeld ließen den Schluss ziehen, dass die Gravitationsfelder einen Einfluss auf Raum und Zeit sogar unabhängig vom Bewegungszustand eines Beobachters ausüben.



Wenn man bedenkt, dass die geometrischen Eigenschaften des Raumes durch einen Körper beeinflusst werden, ein materielles Objekt also die Metrik des Raumes verändert, dann kann folgende, allgemeine Aussage getroffen werden:

Gemäß der Allgemeinen Relativitätstheorie verschmelzen Raum, Zeit und Materie zu einer untrennbaren Einheit.

Nach dem Hinweis, dass den Raum *merklich* zu krümmen nur sehr *großen* Massen gelingt und demzufolge im Schwerfeld der Erde die Euklid'sche Geometrie für unsere alltägliche Praxis nach wie vor von ausreichender Genauigkeit ist, soll auch hier wieder ein Überblick diesen Abschnitt beenden.

Zur Erhaltung der Gültigkeit des Allgemeinen Relativitätsprinzipes müssen die geometrischen Eigenschaften eines von einem Gravitationsfeld durchdrungenen Raumes nicht-Euklid'scher Natur sein. Wenn man diesen Raumbereich als gekrümmt voraussetzt, dann lassen sich die in ihm auftretenden Gravitationskräfte von einem eingeschlossenen Beobachter als parallel wirkende Kräfte darstellen, sodass sie den parallel wirkenden Trägheitskräften tatsächlich äquivalent sind. Die auch als „Metrik“ bezeichnete geometrische Struktur des Raumes wird mit der Gravitation identifiziert und somit von der Massenverteilung im Raum bestimmt. Welche der möglichen nicht-Euklid'schen Geometrien im Universum tatsächlich realisiert ist, konnte bislang noch nicht eindeutig geklärt werden.

Im Zusammenhang mit dem Einfluss der Gravitation auf Raum und Zeit (Längenkontraktion und Zeitdilatation im Schwerfeld) wurde gezeigt, dass Raum, Zeit und Materie damit eine untrennbare Einheit darstellen.

#### 4.6. Die ganz krumme Tour des Lichtes

Dem Leser wird nicht entgangen sein, dass bei der Behandlung grundlegender Gedanken der Allgemeinen Relativitätstheorie die (im Rahmen des Wellen-Modells) elektromagnetische Erscheinung „Licht“ noch keine Beachtung fand.

Was geschieht, wenn der in einer Kabine eingeschlossene Physiker statt mit Versuchen zur Mechanik oder Geometrie mit optischen Versuchen ein inneres Anzeichen einer absoluten Bewegung sucht?

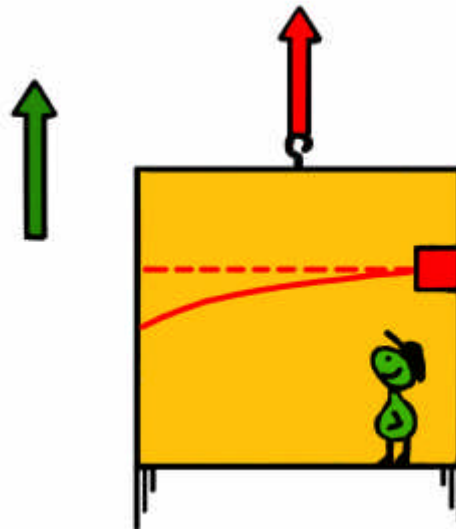
Wir halten konsequent am Allgemeinen Relativitätsprinzip fest und formulieren:

Auch elektromagnetische Vorgänge lassen sich in allen Bezugssystemen mit den gleichen Formulierungen der Naturgesetze erfassen.

Folgendes Gedankenexperiment bestätigt unsere Konsequenz:

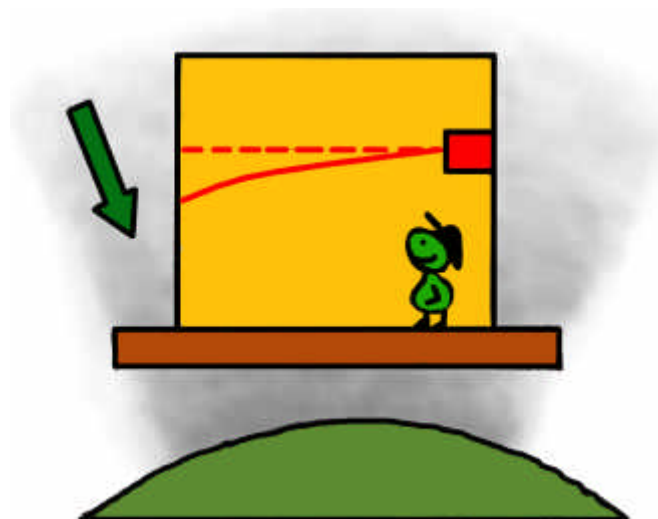
Ein isolierter Beobachter untersucht einen Lichtstrahl, der seine Kabine senkrecht zur Bewegungsrichtung durchquert.

Abb.82



Bedingt durch die Überlagerung der gleichförmigen Bewegung des Lichtes und der beschleunigten Bewegung der Kabine beschreibt der Lichtstrahl keine geradlinige, sondern eine Parabelbahn. Wie wir bereits vermuten, muss dieser Sachverhalt auch im Inertialsystem, das im Schwerfeld ruht, beobachtbar sein.

Abb.83



Es unterliegt keinem Zweifel: Licht fällt im Schwerfeld ebenso unweigerlich „nach unten“, wie ein horizontal abgeworfener Gegenstand. Dabei krümmt sich der Lichtstrahl um so stärker, je größer die Gravitationsfeldstärke ist. Wenn man daran denkt, dass Gravitation aber nichts anderes ist, als die mehr oder weniger starke Krümmung des Raumes, dann wird der Lichtstrahl aber nicht von seiner „geradlinigen Bahn“ abgelenkt, sondern im Gegenteil: Er folgt der „geradlinigsten Bahn“, die es im gekrümmten Raum gibt: einer gekrümmten Geodäte!

Elektromagnetische Wellen breiten sich entlang geodätischer Linien aus, wobei deren Verlauf von der Verteilung der Körper bestimmt wird.

Die in ihrer universellen Gültigkeit auch von der Allgemeinen Relativitätstheorie nicht eingeschränkte Masse-Energie-Äquivalenz, die der Leser bereits im 3. Kapitel kennen lernte, gibt uns ebenfalls einen Hinweis zur Bestätigung obiger Aussage:

Licht stellt sozusagen dahinflutende Energie dar. Ein Lichtstrahl hoher Energie hat dabei eine geringe Wellenlänge und umgekehrt besitzt energiearmes Licht eine große Wellenlänge. Energie und Wellenlänge verhalten sich umgekehrt proportional zueinander.

$$W \sim \frac{1}{\lambda}$$

Der zugehörige Proportionalitätsfaktor setzt sich zusammen aus dem sogenannten „Planckschen Wirkungsquantum“  $h$  und der Lichtgeschwindigkeit  $c$  :

$$W = h \cdot c \cdot \frac{1}{\lambda}$$

Dieser Energie entspricht gemäß der Masse-Energie-Äquivalenz  $W = m \cdot c^2$  eine bestimmte Masse (Trägheitswiderstand gegenüber Beschleunigungen) und bekanntlich werden alle Objekte mit einer Masse von den Gravitationsfeldern angezogen, was zu (aus unserer Euklid'schen Sichtweise) *gekrümmten* Lichtwegen im Schwerfeld führt.

Könnte man diesen Effekt beobachten, so würde er zu einer glänzenden Bestätigung *aller* bislang angestellten Überlegungen werden.

Wie zu erwarten war, liefern also auch optische Versuche dem von seiner Umwelt isolierten Beobachter keinerlei Hinweise auf irgendwelche Absolut-Bewegungen seiner Kabine.

Übrigens lässt sich aus der Formel  $W = h \cdot c \cdot \frac{1}{\lambda}$  noch ein zweiter Ef-

fekt ableiten, der – wenn er beobachtbar wäre – die Allgemeine Relativitätstheorie bestätigen könnte:

Ein Körper, der sich im Schwerfeld nach oben bewegt, gewinnt beim Überwinden eines bestimmten Höhenunterschiedes einen bestimmten Zuwachs an potentieller Energie. Diese zusätzliche potentielle Energie entsteht (bei freier Bewegung eines Körpers) durch Umwandlung aus seiner kinetischen Energie  $W_{\text{kin}} = m/2 \cdot v^2$ , die deshalb kleiner werden muss. Die Geschwindigkeit des (z.B. abgeworfenen) Körpers wird mit zunehmender Höhe geringer.<sup>49</sup>

<sup>49</sup> Die relativistische Massenzunahme spielt bei derlei kleinen Wurfgeschwindigkeiten keine Rolle.

Auch ein im Schwerfeld nach „oben“ verlaufender Lichtstrahl gewinnt potentielle Energie.<sup>50</sup> Da wir die Lichtgeschwindigkeit bisher als Konstante, als vom Bezugssystem völlig unabhängige Größe angesehen haben, kann dieser Zuwachs an (zuordenbarer) potentieller Energie beim Lichtstrahl nur auf Kosten der Energie

$W = h \cdot c \cdot \frac{1}{\lambda_a}$  gehen. Wenn diese Energie kleiner wird und  $h$  bzw.  $c$  konstante Größen sind, dann muss folglich der Faktor  $1/\lambda_a$  geringer werden, was gleichbedeutend damit ist, dass  $\lambda_a$ , die Wellenlänge steigt.

Die Wellenlänge eines Lichtstrahles, der ein Gravitationsfeld verlässt, wird mit zunehmender Entfernung vom Zentrum des Feldes größer.

Im Bereich des sichtbaren Teils des elektromagnetischen Spektrums<sup>51</sup> empfindet das menschliche Auge Licht großer Wellenlänge als „rotes Licht“, weswegen man den genannten Effekt auch als „Rotverschiebung im Gravitationsfeld“ bezeichnet.

Später (im Abschnitt 5.8.) wird der Leser erfahren, ob der von uns auf diese Weise abgeleitete Effekt der Rotverschiebung im Gravitationsfeld tatsächlich so nachgemessen werden konnte und damit die Allgemeine Relativitätstheorie zu bestätigen in der Lage war.

