

Raum und Zeit:

Eine physikalische Zeitreise

Othmar Marti

Abteilung Experimentelle Physik

Universität Ulm

1 Einleitung

Was ist Raum, was ist Zeit? Zur Definition der Begriffe Raum und Zeit gibt es ganz verschiedene Antworten. Umgangssprachlich gehen wir sehr locker mit diesen Worten um. Wer hatte noch nie „keine Zeit“? Wem ist vor allem als Kind vor dem Heiligabend die Zeit endlos lange vorgekommen oder in einem glücklichen Augenblick viel zu schnell vorbei geflogen? Genauso hängt der Begriff des Raumes in der Umgangssprache sehr stark von den Menschen die ihn gebrauchen und den kulturellen Gegebenheiten ab. Es gibt Menschen, die brauchen die Weite des flachen Landes. Nur dort fühlen sie sich frei. Es gibt andere, und dazu zählen vielfach meine Landsleute die Schweizer, die fühlen sich im flachen Lande verloren. Die Geborgenheit der kleinräumigen Landschaft fehlt ihnen. In der Umgangssprache haben Raum und Zeit sehr viel mit Erleben, Gefühl und Fühlen zu tun.

Die physikalischen Begriffe von Raum und Zeit orientieren sich an dem was meßbar oder berechenbar ist, denn die Physik beschreibt die Natur anhand von mathematischen Modellen. Was nicht mit Mathematik beschreibbar oder was nicht meßbar ist, gehört nicht zum Gebiet der Physik. Außerhalb der meßbaren Welt macht die Physik keine Aussage zu Raum und Zeit. Dies heißt nicht, daß Aussagen über Raum und Zeit, die nicht mathematisch formulierbar sind, keine Wahrheit in sich hätten. Da die Physik ein formales Gedankengebäude ist, ist sie, wie der große Mathematiker Gödel im ersten Drittel unseres Jahrhunderts zeigen konnte, in sich selber nicht beweisbar ist.

Die physikalischen Modelle der Wirklichkeit werden durch Experimente, also Messungen, getestet. Ein physikalisches Experiment kann nie beweisen, daß ein Modell wahr ist. Es kann jedoch zeigen, daß die meßbare Wirklichkeit im Widerspruch zum Modell, zur Theorie steht. In der physikalischen Umgangssprache geht man mit dieser logischen Aussage eher locker um. Wenn behauptet oder gesagt wird, daß ein Modell gezeigt wurde, heißt das, daß kein Widerspruch zum Modell gefunden wurde. Dieser Artikel wird im folgenden die meßbaren Eigenschaften von Raum und Zeit diskutieren.

2 Von den Babyloniern zu Kopernikus

2.1 Das Weltbild der Babylonier

Warum haben Menschen mit dem Messen von Zeit und Raum begonnen? Welche Gründe gab es, Zeit zu messen? Sobald Menschen sesshaft, also Bauern, wurden, war es von enormer Wichtigkeit, den Zeitpunkt der Aussaat zu bestimmen. In vielen Gegenden ist es gar nicht einfach, den Frühlingsbeginn festzustellen. Vielfach kann man sich auf das Wetter als Indikator nicht verlassen. Zum Beispiel sind in Ulm 10 schöne Tage selten ein tauglicher Indikator für den Frühlingsbeginn. Die alten Hochkulturen begannen deshalb, anhand von Sternbeobachtungen, den Jahresablauf zu bestimmen. Dazu mußte man sich jedoch ein Modell ma-

chen, das beschreibt, wie die Sterne sich bewegten. Ein weiterer Antrieb zur Bestimmung des Jahreslaufes dürfte das Eintreiben von Steuern gewesen sein. Auch Opfer wurden zu ganz bestimmten Jahreszeiten oder Daten den Göttern dargebracht. Um den Sternenlauf mit einem mathematischen Model beschreiben zu können, mußte das ursprüngliche Weltbild aufgegeben werden.

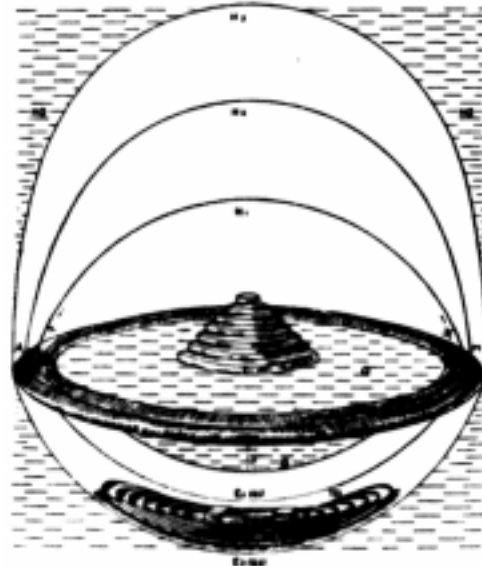


Fig. 1: Das Weltbild der Babylonier (aus Simonyi)

Das ursprüngliche Weltbild ist das, was sie als Kind aus ihrer Erfahrung bestimmen konnten. Wenn sie ehrlich sind, dann müssen sie zugeben, daß sie keine Beweise für die Behauptung haben, daß die Erde rund ist. Wir erleben auch, daß die Erde im Mittelpunkt unseres ganzen Lebens ist. Genauso war das Weltbild der Babylonier (Fig. 1), und auch das der Ägypter. Die Sterne sind an einem Himmelsgewölbe befestigt, eine Ansicht, die auch in unseren Breiten üblich war. Wenn es ein Himmelsgewölbe gibt, dann kann das Gewölbe auch einstürzen. Das sagt uns schon die Erfahrung mit vielen Bauten. Darum haben die Germanen und Kelten befürchtet, daß ihnen der Himmel auf den Kopf fallen könnte. Wenn die Erde eine Platte ist, dann muß sie irgendwo ein Ende haben. Auch diese Erfahrung ist in das babylonische Weltbild eingeflossen. Noch zur Zeit des Kolumbus haben es viele Menschen nicht gewagt, sich von der Küste zu entfernen, da sie befürchteten, von der Erde zu fallen. Ein solches Weltbild, bei dem die Sonne mit einem Himmelswagen über die Erde fährt, abends verschlungen wird und morgens wiedergeboren wird, ist nicht berechenbar (und macht auch Angst!). Deshalb sind sowohl bei den Babyloniern als auch bei den Griechen neue Weltbilder entstanden. Heute noch bekannt ist das Weltbild des Ptolemäus aus Griechenland.

2.2 Das Weltbild der Ptolemäer

Die Ptolemäer (Fig. 2) hatten die Philosophie für Griechen auf die Spitze getrieben, indem in ihren Gedankengebäuden die Erde und die Welt vollkommen sein sollten. In ihrem Weltbild ist die Erde im Mittelpunkt, umkreist von Mond, Merkur, Venus, Sonne, Mars, Jupiter, Saturn sowie von den Fixsternen auf einer eigenen neunten Sphäre. Vollkommenheit bedeutete ihrer Ansicht nach, dass die Planetenbahnen Kreise waren, da ein Kreis die vollkommenste geometrische Figur überhaupt sei. Die Himmelsbeobachtung zeigt, daß Planeten sich nicht immer in die gleiche Richtung bewegen. Zeitweise bewegen sie sich nach Osten, dann wieder nach Westen. Diese gravierende Diskrepanz zwischen Beobachtung und haben die Ptolemäer dadurch gelöst, daß die Planeten sich auf Epizyklen bewegen. Epizyklen sind Kreise, deren Mittelpunkt auf sich der eigentlichen Kreisbahn um die Erde befindet. Mit dieser Konstruktion

konnten die vor- und rücklaufenden Bewegung der Planeten innerhalb der Meßgenauigkeit, die die Griechen erreicht hatten, bestimmt werden.

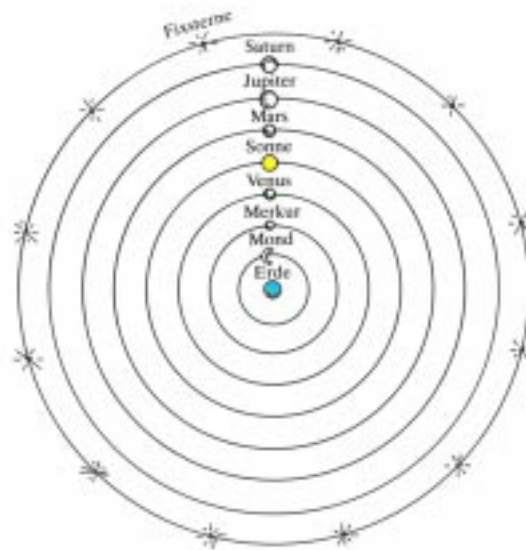


Fig. 2: Das Weltbild der Ptolemäer (aus Hoffmann)

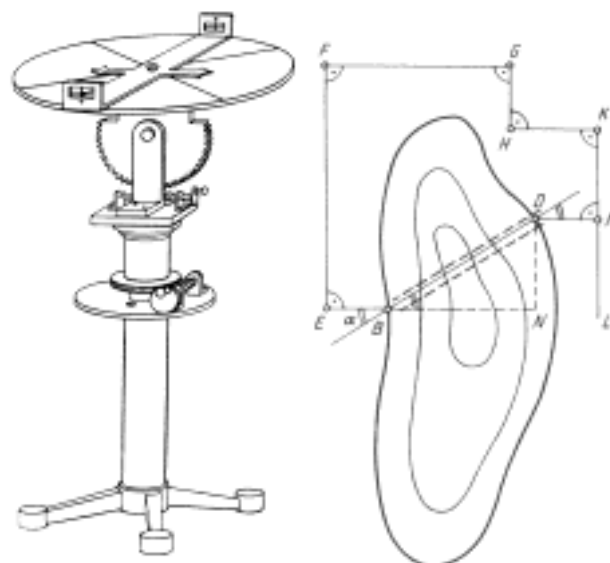


Fig. 3: Links: Diopter des Heron. Rechts: Tunnelbau (aus Simonyi)

Mit der Darstellung der Ptolemäer, bei der Erde im Zentrum war, hat sich die zumindest Wissenschaft vom Bild der flachen Erde verabschiedet. Um festzustellen, dass die Erde eine Kugel ist, mußte man die Technik der Längen- und Winkelmessung vervollkommen werden. Wie die Zeitmessung könnte auch die Längenmessung ihren Ursprung in der Bestimmung des Besitzes von Königen und Adligen haben, da diese wissen wollten, wieviel Land sie besaßen. Die Griechen, zum Beispiel Heron (Fig. 3 links), hatten Geräte entwickelt, mit denen sie Tunnelbauten von mehreren hundert Metern Länge durchführen konnten (Fig. 3 rechts), die von beiden Seiten begonnen wurden, und wo die Röhren sich in der Mitte auch trafen. Ebenso sind

viele Tempelbauten in Ägypten und in Griechenland ohne ausgefeilte Längen- und Winkelmeßmethoden nicht denkbar¹.

2.3 Das Weltbild der Pythagoräer

Das Universum der Ptolemäer hat die Erde zum Zentrum, die Menschen sind zentral auf der Erde. Diese Ansicht wird heute noch von vielen vertreten. Der Mensch als Krone der Schöpfung, der Mensch als Zentrum des Universums bestimmt, wo es lang geht; viele merken nicht, daß sie, z.B. mit Umweltsünden, dabei sind, ihr eigenes Grab zu schaufeln.

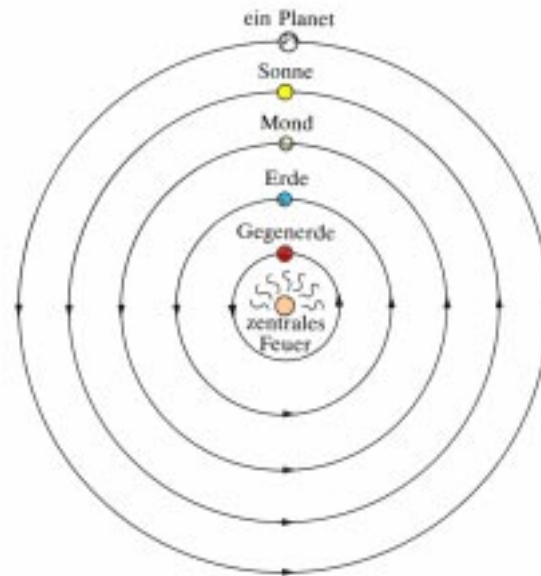


Fig. 4: Das Weltbild der Pythagoräer (aus Hoffmann)

Die Pythagoräer, die philosophische Schule des aus Samos gebürtigen Pythagoras, hatten eine andere Ansicht (Fig. 4). Für sie umkreist die Erde täglich ein zentrales Feuer. Immer die gleiche Seite der Erde zeigt zum Zentralfeuer. Warum haben wir dieses Zentralfeuer noch nie gesehen? Die Antwort der Pythagoräer: es gibt eine Gegenerde, die dieses zentrale Feuer bedeckt und für die Erde unsichtbar macht. Außerhalb der Erdbahn bewegen sich der Mond, die Sonne und die weiteren Planeten um dieses zentrale Feuer. Ganz außen auf der Himmelskugel sind die Fixsterne befestigt. Die Gegenerde war für die Pythagoräer eine wichtige Erfindung. 10 war für sie eine heilige Zahl. Bei Berücksichtigung der Fixsternhülle zählte aber jedes andere Weltsystem nur 9 Himmelskörper. Um ihre heilige Zahl zu erhalten, haben sie die Gegenerde eingeführt. Das pythagoräische Weltbild war radikal. Die Erde und der Mensch wurden aus dem Zentrum des Universums entfernt. Die Erde ist zwar noch sehr nahe am Mittelpunkt, die Sonne z.B. ist weiter weg. Ein zentrales Feuer nimmt nun den Platz der Erde ein. Mit dem Weltbild der Pythagoräer konnte man nicht besser und nicht schlechter rechnen als mit dem der Ptolemäer. Seine Bedeutung liegt, wie gesagt, darin, daß die Erde ihren privilegierten Standpunkt verloren hat.

¹ Die Säulen und Gesimse der Tempel auf der Akropolis z.B. berücksichtigen die Perspektive. Sie sind krumm gebaut, so daß, wenn man vor einem Tempel steht, die Gesimse gerade erscheinen.

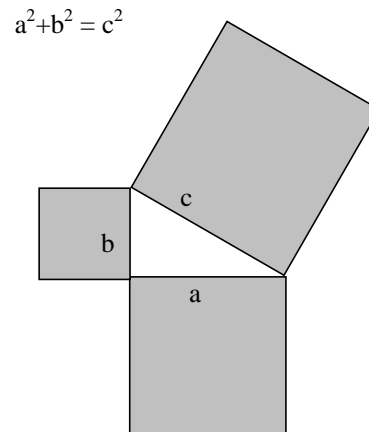


Fig. 5: Dreieck des Pythagoras.

Das Weltbild der Pythagoräer ist den meisten nicht mehr bekannt, ganz im Gegensatz zum Dreieck des Pythagoras (Fig. 5). Für jedes rechtwinklige Dreieck kann man zeigen, daß die Summe der Quadrate der kurzen Seiten (Katheten) gleich dem Quadrat der längsten Seite (Hypotenuse) ist. Diese Gleichung, die in jedem euklidischen Raum² gilt, ist noch heute die Grundlage für die Vermessung von Längen und Flächen.

2.4 Das Weltbild des Aristarch

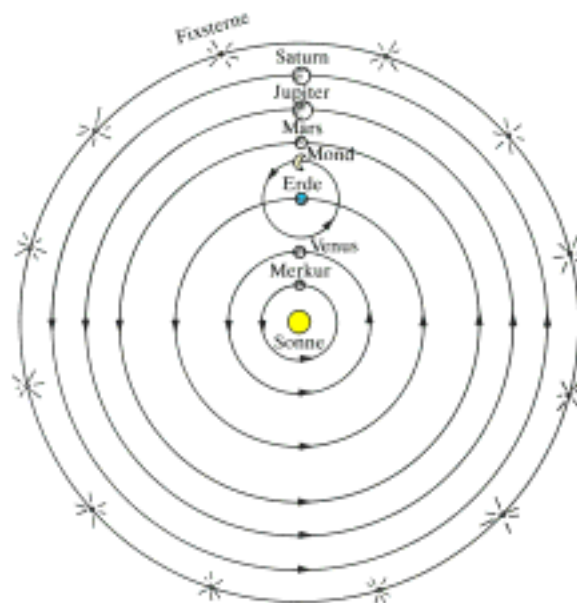


Fig. 6: Weltbild des Aristarch (aus Hoffmann)

Wirklich revolutionär waren die Gedanken des Aristarch. Er veröffentlichte etwa 300 vor Christus sein Weltbild, in dem die Sonne im Zentrum steht (Fig. 6). Merkur und Venus kreisen um die Sonne, dann folgt die Bahn der Erde. Um die Erde kreist der Mond, die Bahnen von Mars, Jupiter, Saturn und die Fixsterne folgen weiter außen. Aristarch ist wie Pythagoras in Samos geboren worden. Sein Weltbild ist sofort verdammt worden. Während bei den Pythagoräern die Zahl 10 als Argument diente, um eine Gegenerde und eine bewegte Erde zu begründen, gab es diese ästhetische Begründung bei Aristarch nicht. Aristoteles hat z.B. ein-

² Euklidische Räume sind Räume, die flach sind, bei denen parallele Linien sich nie schneiden.

geworfen, daß nach seiner Erfahrung senkrecht nach oben geworfene Gegenstände zum gleichen Ort zurückfallen. Seine Aussage stimmt, wenn man nicht zu genau mißt. Andernfalls wird man finden, daß senkrecht nach oben geworfene Gegenstände nicht auf den gleichen Ort zurückfallen. Ptolemäus rechnete aus, daß Orte am Äquator bis zu 2000 km pro Stunde schnell seien. Das müßte einen andauernden verheerenden Sturm geben: in Äquatornähe dürften deshalb kein Leben möglich sein. Ptolemäus hätte recht, wenn die Atmosphäre überall, also auch im ganzen Weltraum, vorhanden wäre. Wir wissen heute, daß unsere Erdatmosphäre eine relativ dünne, von der Erde mitgeführte Schicht ist, in der deshalb keine so verheerenden Stürme auftreten können³. Der wichtigste Grund für die Ablehnung des Systems des Aristarch war philosophischer Natur. Der Mensch und die Erde sind nicht mehr im Zentrum. Dieser Grund hat bis zu den Zeiten des Galilei die Kirche und den Vatikan bewogen, solche und ähnliche Weltmodelle zu verdammen.

3 Von Kopernikus zu Newton: Evolution unseres „Alltagsweltbildes“

3.1 Kopernikus

Das System des Aristarch ist von Kopernikus im 15. Jahrhundert neu entdeckt worden. Kopernikus hat seine diesbezüglichen Veröffentlichungen sehr vorsichtig abgefaßt, um der Inquisition zu entgehen. Geholfen hat ihm, daß er weit ab von den Machtzentren in Königsberg gelebt hat. Auf den ersten Blick verblüffend ist jedoch, dass das kopernikanische Weltsystem und dasjenige des Aristarch oder des Ptolemäus mathematisch äquivalent sind. Eine Epizyklus ist nichts anderes als die auf die jeweilige Bahn eines Planeten projizierte Erdbahn. Man kann mathematisch streng zeigen, daß beide Systeme genau die gleichen Voraussagen erlauben. Der Unterschied ist wirklich nur philosophischer Natur. Die alles entscheidende Frage zur Wahl des Weltbildes ist, ob man den Menschen im Zentrum haben will oder nicht.

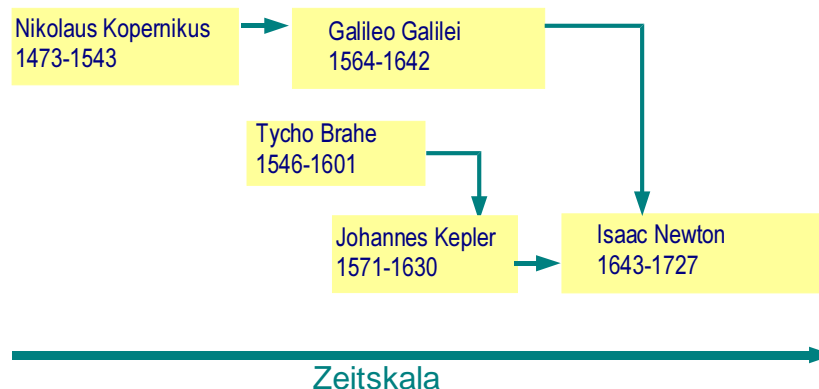


Fig. 7: Zeitliche Abfolge der Entdeckung der Newton'schen Gesetze

Der Sturz des im ausgehenden Mittelalter allgemein anerkannten griechischen Weltbildes wurde durch Tycho Brahe, durch Johannes Kepler, Galileo Galilei und vor allem Isaac Newton besiegt. Um zu begreifen, wie es zu diesem neuen physikalischen Bild der Erde, aber

³ Diese große Geschwindigkeit wird beim Abschuss von Satelliten ausgenutzt. Beim Start müssen sie von der Oberflächengeschwindigkeit der Erde am Startort auf die Bahngeschwindigkeit von 29'000 km/h beschleunigt werden. Der Weltraumbahnhof der Europäer in Kourou in der Nähe des Äquators bedeutet eine nicht unerheblichen Ersparnis von Treibstoff. Die am schlechtesten gelegenen Abschußrampen haben die Russen. Sie können die Hilfe der sich schnell drehenden Erde kaum ausnutzen.

auch von Raum und Zeit, kam, müssen wir uns zuerst mit einigen allgemeinen Gedanken vertraut machen.

