

Kapitel 2

Die Welt aus Raum und Zeit

2.1 Fahrpläne

Die Untersuchung der Gesetze der Formen setzt Stabilität dieser Formen voraus. Deshalb zeichnen wir geometrische Figuren auf feste Körper, in denen die Koordination der Atome auf Grund der mikrophysikalischen Gesetze eine gewisse Dauer hat und die den verschiedensten Manipulationen, unter anderem eben auch Drehungen und Verschiebungen im Raum, unterworfen werden können¹. Wir stellen dabei als erstes fest, daß man viele Eigenschaften unabhängig von Vorgeschichte, Ort und Zeitpunkt vergleichen kann. Die zweite Feststellung ist, daß man schon sehr fein messen muß, um überhaupt zu bemerken, daß die Eigenschaften eines Körpers oder Prozesses davon abhängen können, wo und wann er präpariert wird. Stellt man eine solche Abhängigkeit tatsächlich einmal fest, versucht man die Schuld nicht abstrakt Ort, Zeit und Orientierung zuzuschreiben, sondern der Wechselwirkung mit anderen Objekten, die näher zu untersuchen dann als Aufgabe gestellt ist. Auf diese Weise gelangen wir zu einem ersten **Relativitätsprinzip**.

Position und Orientierung eines Gegenstands können nur relativ zu anderen Gegenständen bestimmt werden. Zwei Gegenstände, die sich nur durch Position und Orientierung unterscheiden, können wir deshalb als gleich ansehen. Sind diese Gegenstände Figuren, sprechen wir von Kongruenz.

Es ist schwer zu sehen, wie ohne dieses physikalische Phänomen das System einer Geometrie überhaupt entdeckbar wäre. Dennoch kann man sich – nach Erlernen der

¹Man könnte einwenden, daß die Stabilität der mikroskopischen Objekte durch makroskopische Beobachtungen festgestellt wird, die ihrerseits mikroskopische Stabilität voraussetzen, um überhaupt präpariert werden zu können [2]. Diese Situation ist aber nicht ungewöhnlich in der Physik und zeigt, daß man nur Konsistenz oder Widerspruch finden kann. Es kann durchaus sein, daß es mehrere konsistente Modelle des realen Sachverhalts gibt. Gewöhnlich muß man zufrieden sein, wenigstens eins davon zu finden.

konstruktiven Eigenheiten der geometrischen Zusammenhänge – auch vorstellen, daß das formulierte Relativitätsprinzip nicht gilt. Bezogen aber auf unsere Erfahrung würde man den Raum dann als inhomogen bezeichnen. Das kann physikalisch so sein. Die Erfahrung der Relativität im Groben veranlaßt uns dann aber wieder, nach physikalischen Gründen für diese Inhomogenität zu suchen².

Ein fester Körper ist soweit unmittelbar ein Längenmaß, wie seine Struktur und seine Maße von der Stabilität der Struktur und der Wechselwirkung der Atome garantiert werden. So ist mit dem Pariser Urmeter die Längeneinheit implizit über den charakteristischen Abstand der Atome in der Metallstruktur festgelegt. Dieser charakteristische Abstand wird wiederum durch das Gleichgewicht verschiedener Kräfte³ bestimmt. Nun sind wir sofort bereit zu akzeptieren, daß die wichtigsten Kräfte (Schwerkraft, Coulomb-Kraft) nur vom Abstand abhängen und die Flächen gleichen Potentials Kugeln sind. Dabei muß man aber wieder sehen, daß die Kugel erst durch eine Kraft (genauer einer Kombination der Kräfte) definiert wird. Schließlich werden die charakteristischen Abstände in unserem Atomgitter auch durch das Gleichgewicht solcher Kräfte eingestellt⁴. Die beruhigende Entdeckung ist, daß die anderen Kräfte mitzuspielen scheinen, zumindest bei einer Gleichverteilung mikroskopischer Orientierungen (wobei auch die Feststellung, was eine Gleichverteilung über die Orientierungen ist, schon Teile des Begriffs Kugel vorwegnimmt). Wir sehen auch an dieser Diskussion, daß am Ende ein Teil jedes Begriffs unausweichlich, ein anderer dagegen abhängig von seiner konsistenten Anwendbarkeit ist [99].

Stellen wir uns einmal vor, es gäbe Kräfte, die dieser Ähnlichkeit nicht gehorchen. Dann könnte es feste Körper verschiedener Zusammensetzung geben, die bei Drehung und Verschiebung ihre Form relativ zueinander ändern, weil die mittleren Atomabstände – verglichen zwischen beiden – sich bei Drehung und Verschiebung ändern. Dann wäre es – wie erwähnt – schwierig, überhaupt eine Vorstellung von Kongruenz, also Geometrie, zu entwickeln. Ist der Vergleich zweier fester Körper

²Das einfachste Beispiel einer Ortsbestimmung ohne prominenten Bezug auf entfernte Objekte ist die Höhenmessung im Flugzeug mit Barometer. Hier wird scheinbar am Zustand eines Objekts eine Komponente der Position abgelesen, ohne daß der überflogene Grund erfaßt werden muß. Er wird auch nicht unmittelbar erfaßt, sondern nur mittelbar über den Zustand der Atmosphäre. Diese hat den Charakter eines äußeren Bezuges. Wir sehen, daß auch die Höhenmessung mit dem Barometer eine Bestimmung *mit* Bezug auf die Atmosphäre und deshalb auch *mit* Bezug auf den Grund durchgeführt wird, d.h., eben nicht absolut ist.

³Das erste Newtonsche Axiom behauptet, daß die Zeit so bestimmt werden kann, daß die kräftefreie Bewegung durch eine gerade Weltlinie dargestellt wird. Dementsprechend fordert das zweite Newtonsche Axiom die Begründung einer Beschleunigung als Folge des Einflusses anderer physikalischer Objekte, den wir am Ort der Beschleunigung als Kraft bezeichnen. Newton selbst identifizierte die Schwerkraft mit dem bekannten Abstandsgesetz als verantwortlich für die Satellitenbahnen um massivere Himmelskörper. Später stellte sich heraus, daß auch die elektrostatische Kraft einem solchen Abstandsgesetz gehorcht und man beide Kräfte als Abstieg eines Potentials ansehen kann. Zur euklidischen Geometrie und der Relativität der Orientierung gehört, daß dieses Potential nur vom Abstand der zentralen Quelle der Kraft abhängt. Alles andere wäre nicht nur eine Komplizierung des Kraftgesetzes, sondern auch der Geometrie.

⁴Gäbe es nur eine Kraft, wäre das nichts Besonderes. Wiederum kommt es auf die Abstimmung der Kräfte untereinander und die Konsistenz an

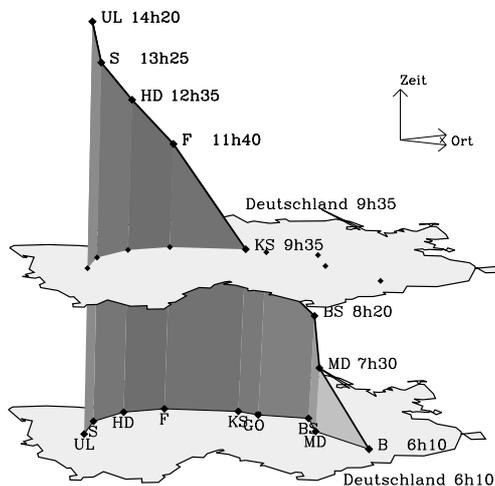


Abbildung 2.1: Welt, Weltlinie, Fahrplan
Die Welt ist das Produkt aus Raum und Zeit. Wir stellen den Raum durch eine Ebene dar, in der die Umrisse von Deutschland und die Eisenbahnlinie von Berlin nach Ulm zu sehen sind. Die Weltlinie des Zuges ist sein Fahrplan. Die abgelaufene Zeit wird durch die Höhe über der Grundfläche angezeigt. Je steiler die Weltlinie, desto langsamer der Zug. Ein vertikaler Abschnitt zeigt, daß der Zug hält.

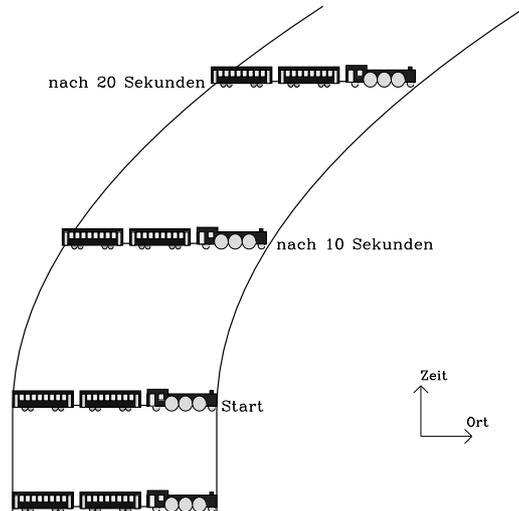


Abbildung 2.2: Fahrplan eines anfahren- den Zuges

Die Neigung der Weltlinie gegen die Zeitachse ist die Geschwindigkeit des Objekts. Beim Anfahren mit konstanter Beschleunigung entsteht eine Parabel als Weltlinie. Diese Parabel ist homolog zur Wurfparabel, wo die horizontale Koordinate die Rolle der Zeit übernehmen kann, weil sich die Horizontalkomponente der Geschwindigkeit nicht ändert.

aber unabhängig von ihrer Lage im Raum, definieren sie Länge und Geometrie. An dieser Länge bestimmt, sind die Flächen gleichen Potentials selbstverständlich Kugeln, und der Raum erscheint uns notwendigerweise *isotrop*, d.h. ohne eine besondere Richtung. Unterstellen wir einmal, es gäbe einen Raum auch ohne Bezug auf eingelagerte Objekte, d.h. einen *absoluten Raum*, in dem sich die physikalischen Körper bei Drehung in eine bestimmte Richtung etwas ausdehnten⁵. Widerführe dies den einzelnen Körpern in verschiedenem Maße, wäre dieser absolute Raum tatsächlich beobachtbar, die Kongruenz aber eine fremde Vorstellung.