Nun aber noch einige Gedanken zur Lichtgeschwindigkeit.

Wir wissen aus Abschnitt 4.1., dass die Geschwindigkeit eine vektorielle Größe ist. Sie verfügt nicht nur über einen gewissen Betrag, sondern ist außerdem nach einer bestimmten Richtung orientiert. Nicht nur Betragsänderungen, sondern auch Richtungsänderungen führen demnach zu Änderungen des Vektors „Geschwindigkeit“.

Aber sprachen wir vorhin bezüglich des Lichtes nicht von einer *Änderung* der Ausbreitungsrichtung im Schwerfeld?

Bedeutet das nicht eine Änderung der Lichtgeschwindigkeit?

Dieser Gedanke ist nicht von der Hand zu weisen und wir müssen feststellen:

In der Allgemeinen Relativitätstheorie ist die Lichtgeschwindigkeit keine Konstante mehr, sondern von der Ausbreitungsrichtung gegenüber der Schwerkraftrichtung abhängig.

<sup>50</sup> Licht unterliegt nicht den mechanischen Bewegungsgesetzen. Dennoch kann man (die Beschreibung des Lichtes nach dem Teilchen-Modell vorausgesetzt) den Photonen nicht nur eine kinetische, sondern auch eine potentielle Energie zuordnen.

<sup>51</sup> Ein solches „Spektrum“ ist die Darstellung bestimmter Eigenschaften in Abhängigkeit von der Wellenlänge (mit konstanter Lichtgeschwindigkeit) oder in Abhängigkeit von der Frequenz.

Dem Leser möge an dieser Stelle die oben genannte, hinführende Begründung dieser Tatsache genügen. Um die Veränderlichkeit der Lichtgeschwindigkeit in Schwerfeldern exakt nachzuweisen, sind komplizierte mathematische Formalismen notwendig, auf die aber im Rahmen dieser Schrift bewusst verzichtet werden sollte.

Die folgenden fünf Aussagen sollen vom Leser ebenfalls als Hinweise aufgefasst werden, weiterführende Literatur enthält entsprechende Herleitungen (Anhang).

1. Die Abhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit von der Ausbreitungsrichtung verletzt nicht die prinzipielle Gleichberechtigung aller Raumrichtungen, denn mit dieser Abhängigkeit ist gemeint, dass die Geschwindigkeit des Lichtes im Vakuum davon beeinflusst wird, welchen Winkel der Lichtstrahl und die im betreffenden Raumbereich gegebene Gravitationsfeldstärke miteinander einschließen.
2. Die Gültigkeitsbereiche zum einen der Speziellen und zum anderen der Allgemeinen Relativitätstheorie sind bei der Beschreibung von Naturvorgängen genau zu beachten. Doch die Natur selbst richtet sich selbstverständlich nicht nach den von uns geschaffenen Beschreibungsmöglichkeiten und deren Gültigkeitsgrenzen.  
Wie verträgt sich die in der allgemeinen Theorie enthaltene Veränderlichkeit von  $c$  mit dem der speziellen Theorie zugrundeliegenden Michelson-Experiment, dessen eindeutiges Ergebnis doch gerade die Konstanz von  $c$  war?  
Beim Michelson-Versuch verliefen beide Teilstrahlen trotz der horizontalen Drehung des Apparates in jedem Moment im gleichen Winkel von  $90^\circ$  zur vertikalen Richtung der Erdgravitationsfeldstärke. Dadurch unterlagen beide Teilstrahlen der gleichen gravitativen Beeinflussung, was sich deshalb auf den Laufzeitunterschied nicht auswirken konnte. Würde man das Michelson-Experiment so durchführen, dass beide Teilstrahlen unterschiedliche Winkel zur Gravitationsfeldstärke einnehmen (schräge Lage des Apparates), dann müsste tatsächlich eine Verschiebung der Interferenzbilder eintreten. Dieser Effekt wäre aber wegen der geringen Stärke des Erdschwerfeldes derart klein, dass man ihn mit den heute zur Verfügung stehenden Mitteln nicht nachweisen könnte.
3. Die Veränderlichkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes steht nicht im Widerspruch zu der Tatsache, dass bei der Überwindung des Höhenunterschiedes im Schwerfeld der auftretende Zuwachs an zuordenbarer potentieller Energie zu Lasten der Energie  $W = h \cdot c \cdot 1/La$  vor sich geht und damit ein Ansteigen der Wellenlänge mit sich bringt. Vielmehr muss daraufhin die Stärke oder das Ausmaß der Rotverschiebung im Schwerfeld lediglich einer geringfügigen Korrektur unterworfen werden, die aber so unbedeutend ist, dass man selbst im mathematischen Apparat der Theorie meist auf sie verzichtet.
4. Die uns aus der Speziellen Relativitätstheorie bekannte Aussage, dass sich kein Objekt schneller als mit Vakuum-Lichtgeschwindigkeit bewegen bzw. ausbreiten kann, bleibt richtig. Allerdings ist die Vakuum-Lichtgeschwindigkeit nun nicht mehr konstant, sondern sozusagen eine

variable Obergrenze. Damit können materielle Objekte **jede beliebige** Geschwindigkeit annehmen, sie werden jedoch auf keinen Fall schneller sein, als sich im selben Schwerfeld entlang derselben geodätischen Linie ausbreitende elektromagnetische Wellen.

5. Zusammenfassend lässt sich folgendes sagen: Vernachlässigt man die Wirkungen der Gravitationsfelder, d.h. geht man von der Euklid'schen Metrik des Raumes aus, so kommen die Zusammenhänge der Speziellen Relativitätstheorie zur Anwendung. Der Zeitablauf, die Längenänderung und die Zunahme des Trägheitswiderstandes aller Objekte sind nur von der Relativgeschwindigkeit zwischen den Inertialsystemen abhängig. Die Lichtgeschwindigkeit  $c$  ist – völlig unabhängig vom Inertialsystem und dessen Relativgeschwindigkeit – prinzipiell die gleiche, sie ist in der speziellen Theorie eine absolute Naturkonstante. Im Rahmen der allgemeinen Theorie jedoch verliert  $c$  ihren absoluten Charakter. Der Nicht-Euklid'sche, gekrümmte Raum führt zu mehr oder weniger „verbogenen“ Lichtstrahlen, deren Geschwindigkeit nunmehr von der Richtung und dem Betrag der am jeweiligen Ort wirkenden Gravitationsfeldstärke abhängen.

#### 4.7. Einsteins Universum

Nach dem recht komplizierten vorangegangenen Abschnitt wollen wir uns jetzt einem sehr allgemeinen Thema zuwenden, das allerdings nicht minder schwierig ist und von dem deshalb nur einige Grundgedanken angeschnitten werden sollen.

Schon seit dem Altertum machen sich die Menschen Gedanken darüber, ob unsere Welt schon ewig existiert, wie und wann sie eventuell entstanden sein könnte und auf welche Weise sie sich in der Vergangenheit bis zu ihrem heutigen Zustand entwickelt hat bzw. wie sich in der Zukunft entwickeln wird.

Sicher hat sich jeder von uns schon einmal mehr oder weniger intensiv mit der Problemstellung beschäftigt, ob das Universum räumlich oder zeitlich unendlich ist oder nicht.

Diese äußerst interessanten Fragen werden von der Kosmologie untersucht, die sich in den letzten Jahrzehnten zu einem selbständigen Wissenschaftsgebiet entwickelt hat.

Die Grundlage der Kosmologie ist die Allgemeine Relativitätstheorie. Das heißt, aus dieser Theorie lassen sich im Zusammenhang mit bestimmten, empirischen<sup>52</sup> Befunden (experimentell beobachteten Tatsachen) eine ganze Reihe kosmologischer Schlussfolgerungen ziehen, von denen einige hier angedeutet werden sollen. Dabei stehen die für den Leser wohl interessantesten Fragen im Mittelpunkt.

Neben der durch Schwerfelder bedingten Rotverschiebung elektromagnetischer Wellen gibt es noch eine andere – allein durch die Relativbewegung zwischen Bezugssystemen hervorgerufene – Verschiebung der Wellenlänge, allerdings nicht nur elektromagnetischer, sondern auch akustischer Wellen (Schall). Dieser nach dem Physiker Christian Doppler (1803 – 1853) benannte Effekt war

---

<sup>52</sup> Empirie.....(sinnliche) Erfahrung

auch schon der klassischen Physik bekannt, weil er bereits bei den geringen Relativgeschwindigkeiten unserer Umwelt zum tragen kommt.

Unter dem „Doppler-Effekt“ versteht man die Veränderung der Wellenlänge der von einer relativ zum Beobachter bewegten Schall- oder Lichtquelle ausgesandten Wellen (in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit).

Beispielsweise hört man das Motorengeräusch eines schnell vorbei fahrenden Autos als hohes Singen, solange sich das Fahrzeug nähert (kleine Wellenlänge) jedoch als tiefer werdendes Brummen, wenn sich das Fahrzeug wieder entfernt (große Wellenlänge).

Nun kennt man die Wellenlängen des von einem Atom eines bestimmten Elementes ausgestrahlten Lichts aus vielen Experimenten sehr genau. Ist dieses Element in einem sehr weit entfernten Fixstern enthalten, dann gelangt das von ihm ausgestrahlte Licht u.a. auch auf die Erde und man kann einen Vergleich der Wellenlängen durchführen.

Dieser Vergleich hat den Wissenschaftlern gezeigt, dass die Wellenlängen des aus dem All zu uns gelangenden Lichts ferner Fixsterne immer etwas größer sind, als die Wellenlängen des Lichtes entsprechender, auf der Erde untersuchter Atome.

Dieses höchst erstaunliche Ergebnis lässt nur einen Schluss zu:

Das zur Erde gelangende Licht ferner Fixsterne unterliegt einer Rot – Verschiebung.

Berechnungen zeigen, dass diese Rot – Verschiebung allein mit der durch die Schwerefelder hervorgerufenen Rot – Verschiebung nicht erklärbar ist. So gelangten die Physiker zu der Überzeugung, dass sich die Fixsterne gemäß dem Doppler-Effekt von uns entfernen müssen.