3.2 Die Entdeckungen des Galileo Galileis

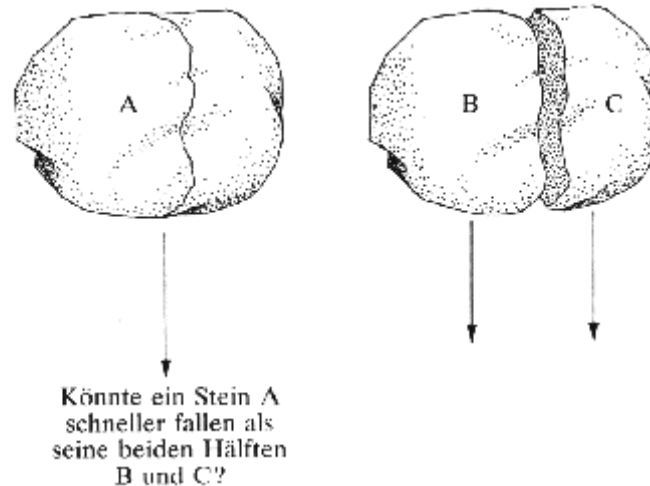


Fig. 8: Fallende Körper: Skizze zu Galileis Argumentation (aus Hoffmann)

Die griechische Naturphilosophie war an dem orientiert, was man ohne besondere Hilfsmittel beobachten kann. Kinder⁴ glauben, daß schwere Körper schneller fallen als leichte. Eine Feder fällt ja auch langsamer als ein Stein. Galileo Galilei hat sich folgendes Gedankenexperiment überlegt (Fig. 8): Ein Stein A sei in die Teile B und C geteilt. A ist deshalb schwerer als B oder C, müsste also schneller als B oder C fallen. Der Stein soll halbiert sein. Deshalb sind die Teile B und C gleich schwer. Wenn B und C langsamer fallen, so fallen sie auch langsamer, wenn sie gemeinsam fallen gelassen werden, da B und C zwei unabhängige Teile sind. Wenn man jetzt Gedanken B und C immer näher zueinander bringt, sieht man, daß $A=B+C$ langsamer fallen sollte als A alleine: ein Widerspruch. Deshalb muss die Fallgeschwindigkeit eines Körpers unabhängig von seinem Gewicht sein.

Diese Überlegungen waren der Beginn moderner naturwissenschaftlicher Denkweisen. Sie waren ebenso einer der Ausgangspunkte bei der Entdeckung des Gravitationsgesetzes⁵.

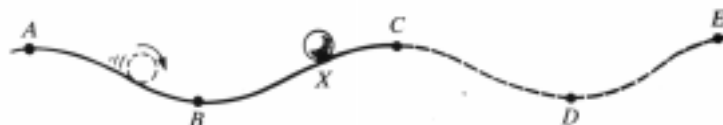


Fig. 9: Galileis Argumentation über die Bewegungsgesetze (aus Hoffmann)

Experimente mit schiefen Ebenen führten Galilei zu folgender Überlegung: rollt eine Kugel verschieden weit, wenn sie aus der gleichen Höhe, aber von unterschiedlichen Punkten aus startet. Galilei behauptete, daß die Geschwindigkeit einer Kugel oder die Steighöhe bei einer zweiten Erhebung (Fig. 9) nur von der Ausgangshöhe abhängt. Galilei hat eine Bahn angenommen, bei der die Punkte A, B und C gleich hoch sind. Die Kugel soll aus der Ruhe in A starten, wenn sie bei C eine Geschwindigkeit > 0 hätte, könnte man den Abschnitt A, B, C

⁴ Vielleicht auch andere Leute?

⁵ Galilei hat seine Behauptungen durch Experimente belegt. Man sagt, er hätte am schiefen Turm von Pisa experimentiert. Diese Behauptung ist leider nicht nachprüfbar.

viele Male wiederholen und hätte so ein Perpetuum Mobile. Die Geschwindigkeit darf also in C nicht von 0 verschieden sein. Es könnte aber sein, daß die Kugel schon vorher bei X umkehrt. Jetzt überlegte sich Galilei, daß dann das zeitgespiegelte Experiment⁶ im Widerspruch zur obigen Behauptung sei. Er kam zum Schluss, daß die Kugel genau so hoch steigen muss, wie sie heruntergefallen ist. Eine Tatsache, die wir heute unter dem Begriff der Energieerhaltung kennen.

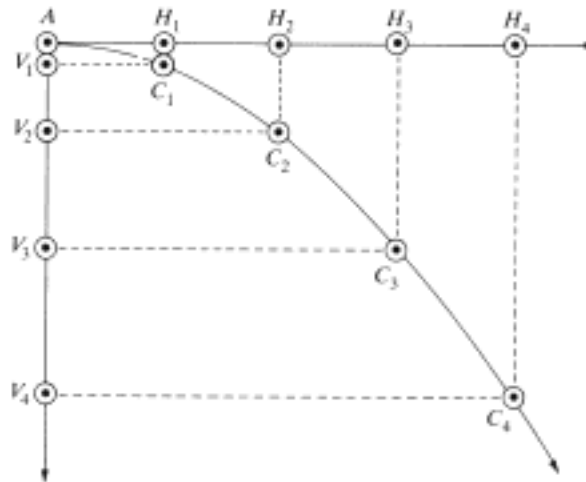


Fig. 10: Flugbahn eines Balls nach Galilei (aus Hoffmann)

Die Erkenntnisse über die Energieerhaltung und über Geschwindigkeiten erlaubten Galilei eine Theorie der Geschosßbahnen zu entwickeln. Diese Theorie war im Widerspruch zu dem, was Aristoteles, die Referenz des Altertums, publiziert hatte. Sie ist genauso im Widerspruch zu den Ansichten von Kindern, z.B. über geworfene Bälle. Aristoteles (wie auch Kinder) meinte, daß ein geworfener Ball geradeaus fliegt, stoppt und herunterfällt. Wenn Sie kleinen Kindern sagen, sie sollten den Ball weiter werfen, dann werden sie sich mehr anstrengen. Sie realisieren nicht, daß sie den Ball einfach ein bißchen mehr nach oben werfen müßten, um eine größere Weite zu erzielen. Galilei erkannte daß die Geschwindigkeit beibehalten bleibt, wenn keine Kraft auf einen Körper wirkt. Die horizontale Geschwindigkeit bleibt deshalb konstant, die Vertikalgeschwindigkeit wird beschleunigt durch die Anziehungskraft der Erde (Fig. 10). Das Resultat ist die in der Abbildung gezeigte Fallparabel.

3.3 Newton und das „klassische physikalische“ Weltbild

Isaac Newton führte die Überlegungen von Galileo Galilei weiter. Er berücksichtigte, daß die Erde rund ist. Wenn die Anfangsgeschwindigkeit immer größer und größer wird, fliegt ein Ball eine längere Strecke. Die Erde wird allmählich dem Ball zurückzuweichen und die Flugstrecke wird mehr, als der Zunahme der Anfangsgeschwindigkeit entspräche, länger werden. Schliesslich gerät der Ball in eine Umlaufbahn. Er wird die Erdoberfläche nie mehr berühren. Die parabelförmige Bahn, die Galilei berechnet hatte, ist zu einer Kreisbahn geworden⁷ (Fig. 11). Newton hat also entdeckt, daß eine Kreisbewegung eine beschleunigte Bewegung ist und

⁶ Eine Zeitspiegelung liegt zum Beispiel vor, wenn ein Film rückwärts vorgeführt wird.

⁷ Ähnliches sieht man beim Skispringen. Die Weiten von 200 m der Skispringer sind nur möglich, weil die Landefläche wie eine Fallparabel unter ihnen weicht, so daß die Relativgeschwindigkeit zum Boden klein und die Höhe der Springer über dem Boden nie mehr als 2-3m beträgt.

daß die Anziehungskraft (Gravitation) der Erde die Ursache ist. Newton hat sein Gravitationsgesetz gefunden, indem er die Ergebnisse der Forschung von Johannes Kepler mitverwendet hat.

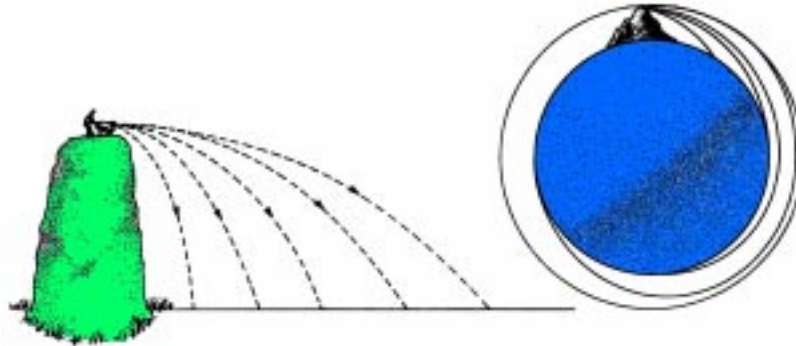


Fig. 11: Erklärung der Satellitenbahnen nach Newton (aus Hoffmann)

Kepler, in Leonberg geboren, wurde um 1600 Assistent bei Tycho Brahe in Prag, dem besten Beobachter aller Astronomen seiner Zeit. Brahe, der höchst präzise Messungen durchführen konnte, hat seine Daten aber keinem andern zur Verfügung gestellt. Kepler blieb deshalb bis zum Tode Brahe's als Assistent in Prag, um später mit diesen Daten arbeiten zu können. Er hat versucht, damit die Bahnen der Planeten zu berechnen (Fig. 12). Unter Berücksichtigung der Messgenauigkeit zeigten die Daten von Tycho Brahe, dass die Planetenbahnen nicht Kreise sein können. In einem kühnen Wurf hat Kepler behauptet, dass Planetenbahnen Ellipsen seien. Die Abweichung der Planetenbahnellipse von der Kreisform beträgt etwa 0,4 %, d.h. 4 mm auf 1 m. Von Auge ist diese Abweichung nicht sichtbar. Die meisten Forscher zu Keplers Zeit hätten diese geringe Abweichung auf Messfehler zurückgeführt und als unwichtig verworfen. Nicht so Kepler! Er war einer der ersten Naturwissenschaftler, der Messungen mehr getraut hat als seinen Intuitionen.

Kepler entdeckte auch, dass die Verbindungsstrahlen von der Sonne zu den Planeten in gleichen Zeiten gleiche Flächen überstreichen. Dies bedeutet, dass Satelliten sich in der Nähe des Zentralgestirns schneller bewegen als in größerer Entfernung. Die dritte Entdeckung Keplers war, dass sich die Quadrate der Umlaufzeiten wie die dritten Potenzen der Radien verhalten. Dieses Gesetz hat Newton ermöglicht, sein Gravitationsgesetz zu begründen.

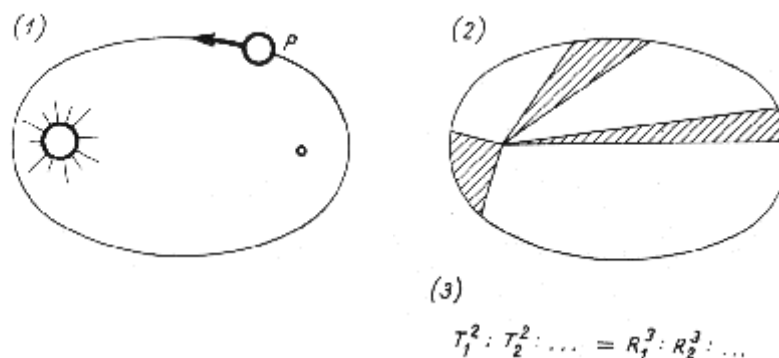


Fig. 12: Theorie der Planetenbahnen nach Kepler (aus Simonyi)

Aus andern Untersuchungen entdeckte Newton, dass die Beschleunigung, der ein Körper auf einer Kreisbahn unterworfen ist, proportional zu v^2/R ist, wobei v ist hier die Bahngeschwindigkeit und R der Radius der Bahn ist. Die Bahngeschwindigkeit v selber ist proportional zum Radius der Bahn dividiert durch die Umlaufzeit. Da die Beschleunigung und die Kraft pro-

portional sind, kann man einsetzen und erhält, dass die Anziehungskraft $\approx R/T^2$ ist. Bis hier hin ist die Argumentation allgemeingültig, unabhängig von irgendwelchen Gravitationsgesetzen. Keplers Gesetz eingesetzt, in die Beziehung von Newton, bedeutet, dass die Kraft mit der ein Körper zum Zentrum hin beschleunigt wird, proportional zu $1/R^2$ sein muss. Dies führt auf das auch heute noch gültige Gravitationsgesetz von Newton.

Um seine Beobachtungen interpretieren zu können, musste Newton einige Postulate einführen. Es war für ihn, zum Beispiel, undenkbar, dass es nicht irgendwo, durch Gott geschaffen, einen absoluten Raum gebe. Newton postulierte deshalb: „Der absolute Raum bleibt vermöge seiner Natur und ohne Beziehung auf einen äußeren Gegenstand stets gleich und unbeweglich“. Analog dazu war Newton Postulat für die Zeit: „Die absolute wahre und mathematische Zeit verfließt an sich und vermöge ihrer Natur gleichförmig und ohne Beziehung auf irgendeinen äußeren Gegenstand. Sie wird so auch mit dem Namen Dauer belegt.“

Mit Hilfe dieser beiden Postulate und den Erkenntnissen Galileis und Keplers, war es ihm möglich die Gesetze der Mechanik zu formulieren. Eine erste Konsequenz der Existenz eines absoluten Raums und einer absoluten Zeit ist das Trägheitsgesetz. Ein Körper auf den keine äußeren Kräfte wirken verharrt in absoluter Ruhe oder gleichförmiger Bewegung. Trägheit ist nach Newton der Widerstand gegen Beschleunigung: je grösser die träge Masse eines Körpers ist, desto mehr Widerstand setzt sie einer Veränderung der Geschwindigkeit entgegen, d.h. eine desto größere Kraft braucht es um die gleiche Beschleunigung zu erhalten.

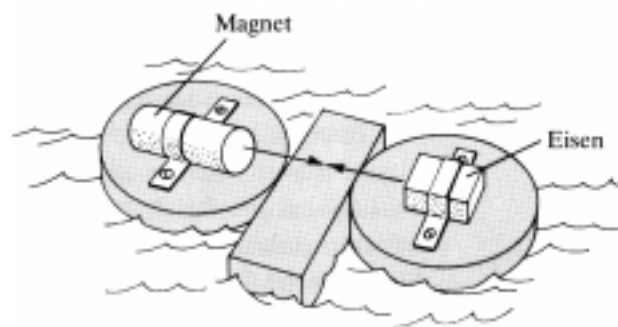


Fig. 13: Kraft und Gegenkraft: Überlegung Newtons (aus Hoffmann)

Wenn zwei Körper aufeinander Kräfte ausüben, tritt ein Problem auf. Was geschieht, wenn ein Körper auf einen zweiten eine Kraft ausübt, aber der zweite auf den ersten keine oder eine andere? Newton hat zu dieser Frage ein kleines Experiment durchgeführt (Fig. 13). Zwei Schwimmer auf der Wasseroberfläche, der eine mit einem Magneten, der andere mit Eisen versehen wurden mit einem Distanzhalter getrennt. Newton überlegte, dass, wenn der Magnet mehr Kraft auf das Eisen ausübte als das Eisen auf den Magneten, oder umgekehrt, sich anhand des vorher diskutierten Gesetzes⁸ sich das ganze System beschleunigen müsste. Er fand in seinem kleinen Experiment jedoch keine Beschleunigung und schloss deshalb, dass Kräfte und Gegenkräfte sich immer aufheben müssten, wobei als Gegenkraft durchaus eine Trägheitskraft, also ein Widerstand gegen eine Beschleunigung, denkbar wäre.

Newtons Kraftgesetze und sein Gravitationsgesetz haben uns nun zwei verschiedene Massen beschert, die träge Masse, die einer Beschleunigung entgegenwirkt und die schwere Masse, die von der Erde oder einer anderen Masse angezogen wird (Fig. 14). Newton postulierte, dass diese träge Masse gleich der schweren Masse sei. Unsere Erfahrung stimmt mit diesem Po-

⁸ Kraft gleich Masse mal Beschleunigung.

stulat überein. Die Gleichheit von träger und schwerer Masse ist nicht a priori gegeben. Erst Einstein konnte dieses Problem lösen.

Newton hatte mit seiner Theorie zwar einige Fragen geklärt, jedoch der Nachwelt auch ein neues Problem hinterlassen, da er einen absoluten Raum und eine absolute Zeit postulierte. Seine Überlegungen zur Mechanik münden in das Newton'sche Relativitätsprinzip, das besagt: „Körper, welche in einem gegebenen Raum eingeschlossen sind, haben dieselbe Bewegung unter sich; dieser Raum mag ruhen oder sich gleichförmig gradlinig, nicht aber im Kreise bewegen“. Als Konsequenz musste Newton konstatieren, dass seine Gesetze keinen Unterschied zwischen einem absoluten Raum und einem dazu gleichförmig bewegten Raum zeigen⁹. Newtons ursprüngliche Annahme eines absoluten Raumes führte ihn zum Schluss, dass es einen absoluten Raum gar nicht geben kann. Dieser Schluss war für Newton sehr beunruhigend. Er hat postuliert deshalb, dass im Zentrum des Sonnensystems ein Punkt sein müsse, der in absoluter Ruhe sei. Dieser Punkt sei ein Ausdruck des absoluten Raumes.

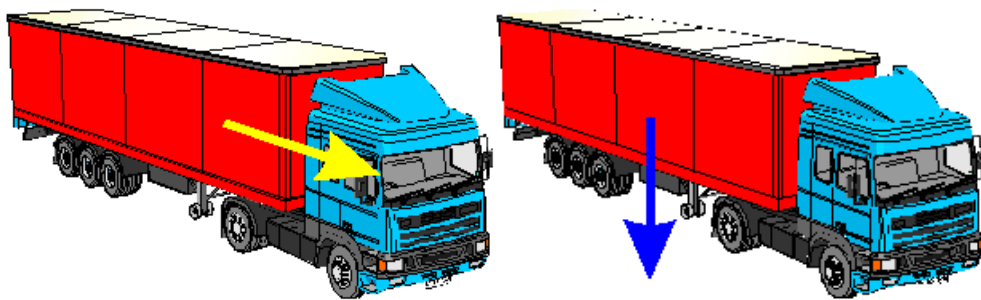


Fig. 14: Träge Masse (links) widersetzt sich der Beschleunigung, schwere Masse (rechts) wird gemeinhin mit Gewicht assoziiert.

Eine weitere Konsequenz des Newton'schen Relativitätsprinzips ist nicht so offensichtlich. Die Gesetze der Mechanik müssen in jedem äquivalenten Bezugssystem die gleiche Form haben, d.h. in jedem gleichförmig gegen ein anderes bewegten Bezugssystem müssen die Gleichungen gleich formuliert sein. Untersuchungen, ob die Form physikalischer Gesetze bei einer bestimmten Transformation erhalten seien, waren wichtige Meilensteine auf dem Weg zu den heutigen Erkenntnissen über Raum und Zeit.

4 Die Entdeckung der endlichen Lichtgeschwindigkeit

Die Mechanik Newtons, die Ansichten Galileis und Keplers, sie sind alles was wir für die Physik des täglichen Leben benötigen, wenn wir von der Elektrizität absehen. Es gibt keinen Grund für unser tägliches Leben kompliziertere Gesetze als die Newton'schen zu verwenden. Nichtsdestotrotz weiß man heute, dass die Newton'sche Welt nicht die wirkliche Welt ist. Die Gesetze Newtons können wir in unserem täglichen Leben erfahren. Wir können die physikalischen Tatsachen, die zur speziellen und allgemeinen Relativitätstheorie führten, nicht so einfach begreifen. Die heutigen Begriff von Raum und Zeit sind durch das Nachdenken über das Problem der Lichtgeschwindigkeit (Fig. 15) entstanden.

⁹ Sie können diese Erfahrung selber machen: wenn Sie in einem Flugzeug nach hinten gehen, sofern keine Turbulenzen da sind, werden Sie keinen Unterschied entdecken, ob das Flugzeug auf dem Boden steht oder ob es mit 800 km pro Stunde durch die Welt düst.

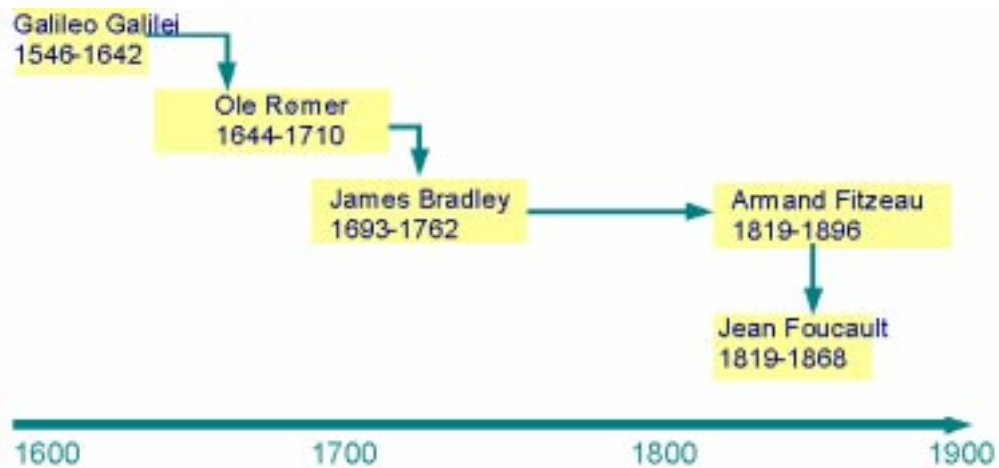


Fig. 15: Die Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit: zeitliche Abfolge und Akteure

4.1 Galileo Galilei

Schon Galilei Galileo hatte sich gefragt, wie schnell sich Licht ausbreitet. Zu seiner Zeit waren die Messmethoden und die Messgeräte natürlich äußerst primitiv (Fig. 16). Er stellte zwei Menschen auf zwei entfernten Hügeln auf. Er ließ den ersten eine Lampe aufdecken. Der zweite musste, sobald er das Licht des ersten gesehen hatte, seine Lampe aufdecken. Galilei bestimmte die Zeit, wann er, vom ersten Lichtblitz her gemessen, den zweiten Lichtblitz sah. Galilei hat, natürlich, die Reaktionszeit der Menschen mitberücksichtigt. Er kam so zum Schluss, dass Licht sich unendlich schnell ausbreitet.

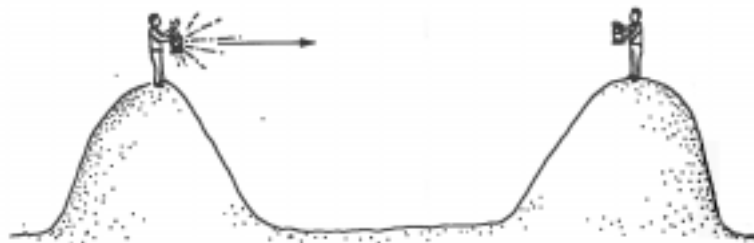


Fig. 16: Galileis Experiment zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit (aus Hoffmann)

4.2 Ole Rømer: Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit aus den Umlaufzeiten der Jupitermonde

Ein Anstoß, weiter über Licht nachzudenken, kam aus der Astronomie. Ole Rømer beobachtete, dass die Monde des Jupiter, die übrigens von Galilei entdeckt wurden, nicht immer zur vorausberechneten¹⁰ Zeit im Jupiterschatten verschwanden (Fig. 17 oben). Rømer stellte nun fest, dass, je nachdem wo sich die Erde auf ihrer Umlaufbahn um die Sonne befand, die Monde um bis zu 22 Minuten zu früh oder zu spät in den Jupiterschatten eintraten. Er erklärte diese Diskrepanz damit, dass Licht sich nicht unendlich schnell ausbreitete, sondern dass es eine bestimmte Geschwindigkeit hätte. Dann wäre ist der maximale Zeitunterschied zwischen dem

¹⁰ Man kann anhand der Umlaufzeit der Monde und anhand der Bahnelemente des Jupiters ausrechnen, wann die Jupitermonde in den Schatten des Jupiters eintreten.