Wir müssen sehen, daß mikroskopische Feinheit der Messung nicht unmittelbar geometrische Eigenschaften auch besser zeigt. Die Ungleichförmigkeit der Materieverteilung auf atomaren Längenskalen macht vieles eher schwieriger durchschaubar. Grobheit der Messung ist auch Mittelung über kleinskalige Besonderheiten und des-

⁵In der Aristotelischen Physik war die Richtung senkrecht zur Erdoberfläche eine ausgezeichnete Richtung, in der solche Erscheinungen hätten erwartet werden können.

halb in manchen Fällen durchaus notwendig⁶. So kann die Beobachtung Galileis, daß alle Körper gleich schnell fallen, nur bei grober Messung gefunden werden. Man muß schon erhebliche Sorgfalt bei der Präparation eines genauen Experiments aufwenden, um diese Beobachtung bestätigt zu finden [41, 20, 1]. Das ist Ausdruck der Tatsache, daß Beobachtungen die Anwendbarkeit des Gesetzes und nicht das Gesetz selbst prüfen. Euklid, so wird berichtet, hat seine Figuren in den Sand gezeichnet⁷.

Die Eigenschaft der Kongruenz fester Körper kann nur im Groben gelten, weil es ideal feste Körper nicht gibt: Zum einen gestatten alle Körper innere Bewegung (Schallwellen) und im ungünstigsten Fall auch plastische Verformung. Wie man bei der Begründung der Thermodynamik gelernt hat, verstärkt sich diese innere Bewegung mit wachsender Temperatur, und seit der Entdeckung der quantenmechanischen Bewegungsgesetze wissen wir auch, daß selbst am absoluten Nullpunkt der Temperatur die Bewegung der einzelnen Atome nicht vollständig zur Ruhe kommt. Zum anderen weiß man, daß das Schwerfeld mit einer von Ort zu Ort variierenden Weltkrümmung beschrieben werden muß und daß deshalb die prinzipielle wie praktische Bewegung eines ausgedehnten Körpers in vollständiger Starre nicht möglich ist. Es reicht für die Entdeckung der Geometrie aber aus, daß die Eigenschaft der Kongruenz fester Körper nur im Groben gilt.

Eine ebenso wichtige Einschränkung gibt es beim Vergleich von Lichtstrahl und Gerade. Auch ein Lichtstrahl hat prinzipiell immer eine Öffnung (erzwungen vom zweiten Hauptsatz der Thermodynamik) und eine Unschärfe (hervorgerufen durch die Beugung an vermessenen und vermessenden Gegenständen). Mit der Platonischen absoluten Setzung des Lichtstrahls als Gerade muß man also auch den Einwand Aristoteles' sehen⁸. Prinzipiell spielt aber gerade in der Relativitätstheorie das Licht eine besondere Rolle: Man kann die Theorie der Messung direkt auf die Lichtausbreitung (Kapitel 5) und die Existenz von Zeitnormalen (Atomuhren) stützen [34, 90, 94, 92]. Dabei ist die Atomuhr selbst ein durchaus kompliziertes Gebilde und weit jüngeren Datums als die mechanischen Begriffe, mit denen wir operieren werden. Man hat immer den Eindruck einer tiefliegenden Konspiration der Bewegungen, die einen einfach geometrisierbaren Zeitbegriff überhaupt möglich machen [8].

So wie Lage- und Formveränderungen von Körpern nur relativ zueinander gemessen werden können und deshalb eine Geometrie des Raums gestatten, so messen wir auch den Ablauf von Bewegungen gegeneinander und erfahren so die *Zeit*. Wieder

⁶Auch ist die Glättung kleinskaliger Störungen ein mit Absicht eingesetztes Mittel, die Genauigkeit makroskopischer Experimente zu erhöhen.

⁷Das betont die Notwendigkeit eines strikten Beweises, nicht die Ungenauigkeit der Methode. Man muß sehen, daß das Konstruieren mit Zirkel und Lineal bis zur Erfindung der Logarithmentafel die genaueste Methode zur Lösung mathematischer Aufgaben war [110].

⁸„Und es ist nicht einmal wahr, daß die Geodäsie sich nur mit sinnlichen und vergänglichen Größen beschäftige; sonst müßte sie mit den vergänglichen Dingen selbst vergehen. Ebensowenig handelt die Astronomie nur von sinnlichen Größen und dem sichtbaren Himmel. Die sinnlichen Linien sind ja auch nicht diejenigen, von denen der Vertreter der Geometrie spricht.“ (Aristoteles, *Metaphysik*, Buch B.2, Übers.F.Bassenge, Aufbau-Verlag Berlin 1960)

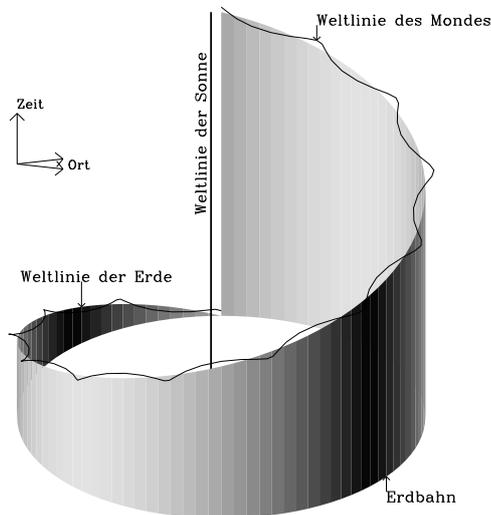


Abbildung 2.3: Fahrplan von Erde und Mond

Die Weltlinie der Erde ist eine Schraubenlinie. Die Palisade zeigt ihre Projektion in den Ortsraum, eine Kepler-Ellipse. Im Gegensatz zu dieser Projektion ist die Weltlinie selbst nicht geschlossen. Die Weltlinie des Mondes – als schwarze Linie angedeutet – windet sich um die der Erde.

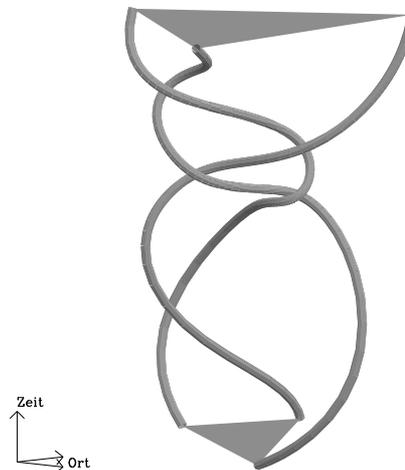
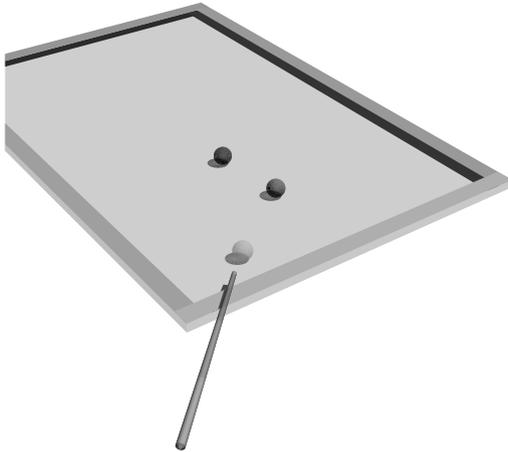


Abbildung 2.4: Spaghetti-Diagramm der Bewegung dreier Körper

Die Weltlinien dreier sich in einer Ebene bewegender Körper sind zusammen mit den Dreiecken des Anfangs- und des Endzustands dargestellt [8].

ist für die Präparation eines physikalischen Begriffs Zeit vorauszusetzen, daß das periodische System, welches das Zeitmaß definieren soll, gleiche Einheiten produziert, auch wenn es zu verschiedenen Zeiten in Gang gesetzt wird. Ohne eine solche zumindest in erster Näherung generelle Unabhängigkeit des Zeitlaufs von der Zeit selbst ist die Erfahrung einer meßbaren Größe schwer vorstellbar. Dabei erscheint der Begriff der Zeit zunächst völlig getrennt von räumlicher Erfahrung. Auf ideale Uhren und Maßstäbe hat nicht nur Positions- und Orientierungswechsel keinen Einfluß, auch die Bewegung scheint sie nur zu verändern, wenn Beschleunigungen zu störenden Trägheitskräften Anlaß geben. Es scheint, daß man eine Normaluhr transportieren kann, um alle anderen Uhren nach ihr zu stellen, um auf diese Weise eine *absolute Zeit* zu definieren. Ob zwei Ereignisse gleichzeitig sind oder nicht, scheint eine zweifelsfrei und endgültig entscheidbare Frage zu sein. Dennoch ist das Studium des zeitlichen Ablaufs einer Bewegung immer das Studium einer Figur in Raum und Zeit. Dieses Produkt aus Raum und Zeit nennen wir *Welt*. Ein Punkt der Welt ist charakterisiert durch die Lage im Raum und einen Zeitpunkt. Wir nennen ihn *Weltpunkt* oder *Ereignis*. Die Geschichte der Bewegung eines Punktes im Raum ist eine *Weltlinie*, die wir in ihrer Gesamtheit auch als eine Art *Fahrplan* ansehen können (Abb. 2.1, 2.2). Unser Fahrplan ist die graphische Darstellung von Zeitab-



Der Billardtisch ist unser Modell eines zwei-dimensionalen Raumes, in dem Massenpunkte miteinander nur beim Stoß wechselwirken. Von der Größe der Billardkugeln wollen wir gerade absehen und alle Effekte vernachlässigen, die dadurch möglich werden, daß die Kugeln keine Punkte sind.