Da aber im Raum alle Punkte und Richtungen gleichberechtigt („isotrop“) sind („kosmologisches Prinzip“), und sich die Erde sicherlich nicht im „Mittelpunkt der Welt“ befindet [ ...weil es einen solchen nicht gibt – das geozentrische Weltbild hat sich schon vor Jahrhunderten als falsch herausgestellt...] , deshalb muss man feststellen, dass sich die Fixsterne dann wohl auch untereinander entfernen müssen.

Das Licht weiter entfernter Fixsterne ist stärker nach „Rot“ verschoben, mit zunehmender Entfernung wird die Geschwindigkeit der Sterne immer größer.

Der anhand der Rot – Verschiebung des Fixsternlichtes beobachtbare (auch als „Flucht der Galaxien“ bezeichnete) Effekt zunehmender Relativgeschwindigkeiten zwischen den Fixsternen wird als Expansion des Weltalls gedeutet.<sup>53</sup>

<sup>53</sup> Expansion.....Ausdehnung

Die Fragestellung, woher denn die ungeheure Energie kommt, die dazu notwendig wäre, führt uns zu der Vermutung, dass eigentlich ein jedes Fixstern-System an seinem Platz verharrt, jedoch der zwischen den Fixsternen liegende Raum selber einer Veränderung unterliegt, die die Entfernungen zwischen den Fixsternen immer größer werden lässt.

Verfolgt man die derzeitig beobachtbare Expansion des Weltalls gedanklich in die Vergangenheit zurück – natürlich nur unter der Voraussetzung, dass die derzeit gemachte Beobachtung der Fluchtgeschwindigkeiten auch vor Jahrmillionen schon so zutreffend gewesen wäre – so gelangt man zu der Aussage:

Die gesamte im Weltall verteilte Materie muss sich zu irgend einem Zeitpunkt in der Vergangenheit einmal in einem winzigen Raumbereich und dort in einem äußerst verdichteten Zustand befunden haben.<sup>54</sup>

Die so extrem zusammengeballte Materie zog Gravitationsfelder unvorstellbarer Stärke nach sich, d.h. der Raum war in dieser Epoche extrem gekrümmt.

Gemäß unseren heutigen Vorstellungen soll sich eine derart komprimierte Materie auch in einem äußerst heißen Zustand befunden haben. Im Verlaufe der zunehmenden Ausdehnung des Raumes entfernten sich die Materieteilchen voneinander, die Krümmung des Raumes wurde schwächer und die Temperatur nahm ab. Entsprechend der noch heute beobachtbaren Entfernungszunahme zwischen den derweil entstanden Materie-Haufen (Galaxien), müsste sich deshalb auch heute noch so eine Art „Rest-Temperatur“ nachweisen lassen. Die Physiker stellten Experimente dazu an und konnten im Jahre 1965 tatsächlich eine sogenannte „Hintergrundstrahlung“ entdecken, die richtungsunabhängig und gleichmäßig den gesamten von uns überschaubaren Teil des Kosmos erfüllt und der genau die Temperatur zugeordnet werden konnte, die seit damals theoretisch übrig geblieben sein müsste – nämlich etwa 3° K.

Die auch als „3 – Kelvin – Strahlung“ bezeichnete isotrope und homogene Hintergrundstrahlung wird heute als „Überbleibsel“ des sehr heißen Anfangszustandes des Kosmos gedeutet.

Der Begriff „Anfangszustand“ soll allerdings nicht als „absoluter Beginn“ verstanden werden, sondern lediglich darauf hinweisen, dass dieser heiße Zustand, in dem sich alle Materie offenbar einmal befand, der Beginn einer Entwicklungsetappe war, die bis heute noch nicht abgeschlossen ist.

Welchen Gesetzen Raum, Zeit und Materie vor Beginn der noch jetzt andauernden Entwicklungsetappe gehorchten, ist nicht bekannt.

<sup>54</sup> Falls der Charakter der damals gültigen Naturgesetze eine solche gedankliche Zurück-Verfolgung des physikalischen Entwicklungsprozesse überhaupt erlaubt. Davon aber gehen die meisten Naturwissenschaftler zur Zeit aus.



Der Prozess der vermutlich plötzlich einsetzenden und explosionsartigen Ausdehnung der Materie aus einem sehr stark komprimierten und sehr heißen Zustand heraus, wird häufig als „Ur – Knall“ bezeichnet.

Der diese Entwicklungsetappe des Kosmos einleitende Urknall liegt etwa 10 – 15 Milliarden (!) Jahre zurück, diese Zeitangabe ist allerdings unter Wissenschaftlern noch umstritten.

Zwar weisen kosmologische Untersuchungen und die Analyse von Gesteinen sowohl der Erde als auch des Mondes ziemlich übereinstimmend auf dieses Alter hin, doch sind – wie wir bereits wissen – alle Zeitverläufe und Zeitangaben auf des Engste mit den jeweils stattfindenden Vorgängen der Materie verbunden. Es hat sich aber herausgestellt, dass die kurz nach dem Urknall abgelaufenen Prozesse sich von den heute beobachtbaren Prozessen ganz wesentlich unterscheiden und von diesem Unterschied natürlich auch der Ablauf der Zeit beeinflusst worden sein muss.

Soviel zu den Gedanken, die mit der kosmologischen Rot-Verschiebung und der 3 – Kelvin – Strahlung in Zusammenhang stehen. Diese zwei experimentellen Befunde gelten heute als ziemlich gesichert und stellen somit ein Auswahlkriterium für die Vielzahl möglicher Beschreibungsmodelle des Kosmos dar.

Unter unerhörtem mathematischen Aufwand gelang es Einstein nach der Entdeckung des Äquivalenzprinzipes, solche Gleichungen aufzustellen, aus denen die bisher bekannten Naturgesetze unabhängig von der Wahl des Bezugssystems abgeleitet werden können. Außerdem liefern diese Gleichungen sowohl die erstaunlichen Effekte der Längenkontraktion und der Zeitdilatation als auch die geometrische Struktur des Raumes (Gravitation).

Den Physikern in aller Welt wurde nach Veröffentlichung der Einstein'schen Gleichungen bewusst, dass die moderne Physik eine Physik der Felder ist, und zwar solcher Felder, die sich sowohl nach dem Wellenmodell als auch nach dem Teilchenmodell beschreiben lassen.

Die grundlegenden Formeln der Allgemeinen Relativitätstheorie nennt man die „Einstein'schen Feldgleichungen“.

Diese Einstein'schen Feldgleichungen enthalten die gesamte klassische Physik nebst allen ihr eigenen Gesetzmäßigkeiten als Spezialfall, nämlich als den Spezialfall der geringen Relativgeschwindigkeiten. Darüber hinaus sind die Einstein'schen Feldgleichungen aber so allgemein gehalten, dass aus ihnen eine Vielzahl kosmologischer Modelle ableitbar ist. Welches dieser Modelle mit der Realität übereinstimmt, muss selbstverständlich durch Experimente überprüft werden und ist bis heute noch nicht eindeutig geklärt. Fest steht aber, dass nur

solche Modelle in Frage kommen, die einerseits die kosmologische Rot – Verschiebung und die 3 – Kelvin – Hintergrundstrahlung enthalten und die andererseits grundlegende philosophische Anschauungen nicht verletzen (Homogenität und Isotropie von Raum und Zeit, Einheitlichkeit der Welt, Kausalitätsprinzip<sup>55</sup> usw.). Überraschend ist allerdings, dass alle kosmologischen Modelle, die die eben genannten Bedingungen erfüllen, also für die Beschreibung unserer Welt als geeignet erscheinen, sogenannte „Singularitäten“ enthalten. Was sind „Singularitäten“?

Bei der Untersuchung der Entwicklungsgeschichten verschiedener Sterne stellte man fest, dass es verschiedene stabile Zustände gibt und dass Sterne unterschiedlicher Masse ganz unterschiedlichen Endzuständen zustreben.

Hat ein Stern in einer bestimmten Phase seiner Entwicklung „zuviel“ Masse, dann „stürzt“ er aufgrund seines eigenen Gravitationsfeldes (das ja nicht nur nach außen wirkt!) in sich zusammen. Der im Inneren des Feuerballs wirkende (Gas-)Druck wird überwunden. Unterschreitet nun der Radius im Verlaufe des „In-sich-Zusammenstürzens“ eine bestimmte Grenze (den sogenannten „Schwarzschild-Radius“<sup>56</sup>), dann kann nichts und niemand diesen Vorgang des „In-sich-Zusammenstürzens“ mehr aufhalten, der Stern erleidet einen „Gravitationskollaps“. Das Volumen der gesamten, den Stern bildenden Materie strebt gegen Null, der Stern wird zu einem sogenannten „Schwarzen Loch“.

Den theoretisch möglichen Zustand der Konzentration von Materie in einem ausdehnungslosen Punkt bezeichnet man als Singularität .

Wir wollen einige, theoretisch abgeleitete und phantastisch klingende Eigenschaften „Schwarzer Löcher“ erwähnen:

Ein einmal entstandenes Schwarzes Loch ist wahrscheinlich stabil und kann nicht mehr zerstört werden. Innerhalb seines Schwarzschild-Radius' ist das Gravitationsfeld so stark, dass nichts und niemand diesen Bereich jemals wieder verlassen können.<sup>57</sup>

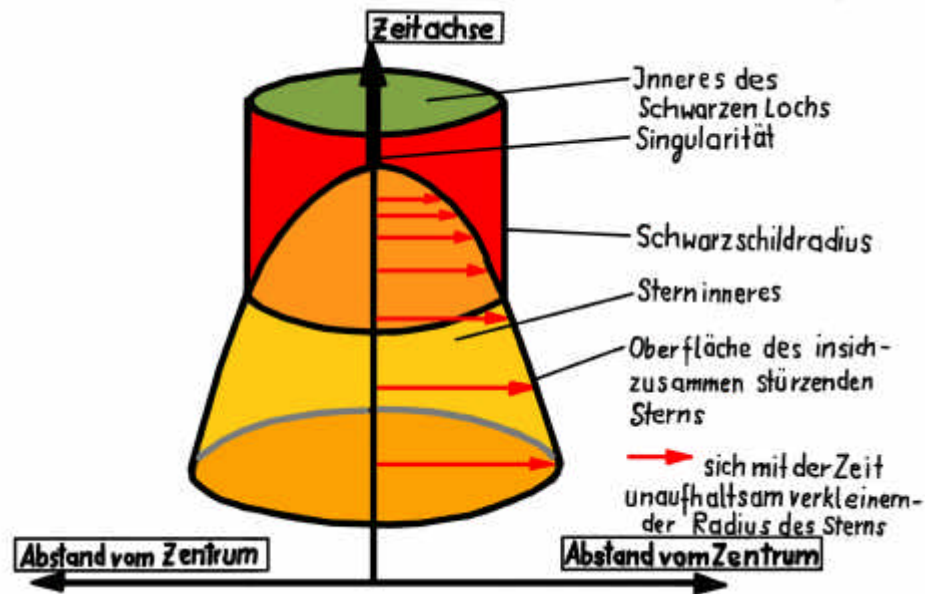
Für einen weit entfernten Beobachter **Y** dauert es unendlich lange, bis der hineinstürzende Beobachter **X** den Schwarzschild-Radius durchdrungen hat. Für Beobachter **X** ist dies jedoch schon in endlicher Zeit erreichbar. Während **Y** seinen Kollegen **X** noch auf dem Weg zum kritischen Schwarzschild-Radius wähnt, ist **X** schon lange im Inneren des Schwarzen Lochs auf nimmer Wiedersehen verschwunden (Zeitdehnung im Schwerefeld). Von seinem Schicksal wird nie wieder etwas bekannt werden, er ist für alle Zeiten verschollen, da keinerlei Informationen, Signale oder Wirkungen und schon gar nicht Herr **X** selber jemals wieder nach außen gelangen können.