Fig. 18: Aberration des Lichtes. Oben ein analoges Beispiel mit fallendem Regen. Unten die dazu äquivalente Zeichnung mit Licht (aus Hoffmann).

Der Engländer Bradley hat 1728 gefolgert, dass der Grund für diese scheinbare Bewegung die endliche Lichtgeschwindigkeit sei. Man kann dies einfach verstehen. Wenn Regen direkt von oben kommt, dann muss man den Schirm senkrecht halten (Fig. 18 oben). Läuft man, scheint der Regen von vorne zu kommen, obwohl, sobald man anhält, er wieder senkrecht von oben fällt. Bradley's Analogieschluss, dass die Geschwindigkeit der Erde auf der Umlaufbahn genau denselben Effekt bedingt, erklärt die Aberration des Sternlichts. Licht kommt nicht immer aus der gleichen Richtung, weil sich die Erde eben bewegt (Fig. 18 unten). Aus der Grösse der Aberration hat Bradley die Lichtgeschwindigkeit zu 303 000 km/s bestimmt.

s ist doch erstaunlich: dadurch dass Bradley einen Winkel gemessen hat, konnte er daraus den Wert der Lichtgeschwindigkeit sehr viel genauer als Rømer bestimmen. Zur Zeit Rømers und Bradley's waren Winkelmessungen sehr viel genauer als Zeitmessungen, ganz im Gegensatz zur heutigen Zeit.

4.4 Erste terrestrische Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit

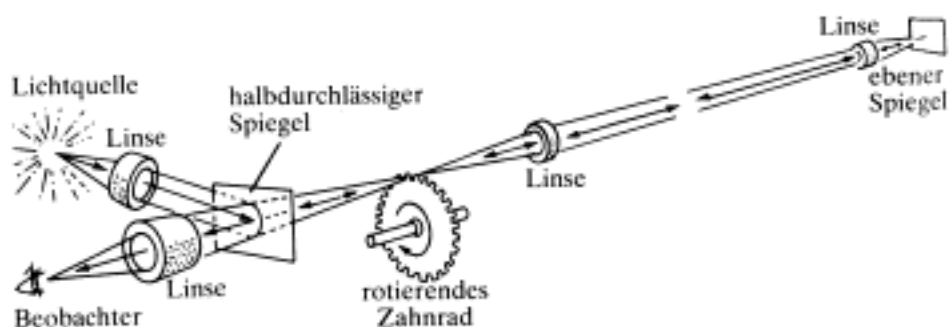


Fig. 19: Erste Messung der Lichtgeschwindigkeit durch Fizeau 1849 (aus Hoffmann).

1849 gelang es Fizeau und später Foucault, die Geschwindigkeit des Lichtes auf der Erde zu messen. Ihre Apparatur beruhte auf dem im folgenden angegebenen Prinzip (Fig. 19): Wenn Licht eine endliche Geschwindigkeit hat, - nach den Messungen von Bradley und Rømer war daran nicht zu zweifeln -, dann braucht es eine gewisse Zeit um eine Strecke zurückzulegen. Wenn jetzt Licht abwechselnd von den Zähnen eines Zahnrads abgedeckt und durchgelassen wird, dann gibt es eine Geschwindigkeit, bei der ein Lichtpaket durchgelassen wird, zu einem fernen Spiegel geht und genau dann zurückkommt, wenn der nächste Zahn den Lichtweg blockiert: der Beobachter sieht nichts. Wenn die Geschwindigkeit verdoppelt wird, kehrt das Licht genau dann zurück, wenn die nächste Zahnücke den Lichtweg freigibt. Aus diesen Messungen konnte die Lichtgeschwindigkeit ziemlich genau bestimmt werden.

5 Von der Wellentheorie des Lichtes zur speziellen Relativitätstheorie

Der heute gültige Wert der Lichtgeschwindigkeit beträgt $299\,792\text{ km/s}^{14}$. Nachdem anerkannt war, dass Licht eine endliche Ausbreitungsgeschwindigkeit hatte, mußte die Frage nach seiner Natur geklärt werden. Die Antwort war für die Formulierung der speziellen Relativitätstheorie wichtig.

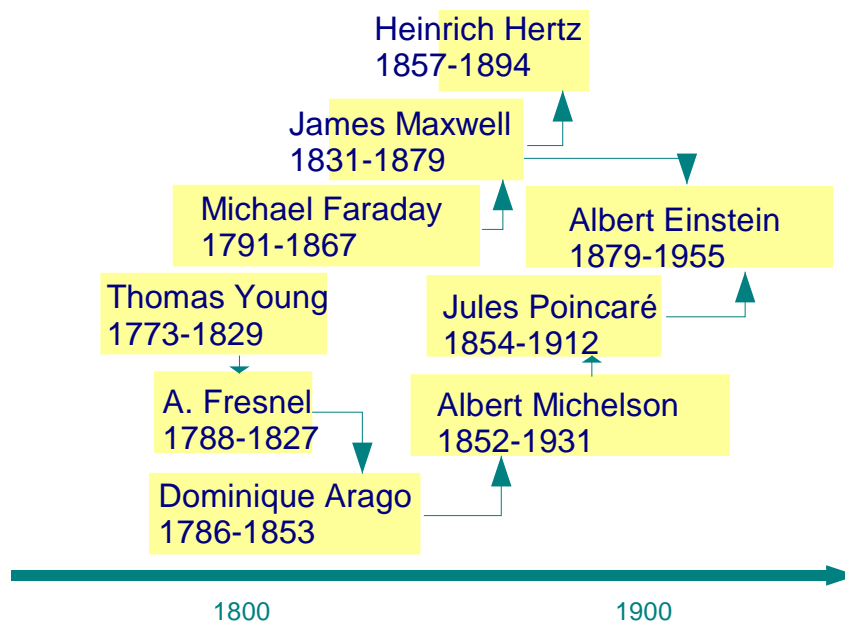


Fig. 20: Von der Wellentheorie zur speziellen Relativitätstheorie. Zeitlicher Ablauf und Akteure.

Was ist nun Licht? Newton behauptete, dass Licht aus Teilchen bestünde. Mit dieser Annahme konnte er die Brechung von Lichtstrahlen beim Übergang von Luft in Wasser oder Glas erklären. Die Ablenkung zum Lot sei dabei eine Folge der Anziehung der Lichtkorpuskel durch das Glas oder das Wasser. Die Korpuskel würden beschleunigt und seien so im Innern des Glases oder des Wassers schneller. Doch gibt es einen experimentellen Beweis für eine höhere Lichtgeschwindigkeit in Materie?

¹⁴ Dieser Wert ist eine Definitionsgröße unseres Messsystems (SI, Système Internationale) und dient als Grundlage der Längenmessung, da Zeiten heute um mehrere Größenordnungen genauer messbar sind als Längen.

5.1 Interferenzerscheinungen

Der Ausgangspunkt zur Lösung der Frage nach der Lichtgeschwindigkeit in Materie war die Entdeckung Youngs (1773-1829), dass Licht Interferenzen bildet. Interferenzen nennt man die konstruktive oder destruktive Überlagerung von Wellen. Sie können Interferenzen sehr einfach auf Wasseroberflächen beobachten. Bei einem Hafen mit zwei Einfahrten (Fig. 21) bilden sich hinter jeder Einfahrt Kreiswellen aus. Es gibt Orte, an denen Wellen stets in Phase sind¹⁵. Dort addieren sich die Amplituden der Wellen. Daneben gibt es auch Orte, wo die Amplituden der beiden Wellenzüge sich immer zu null addieren, also auslöschen. Es gibt also Bereiche, an denen die Wellenhöhe doppelt so hoch ist wie vor der Kaimauer, und es gibt Orte, an denen die Wasseroberfläche im Hafen absolut ruhig ist. Die Physik von Wellen und damit auch von Licht wurde von Fresnel 1815 mathematisch beschrieben.

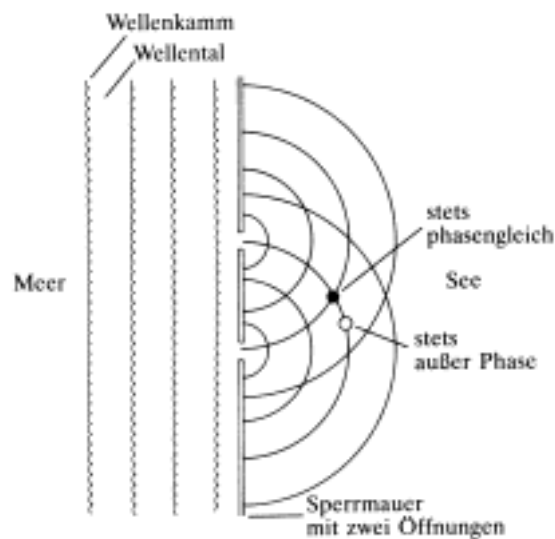


Fig. 21: Interferenzen im Wasser hinter einer Hafenspermmauer mit zwei Öffnungen (aus Hoffmann)

5.2 Longitudinale und transversale Wellen

Es gibt zwei Arten von Wellen. Die erste, die transversalen Wellen, erhält man, indem z.B. eine Auswölbung über ein Seil laufen lässt (Fig. 22). Diese Wellen heißen transversal, weil die Auslenkung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung ist.

Die zweite Art, die longitudinalen Wellen, entstehen z.B. wenn eine Windböe über ein Weizenfeld weht (Fig. 23). Schallwellen sind ein klassisches Beispiel für longitudinale Wellen.

¹⁵ In Phase sein heisst, dass beide Wellenzüge am gleichen Ort stets zur gleichen Zeit maximal oder minimal sind.

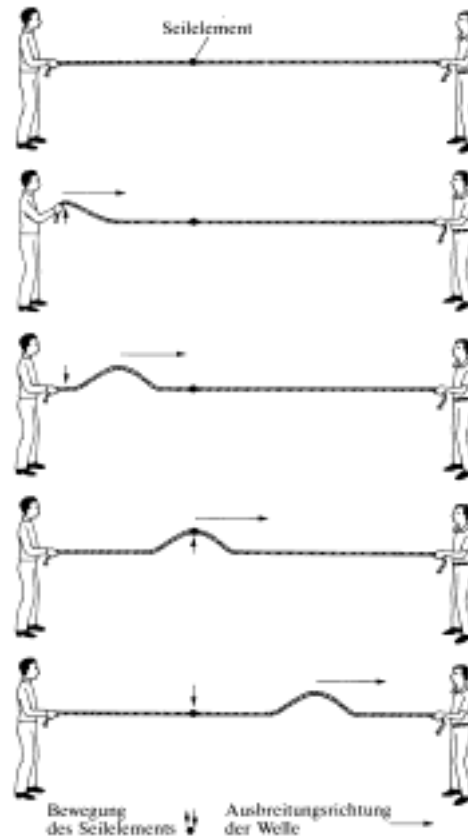


Fig. 22: Transversalwellen am Beispiel der Seilwelle (aus Hoffmann)

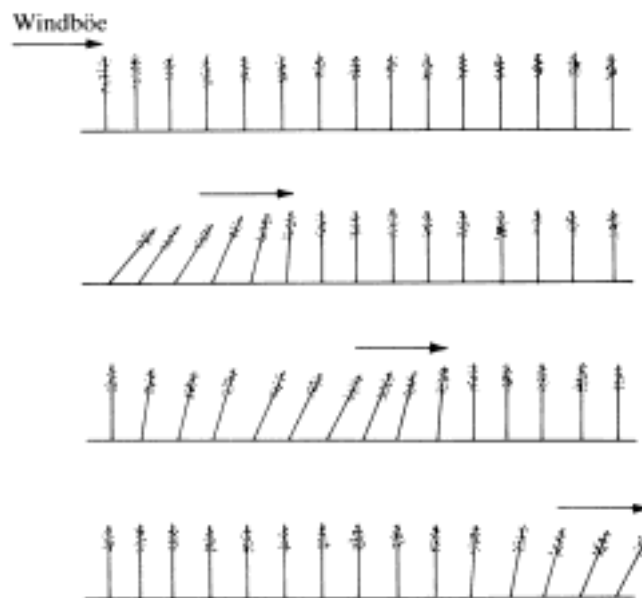


Fig. 23: Longitudinale Wellen am Beispiel einer Windböe in einem Weizenfeld (aus Hoffmann)

5.3 Fresnels Theorie des Lichtes

Fresnel beschrieb das Licht als transversale Welle. Seine Gleichungen erklären die Interferenzmuster, die an Kanten oder Spalten entstehen. Fresnel sagte voraus, daß hinter einer kreis-

runden Scheibe ein heller Fleck in der Mitte des Schattens entstehen müßte (Fig. 24). Dieser helle Fleck ist nicht erklärbar mit einem Korpuskelmodell, wie es Newton vertrat.

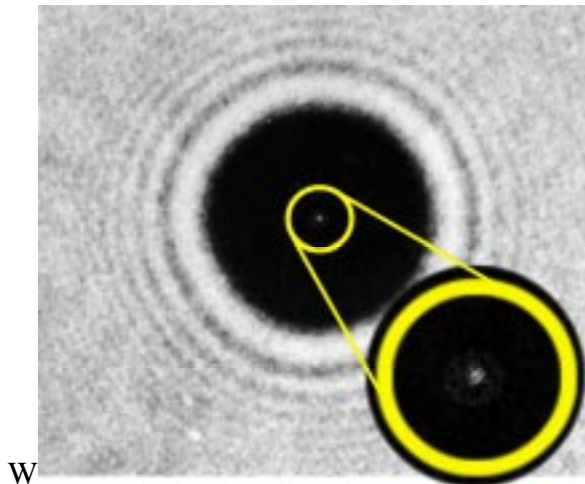


Fig. 24: Heller Fleck im Schatten einer kreisrunden Scheibe. (aus Hoffmann)

eiter fand Fresnel, daß Licht sich in einem Medium langsamer ausbreiten müßte. Die Brechung des Lichtes sei (Fig. 25) auf die geringere Ausbreitungsgeschwindigkeit im Medium zurückzuführen. Die Wellenfronten würden sich langsamer ausbreiten, deshalb müßte der Lichtstrahl zum Lot gebrochen werden.

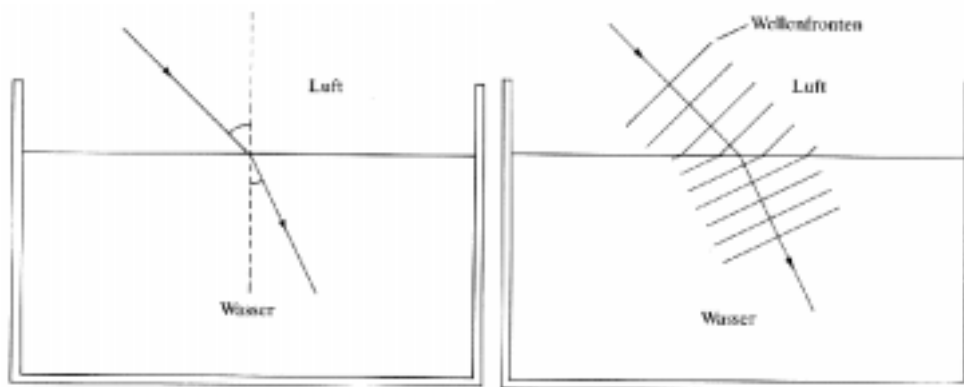


Fig. 25: Brechung des Lichtes (aus Hoffmann)

5.4 Der Lichtäther

In der Fresnel'schen Theorie gab es eine offene Frage. Es war als allgemeingültig angesehen worden, daß Wellen ein Medium benötigen. Das Medium der Seilwelle ist das Seil, dasjenige einer Welle in einem Getreidefeld das Getreide. Was ist aber das Medium des Lichtes? Fresnel postulierte als Medium einen Äther. Die Experimente von Bradley hatten gezeigt, daß der Äther absolut ruhend sein müßte (Fig. 18). Der Äther müßte deshalb den absoluten Raum Newtons repräsentieren. Deshalb müßte der Äther widerstandslos durch die Erde und durch Körper hindurchgehen. Die geringere Lichtgeschwindigkeit im Wasser, die Fizeau gemessen hatte (Fig. 26), wurde so erklärt, daß dort die Ätherdichte unterschiedlich sei. Fizeau hat in einem weiteren Experiment die Lichtgeschwindigkeit in strömendem Wasser gemessen. Er fand, daß die Lichtgeschwindigkeit von der Fließgeschwindigkeit des Wassers abhängig war. Dieser experimentelle Befund kann nur verstanden werden, wenn man annimmt, daß Äther von der Materie mitgeführt wird.

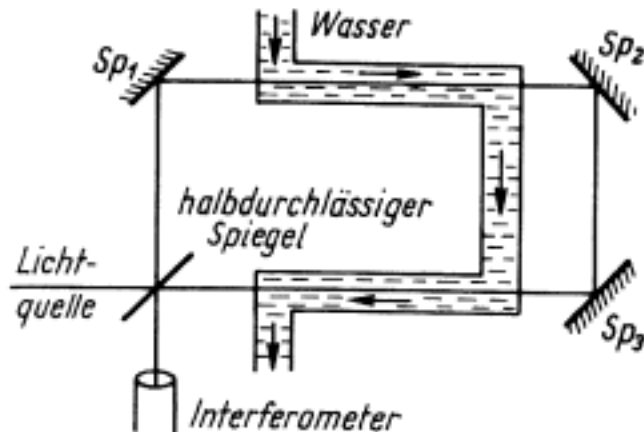


Fig. 26: Messung der Lichtgeschwindigkeit im Wasser nach Fizeau (nach Simonyi)

Es gibt also zwei Aussagen über den Äther:

- Der Äther müsste widerstandslos durch die Erde hindurchgehen (Bradley).
- Der Äther sollte von Materie mitgeführt werden (Fizeau).

Arago hat 1818 versucht, die Äthergeschwindigkeit zu messen. Seine Überlegung war die folgende: Wenn ein Ätherwind existierte und wenn der Beobachter sich bewegte, gäbe es eine Geschwindigkeit, bei der das Licht (analog zum Regen in Fig. 27) scheinbar senkrecht von oben käme. Der Brechungsindex eines Materials oder Mediums ist der Quotient aus der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum und der Lichtgeschwindigkeit im Material. Die Brechung (Ablenkung) eines Lichtstrahls beim Übergang vom Vakuum in ein Material (Glas) hängt vom Brechungsindex des Glases ab, der also aus der Ablenkung eines Lichtstrahls bestimmt werden kann. Dann ist das Verhältnis der Lichtgeschwindigkeiten im Vakuum und im Glas¹⁶ gleich dem Brechungsindex. Der Äther müßte, je nachdem ob der Beobachter sich mit oder gegen ihn bewegt, eine unterschiedliche Ablenkung (Brechung) des Lichtes bewirken.

Arago konnte mit seinem Experiment keinen Einfluss der Bewegungsrichtung finden. Er mußte deshalb annehmen, daß der Äther von der Erde mitgeführt wird. Bradley's Beobachtung der Aberration bedeuteten aber, daß Äther widerstandsfrei durch die Erde gehen müßte. Fizeaus Messungen zeigten, daß Äther von strömendem Wasser mitgeführt wird. Die experimentellen Tatsachen widersprachen sich. Der logische Schluss war, dass die Widersprüche in der Theorie der Lichtbewegung lägen. Zur Lösung dieser Widersprüche mußte jedoch zuerst die physikalische korrekte Beschreibung von elektromagnetischen Wellen gefunden werden¹⁷.

¹⁶ Nehmen wir einmal an, daß im Vakuum Licht die Geschwindigkeit 3 hätte und im Glas die Geschwindigkeit 2. Wenn ich jetzt einen bewegten Äther habe, dann habe ich in die eine Bewegungsrichtung im Vakuum die Geschwindigkeit 3+1, also 4 und im Glas 2+1 also einen Brechungsindex von 4/3. In die andere Richtung erhalte ich dann 3-1 und 2-1 also einen Brechungsindex von 2.

¹⁷ Fizeau, Arago und Fresnel haben ihre Experimente und Erkenntnisse erarbeitet ohne etwas von elektromagnetischen Wellen zu wissen.



Fig. 27: Ätherwind, erklärt mit Regen und Wind (nach Hoffmann)

5.5 Faraday entdeckt die magnetische Induktion

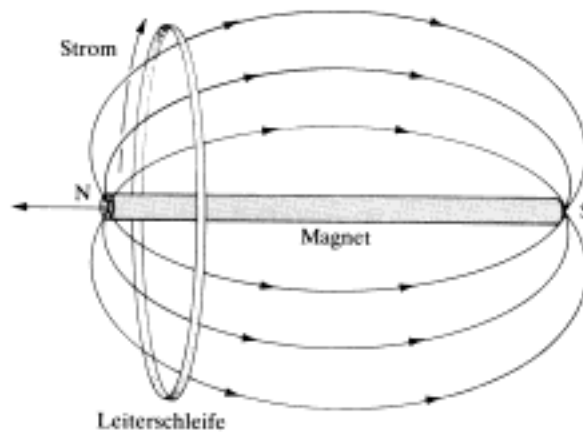


Fig. 28: Entdeckung der magnetischen Induktion durch Faraday (aus Hoffmann)

Die wahre Natur des Lichtes wurde nicht durch Experimente in der Optik entschlüsselt. Die Entdeckung, dass Licht eine elektromagnetische Welle ist, beruhte auf der Untersuchung der Folgerungen aus der Theorie der Elektrizität und des Magnetismus. Eine der führenden Forscherpersönlichkeiten war Michael Faraday, der 1831 entdeckt hatte, daß mit Magnetfeldern Strom erzeugt werden kann (Fig. 28). Michael Faraday wurde als Sohn eines Hufschmieds geboren. Er arbeitete im Alter von 13 bis 21 in einer Buchbinderei. Er eignete sich sein Wissen und seine Bildung an, indem er die zu bindenden Bücher las. Er stieg zum Laborassistenten und letztlich zum Direktor der Royal Institution auf, ohne je mathematische Kenntnisse, die über den Dreisatz hinaus gingen, zu haben. Faraday begriff die Physik in Bildern. Seine Bilder wurden oftmals belächelt, helfen aber auch heute noch die essentielle Physik der Elektrizitätslehre zu begreifen. Seine Forschung, das kann man ohne Übertreibung sagen, war eine

der wesentlichen Grundlagen der Theorien des Elektromagnetismus. Die Entdeckung, dass die Gesetze, die Faraday und andere über Ströme, Ladungen und deren Wechselwirkungen fanden, in sich inkonsistent waren, hat letztlich die Entwicklung der speziellen Relativitätstheorie ermöglicht.