Die vordere Kugel wird gegen die anderen gestoßen. Je zentraler die anderen Kugeln getroffen werden, desto mehr Bewegung wird ihnen übertragen. In der Näherung, welche die Drehung der Kugeln vernachlässigt, streben die Kugeln nach dem Stoß in rechtem Winkel auseinander. Im Bild links ist die Lage der Kugeln zu vier Zeitpunkten festgehalten. Rechts sind diese vier Zeitpunkte übereinander dargestellt, es entsteht der Fahrplan des Stoßes mit den Weltlinien der drei Kugeln.

Abbildung 2.5: Der Billardtisch

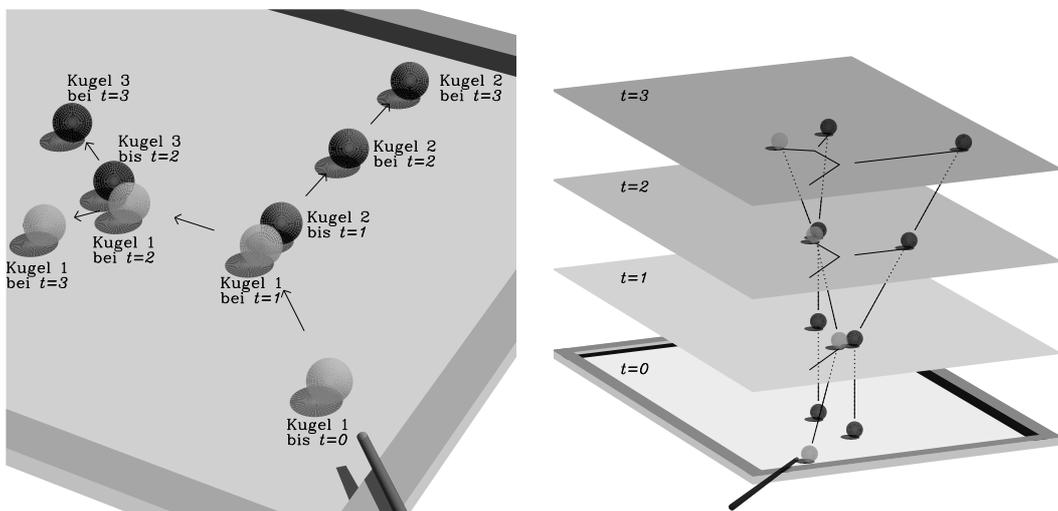


Abbildung 2.6: Der Billardstoß

laufen, auch solcher, die nicht durch Anordnung geregelt werden. Deshalb fügen wir gleich noch den Fahrplan von Erde und Mond (Abb. 2.3) und den für alles weitere ganz wichtigen Fahrplan eines symmetrischen *Stoßes* an, wie man ihn sich am besten auf dem Billardtisch vorstellt (Abb. 2.5). Billardkugeln sind ja alle gleich, und wenn zwei mit entgegengesetzt gleichen Geschwindigkeiten aufeinandergestoßen werden, rollen sie mit entgegengesetzt gleichen Geschwindigkeiten auseinander.

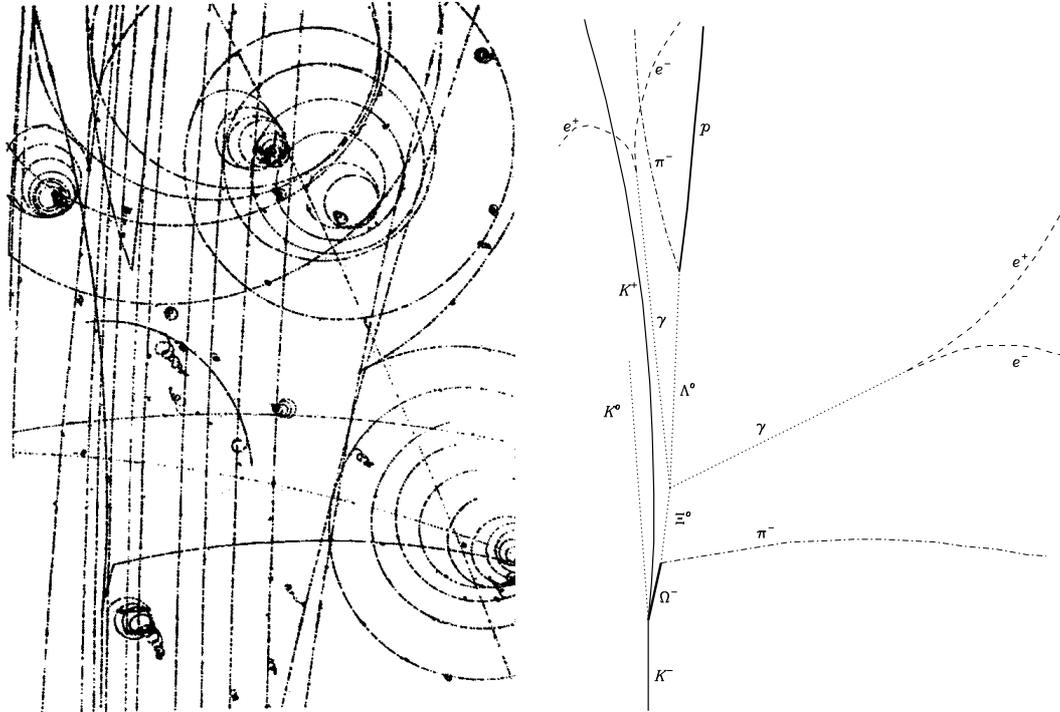


Abbildung 2.7: Spuren in der Blasenkammer

In der Blasenkammer verfolgen wir das Billardspiel mit den Elementarteilchen an Hand der Spuren, die sie hinterlassen, wenn sie elektrisch geladen sind. Die Krümmung dieser Spuren wird durch ein äußeres Magnetfeld erzeugt und erlaubt, den Impuls der entsprechenden Teilchen zu bestimmen. Die Stärke der Spuren läßt Rückschlüsse auf Masse und Energie der Teilchen zu. Zusammen mit den Erhaltungssätzen für Energie und Impuls kann man auch die ungeladenen Teilchen bestimmen, die keine Spuren hinterlassen. Hier ist das Schema einer berühmten Aufnahme gezeigt, in der das Ω^- -Hyperon vermessen werden konnte [97]. Ein K^- -Meson aus dem Beschleuniger tritt von unten ins Bildfenster, trifft auf ein Proton der Blasenkammerfüllung und bildet ein Ω^- -Hyperon zusammen mit einem ungeladenen K^0 und einem K^+ -Meson, dessen Spur oben aus dem Bild verschwindet. Das Ω^- hinterläßt eine kurze Spur, die zeigt, daß es elektrische Ladung trägt und seine Lebensdauer in der Nähe von 10^{-11} s liegt, und zerfällt in ein ungeladenes Ξ^0 -Hyperon und ein π^- -Meson, dessen Spur nach rechts verschwindet. Das spurlose Ξ^0 -Hyperon zerfällt in drei andere ungeladene Teilchen, ein Λ^0 -Hyperon und zwei Photonen (γ). Die drei Teilchen hinterlassen selbst keine Spur, wohl aber ihre Zerfallsprodukte. Das Λ^0 -Hyperon zerfällt in ein Proton- π^- -Paar, die Photonen erzeugen beim Stoß mit anderen Protonen der Kammerfüllung Elektron-Positron-Paare, die charakteristische Schneckenpaare zeichnen. Durch einen glücklichen Umstand sind selbst noch diese Teilchen der 4. Generation zu sehen, weshalb der gesamte Prozeß rekonstruiert werden kann.

Nur der Winkel bleibt unbestimmt. Er hängt davon ab, wie zentral der Stoß ist⁹, so

⁹Die Kunst besteht ja u.a. gerade darin, den Lauf der Kugeln durch geeigneten Einsatz der Nicht-zentralität zu lenken. Wir werden davon aber absehen und so tun, als könnten wir sie nicht beein-

daß der Fahrplan von Abbildung 2.8 entsteht.