<sup>55</sup> Die Ursache findet zeitlich immer vor der Wirkung statt.

<sup>56</sup> Benannt nach dem Astro-Physiker Karl Schwarzschild (1873 – 1916)

<sup>57</sup> In den Einstein'schen Feldgleichungen sind Raum- und Zeit-Koordinaten nicht unterscheidbar. Innerhalb des Schwarzschild-Radius' nimmt der Abstand eines Objektes zum Zentrum genauso unaufhaltsam ab, wie außerhalb die Zeit vergeht.

Abb.84



Da kein Objekt und damit keine Information die Welt innerhalb des Schwarzschild-Radius' verlassen kann, ist die im Inneren des Schwarzen Lochs befindliche Singularität auf die Physik der Außenwelt ohne Einfluss.

Dennoch wirken sich die schon außerhalb des Schwarzschild-Radius' extrem starken Gravitationskräfte auf die kosmologische Umgebung aus und „saugen“ mehr und mehr Materie an, die sich im Inneren immer weiter konzentriert.

Nach Aufführung dieser höchst seltsamen Eigenschaften der Schwarzen Löcher stellt sich die Frage, ob sie überhaupt existieren oder ob sich nicht vielmehr hier die Gültigkeitsgrenzen auch der Allgemeinen Relativitätstheorie offenbaren.

Dazu muss gesagt werden, dass Schwarze Löcher Lösungen der Einstein'schen Feldgleichungen sind und somit von der Theorie zugelassen werden. Allerdings ist es aufgrund ihrer Eigenschaften höchst schwierig, sie nachzuweisen. Bisher ist im All noch keins entdeckt bzw. als solches eindeutig identifiziert worden. Zur Zeit diskutiert man als einen möglichen Kandidaten für ein Schwarzes Loch den Stern Cyg X1 im Sternbild Schwan. Alle diese Fragen lassen sich jedoch z.Z. noch nicht exakt beantworten.

Welche Bedeutung haben nun die am Beispiel der Schwarzen Löcher behandelten Singularitäten für die kosmologischen Modelle?

Wir waren zu dem Ergebnis gelangt, dass nur solche kosmologischen Modelle für die Beschreibung der Welt als Ganzes in Frage kommen, die sowohl die kosmologische Rot-Verschiebung als auch die 3 – Kelvin – Strahlung berücksichtigen.

Es lässt sich zeigen, dass diese kosmologischen Modelle unter bestimmten, vernünftigen Voraussetzungen (Homogenität und Isotropie des Raumes, Symmetrie-Eigenschaften, Kausalitätsprinzip usw.) zwangsläufig die erwähnten Singularitäten enthalten müssen.

Einstein hatte die Hoffnung, die gemäß seinen Feldgleichungen zu erwartenden Singularitäten mit nichts anderem als den Elementarteilchen in Verbindung bringen zu können. Doch diese Hoffnung hat sich nicht erfüllt, die Allgemeine Rela-

tivitätstheorie bezieht sich auf dem Wellenmodell folgenden Erklärungen und ist in ihrer ursprünglichen Form mit Teilchen-Vorstellungen nicht vereinbar.

Zum Schluss dieses Abschnittes soll noch auf folgendes hingewiesen werden: Wenn im Frühstadium der Entwicklung des Kosmos die Wechselwirkungen zwischen den Elementarteilchen von vorrangiger Bedeutung waren, so spielen in der gegenwärtigen Entwicklungsphase des Weltalls die Gravitationsfelder wegen ihrer Langreichweitigkeit die Hauptrolle.

Nun ist jedoch von elektromagnetischen Phänomenen wie dem Licht bekannt, dass sie sowohl Wellencharakter tragen als auch mit dem Teilchenmodell beschreibbar sind. Sowohl die elektromagnetischen Wellen als auch die Photonen als Teilchen („Energie-Portionen“) der elektromagnetischen Felder entziehen sich heute nicht mehr unserer Beobachtung bzw. werden in großem Stil technisch genutzt.

Trotz der oben erwähnten Schwierigkeiten versucht man dementsprechend, Wellenmodell und Teilchenmodell auch auf Gravitationsfelder anzuwenden. Eventuelle, vielleicht durch schnelle Schwingungen eines massereichen Körpers hervorgerufene Störungen der Metrik des Raumes sollten sich wellenartig und mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. Die dazugehörigen „Energie-Portionen“ nennt man „Gravitonen“ – die sind aber immer noch rein hypothetischer Natur, weder Gravitationswellen noch Gravitonen konnten bis heute nachgewiesen werden.

Damit, lieber Leser, ist auch das wesentlichste Gedankengut der Allgemeinen Relativitätstheorie in den Grundlagen behandelt.

Weil sowenig wie möglich der Gutgläubigkeit des Lesers anvertraut werden soll, wird im letzten Kapitel die Beschreibung einiger, glänzender, experimenteller Bestätigungen der Relativitätstheorie Platz finden.

## 5. Beweise

Die Schwierigkeiten, in die die Physik Ende des vergangenen Jahrhunderts geraten war, sind durch die Relativitätstheorie weitgehend beseitigt worden. Diese Theorie ist in sich geschlossen und von ihrem logischen Aufbau her eine harmonische Theorie.

Doch die logische Geschlossenheit einer Theorie allein kann keine ausreichende Bestätigung ihrer Richtigkeit sein. Inwieweit eine Theorie die objektive Realität zutreffend wider spiegelt, die Naturvorgänge wahrheitsgetreu beschreibt, kann nur in der Praxis überprüft werden. Das bedeutet, dass die Theorie unbedingt der experimentellen Bestätigung bedarf.

Diese Notwendigkeit haben wir schon erwähnt, als darauf verwiesen wurde, dass eine Vielzahl von Erkenntnissen „induktiv“, d.h. durch Verallgemeinerungen gewonnen worden sind. Sie müssen prinzipiell durch Versuche untermauert werden, um zu prüfen, ob die durchgeführten Verallgemeinerungen zulässig, d.h. die induktiv gewonnenen Aussagen wahr sind.

Bei der nachfolgenden Aufführung experimenteller Bestätigungen der Relativitätstheorie soll zwei Aspekten besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden: Zum einen gilt es, die von der Relativitätstheorie vorhergesagten und bis dahin noch nicht beobachteten Effekte überhaupt nachzuweisen und zum anderen gilt es, die Übereinstimmung von theoretisch errechneten Werten mit den tatsächlich gemessenen Werten zu prüfen.

Einige Effekte sind nämlich schon auf der Grundlage der Newton'schen Physik vorhergesagt und theoretisch berechnet worden (beispielsweise die Lichtablenkung im Schwerfeld). Um diesbezüglich die Richtigkeit der relativistischen Physik zu kontrollieren, kommt es hierbei nicht darauf an, den Effekt überhaupt nachzuweisen, sondern zu zeigen, dass die gemessenen Werte den theoretisch von der Relativitätstheorie gelieferten Werten entsprechen (und nicht denen der klassischen Berechnungen).

Die Ergebnisse klassischer und relativistischer Berechnungen unterscheiden sich jedoch teilweise nur sehr wenig voneinander. Die Frage der Messgenauigkeiten wird also eine ganz entscheidende Rolle spielen – auch im Hinblick darauf, dass die Effekte selbst meist äußerst schwach sind und schon deshalb hohe Messgenauigkeiten gebraucht werden, um auswertbares Zahlenmaterial zu erhalten.

### 5.1. Konstanz der Lichtgeschwindigkeit

Das zum Nachweis dieser Aussage dienende Michelson-Experiment ist im Abschnitt 3.6. ausführlich erläutert worden. Wir wollen an dieser Stelle nur noch einmal wiederholen, was schon angedeutet wurde:

Wenn der Äther existiert, dann muss sein Einfluss auf Lichtstrahlen und deren Geschwindigkeiten nachweisbar sein. Eine Verschiebung der Interferenz-Bilder beim Michelson-Interferrometer tritt jedoch nicht ein. Aus der vielfach bestätigten *Nicht-Beobachtbarkeit* des Äthers wurde auf seine *Nicht-Existenz* geschlossen. Deshalb bezeichnet man das Michelson-Experiment auch als „negatives Experiment“. Dass man aufgrund des Versuchsergebnisses von Michelson die Äther-Vorstellung verwarf, lag aber auch darin begründet, dass dieser Begriff in der Relativitätstheorie zur Beschreibung der Natur einfach nicht mehr benötigt wurde. Ein physikalischer Begriff hat nur dann einen Sinn, wenn er eindeutig mit dem physikalischen Geschehen verknüpfbar ist. Genau das ist ja beim Begriff des „Äthers“ nicht der Fall gewesen.