5.6 Maxwells Gesetze des Elektromagnetismus

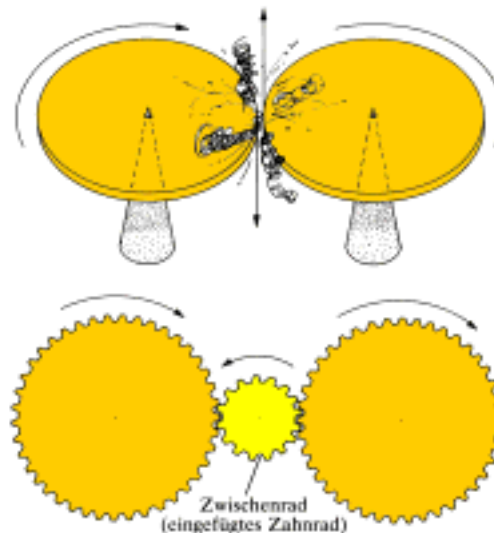


Fig. 29: Äthermodell Maxwells (aus Hoffmann)

James Clark Maxwell, 1831 in Edinburgh geboren, hat ein konsistentes mathematisches Modell des Elektromagnetismus entwickelt. Ausgangspunkt seiner Überlegungen war ein mechanisches Modell des Äthers (Fig. 29). Maxwell postulierte, daß Magnetfelder Wirbel im Äther sein müßten. Diese Wirbel müßten analog zu rotierenden Scheiben sein. Sofort war er mit dem Problem konfrontiert, daß zwei gleichsinnig rotierende Scheiben sich an der Grenzfläche reiben müßten. Um dies zu vermeiden fügte Maxwell in seinem Modell Zwischenzahnräder ein. Mit Hilfe dieses Zahnradmodells des Äthers gelang es ihm, Gleichungen herzuleiten, die den Elektromagnetismus beschreiben. In der endgültigen Form der Gleichungen waren die Zahnräder nicht mehr vorhanden¹⁸.

Die heute Maxwell'schen Gleichungen genannten vier Differentialgleichungen beschreiben alle bekannten elektromagnetischen Phänomene. Um jedoch eine konsistente mathematische Formulierung zu erhalten, mußte Maxwell annehmen, daß es auch in Nichtleitern sogenannte Verschiebungsströme gibt. Maxwell argumentierte, daß die Materie ja aus positiven und negativen Ladungen bestünde und dass diese Ladungen gegeneinander zu verschiebbar seien.

¹⁸ Das Beispiel von Maxwell zeigt, daß man auch mit unkonventionellen und eigentlich unrichtigen Überlegungen auf die richtigen Gleichungen kommen kann.

5.7 Entdeckung der elektromagnetischen Wellen durch Hertz

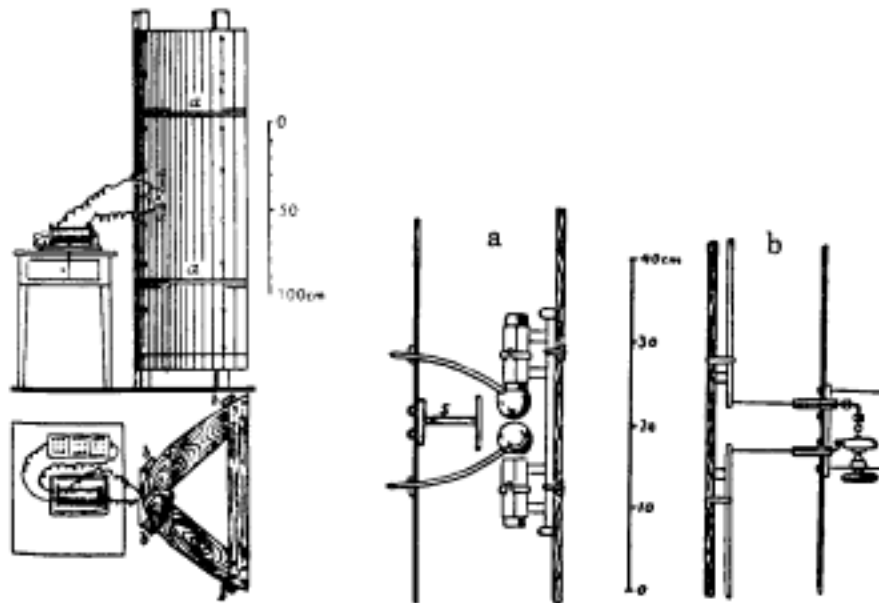


Fig. 30: Hertz's Apparatur, mit der er die elektromagnetischen Wellen entdeckt hat. (aus Simonyi)

Aus den Maxwell'schen Gleichungen konnten alle bekannten Phänomene des Elektromagnetismus hergeleitet werden. Eine Voraussage dieser Gleichungen war die Existenz elektromagnetischer Wellen, also zum Beispiel von Radiowellen. Heinrich Hertz gelang es 1888, diese Radiowellen nachzuweisen (Fig. 30). Hertz, der von 1857 bis 1894 gelebte, war zuerst Assistent bei Helmholtz und später Professor für Physik in Bonn. Er entwickelte die sogenannten Hertz'schen Dipole¹⁹, die den Nachweis der Radiowellen ermöglichten. Mit Hilfe dieser, von Maxwell vorausgesagten elektromagnetischen Wellen, konnte er in der Ferne z.B. eine Klingel betätigen. Hertz's Entdeckungen sind die Grundlage für unsere heutigen Telekommunikationseinrichtungen. Obwohl Hertz mit seinen Versuchen Maxwells Theorie bestätigte, konnte er sich mit ihr nicht anfreunden. Es war Hertz nicht klar, wie er diese Theorie zu interpretieren hätte.

5.8 Die Versuche von Michelson und Morley

Als klar war, daß Licht eine elektromagnetische Welle ist und daß die Fresnel'schen Gesetze aus den Maxwell'schen Gleichungen abgeleitet werden können, hat Michelson 1881 und 1887 versucht, die Ätherbewegung genau zu vermessen. Er baute dazu ein Interferometer (Fig. 31).

Ein Interferometer muß man sich folgendermaßen vorstellen: Ein Lichtpuls wird am Ursprung bei 0 ausgesandt. Er bewegt sich auf beiden Armen bis zum jeweiligen Spiegel und kehrt dann wieder um. Sind beide Interferometerarme gleich lang, dann kehren die beiden Lichtpulse gleichzeitig zum Ursprung zurück. Die konstruktive Interferenz beider Lichtstrahlen bewirkt, dass das Licht besonders hell ist. Macht man einen Arm um eine $\frac{1}{4}$ Wellenlänge länger als den anderen, dann treffen sich die beiden Lichtstrahlen mit entgegengesetzter Phase. Sie löschen sich deshalb aus und der Beobachter sieht kein Licht. Man kann so mit einem Interferometer Längenänderungen extrem genau messen. Michelson, zuerst alleine und später zu-

¹⁹ Hertz'sche Dipole sind als Fernsehantennen auf vielen Dächern zu sehen.

sammen mit Morley, konnte keine Ätherbewegung feststellen²⁰, d.h. der Äther muß von der Erde mitgenommen werden.

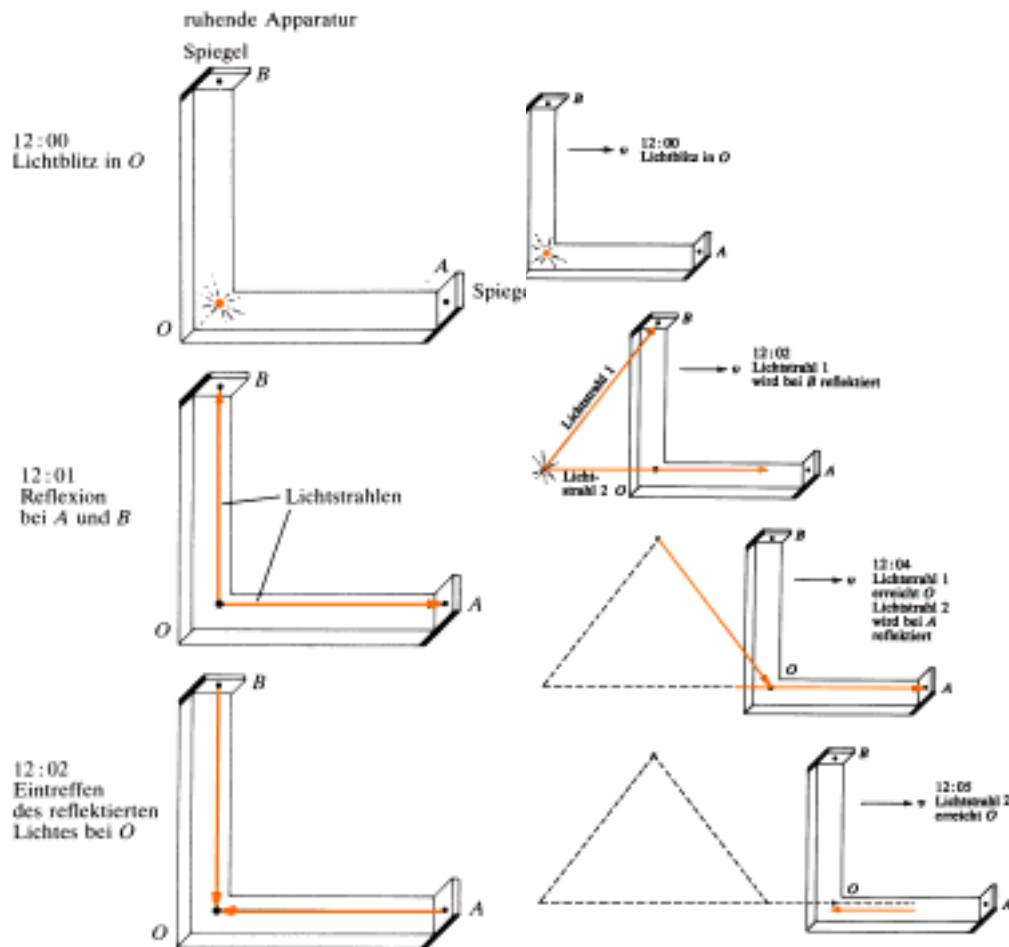


Fig. 31: Die Experimente von Michelson und Morley zur Bestimmung der Äthergeschwindigkeit (nach Hoffmann)

Die Frage nach den Eigenschaften und der Existenz des Äthers war gegen Ende des 19. Jahrhunderts das wichtigste ungelöste physikalische Problem. Es gab verschiedene Experimente und Überlegungen zu den Eigenschaften des Äthers. Stokes, einer der führenden Hydrodynamiker, hat den Äther als inkompressible Flüssigkeit beschrieben. Als solche müßte Sie eine extrem hohe Festigkeit haben, die diejenige vom Diamant sogar noch übersteigt. FitzGerald²¹ und Lorentz erkannten, daß man die Experimente von Michelson auch damit erklären könnte, daß der in Richtung der Bewegung zeigende Arm des Interferometers verkürzt würde. Die Idee einer Längskontraktion wurde von Poincaré aufgegriffen und in ein mathematisches

²⁰ Die Ätherbewegung müßte, analog zur Wirkung des bewegten Wassers, eine Längendifferenz zwischen den Lichtwegen in den beiden Interferometerarmen bewirken.

²¹ FitzGerald, ein Lehrer in Dublin, hat seine Entdeckung an das amerikanische Magazin Science geschickt. Science war zu der Zeit gerade finanziell unpäßig und konnte den Artikel nicht veröffentlichen. FitzGerald dachte, daß er verloren gegangen sei und hat Lorentz, der 3 Jahre später das gleiche gefunden hatte, zu seiner Entdeckung gratuliert. Lorentz auf der anderen Seite erfuhr, daß FitzGerald vorher schon darüber nachgedacht hatte und gab FitzGerald die Priorität. Tatsache war, daß Science ein Jahr später wieder Geld für Publikationen hatte und FitzGerald's Artikel damals publiziert hatte.

System gefaßt, das, bis auf die unvollständige physikalische Interpretation, eigentlich die spezielle Relativitätstheorie beinhaltet.

6 Die spezielle Relativitätstheorie von Raum und Zeit

Diese vielen verschiedenen Ungereimtheiten in Theorien sowie die experimentelle Tatsachen wurden von Albert Einstein 1905 in seinem Artikel über die spezielle Relativitätstheorie zu einem einzigen Bild zusammengefügt. Einsteins Überlegungen haben nicht so sehr auf den Experimenten von Michelson und Morley gestützt. Vielmehr hat Einstein sich Gedanken darüber gemacht, welche Konsequenzen die Newton'sche Relativität für Licht hätte. Wir sahen, daß physikalische Gesetze der Mechanik in Newton'schen Relativität in gegeneinander bewegten Bezugssystemen die gleiche Form haben. Gilt dies auch für Licht? Dies war die Schlüsselfrage, die letztlich zur speziellen Relativitätstheorie führte.

6.1 Koordinatensysteme

Am einfachsten lässt sich die spezielle Relativitätstheorie anhand von geometrischen Darstellungen erklären (Fig. 32). In einer Ebene kann man mit Hilfe von zwei Zahlen die Lage eines Punktes bestimmen. $(1,75;2,25)$ bedeutet nichts anderes als daß Sie in die x -Richtung, das könnte Osten sein, 1,75 m gehen müssen und daß Sie dann 2,25 m nach Norden gehen. Wenn Sie einen Ursprung definiert haben, können Sie so jedem Punkt auf einer Ebene eine Adresse zuordnen. Eine ähnliche Beschreibung der Position gilt auch im Raum. Man braucht jedoch drei Adressen oder drei Koordinaten. Eine weitere Möglichkeit, die wir später benötigen, sind die Weg-Zeit-Diagramme (Fig. 32 rechts). Wenn Sie auf der Horizontalen die Zeit und auf der Vertikalen den Ort auftragen, dann zeigt Ihnen dieses Diagramm wo Sie zu einer bestimmten Zeit sind, also zur Zeit $t=2$, sind Sie am Ort 1, zur Zeit $t=3$ am Ort 2. Übrigens sehen Dienstfahrpläne von Lokomotivführern genau so aus.

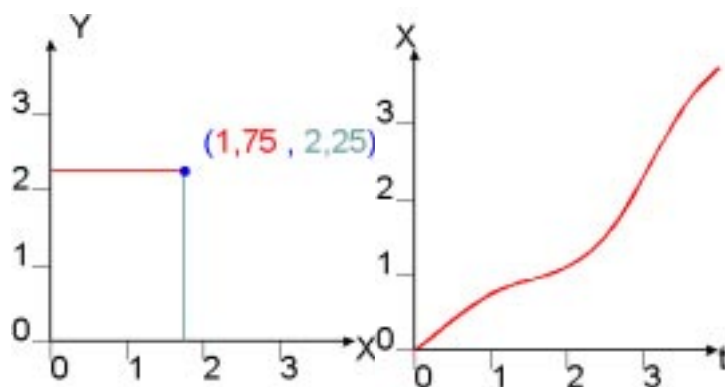


Fig. 32: Koordinatensysteme und Weg-Zeit-Diagramme (rechts)

6.2 Galilei-Transformation

Mit der Koordinatenbeschreibung, wie sie im vorigen Abschnitt vorgestellt wurde, kann die Bedeutung der Galilei-Transformation zwischen zwei äquivalenten Bezugssystemen weiter untersucht werden. Wir betrachten zwei Systeme, eines mit den Achsen x und y und das andere mit den Achsen x' und y' . Das zweite Bezugssystem soll sich mit der Geschwindigkeit v gegenüber dem ersten, ungestrichenen Bezugssystem bewegen (Fig. 33). Zu einer Zeit $t=0$ sollen die y' und die y Achse zusammenfallen. Dann ist die x -Koordinate eines Punktes in beiden Systemen gleich. Zu einer späteren Zeit t hat sich das y' -System um die Distanz vt bewegt. Im ungestrichenen Koordinatensystem hat der Punkt P die Distanz x zum Nullpunkt, im gestrichenen Koordinatensystem jedoch die Distanz x' . Wie man aus der Zeichnung ersehen

kann, ist $x = vt + x'$. Ebenso gilt, dass $x' = x - vt$ ist. Diese Gleichungen, zusammen mit den Angaben, dass $y = y'$, $z = z'$ und $t = t'$ ist, beschreiben den einfachsten Fall der Galilei-Transformation, die für das Newton'sche Relativitätsprinzip benötigt wird.

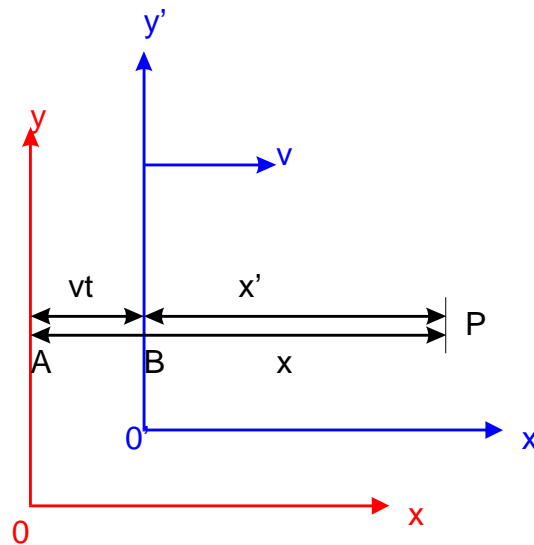


Fig. 33: Galilei-Transformation im Koordinatenbild

Die Forderung, dass in jedem äquivalenten Bezugssystem ein Bewegungsgesetz die gleiche Form haben muss, kann nun überprüft werden. Zur Erläuterung nehmen wir bewusst ein unphysikalisches Bewegungsgesetz an, nämlich $x=y$. Eingesetzt in die Galilei-Transformation erhalten wir $x' + vt = y'$; d.h. im gestrichenen Koordinatensystem hat die Form des Bewegungsgesetzes geändert. Dies widerspricht der Newton'schen Relativität. Wir können noch weiter gehen und z.B. zur Zeit $t = t' = 1$ die Werte $x = 4$ und $y' = 10$ einsetzen. Wir haben dann die Möglichkeit, eine absolute Geschwindigkeit zu bestimmen. Wenn wir jedoch eine absolute Geschwindigkeit bestimmen können, dann existiert ein absolut ruhendes Koordinatensystem. Nun hat aber Newton gezeigt, dass jedes Koordinatensystem, das sich gleichförmig gegenüber einem anderen bewegt, äquivalent ist. Das heisst, es darf gar nicht möglich sein ein absolut ruhendes Koordinatensystem bestimmen zu können.

6.3 Lorentz-Transformation

Einstein überlegte sich, dass die Maxwell'schen Gesetze unter der Galilei-Transformation nicht invariant sind. Ein Beispiel für Einsteins Gedanken ist das folgende Experiment: Faraday hatte eine Leiterschleife über einen Magneten bewegt (Fig. 28). Das Magnetfeld induziert im Leiter einen Strom. Es ist aber genauso erlaubt, das Experiment folgendermaßen zu beschreiben: Die Leiterschleife ist in Ruhe, der Magnet bewegt sich. Ein bewegter Magnet erzeugt ein elektrisches Feld, und dieses elektrische Feld ist die Ursache für den Strom im Leiter. Nun sollten aber nach Einstein auch die elektromagnetischen Gesetze in beiden Bezugssystemen die gleiche Form haben. Ein elektrisches Feld kann jedoch nicht plötzlich verschwinden, das widerspricht dem Grundgesetz der Energieerhaltung. Einstein konnte nun zeigen, dass eine konsistente Beschreibung möglich ist, wenn man nicht die Galilei-Transformation sondern die Lorentz²²-Transformation (Fig. 34) verwendet. Poincaré fand, dass wenn die Län-

²² Lorentz ist derjenige, der die Längenkontraktion eingeführt hatte (zusammen mit FitzGerald). Er beobachtete, dass, wenn er die Zeit nicht als absolute Grösse ansieht, sondern für jedes Bezugssystem eine sogenannte lokale Zeit vx/c^2 einführt, die Maxwellgleichungen invariant unter seiner Transformation werden.

gen mit dem Faktor $1/(1-v^2/c^2)$ multipliziert werden, die Beschreibung in sich konsistent wurde. Er hat so schon 1904 geschlossen, dass die Lichtgeschwindigkeit c aus mathematischen Gründen eine Grenzgeschwindigkeit sein müsse.

$$\begin{aligned} x' &= \beta (x - vt) & t' &= \beta \left(t - \frac{vx}{c^2} \right) \\ y' &= y & \beta &= \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \\ z' &= z \end{aligned}$$

Fig. 34: Die Lorentz-Transformation

Albert Einsteins spezielle Relativitätstheorie beruht auf zwei Prinzipien. Das erste ist das Relativitätsprinzip, das besagt, dass physikalische Gesetze in jedem unbeschleunigten Bezugssystem die gleiche Form haben sollten. Dies ist eine Erweiterung der Newton'schen Relativität, die die gleiche Aussage allein für die Gesetze der Mechanik macht. Das zweite Einstein'sche Postulat war, dass die Geschwindigkeit des Lichtes im Vakuum unabhängig von der Geschwindigkeit der Lichtquelle sein sollte. Diese beiden Prinzipien haben dem grossen, in Ulm geborenen Physiker geholfen, die von Lorentz und Poincaré gefundenen mathematischen Gesetze physikalisch zu interpretieren.