Nun können wir den Stoß zweier Billardkugeln darstellen, von denen die eine vor dem Stoß ruht (Abb. 2.9). Der Versuch zeigt, daß beim zentralen Stoß die getroffene Kugel die Bewegung vollständig übernimmt und die stoßende Kugel einfach liegenbleibt. Ist der Stoß nicht zentral, rollen die Kugeln in angenähert rechtem Winkel auseinander. Die Figur der Abbildung 2.9 entsteht aus der von Abbildung 2.8, indem wir zu jeder Geschwindigkeit eine andere, allen gemeinsame Geschwindigkeit addieren. Diese Geschwindigkeit wird so bestimmt, daß sie die Anfangsgeschwindigkeit der rechten Kugel in Abbildung 2.8 kompensiert. Christiaan Huygens war der erste, der wie in Abbildung 2.10 [61] die additive Zusammensetzung der Geschwindigkeiten benutzte, um die Stoßgesetze herzuleiten. Er betrachtet den Ablauf mechanischer Bewegungen in einer gefügten Umgebung, die wir *Bezugssystem* nennen können. Die Markierungen auf einem großen und festen Gegenstand dienen als Bezug für Koordinaten im Raum, der Ablauf einer überall kontrollierbaren Uhr als Bezug für die Zeitkoordinate. Das Ufer ist ein Bezugssystem, das Boot ein anderes. Beide bewegen sich gegeneinander. Die Beschreibung der Bewegung unterscheidet sich durch eine feste Geschwindigkeit (die des Bootes), mit der die von dem einen Beobachter notierten Geschwindigkeiten zusammengesetzt werden müssen, um die von dem anderen festgestellten Bewegungen zu erhalten. Huygens setzt additive Zusammensetzung voraus, wie es uns zunächst selbstverständlich erscheint.

Wir können hier das erste Mal erahnen, wie wir aus mechanischen Gesetzen auf geometrische Zusammenhänge schließen werden, und auch, daß diese geometrischen Zusammenhänge ganz anders aussehen können, als wir das aus der euklidischen Geometrie gewohnt sind. Schließlich sollten in der zu erwartenden Geometrie der Fahrpläne die Figuren in den Abbildungen 2.8 und 2.9 kongruent sein: Bis auf die Orientierung in der Raum-Zeit – d.h. bis auf eine gemeinsame Geschwindigkeit – beschreiben beide den gleichen physikalischen Vorgang. Der Kegel in Abbildung 2.8 wird bei oftmaliger Wiederholung des Stoßes tatsächlich im Ganzen realisiert. Im einzelnen Versuch beobachtet man nach dem Stoß eine Bewegung, deren Weltlinien zwei gegenüberliegende Mantellinien eines Kegels sind. Der Kegel ist ebenso auffaßbar als Gesamtheit der Weltlinien der Bruchstücke einer Explosion, wenn diese alle mit gleicher Geschwindigkeit den Explosionsort verlassen (Abb. 2.11).

Wollen wir von der Geometrie des Raums zur Geometrie der Welt übergehen, ziehen wir uns zunächst auf die Erwartung zurück, daß auch die Bewegungen in der Welt durch Spiegelungen erzeugt werden können. Im Gegensatz zu den Spiegelungen des Raums lassen sich Spiegelungen in der Welt in gewisser Weise mechanisch anschaulich realisieren und von der Beobachtung her definieren. Haben wir das getan, können wir dann die Geometrie entwickeln. Spiegelung einer geraden Weltlinie heißt nun Spiegelung einer unbeschleunigten Bewegung. Wenn wir zunächst also vom Pegasus der Phantasie heruntersteigen wollen¹⁰ und nicht nach den möglichen

flüssen. Beim Elementarteilchenbillard der großen Beschleuniger ist das ja auch der Fall (Abb. 2.7).

¹⁰ „Wenn wir an etwas arbeiten, dann steigen wir vom hohen logischen Roß herunter und schnüffeln am Boden mit der Nase herum. Danach verwischen wir unsere Spuren wieder, um die Gottähnlich-

Geometrien der Welt, sondern nach der physikalisch erfahrbaren fragen, müssen wir uns die mechanische Spiegelung mechanischer Bewegung ansehen. Dabei wird sich zeigen, daß die Wellenphänomene, mechanisch erklärt, eine sonderbare absolute Orientierung in der Welt zu vermitteln scheinen. Die damit verbundenen Fragen, die im Grundzug dargestellt werden sollen, führten schließlich A.Einstein im Jahre 1905 zur Relativitätstheorie. H.Minkowski etablierte diese als tatsächliche Geometrie der Welt. F.Klein identifizierte nun die Minkowski-Geometrie als Mitglied einer Familie von Geometrien, die wir in der Ort-Zeit-Ebene illustrieren werden: Es sind dann die neun Geometrien der Ebene [62, 63]. Bevor wir aber die charakteristischen Eigenschaften der Geometrie besprechen, wollen wir noch etwas zum physikalischen Hintergrund notieren.

2.2 Die Vermessung von Raum und Zeit

Wie soll man die grundlegenden Meßmethoden charakterisieren? Im Groben sehen wir uns mit drei verschiedenen Methoden beschäftigt, die es in Kombination gestatten, die Lage eines beobachteten Ereignisses in Raum und Zeit eindeutig festzustellen. Diese drei Methoden sind das *Anpeilen*, das *Anlegen von Meßplatten* und das *Abwarten*.

Beim *Anpeilen* versuchen wir, ein Fadenkreuz so zu positionieren, daß der Sehstrahl zum Objekt durch das Fadenkreuz geht. Das heißt, durch zwei Punkte (das Auge und das Objekt) geht eine Gerade, und die mögliche Aussage ist die *Inzidenz* weiterer Punkte mit dieser Geraden. Voraussetzung einer solchen Aussage ist die Geradlinigkeit der Lichtausbreitung, und hiermit sind wir wieder am Anfang. Bereits in der Antike ist der Zusammenhang zwischen Lichtstrahl und Gerade wesentlich. Platons Höhlengleichnis setzt ihn ebenso voraus wie Parmenides' Beweis, daß die Erde eine Kugel ist, und wie die Bestimmung des Abstandes der Sonne durch Anaxagoras. Man kann zugespitzt sagen, daß die Gerade wichtiger ist als der Punkt: Platon beschreibt letzteren als Schnitt zweier Strahlen. Diese Definition werden wir bei der Behandlung der abstrakten Spiegelung in neuem Gewande wiederfinden (Anhang A).

Euklid hat explizit formuliert, daß es die Lichtausbreitung ist, die Geraden physikalisch definiert [110]. Man kann wohl sagen, daß damit ein Integralprinzip regiert: Lichtstrahlen sind vor allem kürzeste Linien (in der Welt und/oder im Raum), wobei die Weglänge von der geometrischen durchaus abweichen kann, wenn wir einen Brechungsindex zu berücksichtigen haben¹¹. Es gilt das *Fermatsche Prinzip*. Auch der gespannte Faden, den der Gärtner zur Definition einer Geraden benutzt, verwirklicht ein solches Extremalprinzip¹²: Eine Gerade im Raum ist eine Linie, die mit einer mi-

keit zu erhöhen.“ (A.Einstein, zitiert in [121], S.72, wiederholt in [91]).

¹¹In der Wellentheorie des Lichts zeigt der Brechungsindex eine Veränderlichkeit der Phasengeschwindigkeit an, weshalb dann von einer minimalen Laufzeit längs des Strahls gesprochen werden kann.

¹²Die Tatsache, daß Lichtstrahlen und Bindfäden beide benutzt werden können, um Geraden mit

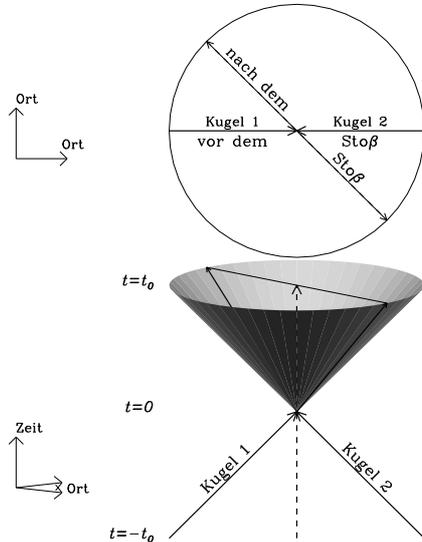


Abbildung 2.8: Fahrplan eines symmetrischen Stoßes

Zwei Billardkugeln mit entgegengesetzt gleicher Geschwindigkeit stoßen aufeinander. Nach dem Stoß bei $t = 0$ bewegen sie sich wieder mit entgegengesetzt gleicher Geschwindigkeit auseinander. Die Orte, die nach einer bestimmten Zeit erreicht werden können, bilden einen Kreis (bzw. eine Kugel aus dem Raum). Geht beim Stoß keine kinetische Energie verloren, ist der Durchmesser des Kreises zu einer Zeit $t = t_0$ nach dem Stoß gleich dem Abstand der Stoßpartner zur Zeit $t = -t_0$ vor dem Stoß.