Der negative Charakter des Versuches von Michelson veranlasste die Wissenschaftler dazu, das Ergebnis dieses Experimentes immer wieder zu überprüfen. In der folgenden Übersicht ist die gemessene Relativgeschwindigkeit der Erde bezüglich des eventuell existierenden Äthers, die klassisch mindestens 30 km/s betragen müsste, ein Maß für die immer weiter gesteigerte Messgenauigkeit.

Abb.85

Physiker	Jahr	Bauart	Ergebnis $v$ in km/s
Michelson, Morley	1887	Interferrometer mit eigene Lichtquelle	< 5
Tomaschek	1924	Verwendung von Fixsternlicht	<5
Joos	1930	Interferrometer mit eigene Lichtquelle	< 1,5
Cedarholm/Bland	1958	Verwendung von MASER	< 0,03
Champeney, Khan	1963	Verwendung des Mössbauer-Effekts	< 0,004

Die übereinstimmenden Ergebnisse dieser Versuche weisen eindeutig darauf hin, dass eine Relativbewegung der Erde bezüglich eines eventuell existierenden Äthers nicht festgestellt werden kann. Hohe Messgenauigkeiten bestätigen das Ergebnis, dass es keinen Äther gibt und damit die Lichtgeschwindigkeit unabhängig von der Wahl des Inertialsystems konstant ist.

## 5.2. Längenveränderung

Wie im Abschnitt 4.4. erwähnt wurde, handelt es sich laut neueren Forschungen bei der durch Relativbewegung zwischen inertialen Beobachtern hervorgerufenen Längenveränderung nicht um eine lineare Kontraktion, sondern um eine Art „Verdrehung“ der äußeren Form der Untersuchungsobjekte. Es bleibt zur Feststellung dieses Effektes nur die Möglichkeit, zwei senkrecht aufeinander stehende Stäbe, von denen einer genau in Bewegungsrichtung verläuft, von einem relativ dazu schnell bewegten Inertialsystem aus zu fotografieren.

Doch bei der optischen Erfassung der Längenveränderung gibt es große Schwierigkeiten, weil das Licht wegen seiner konstanten Ausbreitungsgeschwindigkeit von beiden Enden der Stäbe zu unterschiedlichen Zeitpunkten an der Kamera ankommt, wodurch der Effekt zumindest ausgeglichen werden könnte.

Die Längenkontraktion ist bisher noch nicht zufriedenstellend nachgewiesen.

## 5.3. Zeitdehnung

Dem Leser ist sicher bekannt, dass es viele verschiedene Elementarteilchen gibt. Ihre durchschnittliche Lebensdauer ist ganz unterschiedlich und beträgt für das Elementarteilchen mit dem Namen „m-Meson“<sup>58</sup>  $t = 2,2 \cdot 10^{-6}$  sek<sup>59</sup>. Von den m-Mesonen ist bekannt, dass sie viele Kilometer hoch in der Erd-Atmosphäre entstehen und nach Ablauf ihrer mittlern<sup>60</sup> Lebensdauer in andere Elementarteilchen zerfallen. Aus der Energie, mit der die m-Mesonen auf der Erde ankommen, geht hervor, dass sie sich auf ihrem Weg zur Erdoberfläche mit annähernd Lichtgeschwindigkeit bewegen. Die kurze Berechnung:

$$v = s / t \rightarrow s = v \cdot t \rightarrow s = c \cdot t \rightarrow s = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \cdot 2,2 \cdot 10^{-6} = \underline{\underline{660 \text{ m}}}$$

zeigt, dass diese Teilchen bis zu ihrer Umwandlung in andere Teilchen einen durchschnittlichen Weg von 660 m zurücklegen.

Wie gelangen dann aber die m-Mesonen auf die Erdoberfläche, wenn sie viele Kilometer hoch in der Atmosphäre entstehen und doch bloß einen Weg von 660m zurücklegen können?

Die Antwort auf diese Frage gibt uns die Relativitätstheorie: Die mittlere Lebensdauer von  $t = 2,2 \cdot 10^{-6}$  sek wurde an m-Mesonen bestimmt, die sich im Labor nur sehr langsam bewegten. Da sich diese Teilchen nach ihrer Entstehung in der Atmosphäre jedoch mit fast Lichtgeschwindigkeit bewegen, stellt

---

<sup>58</sup> Sprich: „Mü-Meson

<sup>59</sup> t (sprich: „Tau“) symbolisiert die Eigenzeit eines Objektes.

<sup>60</sup> Bei den Elementarteilchen wird Vieles über statistische Methoden berechnet.

der ruhende Physiker fest, dass die m-Mesonen einer erheblichen Verlangsamung ihres Zeitablaufes unterliegen. Während für die sehr schnell bewegten m-Mesonen tatsächlich  $2,2 \cdot 10^{-6}$  sek vergehen, zählt der ruhende Physiker etwa  $66 \cdot 10^{-6}$  sek und in dieser Zeit legen diese Teilchen tatsächlich die etwa 20 km bis zur Erdoberfläche zurück.

Die mittlere Lebensdauer der m-Mesonen von  $t = 2,2 \cdot 10^{-6}$  sek ist die Eigenzeit dieser Objekte und der Ablauf der Eigenzeit solcher (relativistisch schnell bewegten) Objekte erscheint vom Standpunkt des (relativ dazu) ruhenden Beobachters verlangsamt.

Die in Gebirgen in unterschiedlichen Höhen vorgenommenen, zahlreichen Messungen lieferten Werte, die mit den anhand  $t' = t / W(1 - (v^2/c^2))$  errechneten Werten genau übereinstimmten.

#### 5.4. Relativistische Massenzunahme

Elektronen sind elektrisch geladene Elementarteilchen, die in Magnetfeldern Kraftwirkungen erfahren. Diese Tatsache nutzt man in sogenannten Teilchenbeschleunigern aus, die heutzutage so leistungsfähig sind, dass man mit ihnen die Elektronen bis auf Geschwindigkeiten nahe der Lichtgeschwindigkeit beschleunigen kann. Die Massenbestimmung der relativistisch schnell bewegten Elektronen mittels Massenspektrograph<sup>61</sup> erbrachte folgende Werte:

Abb.86

Geschwindigkeit des Elektrons in km/s	Masse des Elektrons in Einheiten der Ruhemasse
0	1
18760	1,009
58700	1,0193
123800	1,113
164800	1,262
259100	1,985
283000	2,87
299210	13,8
299996	195
299999,96	1950
299999,9996	19500

Diese Werte bestätigen eindrucksvoll die durch  $m = m_0 / W(1 - (v^2 / c^2))$  gegebene, relativistische Massenzunahme.

<sup>61</sup> Ein Massenspektrograph ist ein Gerät, in dem auf die „hindurch fliegenden“ Elektronen von einem Magnetfeld eine Kraft ausgeübt wird. Bei bekannter Kraft ist die durch sie hervorgerufene Ablenkung der Elektronen ein Maß für deren Trägheitswiderstand gegenüber der angreifenden (beschleunigenden) Kraft des Magnetfeldes. Die mehr oder weniger abgelenkten Elektronen treffen anschließend auf einen Schirm, auf dem sie eine Leuchtspur hinterlassen. So kann die Ablenkung der Elektronen von ihrer ursprünglichen Bahn als Maß für ihre Masse abgelesen werden.

## 5.5. Masse-Energie-Beziehung

Dieses Gesetz der speziellen Relativitätstheorie ist durch Experimente völlig gesichert und spielt in der Atom- und Kernphysik eine bedeutende Rolle.

Die bei der Spaltung von Atomkernen durchgeführten Messungen zeigen eindeutig, dass die frei werdende Bindungsenergie genauso groß ist, wie die gemäß  $W = m \cdot c^2$  der Massendifferenz zuzuordnende Äquivalentenergie.

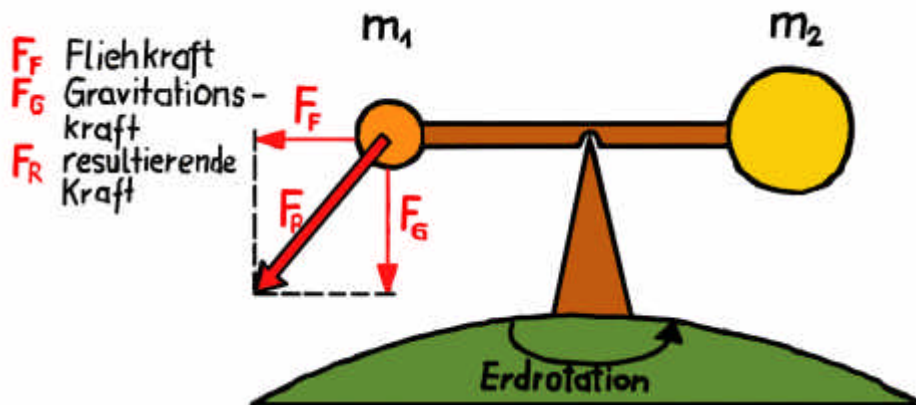
## 5.6. Äquivalenzprinzip

Wir wissen bereits, worin die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie besteht. Zum einen lässt sich, wie wir es getan haben, das Äquivalenzprinzip als grundlegender Gedanke auffassen und das allgemeine Relativitätsprinzip wird daraus geschlussfolgert. Zum anderen kann man sich auch vom Prinzip der allgemeinen Relativität leiten lassen und zur Erfüllung dieses Prinzips fordern, dass träge und schwere Masse prinzipiell gleich sein müssen, damit die Gravitationswirkung auf ein System und die beschleunigte Bewegung des Systems ununterscheidbare innere Vorgänge zur Folge haben.

Über die Frage, welches der beiden Prinzipien (Äquivalenzprinzip oder allgemeines Relativitätsprinzip) als Grundlage der allgemeinen Theorie von entscheidenderer Bedeutung ist, besteht zur Zeit noch keine Einigkeit. In jedem Fall aber dient der Nachweis der Gleichheit von träger und schwerer Masse als Bestätigung beider Prinzipien.

Dieser Nachweis wurde mit hoher Präzision das erste Mal 1894 von Roland von Eötvös (1848 – 1919) geführt.<sup>62</sup> Der verwendete Versuchsaufbau ist genauer als unser Pendel-Experiment und sieht schematisch so aus:

Abb.87



Diesen Versuchsaufbau nennt man „Torsionswaage“. Die Gravitationskraft kommt durch das Schwerfeld der Erde zustande und die Fliehkraft wird durch die Erdrotation bewirkt.