6.4 Gleichzeitigkeit zweier Ereignisse

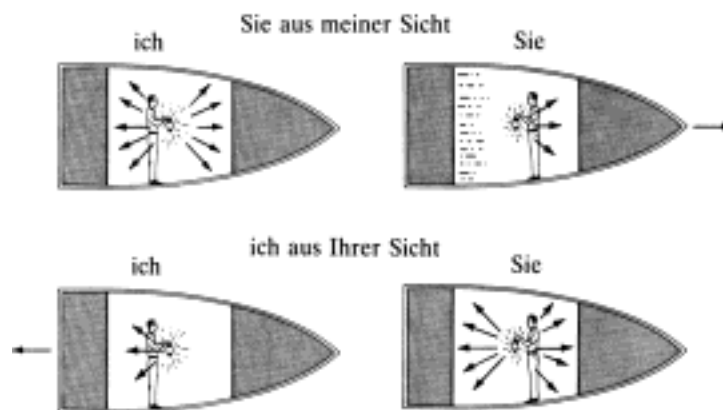


Fig. 35: Gleichzeitigkeit zweier Ereignisse (nach Hoffmann)

Was bedeutet die spezielle Relativitätstheorie? Betrachten wir ein erstes Gedankenexperiment: Sie und ich sollen beide in einem Raumschiff sein (Fig. 35). Sie sollen sich gegen mein Raumschiff mit einer grossen Geschwindigkeit bewegen. Wenn wir am gleichen Ort sind, geben wir beide mit einer Lampe einen Lichtblitz. In meinem Raumschiff, da ich die Lampe in der Mitte des Gefährtes halte, trifft das Licht die Vorder- und die Rückseite gleichzeitig. In ihrem Raumschiff beobachte ich jedoch etwas anderes. Da die Geschwindigkeit des Lichtes unabhängig von der Geschwindigkeit der Lichtquelle ist, bewegt sich das Licht von mir aus gesehen von ihrer Lampe mit gleicher Geschwindigkeit nach vorne und nach hinten. Die hintere Wand rast aber auf den Ort der Lichtemission zu, d.h. das Licht wird die hintere Wand sehr viel eher erreichen als die vordere.

Wir können das ganze Experiment auch umgekehrt betrachten. Sie beschreiben jetzt das Experiment und sagen, dass in Ihrem Raumschiff das Licht bei der vorderen und bei der hinteren

Wand gleichzeitig eintraf und dass mein Lichtblitz in meinem Raumschiff die vordere Wand zuerst erreichte²³. Es scheint also keine konsistente Beschreibung des Experimentes in zwei an sich äquivalenten Bezugssystemen zu geben. Insbesondere ist offensichtlich, dass, was für Sie gleichzeitig ist, nämlich das Licht, das vorne und hinten auftrifft, für mich nicht gleichzeitig erscheint und umgekehrt. Das bedeutet nichts anderes, als dass Newton Postulat einer absoluten Zeit nicht haltbar ist. Wenn es keine absolute Zeit gibt, dann ist nicht mehr offensichtlich, was mit gleichzeitig gemeint ist.

6.5 Synchronisation von Uhren

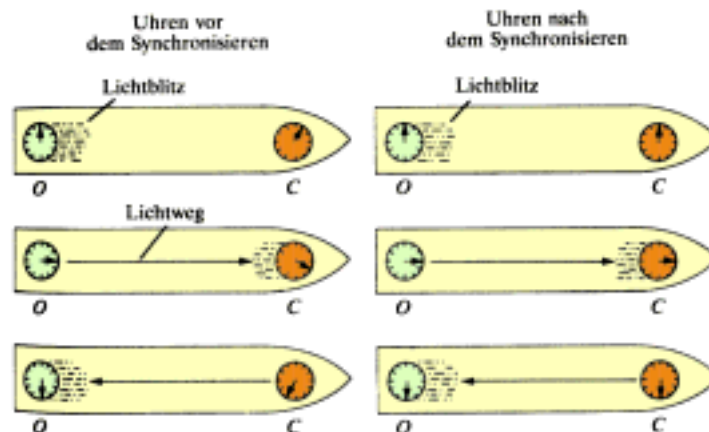


Fig. 36: Synchronisation von Uhren nach Einstein (aus Hoffmann)

Einstein hat ein Verfahren entwickelt, das einem erlaubt, „gleichzeitig“ zu definieren, auch wenn es keine absolute Zeit mehr gibt. Man nennt das Verfahren „Uhren synchronisieren“. Auf der linken Seite des Bildes (Fig. 36) sehen Sie zwei Uhren, die unterschiedlich gehen. Ich schicke jetzt um 12.00 Uhr mittags einen Lichtpuls von der linken Uhr zur rechten. Der Lichtblitz trifft dort um 5 ns nach 12.00 Uhr ein. Gleichzeitig mit dem Eintreffen meines Lichtblitzes sendet die Uhr einen zweiten Lichtblitz zurück, der bei der ersten Uhr um 15 ns nach 12.00 eintrifft. Aus den Zeitdifferenzen berechnet man, dass die Laufzeit einmal 5 ns (hin) und einmal 10 ns (her) betrug. Da beide Uhren im gleichen Bezugssystem in Ruhe sind, müsste die Laufzeit auf dem Hin- und Rückweg gleich sein. Man kann deshalb ausrechnen, dass die zweite Uhr um 2,5 ns falsch geht. Wenn man sie um diesen Wert verstellt, dann hat man die Uhren synchronisiert.

6.6 Weg eines Lichtblitzes in einem bewegten Bezugssystemen: Zeitdilatation

Wenn ich jetzt als Beobachter den Weg des Lichtblitzes in einem bewegten Bezugssystem (Fig. 37 links) von der linken zur rechten Uhr und wieder zurück betrachte, dann würde ich als ruhender Beobachter sagen, dass der Lichtblitz für den Weg nach rechts sehr viel länger braucht als für den Rückweg. Umgekehrt würde man das Experiment beschreiben, wenn sich das Raumschiff nach links bewegt (Fig. 37 rechts). Dies wäre auch ihre Beschreibung, wenn ich in meinem Raumschiff das gleiche Synchronisationsexperiment durchführte. Das heisst: was für mich synchron ist, muss für Sie nicht synchron sein und umgekehrt. Wir nennen Ereignisse, die an einem bestimmten Punkt im Raum zu einer bestimmten Zeit stattfinden, Punktereignisse. Zwei Punktereignisse können in einem Bezugssystem gleichzeitig sein, im

²³ Von Ihnen aus gesehen fliege ich rückwärts.

anderen aber nicht. Das ist entgegen dem Umgangswissen. Diese Eigenschaft von Raum und Zeit ist nur relevant, wenn wir es mit sehr grossen Geschwindigkeiten zu tun haben.

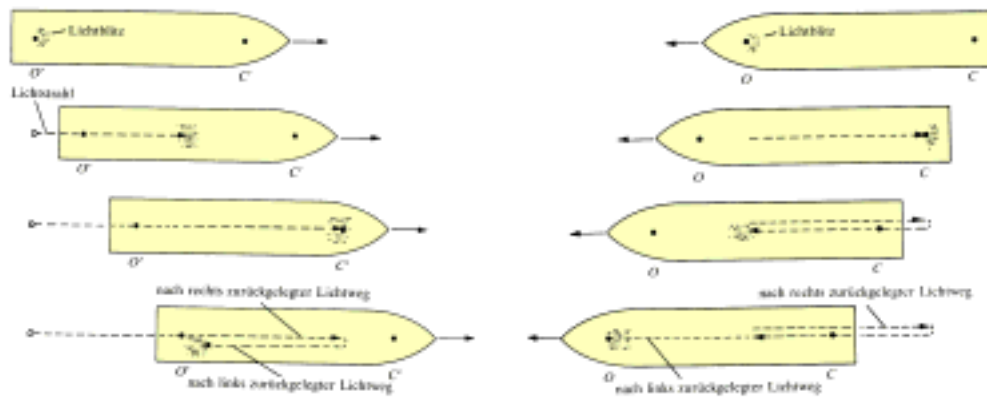


Fig. 37 Weg des Lichtblitzes (nach Hoffmann)

Man kann sich nun fragen, wie schnell Uhren in bewegten Bezugssystemen gehen. Dazu kann man sich eine Lichtuhr denken. Sie funktioniert folgendermaßen: ein Lichtblitz läuft zwischen zwei senkrecht zur Bewegungsrichtung stehenden Spiegeln hin und her. Zählt man wie oft der Lichtblitz hin und her gelaufen ist, ist das ein Maß für die abgelaufene Zeit. Wenn ein Raumschiff mit einer solchen Lichtuhr an mir vorbeifliegt, beobachte ich, dass die Lichtpulse sich nicht mehr senkrecht zur Ausbreitungsrichtung bewegen, sondern schräg. Sie müssen also eine größere Strecke zurücklegen, da die Lichtgeschwindigkeit c konstant ist. Da Sie die Zeit genauso als Anzahl Hin- und Herbewegungen des Lichtpulses messen, kann meine Schlussfolgerung nur sein, dass ihre Uhr im bewegten System langsamer läuft. Wir sehen also, dass bewegte Uhren für den ruhenden Beobachter langsamer gehen.

6.7 Längenkontraktion

Was kann man aus dem Gedankenexperiment zur Zeitsynchronisation außerdem noch schließen? Da die Lichtgeschwindigkeit c unabhängig von der Geschwindigkeit der Lichtquelle konstant sein muss, sollten sowohl Sie wie ich bei der Messung von c zum gleichen Ergebnis kommen. Da von mir aus gesehen ihre Uhr langsamer tickt, muss für mich auch die Strecke, die das Licht in dieser Zeit zurückgelegt hat, kürzer sein als die Länge, die Sie in Ihrem Ruhesystem messen. Nun ist die Lichtgeschwindigkeit der Quotient „zurückgelegte Strecke dividiert durch Laufzeit des Lichtes“. Diese Größe muss sowohl für Sie wie für mich gleich sein. Die Situation kann nur dann konsistent beschrieben werden, wenn nicht nur bewegte Uhren langsamer ticken sondern auch die Längen kontrahiert sind, wie von Lorentz beschrieben (Fig. 34). Die Längenkontraktion ist eine Konsequenz der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit. Sie bedeutet z.B., dass eine Kugel zusammengequetscht erscheinen müsste, also zu einem Sphäroid würde (Fig. 38).

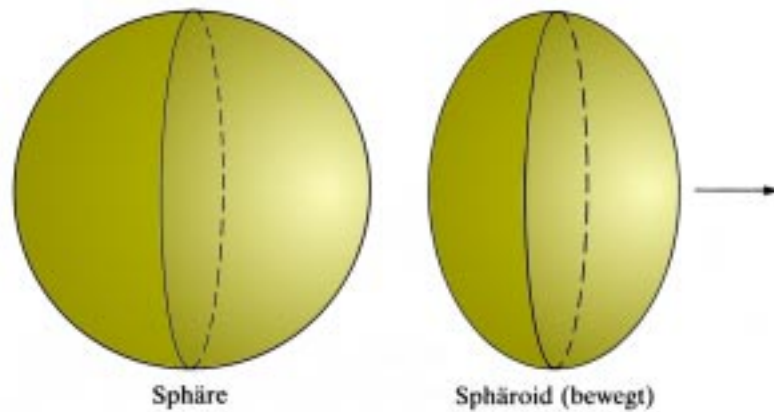


Fig. 38 Längenkontraktion (nach Hoffmann)

6.7.1 Müonenexperiment

Kann man die Längenkontraktion und die Zeitdilatation beobachten? Dies ist sicher nicht in unserem alltäglichen Leben möglich. Es gibt aber ein Experiment, das sehr anschaulich zeigt, dass die Effekte wirklich existieren. In der oberen Atmosphäre werden durch den Sonnenwind Müonen erzeugt. Müonen sind Elementarteilchen, die eine kurze Lebensdauer und, bedingt durch die Art der Erzeugung, eine sehr hohe Geschwindigkeit haben. Die Lebensdauer ist so kurz, dass sie mit ihrer Geschwindigkeit nach klassischer Berechnung den Erdboden kaum erreichen könnten. Nun zeigt es sicher aber, dass ein relativ großer Anteil der Müonen den Erdboden erreicht (Fig. 39) und dort auch beobachtet werden kann. Diese Tatsache ist auf zwei Arten interpretierbar. Aus der Sicht des ruhenden Beobachters auf der Erde ist die innere Uhr der Müonen stark verlangsamt. Das heißt, dass sie nur einen Bruchteil ihrer Lebensdauer benötigen, um auf dem Erdboden anzukommen. Aus der Sicht der Müonen ist die Situation umgekehrt. Für sie bewegt sich die Erde rasend schnell nach oben. Wegen der grossen Geschwindigkeit sind die Berge kontrahiert, die Erde scheint ganz flach zu sein. Deshalb kann, aus Sicht der Müonen, der Boden erreicht werden. Anhand dieses Experimentes wird „anschaulich“ klar, dass die Längenkontraktion und die Zeitdilatation eng miteinander verknüpft sind.

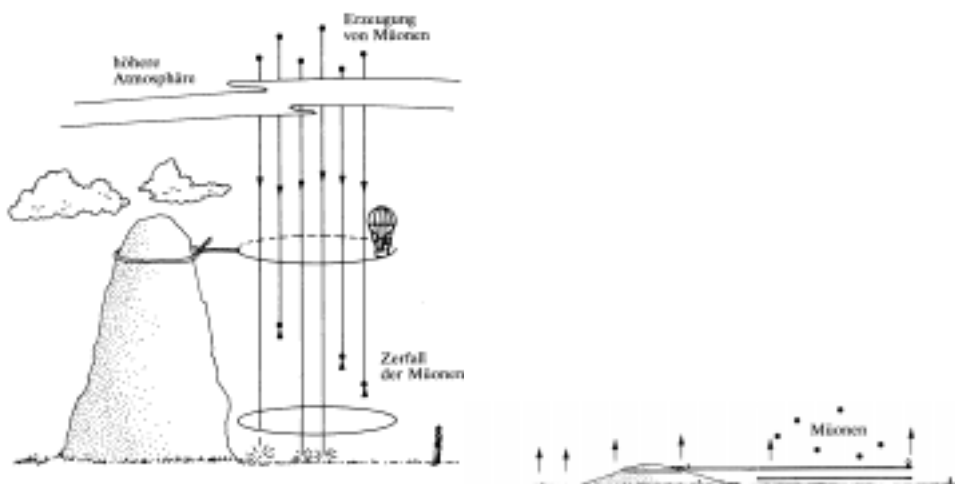


Fig. 39: Längenkontraktion und Zeitdilatation. Links: Für einen Beobachter auf der Erde ist die Zeit der Müonen durch die Zeitdilatation verlangsamt. Im Bezugssystem des Müons scheinen die Höhen der Berge verkürzt (Längenkontraktion).

6.7.2 Schattenwurf eines relativistischen Körpers

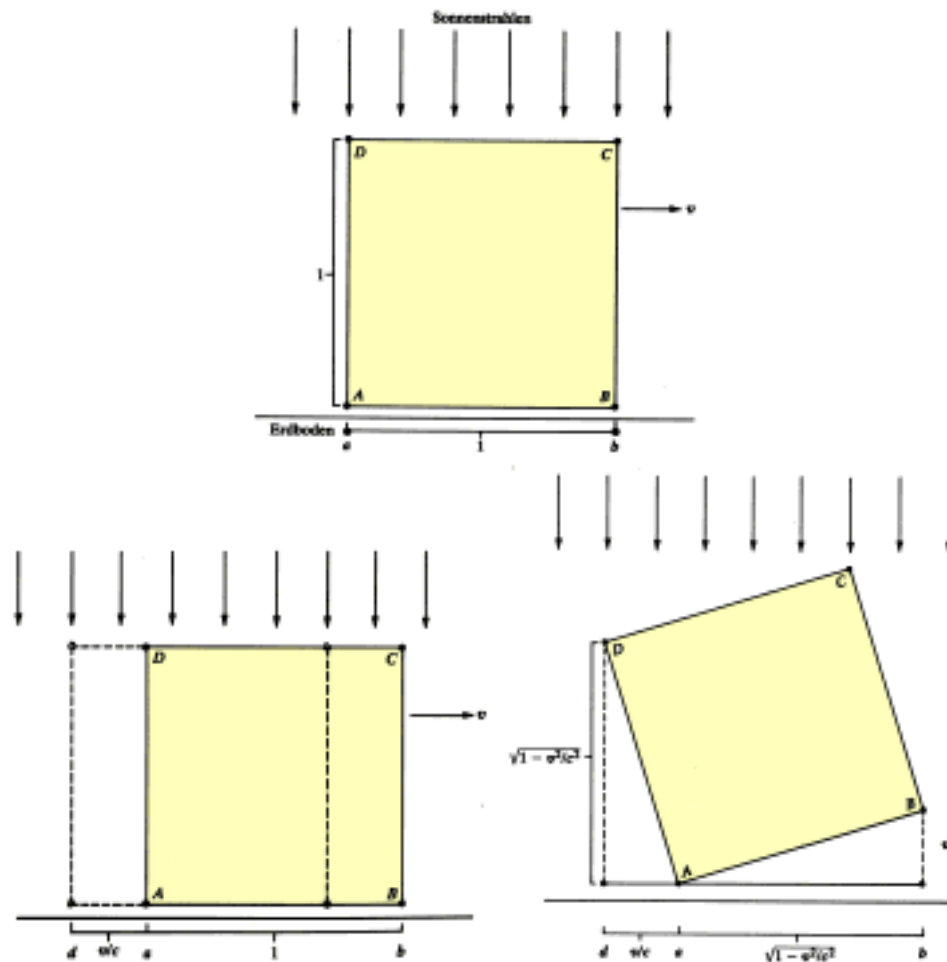


Fig. 40: Was beobachtet man bei einem längenkontrahierten Objekt. Oben die klassische Betrachtungsweise, unten links eine Zeichnung die den Einfluss der Laufzeiten des Lichts angibt und unten rechts, das Resultat (nach Hoffmann)

Ich möchte jetzt noch auf einen witzigen relativistischen Effekt zu sprechen kommen, den Terrell 1957 entdeckt hat. Aus den vorangegangenen Abschnitten mag der Eindruck entstanden sein, dass sich schnell bewegende Objekte auf Fotografien verkürzt abgebildet sind (Fig. 40). Eine Fotografie zeichnet alles Licht auf, das zu einem bestimmten Zeitpunkt auf der Ebene des Films eintrifft. Welche Lichtstrahlen nun gleichzeitig eintreffen, kann man schön anhand eines bewegten Quadrates erklären. Wir betrachten den Schattenwurf eines von oben beleuchteten Quadrates mit der Seitenlänge 1, das sich nach rechts bewegt. Es ist klar, dass der Schatten der Seite AB um die Längenkontraktion verkürzt ist. Was ist aber mit dem Schatten des Punktes B. Das Licht benötigt die Laufzeit $1/c$ bis zur Auflage. In der Zeit hat sich aber das Quadrat um v/c nach rechts bewegt. Die Länge des Schattens ist also die kontrahierte Länge plus die Länge v/c . Die Zeichnung auf der rechten Seite von Fig. 40 zeigt, dass die Länge des Schattens davon herrührt, dass das Quadrat gedreht erscheint. Der relativistische Effekt bei einer Abbildung²⁴ ist also eine Drehung! Dies ist eine Konsequenz daraus, dass für eine Abbildung nicht nur die Orte des Geschehens, sondern auch die Laufzeiten be-

²⁴ Wenn sie etwas anschauen, dann wird das Objekt auf die Netzhaut des Auges abgebildet: auch für einen Betrachter erscheint das Quadrat gedreht.

rücksichtigt werden müssen. Generell ist es so, dass bei relativistischen Geschwindigkeiten Gegenstände gedreht und verzerrt, nicht aber kontrahiert abgebildet werden.

6.8 Weltlinien und Minkowski-Raum

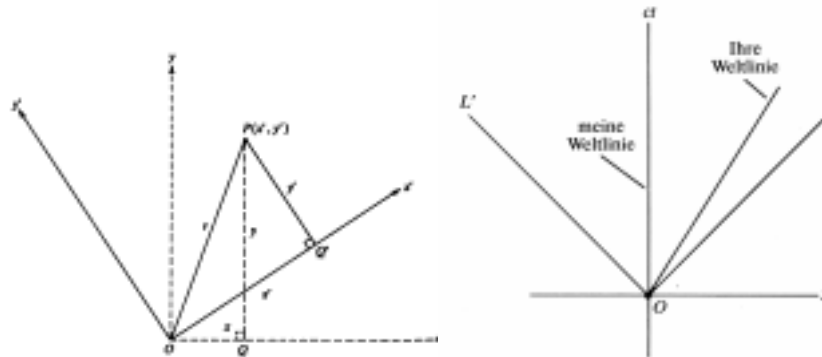


Fig. 41 Weltlinien und Koordinatenmessung (nach Hoffmann)

Um die Bewegung eines Punktes durch Raum und Zeit zu beschreiben, hat Einstein Weltlinien eingeführt (Fig. 41). Weltlinien sind quasi ein Fahrplan durch einen vierdimensionalen Raum. Dies ist schwierig zu visualisieren, deshalb ist unser Bild auf nur zwei Dimensionen beschränkt, nämlich die Zeit ct nach oben und der Ort x nach rechts. Die Geraden L und L' bezeichnen die Ausbreitung des Lichtes. Alle Weltlinien müssen innerhalb dieses Kegels sein. Meine Weltlinie (als Beobachter) ist senkrecht nach oben, weil sich mein Ort nicht ändert. Eine gegen mich bewegtes Objekt hat eine Weltlinie, die schräg nach oben liegt.

Man kann in einem Raum Abstände messen. In einem euklidischen Raum unter der Newton'schen Relativität ist das Abstandsmass durch das pythagoräische Dreieck gegeben, also $r^2 = x^2 + y^2$, im dreidimensionalen Raum ist der abstand: $r^2 = x^2 + y^2 + z^2$.