Im oberen Teil der Abbildung sehen wir den Grundriß des Kegels mit zwei Vektorpaaren, welche die entgegengesetzt gleichen Geschwindigkeiten darstellen, mit der die Stoßpartner nach dem Stoß auseinanderstreben.

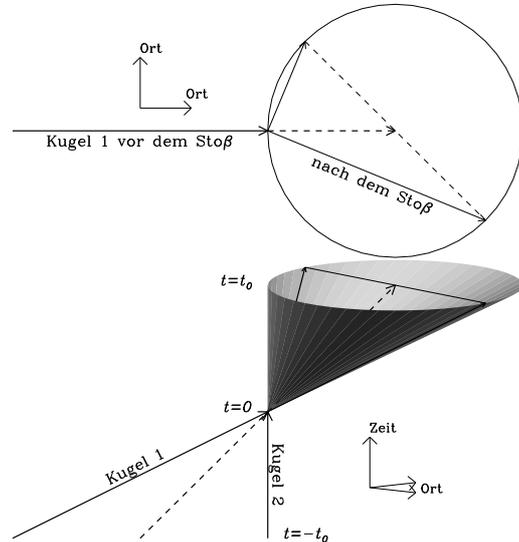


Abbildung 2.9: Fahrplan eines Billardstoßes

Hier ruht die zweite Kugel vor dem Stoß. Nach dem Stoß bewegen sich beide Kugeln mit entgegengesetzt gleicher Geschwindigkeit von gemeinsamen Schwerpunkt weg. Deshalb schneiden die möglichen Weltlinien zu einem festen Zeitpunkt wieder einen Kreis aus der Ortsebene.

Der obere Teil zeigt wieder den Grundriß des Kegels. Das zweite Vektorpaar aus der vorigen Abbildung bildet nun einen rechten Winkel, und die Verbindungslinien der Endpunkte solcher Vektorpaare schneiden sich, wie es sein muß, im Mittelpunkt des Kreises.

Die Abbildung entsteht aus der vorigen durch eine Scherung. Die Schnitte parallel zur Ortsebene sind jeweils identisch, nur gegeneinander um so mehr nach rechts verschoben, je später der zugehörige Zeitpunkt liegt.

nimalen Anzahl Atomabstände ausgefüllt werden kann¹³. Abbildung 2.13 zeigt das Schema eines Meßgeräts, das auf der Basis solcher Inzidenz einen Sichtwinkel auf einen materiell vermeßbaren Winkel zurückführt. – Wir merken hier an, daß keine anderen Konstruktionsprinzipien in der Physik solchen Erfolg haben wie die Extre-

einem gewissen Grad von Konsistenz zu definieren, erscheint dem *advocatus diaboli* als glücklicher Zufall, wenn nicht als Wunder [2]. Es ist das Wunder der Existenz der Geometrie.

¹³Atome überall! Der Faden sollte nicht zu sehr gestreckt werden, sonst fänden wir auch die Atomabstände gestreckt, und die durch Abzählen ermittelten Distanzen würden immer kleiner, bis der Faden reißt [2]. Die *maximale* ermittelte Distanz ist also das idealisierte unabhängige Maß.



Abbildung 2.10: Addition der Geschwindigkeiten

Dies ist Huygens' berühmte Zeichnung des Vergleichs zweier gegeneinander bewegter Beobachter: des Manns auf dem Ufer und des Manns im vorbeitreibenden Boot ([61], Bibliothek der ehem. kgl. preuss. Sternwarte Berlin). Huygens argumentiert als erster mit der universellen Subtraktion der Relativgeschwindigkeit des Beobachters, wenn ein Bewegungsablauf von einem sich selbst auch bewegenden Standpunkt aus beurteilt wird. Mit seinem Argument leiten wir aus der axiomatisch geforderten Figur in Abb. 2.8 die Figur in Abb. 2.9 ab. Bewegt der am Ufer Stehende die beiden Kugeln symmetrisch aufeinander zu, wobei die eine mit der Geschwindigkeit des vorbeigleitenden Bootes geführt wird, stellt man vom Ufer aus den Ablauf von Abb. 2.8, vom Boot aus den von Abb. 2.9 fest.

malprinzipien. Dabei geht es um Extrema der Werte von Wegen in einem abstrakten Konfigurationsraum (in denen jeder einzelne Freiheitsgrad des betrachteten Systems eine Dimension beisteuert und die Bewegungsgleichungen von zweiter Ordnung sind) oder Phasenraum (in dem jeder Freiheitsgrad zwei Dimensionen beisteuert, eine für die Lage und eine für den konjugierten Impuls, und in dem die Bewegungsgleichungen von erster Ordnung sind). Die Wege werden dabei im allgemeinen durch ein Integral bewertet, das *Wirkungsintegral* heißt, weil es im allgemeinen Produkte mit der physikalischen Dimension *Energie* \times *Zeit* summiert. Das tatsächliche Geschehen ist dann eine Kurve im Konfigurations- bzw. Phasenraum. Diese genügt einer Differentialgleichung zweiter bzw. erster Ordnung, die direkt als Extremalbedingung aus

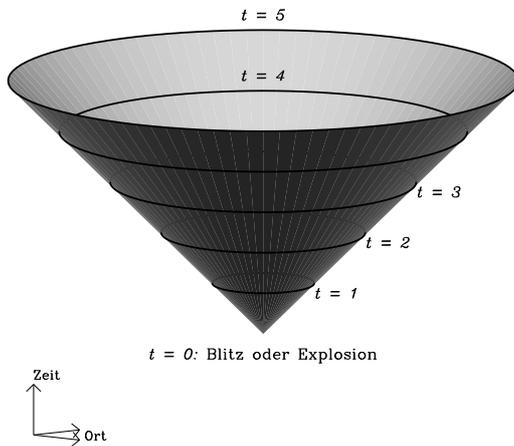


Abbildung 2.11: Fahrplan einer Explosion

Zu einem gegebenen Zeitpunkt, von dem ab wir hier die Zeit zählen, explodiert ein Gegenstand, dessen Bruchstücke alle die gleiche Geschwindigkeit haben sollen. Sie fliegen in alle Richtungen auseinander. Ihr Abstand vom Projektionszentrum ist proportional der verstrichenen Zeit. Damit sind ihre Weltlinien die Mantellinien eines Kreiskegels. Ist das Ereignis ein Blitz, setzt er ein Lichtsignal frei, das sich als Wellenfront ausbreitet. Die Wellenfronten sind die horizontalen Schnitte durch den Kegel. Die Mantellinien können wir als Weltlinien von Signalen ansehen.

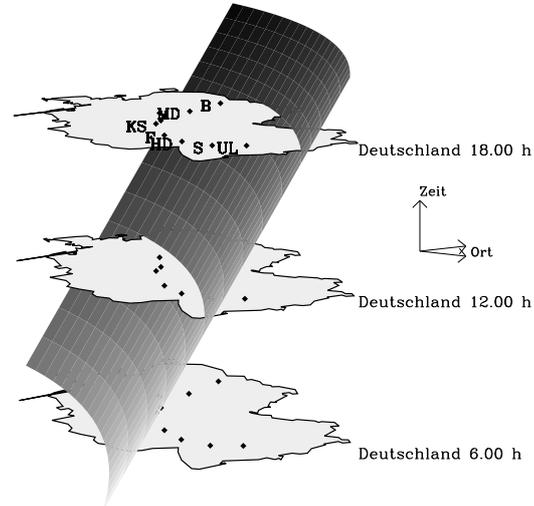


Abbildung 2.12: Fahrplan einer Wetterfront

Eine Wetterfront zieht von West nach Ost über Deutschland. Ihr Fahrplan ist eine Fläche. Wenn sich die Form nicht ändert und die Geschwindigkeit überall gleichförmig ist, wird aus dieser Fläche ein Zylinder. Ist die Front dazu noch geradlinig, finden wir eine Ebene. Wetterfronten und Wellenfronten unterscheiden sich hier nur durch die Geschwindigkeit, d.h. die Neigung der Fläche gegen die Vertikale.

dem Wirkungsintegral abgeleitet werden kann.