<sup>62</sup> Als die Newton'sche Physik in ihrer Anwendung auf Licht an ihre Grenzen stieß, stellte sich die Frage nach der Gleichheit von träger und schwerer Masse schon Ende des 19. Jahrhunderts – war aber völlig offen. Einsteins spätere Ableitung dieser Gleichheit wird damit noch eindrucksvoller bewiesen.



Auf den Körper mit der Masse  $m_1$  wirkt die der trägen Masse proportionale Fliehkraft und die der schweren Masse proportionale Gravitationskraft. Die Resultierende  $F_R$  zeigt in eine bestimmte Richtung. Nach Drehung der Waage um  $180^\circ$  müsste sich die Richtung der Resultierenden ändern, wenn für den Körper mit der Masse  $m_2$  das Verhältnis von träger und schwerer Masse ein anderes ist. Eine Richtungsänderung der resultierenden Kraft wäre durch eine Auslenkung der Torsionswaage zu beobachten. Eine solche Auslenkung tritt jedoch nicht auf, für alle Körper ist das Verhältnis von träger und schwerer Masse gleich. Deshalb bietet es sich an, durch die Wahl geeigneter Maßeinheiten dieses Verhältnis auf 1 festzulegen, wodurch aus der Proportionalität eine Gleichheit wird:  $m_s / m_t = \text{const} := 1 \rightarrow m_s = m_t$ .

Es soll nicht unerwähnt bleiben, dass auch hier der Effekt „Auslenkung der Torsionswaage“ auftritt, wenn die Theorie falsch ist bzw. der Effekt nicht auftritt, wenn die Theorie richtig ist. Deshalb ist genauso wie beim Michelson-Versuch auch bezüglich dieses negativen Experiments das Bemühen um immer höhere Messgenauigkeiten keine bloße Jagd nach neuen Rekorden.

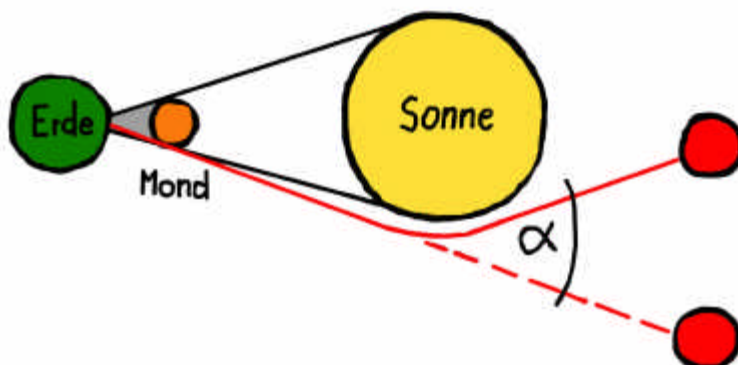
Abb.88

Name	Jahr	Bauart	Messfehler
Newton	publ. 1872	Pendel	$< 1 \cdot 10^{-3}$
Eötvös	1894	Torsionswaage	$< 5 \cdot 10^{-8}$
Eötvös, Picard	1895	Torsionswaage	$< 5 \cdot 10^{-9}$
Dicke, Roll Krotkow	1962	Torsionswaage	$< 1 \cdot 10^{-11}$
Braginski, Panow	1971	Torsionpendel	$< 1 \cdot 10^{-12}$

### 5.7. Lichtablenkung im Schwerfeld

Die Ablenkung elektromagnetischer Felder (speziell die des Lichtes) prüft man im Gravitationsfeld der Sonne. Verwendet wird das Licht fernerer Fixsterne, das, um zur Erde zu gelangen, die Sonne in unmittelbarer Nähe passieren muss. Um den Fixstern fotografieren zu können, muss eine totale Sonnenfinsternis abgewartet werden, damit das Sonnenlicht nicht das Fixsternlicht völlig überstrahlt.

Abb.89



Die Abbildung ist natürlich stark übertrieben, der Winkel ist in Wirklichkeit kleiner.

wahre Stellung (II)

scheinbare Stellung (I)

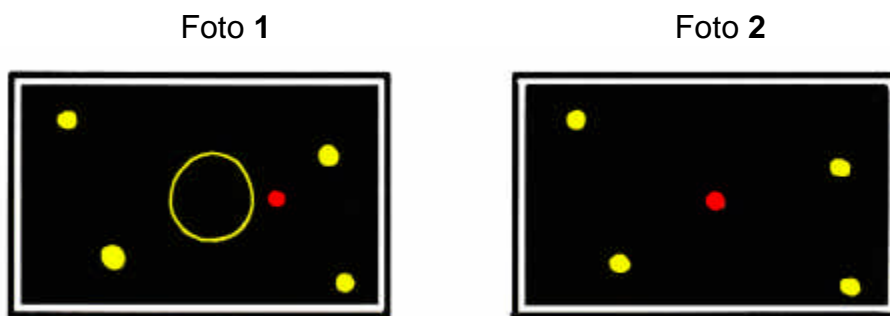
Fotografiert man den Fixstern unter diesen Bedingungen von der Erde aus, so befindet er sich auf dem Foto (1) in der scheinbaren Stellung I.  
 Zum Vergleich unternimmt man ein halbes Jahr später in einer klaren Nacht den gleichen Versuch noch einmal und fotografiert den gleichen Ausschnitt des Fixsternhimmels wieder.

Abb.90



Auf diesem zweiten Foto (2) ist der Fixstern nun in seiner wahren Stellung II abgebildet.

Abb.91



Aus der scheinbaren Verschiebung des Fixsterns gegenüber anderen Sternen (Foto 1) lässt sich anhand des Vergleichs mit der (auf Foto 2 abgebildeten) wahren Stellung des Fixsterns der Winkel berechnen, um den das Licht des Fixsterns am Sonnenrand abgelenkt wurde (bei bekannter Entfernung).

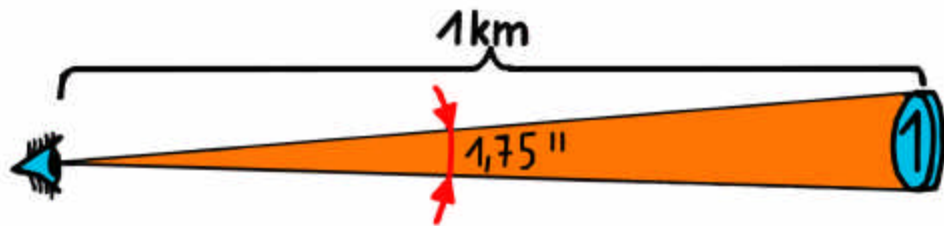
Auf der Basis klassischer Berechnungen erhielt J. Soldner bereits 1801 einen Ablenkungswinkel von  $0,83''$  (Bogenminuten). Die Relativitätstheorie dagegen liefert den Wert  $1,75''$ . In der nachfolgenden Tabelle sind die experimentell ermittelten Werte zusammengestellt:

Abb.92

Name	Jahr	Ablenkungswinkel
Cromelain, Davidson	1919	$1,98'' \pm 0,18''$
Eddington, Cottingham	1919	$1,61'' \pm 0,45''$
Campbell, Trümpler	1922	$1,78'' \pm 0,17''$
Dordell, Kennedy	1922	$1,77''$
Freundlich	1929	$2,24''$
Michailow	1936	$2,73'' \pm 0,31''$
van Biesbroeck	1947	$2,01'' \pm 0,27''$
van Biesbroeck	1952	$1,70'' \pm 0,10''$

Wie klein dieser Effekt der Lichtablenkung selbst in dem verhältnismäßig starken Gravitationsfeld der Sonne immer noch ist, wird deutlich, wenn man sich vor Augen hält, dass  $1,75'' = 1 / 2000 \text{ }^\circ$  ist!

Abb.93



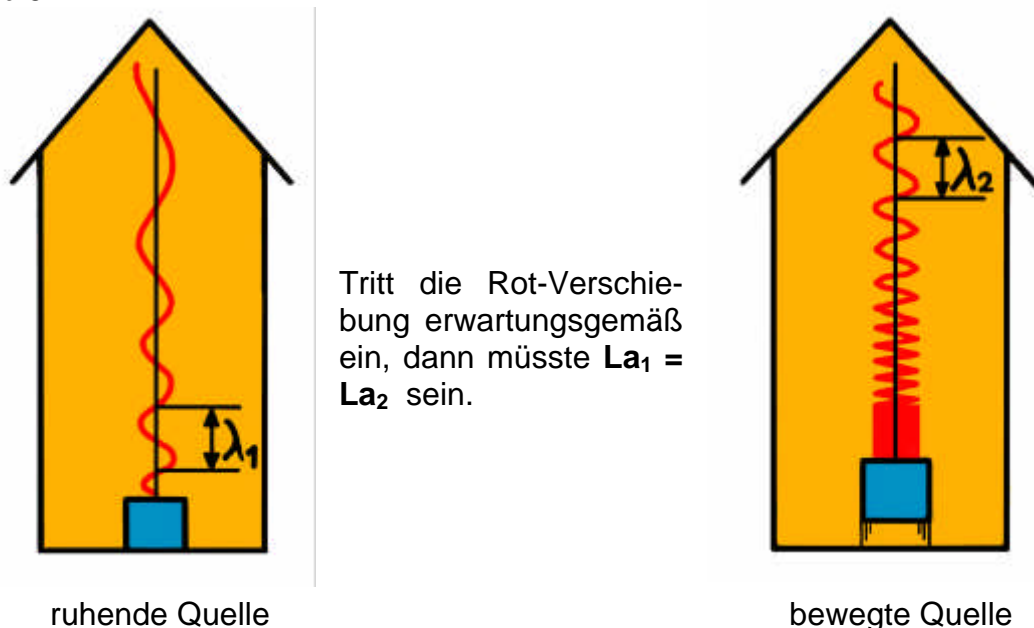
Unter diesem Winkel erscheint dem unbewaffneten Auge eine Pfennigmünze in einer Entfernung von 1 km !

Bei der Messung solch kleiner Effekte treten selbstverständlich relativ große Beobachtungsfehler auf, die sich in den oben angegebenen Toleranzen wider spiegeln.