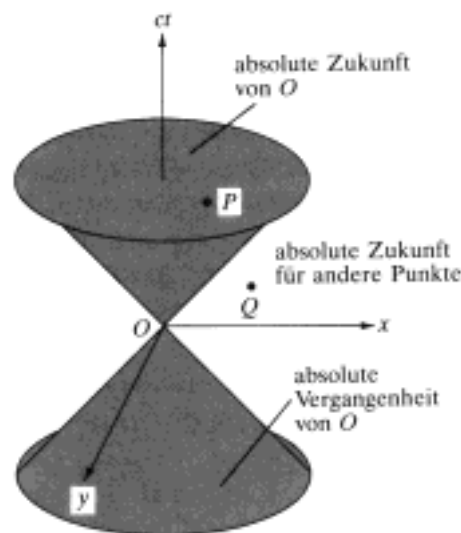


Fig. 42: Minkowski-Raum (nach Hoffmann)

Für den relativistischen Raum nach Einstein muss man ein anderes Abstandsmass definieren. Dieser relativistisch invariante Abstand ist $s^2 = x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2$. Dieser Abstand ist unabhängig vom Bezugssystem. Sie sehen daraus, dass Raum und Zeit im gewissen Sinne in der Relativität äquivalent sind. Punkte können zeitlich und räumlich voneinander entfernt sein und sie können zeitlich und räumlich nahe beieinander liegen. Der relativistische Abstand ist

immer der Gleiche. Diesen vierdimensionalen Raum, bestehend aus den drei üblichen Raumkoordinaten x , y und z sowie der Zeitkoordinate ct nennt man Minkowski-Raum (Fig. 42). In diesem Minkowski-Raum, bei dem ich mich als Beobachter immer in den Punkt O setze, gibt es verschiedene Bereiche. Oben liegt die Zukunft, unten die Vergangenheit. Ich am Punkt O kann mit dem Punkt Q an einen anderen Ort zu einer anderen Zeit nicht kausal²⁵ verbunden sein. Alles was kausal verbunden ist, muss sich im Kegel nach oben oder nach unten befinden. Alles was im unteren Kegel ist, kann O beeinflussen, alles was im oberen Kegel ist kann von O beeinflusst werden. Alles was außerhalb des Kegels, man nennt ihn auch Lichtkegel, ist, ist unerreichbar für O . Übrigens sind Lorentz-Transformationen im Minkowski-Raum äquivalent zu einer Drehung.

6.8.1 Das Zwillings-Paradoxon

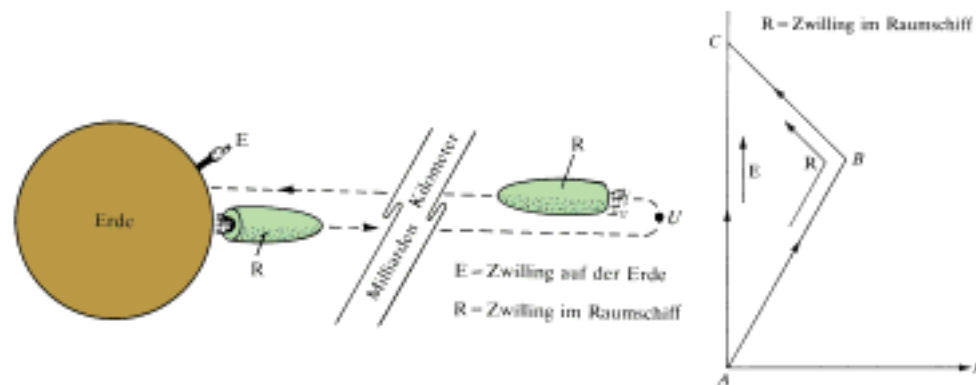


Fig. 43: Zwillings-Paradoxon. Links eine Skizze des Weges, rechts das dazugehörige Bild der Weltlinien (nach Hoffmann)

Als letzte Konsequenz der speziellen Relativitätstheorie möchte ich das Zwillings-Paradoxon beschreiben. Sie haben sicher schon gehört, dass ein reisender Zwilling bei der Rückkehr jünger ist, als der auf der Erde verbliebene (Fig. 43 links). Dies ist ein Effekt der Zeitdilatation, die bewegte Uhren langsamer laufen lässt. Nun ist die Situation keinesfalls symmetrisch (Fig. 43 rechts). Der auf der Erde verbliebene Zwilling bleibt auch aus der Sicht des reisenden Bruders nicht jünger. Der auf der Erde verbliebene Zwilling bleibt in seinem Bezugssystem, während der reisende Zwilling einmal sein Bezugssystem wechseln muss, nämlich um umzukehren. Er muss er von einem gleichmäßig bewegten Bezugssystem in zweites wechseln. Diese Beschleunigung macht die Situation unsymmetrisch.

7 Die allgemeine Relativitätstheorie

7.1 Äquivalenz von Beschleunigung und Gravitation

Mit der speziellen Relativitätstheorie hatte Albert Einstein und die anderen daran beteiligten Mathematiker und Physiker geklärt, was die Folgen der Endlichkeit und Konstanz der Lichtgeschwindigkeit waren. Ein Problem blieb ungelöst: die Frage nach der Äquivalenz von schwerer und träger Masse, die schon von Newton gestellt wurde. Einstein postulierte, ähnlich wie Newton, dass die beiden Massentypen, die träge und die schwere Masse, äquivalent seien.

²⁵ Kausal heisst, dass es eine Ursache-Wirkungs-Beziehung gibt, bei der die Ursache zeitlich vor der Wirkung liegt.

Im Gegensatz zu früheren Forschern hat er die Konsequenzen des Äquivalenzpostulates sehr genau durchdacht. Zur Erläuterung sind Gedankenexperimente sehr viel tauglicher als Zahlen und Formeln. Wenn man annimmt, dass schwere und träge Masse ununterscheidbar sind, dann darf in einem beschleunigten Fahrstuhl²⁶ und auf der Erde die Physik nicht unterschiedlich sein (Fig. 44). Wenn wir auf der Erde eine schwere und eine leichte Kugel fallen lassen, dann fallen beide gleich schnell zu Boden. Wenn wir in einem beschleunigten Fahrstuhl eine schwere und eine leichte Kugel loslassen, dann behalten sie ihre Geschwindigkeit, die sie im Moment des Loslassens hatten, bei. Da der Fahrstuhl immer schneller wird, nähern sie sich immer schneller dem Boden. Wenn man nicht weiß, ob man sich in einem beschleunigten Fahrstuhl oder auf der Erde aufhält, hat man keine Möglichkeit anhand physikalischer Experimente den Ort (Erde oder Fahrstuhl) zu bestimmen, es sei denn, schwere und träge Massen wären nicht äquivalent. Da dies aber die Grundannahme Einsteins war, musste er in der allgemeinen Relativitätstheorie postulieren, dass alle Effekte, die im Gravitationsfeld auftreten, ununterscheidbar von Effekten im beschleunigten Bezugssystemen sind. Das heißt, die allgemeine Relativitätstheorie ist eine Theorie, die die Physik in beschleunigten Bezugssystemen miteinander vergleicht.

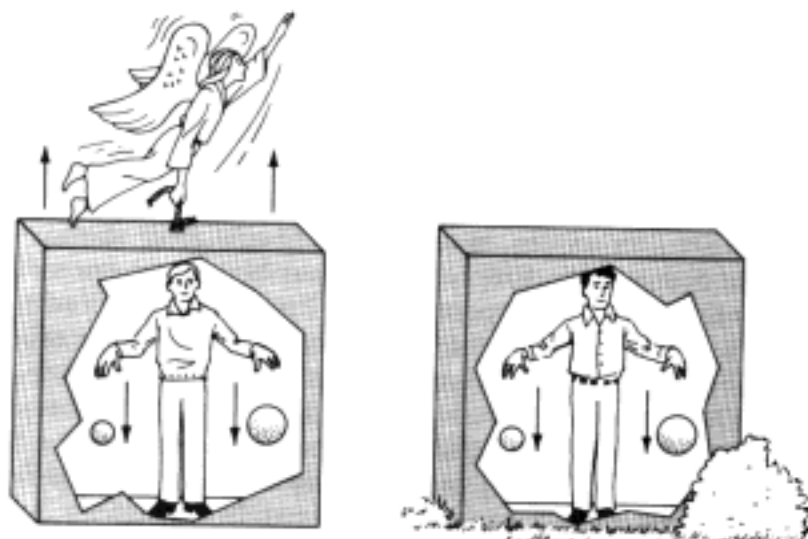


Fig. 44: Äquivalenz beschleunigter Bezugssysteme mit Bezugssystemen im Gravitationsfeld. (nach Hoffmann)

7.1.1 Künstliche Schwerkraft

Eine mögliche Anwendung der Äquivalenz schwerer und träger Masse ist die künstliche Schwerkraft in zukünftigen Raumstationen. Rotiert eine Raumstation, dann erfahren alle Insassen eine Beschleunigung nach außen (Fig. 45). Diese Beschleunigung nach außen kann man auch als nach außen zunehmendes Gravitationsfeld verstehen. Ein solches Gravitationsfeld, das formal einer negativen Masse entspricht, ist nur mit bewegten Massen realisierbar.

²⁶ Sie können auch Rakete in der Weite des Weltalls anstelle des Fahrstuhls betrachten.

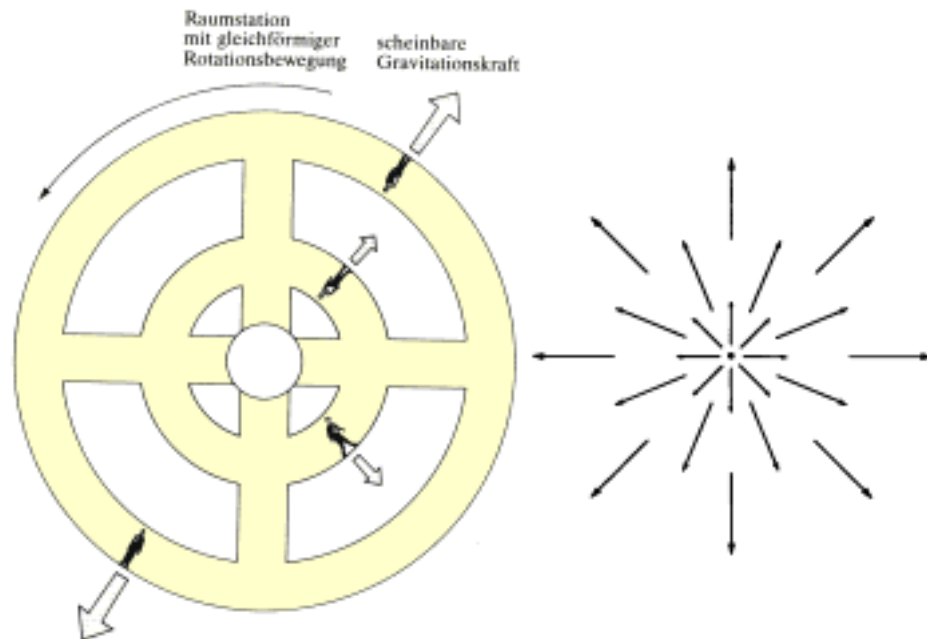


Fig. 45: Künstliche Schwerkraft in einem Raumlabor. Links die Anordnung, rechts das resultierende Gravitationsfeld. (nach Hoffmann)

7.2 Uhren im Schwerfeld

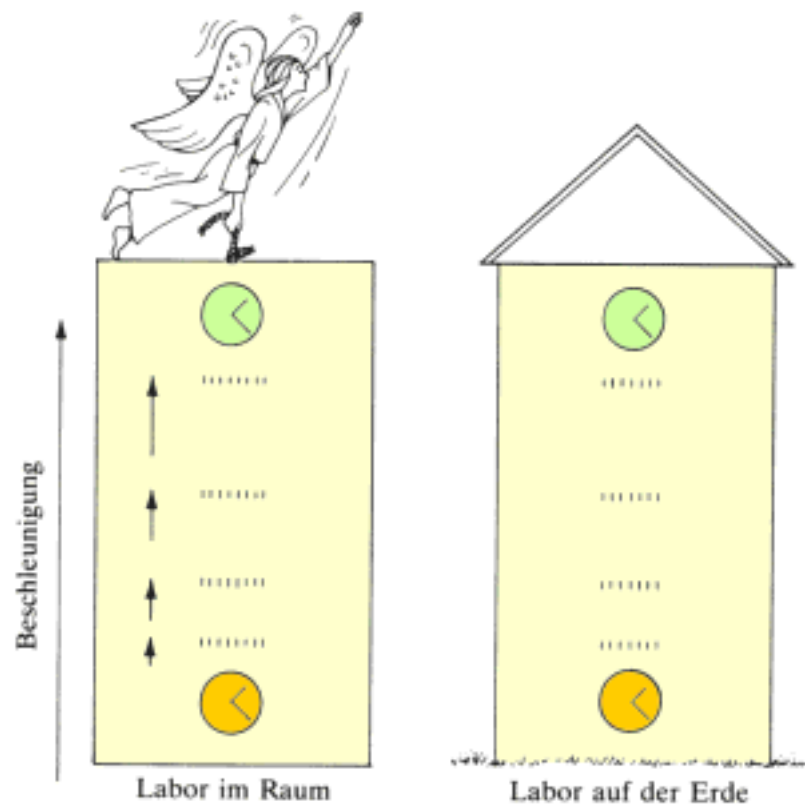


Fig. 46: Uhrenvergleich im beschleunigten Himmelslabor und im Schwerfeld. (nach Hoffmann)

Der allgemeinen Relativitätstheorie liegt das Einstein-Mach'sche Prinzip zugrunde. Es besagt, dass die träge Masse (Beschleunigung) von der Gravitationswechselwirkung mit allen anderen Massen herrührt. As sind die Konsequenzen der Anwendung dieses Prinzips? Anders als Einstein²⁷ wollen wir aber auf die Ausarbeitung der dazugehörigen Mathematik verzichten. Wir wollen bei Bildern bleiben. Wir fragen uns, was passiert, wenn wir, wie bei der speziellen Relativitätstheorie, zwei Uhren miteinander vergleichen (Fig. 46). Weil es einfacher ist, beginnen wir wieder mit dem beschleunigten Himmelslabor. Jede Uhr soll, wie schon früher in ähnlichen Gedankenexperimenten, in regelmäßigen Abständen mit jedem Tick einen kurzen Lichtimpuls aussenden. Die untere Uhr sendet ihre Lichtpulse nach oben zur Decke. Da das Himmelslabor beschleunigt ist, bewegt sich die Decke immer schneller vor dem sich nähernden Lichtpuls her. Deshalb brauchen die folgenden Pulse immer Länger um die Decke zu erreichen. Die „Tick-Pulse“ treffen an der Decke also weniger häufig ein als dass es der eigentlichen „Tick-Frequenz“ entsprechen würde. Für den Beobachter an der Decke scheint die Uhr am Boden also langsamer zu gehen. Umgekehrt treffen die „Tick-Pulse“ der Uhr an der Decke kürzerer Abfolge am Boden ein, da der Boden sich immer schneller auf die obere Uhr zubewegt. Die Uhr oben scheint für den Beobachter unten schneller zu gehen. Im Gedankenexperiment zur speziellen Relativitätstheorie waren die beiden Uhren vorne und hinten im Raumschiff äquivalent (Fig. 37). Hier in der allgemeinen Relativitätstheorie ist die Situation nicht mehr symmetrisch. Die Uhr unten geht langsamer als die Uhr oben. Wenn wir uns nun wieder auf die Äquivalenz zwischen träger und schwerer Masse berufen, dann muss im Schwerfeld die Uhr unten langsamer gehen als die Uhr oben. Mit hochgenauen Atomuhren, die einen Teil in 10^{14} Teilen genau die Zeit messen können, wurde festgestellt, dass Uhren unten in einem Gebäude wirklich langsamer gehen als die oben.

7.3 Ablenkung von Licht durch die Gravitation

Ein weiterer allgemein-relativistischer Effekt ist die Ablenkung des Lichtes durch die Gravitation (Fig. 47). Wieder ist es einfacher sich die Physik im beschleunigten Himmelslabor vorzustellen. Im Augenblick, in dem das Licht unsere Lampe verläßt, ist die Richtung seiner Bewegung vorgegeben. Wenn unser Labor sich mit konstanter Geschwindigkeit bewegte, würde das Licht vom Himmelslabor aus gesehen einer geraden Linie folgen. Da unser Labor aber beschleunigt ist, wird das Licht je länger je mehr in senkrechter Richtung abgelenkt. Die waagrechte Geschwindigkeitskomponente bleibt erhalten. In senkrechter Richtung wird durch die Beschleunigung des Labors die relative Geschwindigkeitskomponente des Lichtes grösser und zwar analog zu einer Fallparabel. Wieder muss man schließen, dass, wenn man an die Äquivalenz von träger und schwerer Masse glaubt, das Licht im Schwerfeld abgelenkt wird.

²⁷ Einstein hat die Mathematik der allgemeinen Relativitätstheorie zusammen mit den Schweizer Physiker Marcel Grossmann ausgearbeitet.

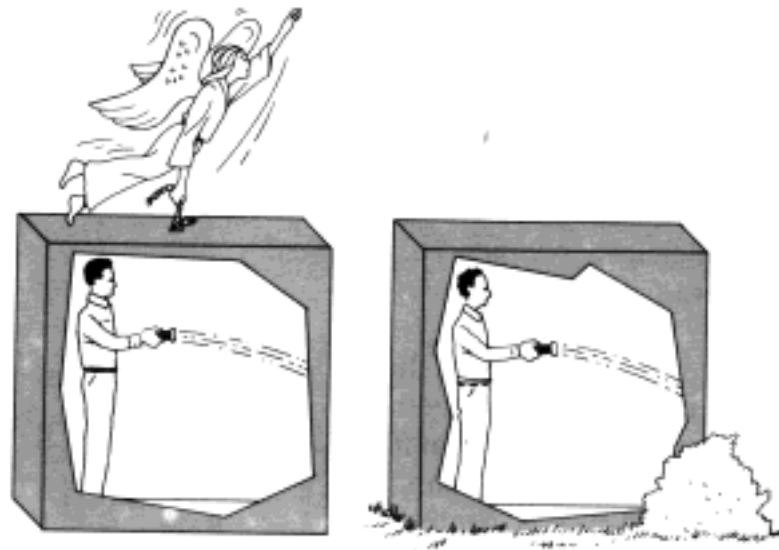


Fig. 47: Ablenkung des Lichtes in einem beschleunigten Bezugssystem oder durch Gravitation (nach Hoffmann)

7.3.1 Gekrümmte Räume

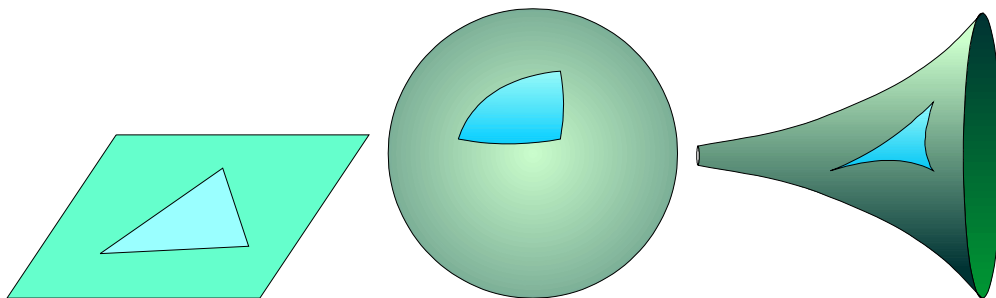


Fig. 48: Beispiele (in zwei Dimensionen gesehen in einem dreidimensionalen Raum) links: für einen euklidischen Raum (ohne Krümmung), in der Mitte für einen positiv und rechts einen negativ gekrümmten Raum.

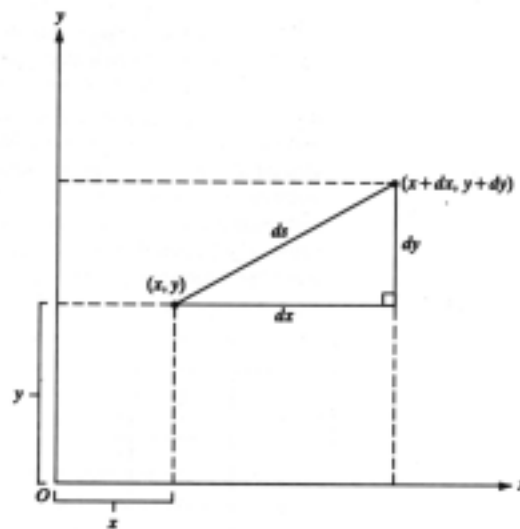
Kann man die Ablenkung des Lichtes durch Massen messen? Wie kann dieser Effekt visualisiert werden? Man kann, rein formal, sagen, dass Massen unseren Raum krümmen. Nun ist es schwierig zu begreifen, wie man die Krümmung eines Raumes feststellen kann, wenn man selber Teil dieses Raumes ist. Ein einfaches Beispiel aus der Welt der zweidimensionalen Lebewesen mag dies verdeutlichen (Fig. 48). Wenn wir in einer euklidischen Ebene sind, also in einer nicht gekrümmten Ebene, dann ist die Summe aller Winkel in einem Dreieck 180° . Wenn wir auf einer Kugeloberfläche²⁸ sind, beträgt die Summe aller Winkel mehr als 180° . Sie können das einfache Weise begreifen. Wenn Sie bei 0° Länge und bei 90° westlicher Länge jeweils zum Nordpol hinaufgehen, dann ist zwischen dem Äquator und dem jeweiligen Meridian auf ein Winkel von 90° . Der Winkel zwischen den beiden Meridianen am Nordpol beträgt aber auch 90° ; also ist die Winkelsumme 270° . Es ist ein Merkmal einer Kugel, dass die Winkelsumme immer grösser oder gleich 180° ist. Es gibt auch Geometrien, bei denen die

²⁸ Wie zum Beispiel Menschen auf der Erdoberfläche.

Winkelsumme kleiner 180° ist. Der Kopf einer Trompete ist ein solches Beispiel. Man kann also, auch wenn man die Fläche der Trompete, der Kugel oder der euklidischen Ebene nicht verlassen kann, durch eine Messung der Winkelsumme bei grossen Dreiecken feststellen, wie die Krümmung ist. Für Dreiecke, die klein sind gegen die charakteristische Krümmungsradius, wird man immer eine Winkelsumme von 180° messen²⁹.