Beim *Anlegen* einer Meßlatte unterstellen wir, daß Meßplatten bewegt werden können, ohne sie wesentlich zu verändern (Abb. 2.14). Bei den Verschiebungen des Lineals nach der Eichung darf keine Veränderung am Lineal eintreten. Eine solche Veränderung könnte ohnehin nur im Vergleich des Verhaltens mehrerer Maßstäbe festgestellt werden. Umgekehrt können wir sie nur dann bedenkenlos vernachlässigen, wenn die Kräfte, die bei der Verschiebung des materiellen Lineals auftreten (Beschleunigungen oder Gezeitenkräfte), genügend klein gegen die Kräfte innerhalb des Lineals sind, die das Lineal fixieren bzw. die nötig wären, um die Struktur und damit auch die Distanz zwischen den Markierungen des Lineals plastisch zu verändern. Dieses Achtungszeichen muß aus der Sicht der Physik gesetzt werden. Es gibt eine theoretische Konstruktion von H.Weyl, in der die Geschichtsabhängigkeit der Längen das elektromagnetische Feld darstellen soll, und es gibt das Argument

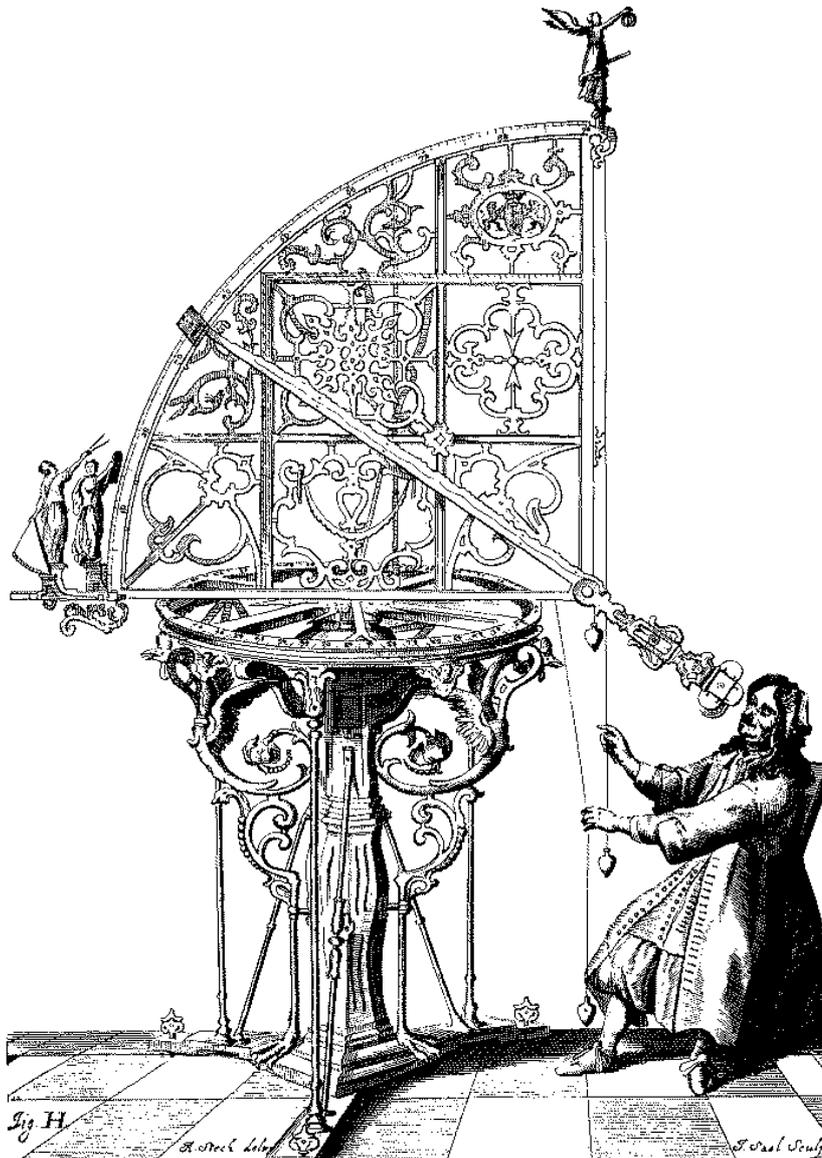


Abbildung 2.13:
Anpeilen

Das Bild aus dem ersten Band der *Machina coelestis* von Hevelius ([58], Bibliothek der ehem. kgl. preuss. Sternwarte Berlin) zeigt die Benutzung eines Quadranten. Nach der Peilung kann Höhe und Azimut des Sterns auf den Teilungen abgelesen werden.

Einsteins, wegen der Schärfe der Spektrallinien könne es eine solche Abhängigkeit charakteristischer Längen von der Geschichte nicht geben. – Auch müssen wir beim Ablesen einer Meßlatte voraussetzen, daß wir dies an beiden Enden gleichzeitig tun und also wissen, was gleichzeitig ist. Dies ist entscheidend bei der Vermessung bewegter Gegenstände (Abb. 2.15). Wir kennen eine analoge Bedingung bereits aus der gewöhnlichen Längenmessung: Die Strecke und die Meßlatte müssen parallel sein, wenn aus der Ferne gemessen wird, etwa zwischen den Backen einer Schieblehre oder zwischen den Peilstrahlen einer Weitsprungsmeßanlage.

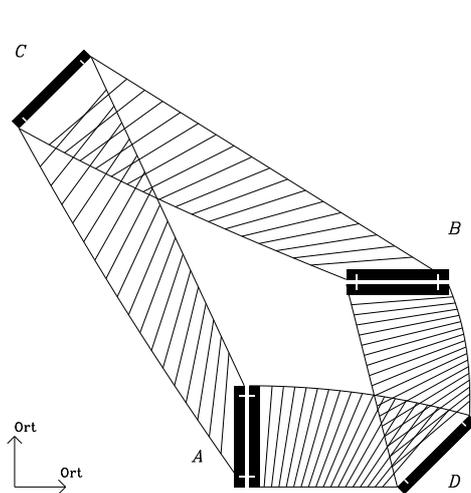


Abbildung 2.14: Das Anlegen von Maßblättern

Längen können durch Anlegen eines Maßstabs bestimmt werden, wenn verschiedene Maßstäbe bei kräftefreier Bewegung durch den Raum gegeneinander keine Veränderungen zeigen, die etwa auftreten könnten, wenn zwei Maßblätter erst bei A verglichen werden und dann auf verschiedenen Wegen (eine über C, die andere über D) nach B bewegt und erneut verglichen werden.

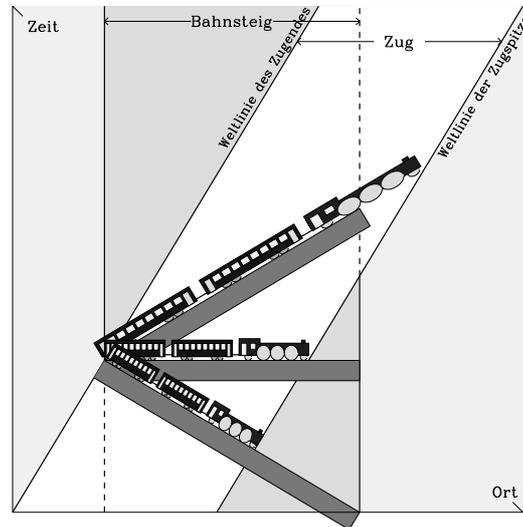


Abbildung 2.15: Gleichzeitigkeit und Längenmessung

Wenn wir die Länge eines bewegten Gegenstands mit einem Maßstab bestimmen wollen, müssen wir an beiden Enden gleichzeitig ablesen. Lesen wir an der Spitze zu früh ab, ist das Ergebnis zu klein, lesen wir zu spät ab, ist es zu groß.

Diesem Problem werden wir in der Relativitätstheorie wieder begegnen (Abb. 5.16).

Beim *Abwarten* messen wir die ablaufende Zeit. Stellen wir uns ein abgedunkeltes Fahrzeug (etwa das Innere einer Raumstation) vor, dann ist die Zeit ohnehin das einzige, was wir von der äußeren Bewegung durch Raum und Zeit erfahren. Die Messung des Zeitablaufs geschieht elementar, indem wir mit einem periodischen System (d.h. mit einer Uhr) zählen, das wir beobachten können. Wie schon bei der Längenmessung besprochen, dürfen Uhren sich durch die Bewegung des Fahrzeugs nicht verändern, um eindeutig verwendet werden zu können. Wieder kann diese Eigenschaft nur durch Vergleich verschiedener Uhren begründet werden. Wieder kann diese Eigenschaft nur erwartet werden, wenn die bei der Bewegung auf die Uhr ausgeübten Kräfte deutlich kleiner als die Kräfte sind, die den periodischen Prozeß steuern, den wir ja ablesen wollen. Wer je eine Pendeluhr umstellen wollte, ohne ihren Gang zu unterbrechen, kann nachfühlen, daß dies durchaus eine Einschränkung ist. – Beobachten wir ein Objekt, das sich durch unser Labor bewegt, benötigen wir entweder Uhren an mehreren Stellen oder wir müssen den Zeitablauf aus der Ferne messen. Auch kann eine Uhr auf dem Objekt aus der Ferne abgelesen werden. In allen Fällen muß man auf Projektionseffekte gefaßt sein, wie sie auch bei der

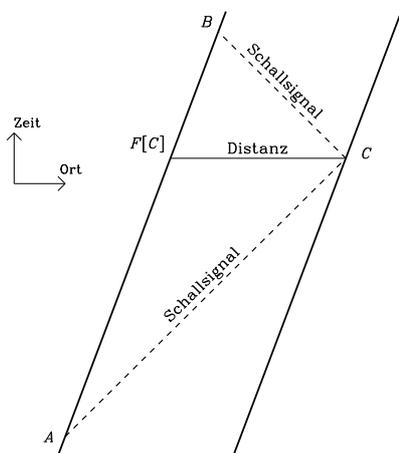


Abbildung 2.16: Das Echolot als Ortsbestimmung

Die Skizze zeigt die Weltlinie eines Beobachters und eines Gegenstands fester Entfernung, beide in Bewegung durch das hier ruhende Medium der Schallausbreitung. Dann können wir die Weltlinien der Schallsignale in beide Richtungen mit gleicher Neigung zeichnen. Die Bestimmung des Abstands $d[C, F]$ aus der Zeitdifferenz t_{AB} erfordert die Kenntnis der Beträge v_+ und v_- der relativen Signalgeschwindigkeiten:

$$t_{AB} = d[C, F] \left(\frac{1}{v_+} + \frac{1}{v_-} \right).$$

Längenmessung aus der Ferne auftreten. Solchen Effekte werden wir in Kapitel 5 begegnen.