### 5.8. Rotverschiebung im Schwerfeld

Zur Bestätigung dieser Aussage der allgemeinen Relativitätstheorie führten die Physiker Pound und Rebka im Jahre 1960 folgenden Versuch durch: Im Keller eines Turms der Havard – University befand sich eine Quelle elektromagnetischer Wellen. Die nach oben ausgesandten Strahlen hatten einen Höhenunterschied von 22,5 m zu überwinden. Die diesem Höhenunterschied entsprechende Vergrößerung der Wellenlänge wurde berechnet und anschließend bewegte man die Quelle langsam nach oben. Der dadurch eintretende Doppler-Effekt müsste dazu führen, dass in 22,5 m Höhe bei bewegter Quelle *die* Wellenlänge gemessen wird, *die* die elektromagnetischen Wellen bei Austritt der Quelle wirklich haben.

Abb.94



Tritt die Rot-Verschiebung erwartungsgemäß ein, dann müsste  $\lambda_1 = \lambda_2$  sein.

Tritt also der Effekt der Rotverschiebung (Vergrößerung der Wellenlänge) tatsächlich entsprechend den Berechnungen ein, so würde er von dem Doppler-Effekt (Verkleinerung der Wellenlänge) genau ausgeglichen.

Das Ergebnis des Versuchs war, dass sich die Wellenlänge der aus der ruhenden Quelle austretenden Strahlen ( $\lambda_1$ ) und der bei bewegter Quelle in Höhe von 22,5 m ankommenden Strahlen ( $\lambda_2$ ) nicht voneinander unterschieden, und zwar mit einer Genauigkeit von 1%.

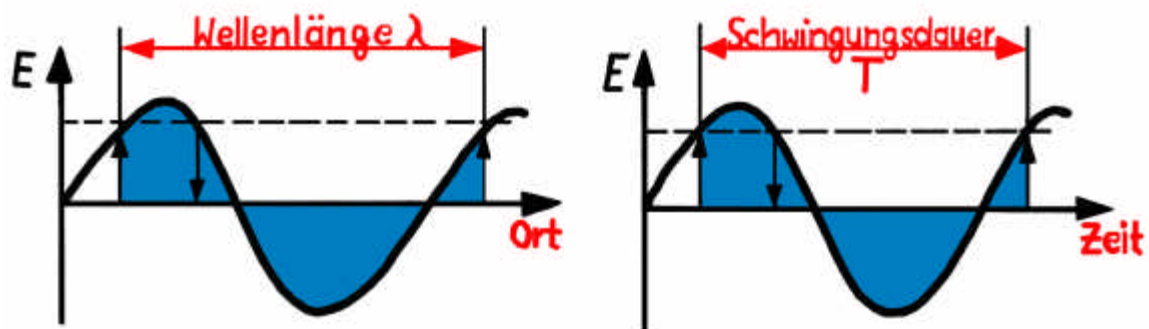
Die Physiker Pound und Rebka konnten auf diese Weise eine weitere experimentell Bestätigung der Relativitätstheorie erbringen, die Rotverschiebung im Gravitationsfeld ist damit nachgewiesen.

## 5.9. Längenveränderung und Zeitdehnung im Schwerfeld

Wenn der Ablauf der Zeit, so wie wir es im Abschnitt 4.4. vorhergesagt haben, tatsächlich von der Gravitationsfeldstärke beeinflusst wird, dann muss der Gang zweier Uhren, von denen die eine im Schwerfeld der Sonne und die andere im Schwerfeld der Erde in jeweils der gleichen Entfernung ruht, wegen unterschiedlich großer Gravitationsfeldstärken voneinander verschieden sein. Aber selbst bezüglich des Schwerfeldes der Sonne ist dieser Effekt so klein, dass man zu seinem Nachweis mechanische oder elektronische Uhren nicht verwenden kann. Vielmehr werden „ideale Uhren“ benutzt, nämlich lichtaussendende Atome bestimmter Elemente.

Von den Atomen ein und desselben Elementes weiß man, dass sie aus gleichen Elementarbausteinen bestehen und auch den gleichen Aufbau haben, weswegen man voraussetzen kann, dass das von ihnen ausgesandte Licht jeweils die gleiche Schwingungsdauer hat.<sup>63</sup>

Abb.95

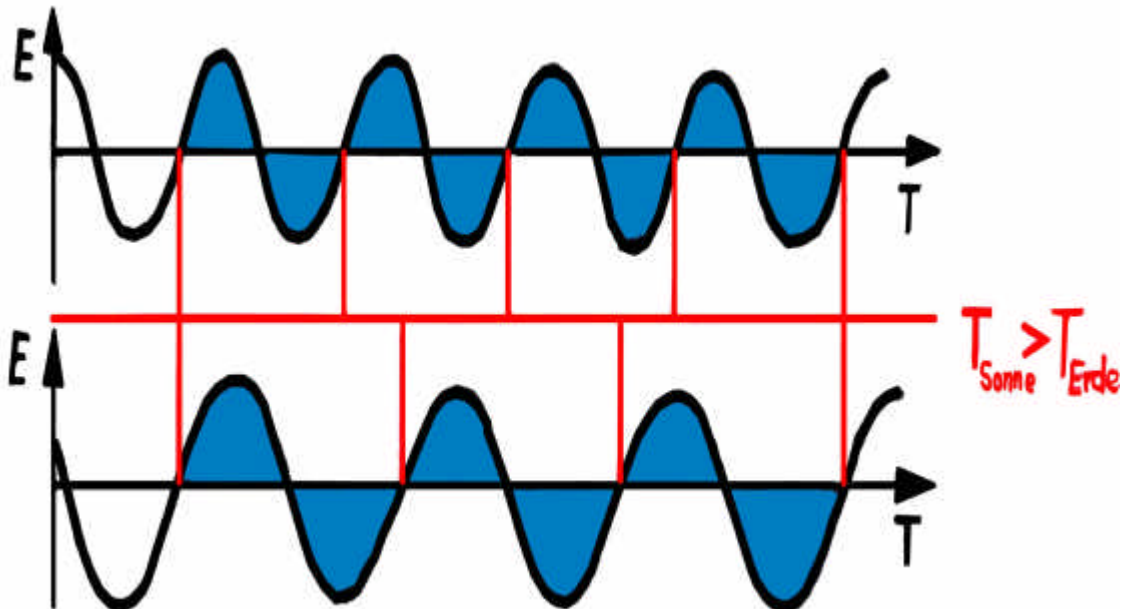


So kann man strahlende Atome als ideale Uhren verwenden, die Zeiteinheiten sind durch die Schwingungsdauern gegeben.

<sup>63</sup> Für den besonders interessierten Leser: Vom Licht wissen wir, dass es nichts anderes ist, als sich wechselseitig erzeugende und dabei ausbreitende elektrische und magnetische Felder (elektromagnetische Wellen). Die elektrische Feldstärke  $E$  beispielsweise ändert sich sowohl räumlich, als auch zeitlich periodisch. So läßt sich  $E$  nicht nur in Abhängigkeit vom Ort, sondern auch in Abhängigkeit von der Zeit darstellen und man ist so in der Lage, die Zeitdifferenz zwischen zwei gleichen Werten von  $E$  als „Schwingungsdauer“ zu bezeichnen.

Verginge nun die Zeit im Schwerfeld der Sonne langsamer als bei uns im Schwerfeld der Erde, so würden einer Zeitdifferenz, die beispielsweise durch 4 Schwingungsperioden des Lichts irdischer Atome gegeben ist – so würden dieser Zeitdifferenz nur beispielsweise 3 Schwingungsperioden des Lichts gleicher Atome auf der Sonne entsprechen (stark übertrieben).

Abb.96



Oben ist das Licht eines Atoms auf der Erde dargestellt, unten eines Atoms auf der Sonne.

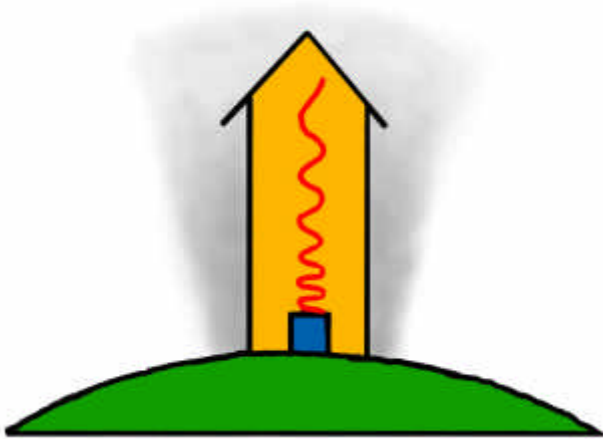
Geht man von konstanter Lichtgeschwindigkeit aus<sup>64</sup>, so gehören zu großen Schwingungsdauern auch große Wellenlängen. Damit ist nicht nur die Schwingungsdauer, sondern auch die Wellenlänge des von den Atomen auf der Sonne ausgestrahlten Lichtes größer, als die der gleichen Atome auf der Erde.

Wir kommen mit Hilfe dieser Überlegung zu dem Ergebnis, dass sich der Effekt der Verlangsamung des Zeitablaufes im Schwerfeld der Sonne (gegenüber dem schwächeren Schwerfeld der Erde) anhand der Wellenlängenvergrößerung des Lichtes bestimmter Atome (gegenüber der Wellenlänge des Lichtes gleicher irdischer Atome) nachweisen lassen muss. Diese Wellenlängenänderung durch die Zeitdilatation sollte aber auch in verschiedenen Höhen ein und desselben Schwerfeldes – beispielsweise dem der Erde – auftreten.

Jene Rot-Verschiebung ist aber genau der von Pound und Rebka bereits nachgewiesene Effekt. Das bedeutet, dass mit diesem Experiment von Pound und Rebka nichts anderes als die Zeitdilatation im Schwerfeld bewiesen wurde.

<sup>64</sup> Die Änderungen von  $c$  im Schwerfeld sind wahrscheinlich sehr gering.

Abb.97



In größerer Höhe wird eine größere Zeitdauer für eine Schwingung gebraucht, die Schwingung scheint bezüglich des hier gültigen Zeitablaufes verlangsamt.

Aber hatten wir bei der Beschreibung des Versuchs von Pound und Rebka den Effekt der Rotverschiebung im Schwerfeld nicht anders erklärt?