7.4 Mathematischer Exkurs: Längenmessung (metrischer Tensor)

Wie kann man die Distanzmessung für einen gekrümmten Raum formulieren? Wir messen jetzt nicht die Distanz für große Abstände sondern für infinitesimal kleine Abstände, die wir ds (mit den Komponenten dx oder dy) nennen. Wieder gilt, dass im euklidischen Raum $ds^2 = dx^2 + dy^2$ ist. Wir können diese Gleichung umformen in $ds^2 = 1 dx^2 + 1 dy^2 + 0 dx dy$. Mit Indizes geschrieben lautet die Gleichung: $ds^2 = g_{11} dx^2 + g_{12} dx dy + g_{21} dy dx + g_{22} dy^2$. Die Koeffizienten g_{ij} beschreiben nun unseren Raum. Wenn die Kreuzkoeffizienten g_{21} und g_{12} null sind, dann haben wir es mit einem euklidischen Raum zu tun. Wenn diese Koeffizienten ungleich 0 sind, ist der Raum gekrümmt. Wir können durch dieses Längenmaß feststellen, welche Krümmung vorhanden ist. Es ist also nicht notwendig, dass wir uns außerhalb eines Raumes bewegen, um die Raumkrümmung feststellen zu können.



$$\begin{aligned}
 & \text{Distanzmessung} \\
 & (ds^2) = (dx^2) + (dy^2) \\
 & \text{Umformung} \\
 & ds^2 = 1 \times dx^2 + 1 \times dy^2 + 0 \times dx dy \\
 & \text{Formulierung mit Indizes} \\
 & ds^2 = g_{11} \times dx^2 + g_{12} \times dx dy \\
 & \quad + g_{21} \times dy dx + g_{22} \times dy^2 \\
 & x = \frac{1}{2} x' \quad y = \frac{1}{3} y' \\
 & ds^2 = \left(\frac{1}{2} dx'\right)^2 + \left(\frac{1}{3} dy'\right)^2 \\
 & = \frac{1}{4} dx'^2 + \frac{1}{9} dy'^2
 \end{aligned}$$

Fig. 49: Distanzmessung. Links die infinitesimale Formulierung, rechts die Schreibweise mit Matrizen (nach Hoffmann)

²⁹ Diesen Effekt findet man sehr schön auf der Erdoberfläche. Das rechtwinklige Grundstück eines Hauses hat mit sehr grosser Genauigkeit eine Winkelsumme von 360° . Die Abweichungen vom rechten Winkel sind bei üblichen Grundstücksgrößen nicht messbar. Nur bei größeren Distanzen, wenn die Seitenlängen hunderte von Kilometern betragen, sind die Abweichungen der Winkelsummen vom Wert in einer euklidischen Ebene deutlich messbar.

7.4.1 Periheldrehung der Merkurbahn

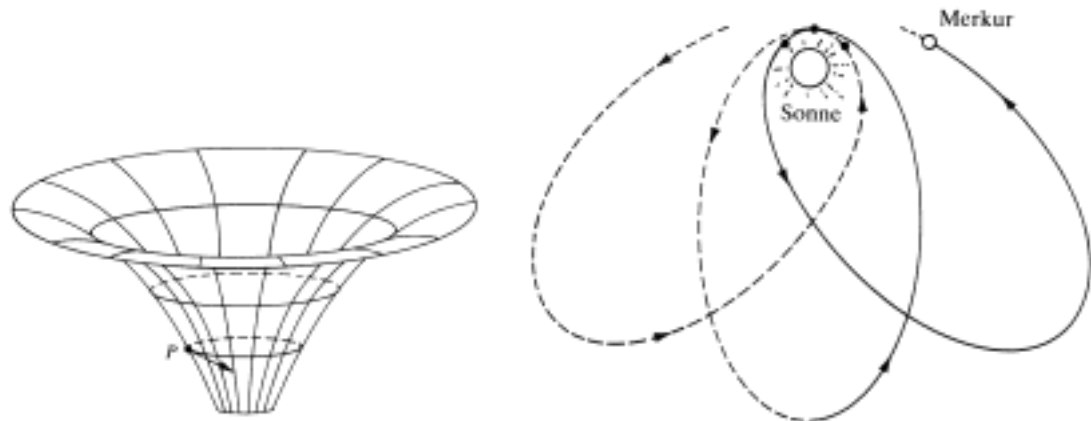


Fig. 50: Periheldrehung der Merkurbahn: eine Konsequenz der Raumkrümmung (nach Hoffmann)

Welchen Einfluss hat die Krümmung des Raumes durch die Sonne? In der Astronomie gab es um die Jahrhundertwende 1900 ein ungelöstes Problem. Die Periheldrehung des Merkur (Fig. 50) war nicht in allen Details verstanden. Die Merkurbahn zeigt, bezogen auf die Fixsterne, nicht immer in die gleiche Richtung. Ihre große Halbachse dreht sich langsam. Man kann für Teile dieser Drehung den Einfluss der anderen Planeten verantwortlich machen. Damit ist der Löwenanteil der Periheldrehung zu erklären. Es bleibt aber eine Komponente übrig. Die allgemeine Relativitätstheorie von Einstein erlaubte, diesen, durch klassische, nichtrelativistische Theorien nicht beschreibbare verbleibende Periheldrehung exakt zu berechnen. Damit war ein erster experimenteller Beweis erbracht, dass die allgemeine Relativitätstheorie nicht im Widerspruch zur Natur steht.

7.4.2 Ablenkung von Licht durch die Sonne

Ein weiterer Effekt der Raumkrümmung durch die Masse der Sonne ist die Ablenkung des Lichtes. Wie kann man das beobachten? Wenn man Sterne in Sonnennähe beobachtet, dann ist ihre Position etwa um $1/4000$ Sonnendurchmesser falsch im Vergleich zur Messung ihrer Position wenn die Sonne weit weg von der Fixsternposition ist. Sterne in Sonnennähe sind nur bei einer Sonnenfinsternis beobachtbar (Fig. 51). Nur der Mond kann das Sonnenlicht genügend stark abdunkeln, damit man die scheinbaren Positionen beobachten kann³⁰. Das Ausmaß der Ablenkung des Sternenlichtes durch die Sonne ergab innerhalb der Messgenauigkeit keinen Widerspruch zur allgemeinen Relativitätstheorie.

³⁰ Am 11. August 1999 hat(te) man hier in Ulm die Gelegenheit, bei der Sonnenfinsternis diese Messung nachzuvollziehen.

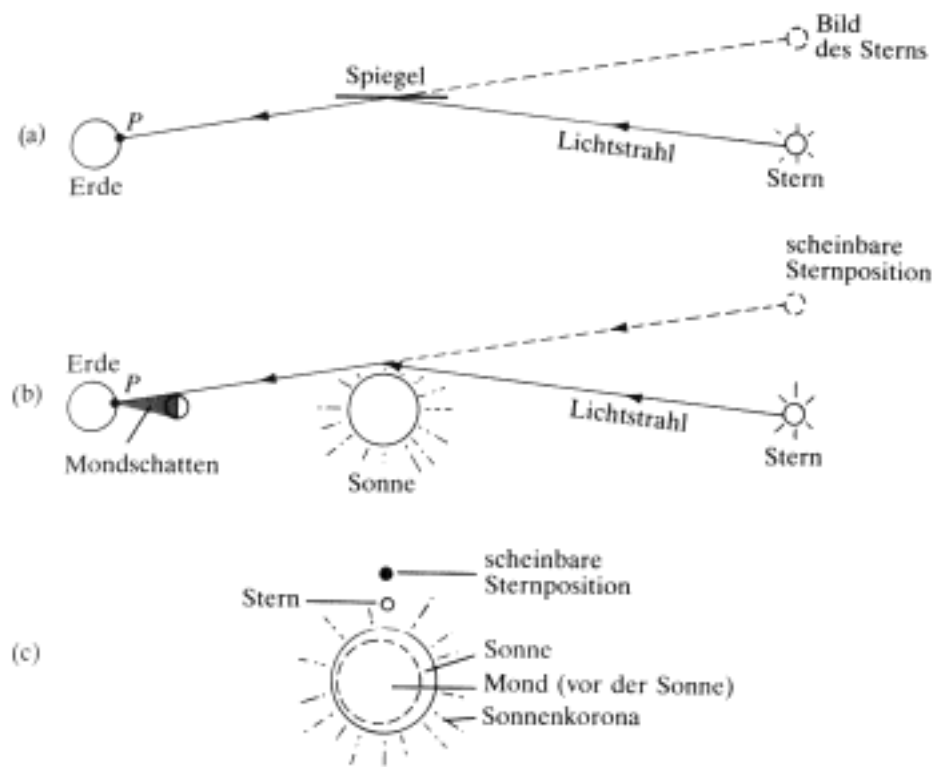


Fig. 51: Ablenkung des Lichtes durch die Sonne (nach Hoffmann)

8 Zeit, Raum, kosmologische Aspekte und offene Fragen

8.1 Die Richtung der Zeit: Entropie

Auch nach der allgemeinen Relativitätstheorie blieben offene Fragen. Eine betraf die Richtung der Zeit. Die physikalischen Modelle, die ich ihnen bis jetzt vorgestellt habe, also die Newton'sche, die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie, haben keine bevorzugte Zeitrichtung. Man weiß aber, dass Zeit in eine bestimmte Richtung läuft. Es tritt nie auf, dass jemand jünger wird, leider fügt sich eine Vase oder ein Glas nach dem Herunterfallen nicht selber wieder zusammen (Fig. 52). Wie kann man diese bevorzugte Zeitrichtung verstehen?

Dazu benötigt man die statistische Physik. Sie wurde entwickelt um Effekte der Wärme zu berechnen. In der statistischen Physik gibt es ein Maß, die Entropie, die sagt, wie wahrscheinlich ein bestimmter Zustand ist. Ist ein Zustand sehr wahrscheinlich, dann wird er eingenommen, ist ein Zustand unwahrscheinlich, dann wird er nicht eingenommen. Wenn Sie jetzt zufällig, z.B. durch würfeln, Punkte auf einem Blatt Papier verteilen³¹, dann ist es sehr wahrscheinlich, dass die Punkte überall gleichverteilt sind. Dass alle Punkte immer nur in die Ecke mit der Adresse (1,1) fallen, ist sehr unwahrscheinlich³². Ebenso scheint Zeit nur Richtung zunehmender Gleichverteilung abzulaufen. In der Physik nennt man das die Richtung zunehmender Entropie oder zunehmender Unordnung.

³¹ Sie können dazu in x- und y-Richtung 6 Striche machen und mit 2 Würfeln würfeln, der erste gibt die x-Koordinate, der andere die y-Koordinate an.

³² Sie wissen aus eigener Erfahrung, dass beim Würfeln eine Serie von Einer-Paschs sehr unwahrscheinlich ist.

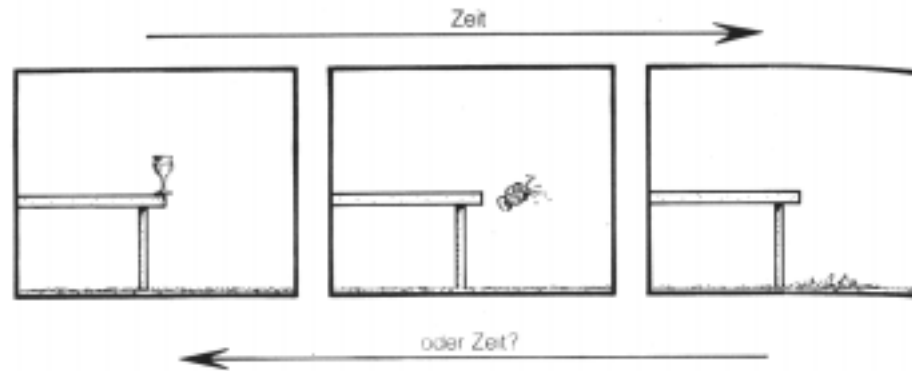


Fig. 52: Die Richtung der Zeit. (nach Penrose)

8.2 Expandierendes Universum



Fig. 53. Anschauliches Bild eines sich ausdehnenden Universums

Weiter hat man beobachtet, dass alle Sterne und Galaxien sich von uns fortzubewegen scheinen. Man beschreibt dies so, dass das Universum ein begrenzter Raum sei, der aber expandiert. Nun ist es wieder schwierig sich vorzustellen, wie ein dreidimensionaler Raum³³ expandieren soll. Man müsste ein vierdimensionaler Übermensch³⁴ sein, um dies einfach so sehen zu können. Es gibt aber wieder ein einfaches Beispiel: das Aufblasen eines Luftballons. Wir stellen uns vor, dass auf der Hülle eines Luftballons Punkte aufgebracht sind. Beim Aufblasen nimmt der Abstand der Punkte zu. Für die zweidimensionalen Menschen auf dem Luftballon scheint es so, wie wenn alles sich von ihnen wegbewegt. Genau das ist die Beobachtung der Astronomen.

Man verwendet zur Darstellung dieses expandierenden Universums wieder die Weltlinien aus der Relativitätstheorie (Fig. 54). Wenn sich alle Weltlinien von uns weg bewegen³⁵, bedeutet das, daß sich alle einmal getroffen haben müssen. Diesen Anbeginn nennt man den Urknall. Eine Frage, die viele bewegt, obwohl sie uns selber nicht betrifft, ist, ob das Universum wieder zu einem Punkt zusammenfällt oder ob es sich irgendwo bei sehr großen Dimensionen totläuft. Diese Frage kann mit dem heutigen Wissen nicht eindeutig beantwortet werden. Auf jeden Fall kann man sagen, daß die Entropie, also die Unordnung zunimmt. Die Entropie muß zum Zeitpunkt des Urknalls minimal gewesen sein.

³³ Wenn wir die Zeit dazu nehmen ist es sogar ein vierdimensionaler Raum.

³⁴ Bei Berücksichtigung der Zeit fünfdimensional!

³⁵ Dies muss man aus astronomischen Beobachtungen schließen.

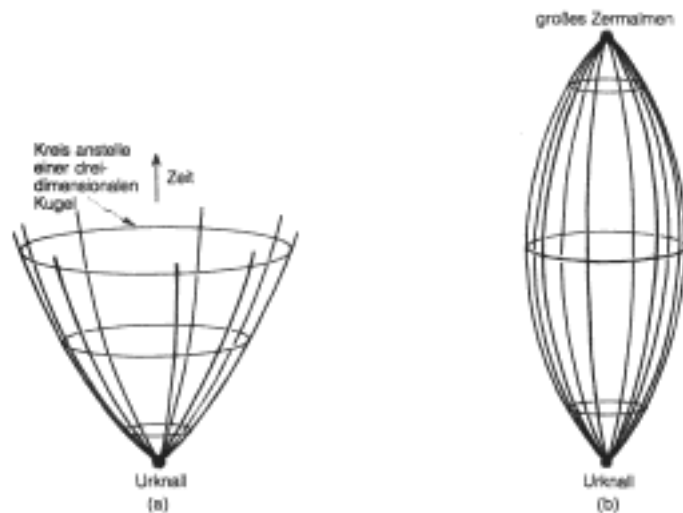


Fig. 54: Weltlinien eines expandierenden Universums. Links ein „offenes“ Universum, rechts eines, das in sich kollabiert.

8.3 Schwarze Löcher

Die allgemeine Relativitätstheorie macht eine weitere Voraussage. Sie wurde von Schwarzschild gefunden. Wenn eine Masse so groß ist, daß die Fluchtgeschwindigkeit größer als die Lichtgeschwindigkeit wäre, kann Licht nicht mehr entkommen (Fig. 55). D.h. alle Materie, alles was in die Nähe eines schwarzen Loches kommt, ist für immer verloren für die Außenwelt. Objekte, die in ein schwarzes Loch fallen, können immer noch Signale von der Außenwelt empfangen, sie können aber keine Signale mehr an die Außenwelt absenden. Deshalb kann die Masse von schwarzen Löchern zunehmen. Es gibt Indizien, daß in jeder Galaxie als Kern ein schwarzes Loch steckt.

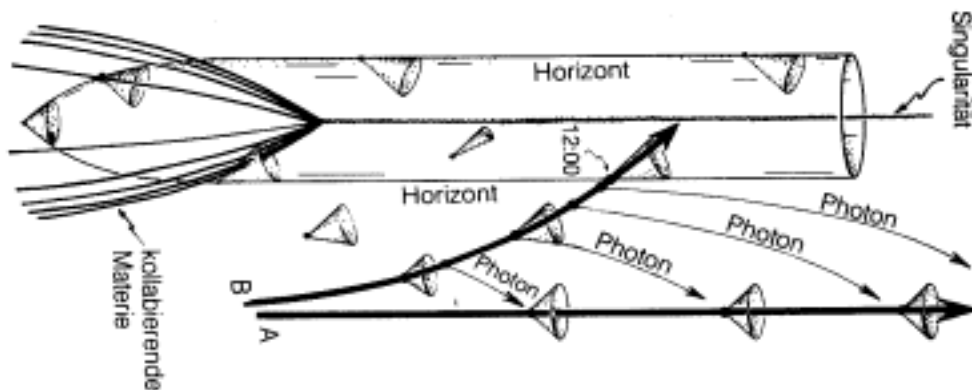


Fig. 55: Schwarze Löcher (nach Penrose)

Was bedeuten schwarze Löcher für die Entropie? Wir haben bis jetzt Entropie immer unter der Maßgabe betrachtet, daß keine Wechselwirkung zwischen den Objekten vorhanden ist, oder daß die Objekte sich abstoßen. Wenn Objekte sich aber anziehen, wie eine Masse und ein schwarzes Loch, nimmt die Entropie zu, wenn durch die Konzentration in Schwarzen Löchern eine Zusammenballung von Masse entsteht. Erst wenn alle Masse in einem schwarzen Loch konzentriert ist, ist die Entropie maximal (Fig. 56). Dieses Gesetz wurde vom schwerkranken Kosmologen und Physiker Steven Hawking entdeckt.

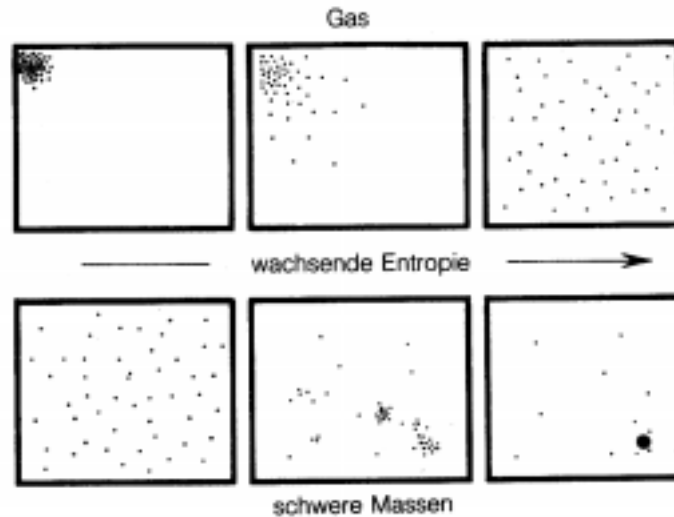


Fig. 56: Entropie bei sich anziehenden Massen (nach Penrose)

Es gibt noch mehrere weitere Probleme mit unseren heutigen Ansichten über Raum und Zeit. Wenn wir unserer Argumentation glauben, dann müssen wir zugestehen, daß unser Universum eine äußerst unwahrscheinliche Angelegenheit ist. Es gibt keine physikalische Begründung, warum ausgerechnet unser Universum in der uns bekannten Form entstanden sein sollte.

8.4 Struktur des Weltalls

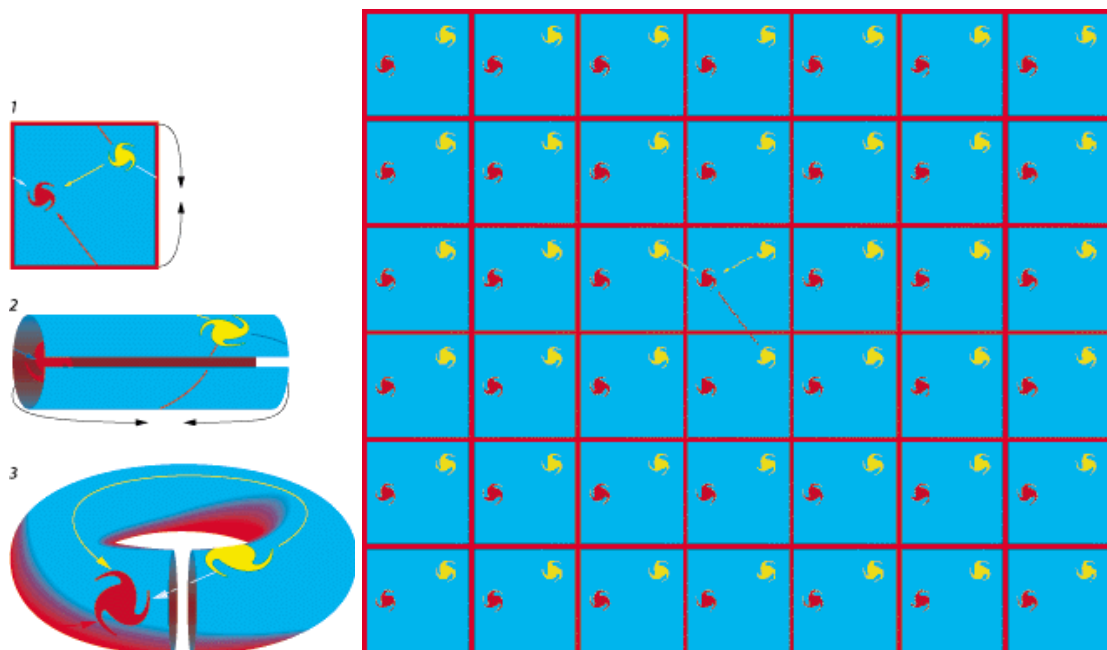


Fig. 57: Was wäre wenn unser Universum nicht einfach zusammenhängend wäre? Hier ist die Verteilung von Galaxien aufgezeigt, wenn unser Universum toroidal wäre (aus Scientific American)

Bei den bisherigen Ausführungen haben wir immer angenommen, daß unser Universum einfach zusammenhängend sei. Einfach zusammenhängend sind Räume oder Strukturen, bei denen man eine, wie auch immer gelegte Seilschlinge zu einem Punkt zusammenziehen kann.

Wenn Sie sich einen Torus vorstellen³⁶, könnten Sie eine Schlinge so hinlegen, daß sie nicht zu einem Punkt zusammenziehbar wäre. Deshalb ist ein Torus, im Gegensatz zu einer Kugel, nicht einfach zusammenhängend.

Die Frage ist jetzt: welche Auswirkungen hätte eine toroidale Struktur (oder gar eine schweizerkäseartige Struktur) des Universums auf die beobachtbaren Eigenschaften? Wenn wir genügend weit ins Universum hinaussehen könnten, sollten wir bei einem Torus regelmäßige Strukturen beobachten (Fig. 57), weil wir uns ja quasi mehrmals von hinten betrachteten. Eine solche Beobachtung wäre auch auf einer Kugel möglich, nur dass die Kugel einen anderen Zusammenhang als z.B. ein Torus hätte. Das kann man auch aus dem Bild, das aus dem Scientific American vom April 1999 stammt, ersehen (Fig. 57). Eine Untersuchung des Mikrowellenhintergrundes³⁷ könnte zeigen, ob unser Universum strukturiert ist. Wenn man Strukturen fände könnte entschieden werden, ob es eher äquivalent zu einer Kugel oder aber zu einer anderen Geometrie wäre. Bis jetzt gibt es keine Antwort auf dieses Problem. Man darf aber nicht annehmen, daß, weil es intuitiv nahe liegt, unser Universum die Struktur einer Kugel hat.