Beim *Loten* fassen wir alle drei Methoden zusammen. Wenn wir mit einem Schallsignal ein Objekt erfassen können, ist auch sein Ort zum Zeitpunkt des Erfassens berechenbar (Abb. 2.16). Allerdings benötigen wir dazu Informationen über das Verhältnis der Schallgeschwindigkeit relativ zum Meßgerät in beiden Richtungen. Wie wir später sehen werden, enthebt uns die Benutzung elektromagnetischer Wellen dieser Mühe, weil die Lichtgeschwindigkeit sich gerade *nicht* ändert, wenn sie mit anderen Geschwindigkeiten zusammengesetzt wird. Wenn wir also mit dem Radarstrahl ein Objekt erfassen können, haben wir für ein bestimmtes Ereignis in der

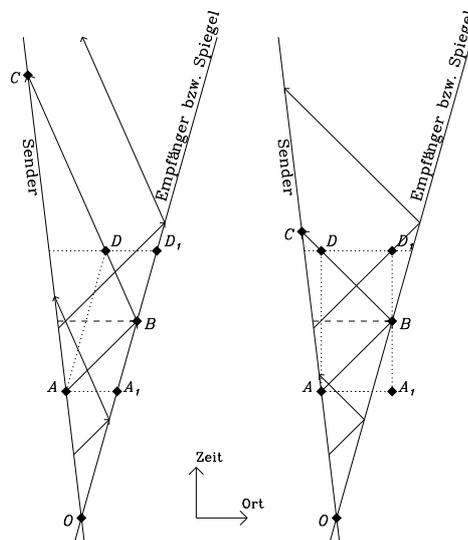


Abbildung 2.17: Der Doppler-Effekt

Wir sehen die Weltlinien eines Senders und eines Reflektors in Bewegung. Auf der linken Seite bestehen die Signale aus Teilchen, die bei der Spiegelung das Vorzeichen ihrer Relativgeschwindigkeit *zum Spiegel* ändern. Das Parallelogramm AA_1D_1D ist an der Weltlinie des Spiegels ausgerichtet. Auf der rechten Seite besteht das Signal aus einer Welle. In diesem Fall ändert sich bei der Spiegelung das Vorzeichen der Geschwindigkeit *relativ zum Träger*. Das Parallelogramm AA_1D_1D ist an der Geschwindigkeit des Mediums ausgerichtet (die in unserer Zeichnung Null ist). Die Periodenänderung ist $(t_C - t_O) : (t_A - t_O)$.

Die Periodenänderung $(t_B - t_O) : (t_A - t_O)$ am Spiegel heißt *Doppler-Effekt*.

Geschichte des Objekts vier Koordinaten: die Sendezeit des Signals, das von diesem Ereignis zurückgeworfen wird, die Gesamtlaufzeit des zurückgeworfenen Signals, und die Richtung, in die das Signal gesandt wurde, bzw. die, aus der es zurückkommt. Unter den idealen Bedingungen der Lichtausbreitung gestattet uns die Messung der Laufzeit eines Signals nicht nur die Abstandsbestimmung, sondern zusammen mit der Richtungs- und Zeitbestimmung die vollständige Koordination des Ereignisses, zu dem das Signal zum Sender zurückgeworfen wird [17, 34].

Das Echo kann benutzt werden, um die *Geschwindigkeit* des Spiegels zu bestimmen. Nehmen wir an, der Sender arbeitet mit einer bestimmten Periode. Seine Signale werden vom Spiegel reflektiert. Am Sender wird nur dann eine unveränderte Periode gefunden, wenn sich der Abstand des Spiegels nicht verändert. Bewegt sich aber der Spiegel relativ zum Sender (Abb. 2.17), findet man eine veränderte Periode. Zählen wir eine Geschwindigkeit positiv, wenn sich das Objekt in der Richtung des emittierten Signals bewegt, ergibt sich

$$\frac{t_C - t_O}{t_A - t_O} = \frac{v_{\text{Signal}} - v_{\text{Emitter}}}{v_{\text{Signal}} - v_{\text{Reflektor}}} \frac{v_{\text{Reflektor}} - v_{\text{refl. Signal}}}{v_{\text{Reflektor}} - v_{\text{Emitter}}}.$$

Zunächst müssen wir zwei Fälle unterscheiden, Signale in Teilchenform und solche in Wellenform. Sind die Signale Teilchen fester Anfangsgeschwindigkeit relativ zum Sender und werden diese Teilchen nach dem Huygensschen Gesetz reflektiert ($v_{\text{refl. Signal}} = 2v_{\text{Reflektor}} - v_{\text{Signal}}$, Abb. 3.12), so ist die Periodenänderung eine Funktion der Relativgeschwindigkeit von Spiegel und Sender allein. Technisch benutzt werden aber akustische oder optische Wellen, deren Periodenänderung als Änderung der akustischen oder optischen Frequenz gemessen werden kann. Die Geschwindigkeit von Wellen ist aber zunächst relativ zum transportierenden Medium fest ($v_{\text{refl. Signal}} = 2v_{\text{Medium}} - v_{\text{Signal}}$) und bezieht sich nicht auf Sender oder Spiegel. Deshalb hängt der Effekt nun einzeln von den Geschwindigkeiten des Senders und des Spiegels relativ zum Medium ab. Bis hierher benötigen wir nur eine Uhr, die des Senders, um den Effekt zu bestimmen. Setzen wir zusätzlich die Existenz einer universellen Zeitkoordinate voraus, können wir auch mit der Periode des Signals am Spiegel selbst vergleichen. Wir erhalten dann

$$\frac{t_B - t_O}{t_A - t_O} = \frac{v_{\text{Signal}} - v_{\text{Emitter}}}{v_{\text{Signal}} - v_{\text{Reflektor}}}.$$

Das ist der *Doppler-Effekt*. Im Falle von Teilchen sollte $|v_{\text{Signal}} - v_{\text{Emitter}}|$ eine gegebene Konstante sein, im Fall von Wellen $|v_{\text{Signal}}|$ selbst. In beiden Fällen zeigt der Doppler-Effekt, daß die Geschwindigkeit des Signals einen endlichen Wert hat und die Ausbreitung *nicht instantan* ist. Im akustischen Fall hängt der Doppler-Effekt von den Relativgeschwindigkeiten des Senders und des Empfängers zum Medium ab. Der optische Doppler-Effekt erhält seine endgültige Form erst in der Relativitätstheorie (Abb. 5.9).

Das klassische Vergleichssystem für die Länge ist die Elle, d.h. ein fester Körper, in dessen Atomgefüge die Markierungen eingepägt sind. Die charakteristischen

Abstände im Atomgefüge werden durch die Quantenmechanik der Atome bestimmt, deren natürliche Einheit der *Bohrsche Radius* des Wasserstoffatoms ist. Vergleiche mit einer Elle sind also Vergleiche mit diesem Bohrschen Radius. Wir können erwarten, daß er unverändert bleibt, wenn sich die einzelnen Faktoren nicht ändern. Die gleichen Gesetze der atomaren Mechanik, die den Bohrschen Radius als charakteristische Länge feststellen, bestimmen auch die Festkörperstruktur und die Abstände der Atome darin. Könnte man die Konstanten, die den Bohrschen Radius bestimmen, anders wählen, würde sich proportional zum Bohrschen Radius auch jede Elle ändern.

Das klassische Vergleichssystem für die Zeit ist der Lauf der Planeten, die *Ephemeridenzeit*. Sie ist durch das dritte Keplersche Gesetz¹⁴ bestimmt und ist allen Störungen und Unwägbarkeiten des Planetensystems unterworfen. Erst die Etablierung der *Atomzeit* hat uns einen quantenmechanischen Vergleichsmaßstab geschaffen. Es sind die Übergänge in den Spektren der Atome, deren Frequenzen sich auf die Rydberg-Konstante und die Sommerfeldsche Feinstrukturkonstante zurückführen lassen. Die Stabilität des Atombaus sorgt wieder für die Stabilität der Frequenzen und des durch sie bestimmten Zeitnormalis.