Die Überlegung, die uns zu diesem Effekt der Rotverschiebung hingeführt hatte, war die, dass ein jedes Objekt beim Verlassen eines Schwerfeldes einen Zuwachs an potentieller Energie erfährt. Diese Überlegung ist zwar richtig, doch wurde sie aus der klassischen Physik entlehnt. Und wir hatten auch bereits weiter oben dazu gesagt, dass Photonen nicht den klassisch-mechanischen Bewegungsgesetzen unterliegen.

An dieser Stelle wird deutlich, dass die klassische Physik trotz aller Schwierigkeiten, in die sie geraten war, den Effekt der Rot-Verschiebung im Schwerfeld durchaus vorher sagen konnte. Allerdings beantwortet sie nicht die Frage nach den Gründen eines solchen Effektes. Diese Frage konnte erst durch die Relativitätstheorie anhand der von ihr vorhergesagten Zeitdilatation geklärt werden und damit braucht die Relativitätstheorie auch nicht den „Umweg“ zu gehen, Photonen eine potentielle Energie zuzuordnen.

In der Allgemeinen Relativitätstheorie ist der Begriff der Energie nicht mehr von überragender Bedeutung, das Gravitationsfeld eines Körpers wird mit den geometrischen Eigenschaften des Raumes identifiziert und die beobachtbare Rot-Verschiebung im Schwerfeld kann auf die (von der Metrik des Raumes abhängende) Zeitdilatation zurückgeführt werden.

Das Experiment von Pound und Rebka weist insgesamt nicht nur die Rot-Verschiebung, sondern auch die Zeitdilatation im Schwerfeld nach.

Zur Längenkontraktion im Gravitationsfeld muss gesagt werden, dass sie – ebenso wie die Längenänderung der speziellen Theorie – bisher noch nicht zufriedenstellend nachgewiesen werden konnte.

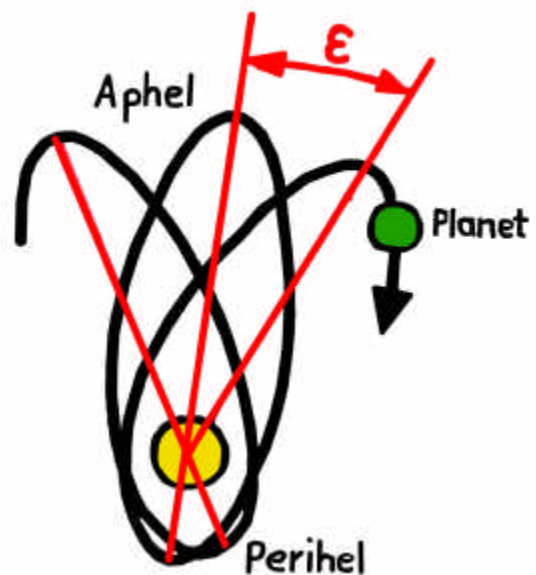
## 5.10. Perihel-Drehung des Merkur

Aus der klassischen Physik ist bekannt, dass die Planetenbahnen ebene Ellipsen sind, in deren einem Brennpunkt sich der Fixstern befindet (1.Kepler'sches Gesetz). Den sonnennächsten Punkt der Ellipsenbahnen nennt man „Perihel“, den sonnenfernsten Punkt „Aphel“.

Schon dem Astronomen Leverrier (1811 – 1877) war nicht verborgen geblieben, dass sich die Planetenbahnen im Laufe der Zeit drehen, d.h. sie verbleiben zwar in ihrer Ebene (Ekliptik), aber ihre sonnenfernsten bzw. sonnennächsten Punkte wandern auf einer Kreisbahn in dieser Ebene langsam um die Sonne.

Abb.98

Diesen Effekt der Wanderung der sonnenfernsten bzw. sonnennächsten Punkte einer Planetenbahn nennt man „Perihel-Drehung“. Aufgrund dieser Perihel-Drehung beschreibt der Planet keine exakte Ellipsenbahn, sondern eine sogenannte „Rosettenbahn“. Eine solche Rosettenbahn beschreibt man mithilfe der zugrundeliegenden Ellipse und dem zugehörigen Winkel  $\mathbf{E}$  (Epsilon), der ein Maß für die Perihel-Drehung ist.



Beim Planeten Merkur ist die in unserem Sonnensystem stärkste Perihel-Drehung zu beobachten, sie beträgt  $\mathbf{E} = 5600''$  (etwa  $1,6^\circ$ ) pro Jahrhundert (!). Die Frage nach den Ursachen der Perihel-Drehung beantwortet die klassische Physik damit, dass sich die Planeten vermittle ihrer Gravitationsfelder in vielfältiger Weise gegenseitig beeinflussen. Tatsächlich lässt sich – wie komplizierte Berechnungen zeigen – die Periheldrehung auch beim Merkur auf Störungen der Ellipsenbahn durch andere Planeten zurück führen, jedoch bleibt ein in diesem Rahmen nicht erklärbarer Rest von  $41''$ .

Doch auch diese  $41''$  erfahren eine natürliche Erklärung, wenn man davon ausgeht, dass der dreidimensionale Raum nicht euklidisch, sondern gekrümmt ist. Die Allgemeine Relativitätstheorie liefert diesbezüglich einen Wert von  $43''$ , der unter Berücksichtigung der Größenordnung des Effektes in sehr guter Übereinstimmung mit dem praktisch ermittelten Rest von  $41''$  steht. Demnach ist auch die Periheldrehung des Merkur eine ausgezeichnete Bestätigung der Relativitätstheorie.

## 5.11. Lichtgeschwindigkeit im Gravitationsfeld

Zu Ende des Abschnittes 4.6. ist auf die Veränderlichkeit der Lichtgeschwindigkeit kurz eingegangen worden.

Würde man das Michelson-Experiment so durchführen, dass der eine Teilstrahl senkrecht zur Wirkungsrichtung der Gravitation (horizontal) und der andere Teilstrahl parallel dazu (vertikal) – oder schräg – verläuft, so müsste sich ein geringfügiger Unterschied anhand der Verschiebung der Interferenzbilder nachweisen lassen. Dieser Unterschied wäre aber entsprechend den theoretischen Berechnungen so gering, dass er mit den zur Zeit möglichen Messgenauigkeiten noch nicht erfasst werden kann. Im Schwerfeld der Erde unterscheiden sich die Lichtgeschwindigkeiten an der Erdoberfläche und in 10 km Höhe nur um die Größenordnung  $10^{-12}$ .

Aus diesem Grunde kann man bezüglich des Nachweises der Zeitdilatation tatsächlich von  $c = \text{konstant}$  ausgehen. Beim Zerfall von  $\mu$ -Mesonen ist die geringfügige Änderung von  $c$  im Schwerfeld völlig ohne Auswirkungen. Auch das Ergebnis des Versuches von Pound und Rebka, bei dem man von  $c = \text{konstant}$  ausging, behält so seine Gültigkeit.

## 5.12. Gravitationswellen

Der Amerikaner Joseph Weber entwickelte als Antenne zum Empfang von Gravitationswellen einen 1,5 t schweren Aluminium-Zylinder. Leider erwies sich die Empfindlichkeit dieser Apparatur als zu gering – die Versuche verliefen ergebnislos.



## 6. Anhang

### Sachwortverzeichnis

- Additionstheorem
  - Klassisches 30, 38
  - Relativistisches 42, 45
- Annihilation 63
- Anteilchen 64
- Äquipotentialfläche 71
- Äquivalenz
  - Masse-Energie 61, 107, 120
  - Prinzip 80, 85ff, 93
- Äther 39ff, 45ff, 63ff, 117
- Bezugssystem 30
- Denkmodelle 29, 62
- Doppler-Effekt 111, 123ff
- Eigenzeit 119
- Expansion des Weltalls 111
- Fallbeschleunigung 13ff, 69, 92  
(Gravitationsfeldstärke)
- Feld
  - Linien 68ff
- Galilei-Transformation 34
- Geodäte 99, 106
- Geometrie 95ff, 100ff, 110ff  
(Euklid'sche, nicht-Euklid'sche)
- Hintergrundstrahlung 112  
(3-Kelvin-Strahlung)
- Homogenität des Raumes 112ff
- Inertialsystem 31ff
- Interferenz 25ff, 40ff, 109, 117
- Isotropie des Raumes 114ff
- Koordinatensystem 33, 67, 88, 95
- Korrespondenzprinzip 60
- Kosmologisches Prinzip 111
- Licht 24ff
- Lichtgeschwindigkeit
  - Konstanz der 43ff, 109, 117
  - im Schwerfeld 108
- Lorentz-Transformation 48ff, 58ff, 91ff
- Loschmidt'sche Konstante 10  
(Fußnote)
- Massenspektrograph 119
- Materie 20, 28ff, 36, 45ff, 56ff, 64, 104ff
- Quantenmechanik 64
- Relativitätsprinzip
  - Klassisches 34ff
  - Spezielles 42ff
  - Allgemeines 86ff, 90ff
- Rotation 16, 93, 103ff, 120
- Ruhemasse 60, 64, 119
- Schwarze Löcher 114ff
- Schwerfeld  
(Gravitationsfeld) 15, 66ff
- Schwingungsdauer 24ff, 124ff
- Singularität 114ff
- Skalar 67
- Teilchenmodell 26ff, 113, 116
- Torsionswaage 120ff
- Trägheitskraft 37, 77ff, 87
- Ur-Knall 113ff
- Vektor 67, 71, 102, 108
- Wellenlänge 26, 107ff, 123ff
- Wellenmodell 26ff, 42ff, 113, 116
- Zwillings-Paradoxon 55

### Literaturverzeichnis

- |            |   |
|------------|---|
| Melcher    | Relativitätstheorie in elementarer Darstellung        |
| Papapetrou | Spezielle Relativitätstheorie                         |
| Stephanie  | Allgemeine Relativitätstheorie                        |
| Lindner    | Das Bild der modernen Physik                          |
| Kuznecov   | Einstein, Leben – Tod – Unsterblichkeit               |
| Macheleidt | Relativitätstheorie                                   |
| Treder     | Philosophische Probleme des physikalischen Raumes     |
| Grimsehl   | Lehrbuch der Physik                                   |
| Sawelski   | Die Zeit und ihre Messung, Die Masse und ihre Messung |
| Kaplan     | Physik der Sterne                                     |