8.5 Kausalität

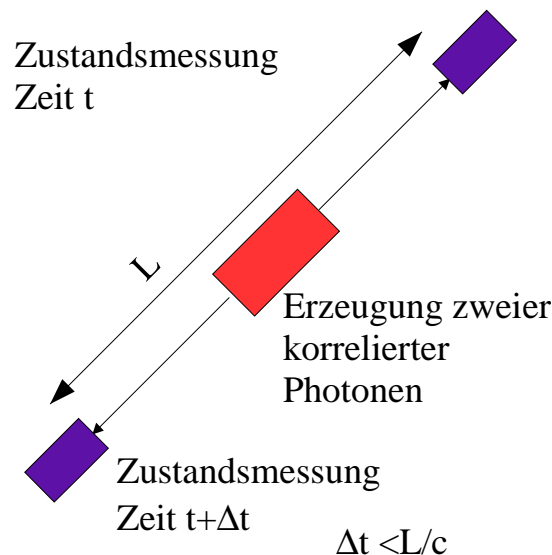


Fig. 58: Fernwirkung in der Quantenphysik: experimenteller Aufbau von Alain Aspect

Ein letztes hier angesprochenes Problem ist die Fernwirkung in der Quantenphysik. Neben den Relativitätstheorien existieren die Theorien der Quantenphysik. Diese sind äußerst erfolgreich in der Beschreibung von Atomen und Molekülen und den dazugehörigen physikalischen Effekten. Die Quantenphysik hat aus der Sicht der Relativitätstheoretikern eine Schwierigkeit: Wenn man zwei Objekte mit miteinander verschränkten Zuständen erzeugt³⁸, wird, sobald man den einen Zustand misst, der Zustand des zweiten gegeben sein. Der französische Physiker Aspect hat 1982 ein Experiment durchgeführt, bei dem er zwei miteinander korrelierte

³⁶ Ein Torus ist geometrisch gleich einem Ring.

³⁷ Der Mikrowellenhintergrund ist die elektromagnetische Strahlung, die vom Urknall übriggeblieben ist.

³⁸ Verschränkte Zustände sind Zustände quantenmechanischer Teilchen, die sich nicht unabhängig voneinander ändern können.

Photonen erzeugte (Fig. 58). Diese Photonen hat er kurze Zeit fliegen lassen und sie in zwei Detektoren innerhalb einer Zeit Δt analysiert. Diese Zeit Δt war klein gegenüber der Laufzeit t , die sich aus dem Abstand der beiden Detektoren dividiert durch die Lichtgeschwindigkeit errechnet. Da die Zustände der beiden Photonen vor der Messung nicht wohl definiert waren, ist durch die Messung des einen Zustandes der andere Zustand festgelegt worden. Die gegenwärtige Interpretation dieses Ergebnisses ist die folgende: Dadurch, daß bei einem Photon ein Zustand gemessen wird und beim anderen Photon deshalb der Zustand bestimmt ist, habe ich keine Information übertragen, da das Resultat ja immer noch zufällig ist. Die Lichtgeschwindigkeit ist die maximale Geschwindigkeit, mit der Information übertragen werden kann. Es ist aber festzuhalten, daß dies ein weites Forschungsgebiet ist, wo die raum-zeitlichen Effekte noch nicht vollständig begriffen sind.

9 Schlussbetrachtungen

In der Summe kommt man heutzutage in der Physik zu folgenden Schlüssen: Es gibt keine absolute Zeit. Sind zwei Ereignisse gleichzeitig, hängt der Befund vom Bezugssystem ab. In einem anderen Bezugssystem können diese Ereignisse zu verschiedenen Zeiten auftreten. Es gibt kein bevorzugtes Bezugssystem. Alle unbeschleunigten Bezugssysteme sind in der speziellen Relativitätstheorie äquivalent. Alle gleich beschleunigten Bezugssysteme sind in der allgemeinen Relativitätstheorie äquivalent. Es scheint eine Tatsache zu sein, daß die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum konstant ist. Es gibt deshalb raum-zeitliche Ereignisse, die nicht kausal voneinander abhängen können. Die allgemeine Relativitätstheorie mit der Annahme, daß schwere und träge Masse äquivalent sind, beschreibt, daß Schwerkraft und Beschleunigung ununterscheidbar sind. Daraus folgt, daß Licht abgelenkt werden kann und daß unser Raum gekrümmt ist. Eine Betrachtung thermodynamischer Effekte zeigt, daß die Zeit eine Richtung hat. Zeit nimmt zu, das Rückwärtsdrehen, also der Jungbrunnen, gibt es in der Physik nicht. Es gibt ungeklärte Phänomene, die mit Raum und Zeit zusammenhängen, wie z.B. die Struktur unseres Universums. Dehnt sich unser Universum immer weiter aus oder gibt es andere Effekte, die dies verhindern? Im Grenzgebiet zur Quantenphysik gibt es Phänomene, die scheinbar das Postulat der Lichtgeschwindigkeit als Maximalgeschwindigkeit verletzen.

Für unser tägliches Leben beschreibt die Physik Raum und Zeit hinreichend genau. Die philosophischen Fragen, die sich aus den vorgestellten physikalischen Theorien ergeben, sind bei weitem nicht verarbeitet.

10 Literatur

Alain Aspect, Jean Dalibard, Gérard Roger "Experimental Test of Bell's Inequalities Using Time-Varying Analyzers", Phys. Rev. Lett. 49, 18054-1807 (1982).

Banesh Hoffmann, "Einsteins Ideen", Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg (1997).

Roger Penrose, "Computerdenken", Spektrum der Wissenschaften Verlagsgesellschaft Heidelberg (1991)

Károly Simonyi, "Kulturgeschichte der Physik", Akadémiai Kiadó Budapest und Verlag Harry Deutsch Thun/Frankfurt am Main (1990)

Jean-Pierre Luminet, Glenn D. Starkman and Jeffrey R. Weeks, "Is Space Finite?" Scientific American April 1999.

11 Verzeichnis der Abbildungen

Fig. 1: Das Weltbild der Babylonier (aus Simonyi) 2

Fig. 2: Das Weltbild der Ptolemäer (aus Hoffmann)	3
Fig. 3: Links: Diopter des Heron. Rechts: Tunnelbau (aus Simonyi)	3
Fig. 4: Das Weltbild der Pythagoräer (aus Hoffmann).....	4
Fig. 5: Dreieck des Pythagoras.....	5
Fig. 6: Weltbild des Aristarch (aus Hoffmann).....	5
Fig. 7: Zeitliche Abfolge der Entdeckung der Newton'schen Gesetze	6
Fig. 8: Fallende Körper: Skizze zu Galileis Argumentation (aus Hoffmann).....	7
Fig. 9: Galileis Argumentation über die Bewegungsgesetze (aus Hoffmann)	7
Fig. 10: Flugbahn eines Balls nach Galilei (aus Hoffmann)	8
Fig. 11: Erklärung der Satellitenbahnen nach Newton (aus Hoffmann)	9
Fig. 12: Theorie der Planetenbahnen nach Kepler (aus Simonyi).....	9
Fig. 13: Kraft und Gegenkraft: Überlegung Newtons (aus Hoffmann).....	10
Fig. 14: Träge Masse (links) widersetzt sich der Beschleunigung, schwere Masse (rechts) wird gemeinhin mit Gewicht assoziiert.	11
Fig. 15: Die Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit: zeitliche Abfolge und Akteure	12
Fig. 16: Galileis Experiment zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit (aus Hoffmann).....	12
Fig. 17 Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit nach Rømer. Oben ist gezeigt, wie der Jupiterschatten zum Bestimmen eines Zeitpunktes verwendet werden kann. Unten ist gezeigt wie die Laufzeit und der zurückgelegte Weg zusammengehören. (aus Hoffmann)	13
Fig. 18: Aberration des Lichtes. Oben ein analoges Beispiel mit fallendem Regen. Unten die dazu äquivalente Zeichnung mit Licht (aus Hoffmann).....	14
Fig. 19: Erste Messung der Lichtgeschwindigkeit durch Fizeau 1849 (aus Hoffmann).	14
Fig. 20: Von der Wellentheorie zur speziellen Relativitätstheorie. Zeitlicher Ablauf und Akteure.	15
Fig. 21: Interferenzen im Wasser hinter einer Hafenanlage mit zwei Öffnungen (aus Hoffmann)	16
Fig. 22: Transversalwellen am Beispiel der Seilwelle (aus Hoffmann).....	17
Fig. 23: Longitudinale Wellen am Beispiel einer Windböe in einem Weizenfeld (aus Hoffmann).....	17
Fig. 24: Heller Fleck im Schatten einer kreisrunden Scheibe. (aus Hoffmann).....	18
Fig. 25: Brechung des Lichtes (aus Hoffmann).....	18
Fig. 26: Messung der Lichtgeschwindigkeit im Wasser nach Fizeau (nach Simonyi).....	19
Fig. 27: Ätherwind, erklärt mit Regen und Wind (nach Hoffmann).....	20
Fig. 28: Entdeckung der magnetischen Induktion durch Faraday (aus Hoffmann).....	20
Fig. 29: Äthermodell Maxwells (aus Hoffmann).....	21
Fig. 30: Hertz's Apparatur, mit der er die elektromagnetischen Wellen entdeckt hat. (aus Simonyi).....	22
Fig. 31: Die Experimente von Michelson und Morley zur Bestimmung der Äthergeschwindigkeit (nach Hoffmann)	23
Fig. 32: Koordinatensysteme und Weg-Zeit-Diagramme (rechts)	24
Fig. 33: Galilei-Transformation im Koordinatenbild.....	25
Fig. 34: Die Lorentz-Transformation	26
Fig. 35: Gleichzeitigkeit zweier Ereignisse (nach Hoffmann).....	26
Fig. 36: Synchronisation von Uhren nach Einstein (aus Hoffmann)	27
Fig. 37 Weg des Lichtblitzes (nach Hoffmann)	28
Fig. 38 Längenkontraktion (nach Hoffmann).....	29
Fig. 39: Längenkontraktion und Zeitdilatation. Links: Für einen Beobachter auf der Erde ist die Zeit der Müonen durch die Zeitdilatation verlangsamt. Im Bezugssystem des Müons scheinen die Höhen der Berge verkürzt (Längenkontraktion).	29

Fig. 40: Was beobachtet man bei einem längenkontrahierten Objekt. Oben die klassische Betrachtungsweise, unten links eine Zeichnung die den Einfluss der Laufzeiten des Lichts angibt und unten rechts, das Resultat (nach Hoffmann)	30
Fig. 41 Weltlinien und Koordinatenmessung (nach Hoffmann)	31
Fig. 42: Minkowski-Raum (nach Hoffmann).....	31
Fig. 43: Zwilling-Paradoxon. Links eine Skizze des Weges, rechts das dazugehörige Bild der Weltlinien (nach Hoffmann)	32
Fig. 44: Äquivalenz beschleunigter Bezugssysteme mit Bezugssystemen im Gravitationsfeld. (nach Hoffmann)	33
Fig. 45: Künstliche Schwerkraft in einem Raumlabor. Links die Anordnung, rechts das resultierende Gravitationsfeld. (nach Hoffmann).....	34
Fig. 46: Uhrenvergleich im beschleunigten Himmelslabor und im Schwerfeld. (nach Hoffmann).....	34
Fig. 47: Ablenkung des Lichtes in einem beschleunigten Bezugssystem oder durch Gravitation (nach Hoffmann)	36
Fig. 48: Beispiele (in zwei Dimensionen gesehen in einem dreidimensionalen Raum) links: für einen euklidischen Raum (ohne Krümmung), in der Mitte für einen positiv und rechts einen negativ gekrümmten Raum.....	36
Fig. 49: Distanzmessung. Links die infinitesimale Formulierung, rechts die Schreibweise mit Matrizen (nach Hoffmann).....	37
Fig. 50: Periheldrehung der Merkurbahn: eine Konsequenz der Raumkrümmung (nach Hoffmann).....	38
Fig. 51: Ablenkung des Lichtes durch die Sonne (nach Hoffmann)	39
Fig. 52: Die Richtung der Zeit. (nach Penrose).....	40
Fig. 53. Anschauliches Bild eines sich ausdehnenden Universums.....	40
Fig. 54: Weltlinien eines expandierenden Universums. Links ein „offenes“ Universum, rechts eines, das in sich kollabiert.	41
Fig. 55: Schwarze Löcher (nach Penrose).....	41
Fig. 56: Entropie bei sich anziehenden Massen (nach Penrose)	42
Fig. 57: Was wäre wenn unser Universum nicht einfach zusammenhängend wäre? Hier ist die Verteilung von Galaxien aufgezeigt, wenn unser Universum toroidal wäre (aus Scientific American).....	42
Fig. 58: Fernwirkung in der Quantenphysik: experimenteller Aufbau von Alain Aspect	43

12 Index

A

Aberration · 19
 Apparatur · 15, 22
 Arago, Dominique Francois Jean (1786-1853) · 19
 Aristarch von Samos (320- 250 v.Chr.) · 5, 6
 Aristoteles (384-322 v. Chr.) · 5, 8
 Aspect, Alain · 43, 44
 Äther · 18, 19, 21, 23

B

Babylon · 1, 2
 Beobachtung · 2, 19, 40, 43
 Beschleunigung · 9, 10, 11, 32, 33, 35, 44

Bezugssystem · 11, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 32, 33, 36, 44
 Bradley, James (1693-1762) · 14, 15, 18, 19
 Brahe, Tycho (1546-1601) · 6, 9
 Brechungsindex · 19

D

Diagramm · 24
 Dreieck · 5, 31, 36

E

Einstein, Albert (1879-1955) · 11, 24, 25, 26, 27, 31, 32, 35, 38
 Entropie · 39, 40, 41, 42
 Epizyklen · 2, 6

Erde · 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 14, 15, 18, 19, 23, 29, 32, 33
Ereignis · 26, 44

F

Fahrstuhl · 33
Faraday, Michael (1791-1867) · 20, 25
FitzGerald, George Francis (1851-1901) · 23, 25
Fixstern · 4, 5, 13, 38
Fizeau, Hippolyte Armand (1819-1896) · 14, 15, 18, 19
Foucault, Jean Bernard Léon (1819-1868) · 15
Fresnel, Augustin (1788-1827) · 16, 17, 18, 19, 22

G

Galilei, Galileo (1564-1642) · 6, 7, 8, 12
Galileitransformation · 24
Gegenerde · 4, 5
Gekrümmter Raum · 36
Gewicht · 7, 11
Gleichzeitigkeit · 26
Gödel, Kurt (1906-1978) · 1
Gott · 10
Gravitation · 9, 32, 35, 36
Griechenland · 2, 3

H

Heron von Alexandrien (10-75) · 3
Hertz, Heinrich (1857-1894) · 22
Himmelsgewölbe · 2
Himmelslabor · 34, 35
Hoffmann, Banesh · 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 14, 16, 17, 18, 20, 21, 23, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 36, 37, 38, 39, 44

I

Induktion · 20
Interferenz · 16, 22
Interferometer · 22

J

Jupiter · 2, 5, 12

K

Kausalität · 43
Kepler, Johannes (1571-1630) · 6, 9
Kinder · 7, 8
Koordinatensystem · 24, 25
Kopernikus, Nikolaus (1473-1543) · 1, 6
Korpuskel · 15
Kosmologie · 41
Krümmung · 36, 37, 38
Kugel · 3, 7, 28, 33, 36, 43

L

Lampe · 12, 26, 35
Längenkontraktion · 23, 25, 28, 29, 30
Licht · 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 22, 24, 26, 28, 30, 35, 41, 44
Aberration · 13, 14
Ablenkung · 35, 38
Wellentheorie · 15
Lichtblitz · 12, 26, 27, 28
Lichtgeschwindigkeit · 11, 12, 13, 14, 15, 16, 18, 19, 26, 28, 32, 41, 44
Lorentz, Hendrik Antoon (1853-1928) · 23, 25, 26, 28
Lorentz-Transformation · 25, 26

M

Magnet · 10, 25
Mars · 2, 5
Masse · 10, 11, 32, 33, 35, 38, 41
schwere Masse · 10, 11, 32
träge Masse · 10, 33, 35, 44
Maxwell, James Clark (1831-1879) · 21, 22, 25
Merkur · 2, 5, 38
Michelson, Albert (1852-1931) · 22, 23, 24
Minkowski
Minkowski-Raum · 31, 32
Modell · 1, 21
Mond · 2, 4, 5, 38
Morley, Edwin (1938-1923) · 22, 23, 24
Müon
Experiment · 29

N

Newton, Isaac (1643-1727) · 6, 8, 9, 10, 11, 15, 18, 24, 25, 26, 31, 32

P

Penrose, Roger · 40, 41, 42, 44
Periheldrehung · 38
Perpetuum Mobile · 8
Philosophie · 2
Picard, Jean (1620-1682) · 13
Planetenbahn · 2, 9
Poincaré, Jules Henri (1854-1912) · 23, 25, 26
Ptolemäus (85-165 n. Chr.) · 2, 3, 4, 6
Pythagoras von Samos (569- 475 v. Chr.) · 4, 5

Q

Quadrat · 5, 30
Quantenphysik · 43, 44
Photon · 44

R

Rakete · 33
Raum · 1, 5, 7, 10, 11, 18, 24, 27, 31, 36, 37, 39, 40, 42, 44
Raumschiff · 26, 27, 28, 35
Regen · 14, 19, 20

Relativitätstheorie · 11, 24, 26, 33, 35, 38, 39, 40, 44
 allgemeine · 32, 33, 38, 39, 41, 44
 spezielle · 15, 21, 24, 32, 35, 44
 Rømer, Ole (1644-1710) · 12, 13, 14, 15

Ulm · 1, 26, 38
 Universum · 4, 40, 41, 42, 43, 44
 Expansion · 40
 Urknall · 40, 43

S

Samos · 4, 5
 Satellitenbahn · 9
 Saturn · 2, 5
 Schatten · 12, 18, 30
 Schattenwurf · 30
 Schwarzes Loch · 41
 Schwarzschild, Karl (1873-1916) · 41
 Schwerefeld · 34, 35
 Seil · 16, 18
 Seilwelle · 17, 18
 Simonyi, Károly · 2, 3, 9, 19, 22, 44
 Sonne · 2, 4, 5, 9, 12, 38, 39
 Sphäre · 2
 Stokes, George Gabriel (1819-1903) · 23
 Synchronisation · 27

T

Tensor
 metrischer Tensor · 37
 Terrell, James · 30
 Theorie · 1, 8, 9, 11, 17, 18, 19, 20, 22, 33
 Tick · 35
 Torus · 43
 Transformation · 11, 25

U

Uhr · 27, 28, 29, 32, 34, 35

V

von Helmholtz, Hermann Ludwig Ferdinand (1821-1894) · 22

W

Wellen
 elektromagnetisch · 19, 22
 longitudinal · 16, 17
 Weltall
 Galaxie · 41
 Struktur · 42
 Weltbild · 1, 2, 3, 4, 5, 8
 Weltlinie · 31, 32, 40, 41
 Winkelsumme · 36, 37

Y

Young, Thomas (1773-1829) · 16

Z

Zeit · 1, 2, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 23, 24, 25, 27,
 28, 29, 30, 31, 35, 39, 40, 42, 44
 Richtung · 39, 40
 Zeitdilatation · 27, 29
 Zwillings-Paradoxon · 32

13 Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	1
2	VON DEN BABYLONIERN ZU KOPERNIKUS	1
2.1	Das Weltbild der Babylonier	1
2.2	Das Weltbild der Ptolemäer	2
2.3	Das Weltbild der Pythagoräer	4
2.4	Das Weltbild des Aristarch	5
3	VON KOPERNIKUS ZU NEWTON: EVOLUTION UNSERES „ALLTAGSWELTBILDES“	6
3.1	Kopernikus	6
3.2	Die Entdeckungen des Galileo Galilei	7
3.3	Newton und das „klassische physikalische“ Weltbild	8
4	DIE ENTDECKUNG DER ENDLICHEN LICHTGESCHWINDIGKEIT	11
4.1	Galileo Galilei	12
4.2	Ole Rømer: Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit aus den Umlaufzeiten der Jupitermonde	12
4.3	Aberration des Sternlichtes und die Lichtgeschwindigkeit	13
4.4	Erste terrestrische Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit	14

5	VON DER WELLENTHEORIE DES LICHTES ZUR SPEZIELLEN RELATIVITÄTSTHEORIE	15
5.1	Interferenzerscheinungen	16
5.2	Longitudinale und transversale Wellen	16
5.3	Fresnels Theorie des Lichtes	17
5.4	Der Lichtäther	18
5.5	Faraday entdeckt die magnetische Induktion	20
5.6	Maxwells Gesetze des Elektromagnetismus	21
5.7	Entdeckung der elektromagnetischen Wellen durch Hertz	22
5.8	Die Versuche von Michelson und Morley	22
6	DIE SPEZIELLE RELATIVITÄTSTHEORIE VON RAUM UND ZEIT	24
6.1	Koordinatensysteme	24
6.2	Galilei-Transformation	24
6.3	Lorentz-Transformation	25
6.4	Gleichzeitigkeit zweier Ereignisse	26
6.5	Synchronisation von Uhren	27
6.6	Weg eines Lichtblitzes in einem bewegten Bezugssystemen: Zeitdilatation	27
6.7	Längenkontraktion	28
6.7.1	Müonenexperiment	29
6.7.2	Schattenwurf eines relativistischen Körpers	30
6.8	Weltlinien und Minkowski-Raum	31
6.8.1	Das Zwillings-Paradoxon	32
7	DIE ALLGEMEINE RELATIVITÄTSTHEORIE	32
7.1	Äquivalenz von Beschleunigung und Gravitation	32
7.1.1	Künstliche Schwerkraft	33
7.2	Uhren im Schwerfeld	34
7.3	Ablenkung von Licht durch die Gravitation	35
7.3.1	Gekrümmte Räume	36
7.4	Mathematischer Exkurs: Längenmessung (metrischer Tensor)	37
7.4.1	Periheldrehung der Merkurbahn	38
7.4.2	Ablenkung von Licht durch die Sonne	38
8	ZEIT, RAUM, KOSMOLOGISCHE ASPEKTE UND OFFENE FRAGEN	39
8.1	Die Richtung der Zeit: Entropie	39
8.2	Expandierendes Universum	40
8.3	Schwarze Löcher	41
8.4	Struktur des Weltalls	42
8.5	Kausalität	43
9	SCHLUSSBETRACHTUNGEN	44
10	LITERATUR	44
11	VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN	44
12	INDEX	46
13	INHALTSVERZEICHNIS	48