Die charakteristischen Längen und Zeiten sind von den involvierten Kräften und Bewegungen bestimmt. Sie sind so einfach zu haben, weil stationäre Zustände nicht kontinuierlich veränderlich und in gewissem Maße stabil sind. Dies lehrt uns im Einzelnen die Quantenmechanik, die aber nicht unser Gegenstand ist. Wie wir schon besprochen haben, erscheint der Raum isotrop, wenn sich die denkbare Orientierungsabhängigkeit des symmetrischen Stoßes gegen die der Kräfte herauskürzt. So ist die Kugel einerseits durch die Endpositionen definiert, die gleiche Stoßpartner nach einem symmetrischen Stoß erreichen können. Andererseits ist sie auch definiert als Äquipotentialfläche des Schwerepotentials oder des elektrostatischen Potentials,

$$\text{Abstand} \propto \frac{1}{\sqrt{\text{Feldstärke}}},$$

wobei die Struktur der Quelle die prinzipielle Ungenauigkeit herbeiführt, oder als Fläche gleicher Intensität einer symmetrischen Quelle,

$$\text{Abstand} \propto \frac{1}{\sqrt{\text{Intensität}}}.$$

Auf der Erde haben wir prinzipiell die Möglichkeit, die Anwendbarkeit der geometrischen Aussagen unmittelbar zu testen. Bei der Vermessung des Kosmos dagegen muß diese Anwendbarkeit zumindest zum Teil vorausgesetzt werden. So bestimmt bei den Parallaxen die Theorie, was gemessen wird. Im Voraus müssen die geometrischen Zusammenhänge bekannt sein, damit die Messungen überhaupt interpretiert werden können¹⁵. Bei der Bestimmung der *trigonometrischen Parallaxe* benutzen

¹⁴Die Quadrate der Umlaufzeiten verhalten sich wie die Kuben der großen Halbachsen.

¹⁵Um mit Einstein zu sprechen, bestimmt *immer* erst die Theorie, was gemessen wird. So tief

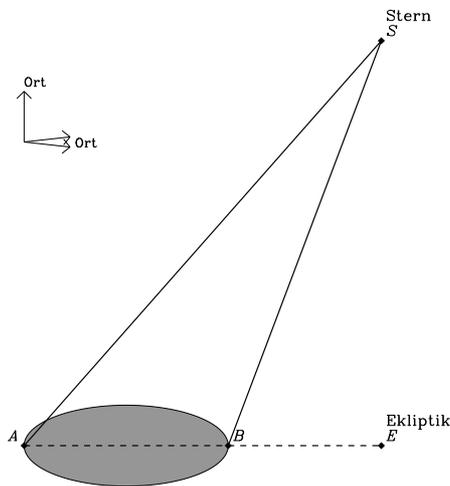


Abbildung 2.18: Trigonometrische Parallaxe

Die Bestimmung der trigonometrischen Parallaxe setzt voraus, daß sich die Winkel eines Dreiecks zu einem gestreckten Winkel summieren. Zwei der Winkel werden als scheinbare Höhe über der Ekliptik beobachtet, der dritte mit dem Erdbahndurchmesser auf die Entfernung hochgerechnet. W.Bessel hat diese Methode entwickelt, und der erste so bestimmte Stern war 61 Cygni. Sein Winkel $\angle ASB$ ist etwa 0.3 arcsec, seine Distanz $3.4 \text{ pc} \approx 10^{14} \text{ km}$.

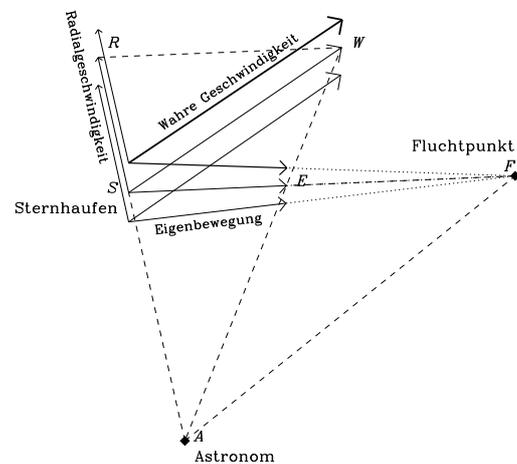


Abbildung 2.19: Bewegungsparallaxe

Der Beobachter sieht geometrisch die Eigenbewegung \vec{SE} als Projektion der wahren Bewegung \vec{SW} eines Sternhaufens auf seine Gesichtsfeldebene und bestimmt dabei einen Fluchtpunkt F . Der Winkel $\angle SAF$ ist gleich dem Winkel $\angle RSW$ der Radialkomponente mit der wahren Bewegung. Es muß dann $SE = SR \tan(\angle RSW)$ gelten. Nun messen wir die Eigenbewegung der Sterne im Winkelmaß, die Radialgeschwindigkeit dagegen im Längenmaß. Der Faktor zwischen beiden ist die Entfernung.

wir den Durchmesser der Bahn der Erde um die Sonne als Basis. Dann messen wir zwei Winkel: die maximale und die minimale Höhe des untersuchten Sterns über der Ekliptik (Abb. 2.18). Mit der Basis AB und den beiden Winkeln $\angle SAE$ und $\angle SBE$ ist das Dreieck $\triangle ABS$ konstruierbar und auswertbar. Zur Bestimmung einer *Bewegungsparallaxe* (Abb. 2.19) wird als Basis die Radialgeschwindigkeit eines Sternhaufens gemessen und über einen Winkel auf die Eigenbewegung umgerechnet, deren scheinbare Größe bestimmt werden kann. Das Verhältnis der wahren zur scheinbaren Eigenbewegung ist dann die Entfernung.

Wichtig für die Entfernungsbestimmung ist neben der scheinbaren Ausdehnung (Abb. 2.20) auch die scheinbare Helligkeit. Hier ist die Basis wieder die Fläche des Detektors in der Hand des Beobachters. Die in diese Detektorfläche fließende Lei-

wollen wir aber hier nicht suchen. Von Eddington soll das Aperçu stammen, es sei immer eine gute Strategie, einer Beobachtung so lange zu mißtrauen, bis sie durch eine gute Theorie beschrieben wird.

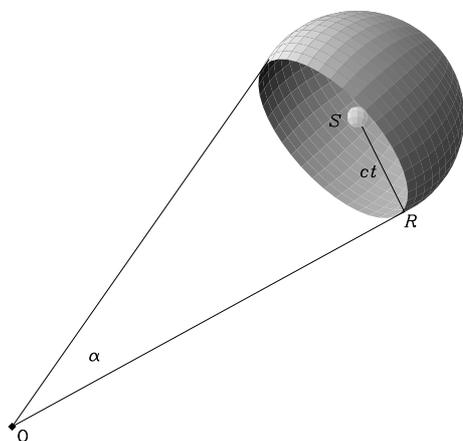


Abbildung 2.20: Scheinbare Ausdehnung
Die Beobachtung der Reflexion des Lichtblitzes einer Supernova gestattet den Schluß auf eine wirklichen Ausdehnung. Vergleichen wir diese mit der scheinbaren Ausdehnung (dem Winkel), finden wir wie bei der Bewegungsparallaxe die Entfernung. Der Abstand der Supernova 1987A in der großen Magellanschen Wolke läßt sich tatsächlich so ermitteln, weil die Ausdehnung des beobachteten Rings R proportional der Zeit t seit dem Ausbruch der Supernova S ist.

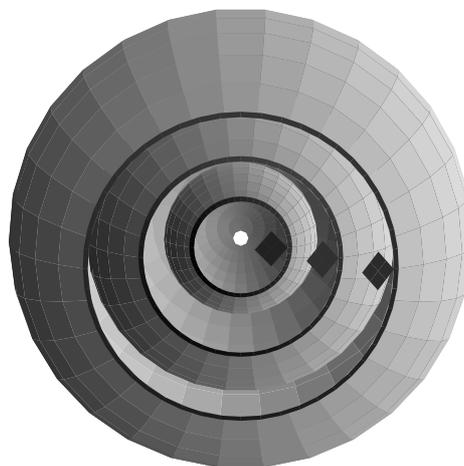


Abbildung 2.21: Intensität und Entfernung

Zu sehen sind drei Kugeln mit Ausschnitten, die von Strahlen aus dem Mittelpunkt begrenzt sind, wo wir uns eine Strahlungsquelle denken. Diese Ausschnitte wachsen mit der Größe der Kugel. Ein Detektor festen Querschnitts nimmt den Teil der Leistung der Quelle auf, den seine Fläche von der jeweiligen Kugelfläche beansprucht.

stung einer Strahlungsquelle ist ein Teil der Gesamtleistung der Quelle. Dieser Teil ist umgekehrt proportional der Kugelfläche, die um die Quelle durch den Detektor gezogen werden kann (Abb. 2.21). Die Kugelfläche nimmt ja unabhängig von ihrem Radius immer die Gesamtleistung der Quelle auf. Entfernungsbestimmungen auf der Basis scheinbarer Größen oder scheinbarer Helligkeiten sind zuerst immer Oberflächenmessungen für die Kugeln, die virtuell um den Standpunkt des Beobachters durch das beobachtete Objekt bzw. um das beobachtete Objekt und durch den Standpunkt des Beobachters gezogen werden können. Insoweit haben sie auch Bedeutung für die Kosmologie, wo das Quadrat der Entfernung wegen der möglichen Krümmung des Raums nicht mehr proportional der Kugelfläche sein muß (Kapitel 7). Die andere Basismessung ist das Volumen, das unter Voraussetzung der Homogenität der Verteilung der betrachteten Objektklasse durch Zählung der Objekte ermittelt werden kann. Die Einsteinschen Gleichungen für das Universum (Friedmannsche Gleichungen) und die kosmologische Rotverschiebung (Ausdruck der universellen Expansion) müssen bei der Bewertung der Ergebnisse berücksichtigt werden, sonst geben die beschriebenen Beobachtungen verschiedene Werte. Die Unterschiede lassen

sich aber direkt der Expansion und der Raumkrümmung zurechnen.