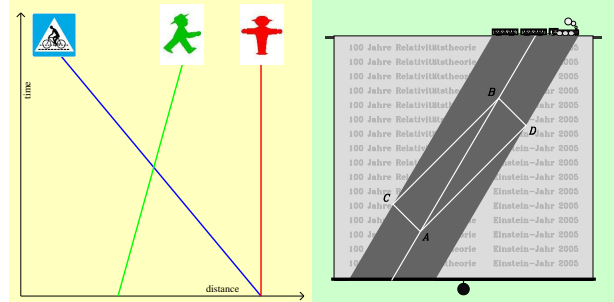


Wir erinnern uns:

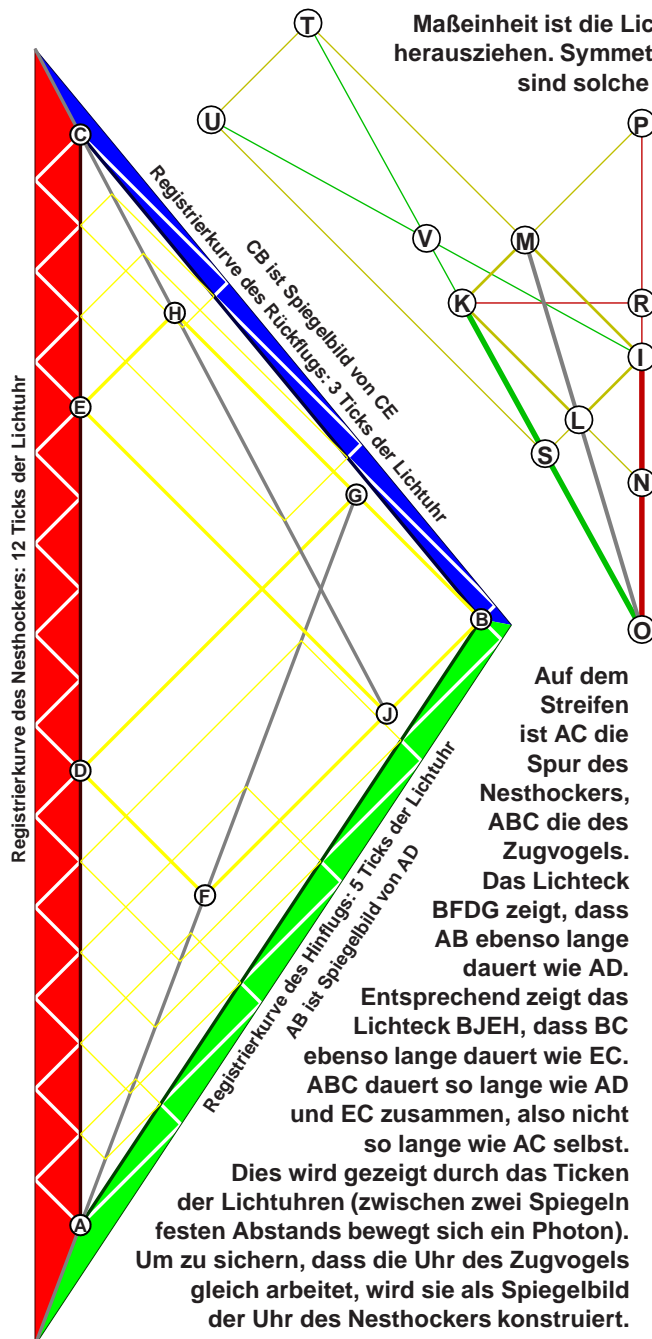
1. Kräftefreie (hier horizontale) Bewegung hinterläßt auf dem Registrierstreifen (der hier nach unten gezogen wird) **gerade** Linien (Galileisches Axiom).
2. Die Neigung der Linien gegen die Vertikale ist die **Geschwindigkeit**.
3. Längen von Strecken vergleichen wir mit Drehungen und Verschiebungen, die wir hier aus Spiegelungen erzeugen.



4. Auf einem Registrierstreifen ist die Länge von Strecken gerade die Dauer, gemessen an den Uhren und Prozessen, die in dem Objekt ablaufen, das die Spur gezogen hat.

ZEITDILATATION UND

ZWILLINGSPARADOXON



Maßeinheit ist die Lichtgeschwindigkeit, wenn wir den Streifen schnell genug herausziehen. Symmetrie wird mit dem Lichteck konstruiert. ILKM, ISUT, QNKP sind solche Lichtecke. Zur grauen Linie liegen I und K symmetrisch, ebenso P und T oder N und S. Zur roten Linie liegen K und Q symmetrisch, zur grünen I und U. OI und OK sind also **gleich lang**, sind Registrierkurvenstücke gleicher Dauer. Füllen wir von K das Lot auf OI, finden wir die Projektion R, und: OR ist länger als OI. Dies heißt **Zeitdilatation**. Die Zeitdilatation ist symmetrisch. Füllen wir von I das Lot auf OK, finden wir V. Wieder ist OV länger als OK. Die Zeitdilatation ist ein Effekt der **Perspektive**, und wir finden ihn, weil die Uhren, deren Spuren OI und OK sind, absolut **gleich** sind und **nicht** etwa durch Bewegung verändert werden.

Was sollen Drehungen auf dem Registrierstreifen sein? Wir erzeugen sie durch Spiegelungen. Die geometrischen Verhältnisse sollen mechanische Prozesse beschreiben, also muss die Spiegelung der Mechanik nachgebildet werden.

Die Vorzeichenumkehr der Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Objekt und Spiegel ist ein **Vorurteil**. Das Licht zeigt, dass die Lichtgeschwindigkeit selbst bei Spiegelungen das Vorzeichen wechselt und die Geschwindigkeit des Spiegels ohne Einfluss ist. Die Konstruktionsvorschrift für die Spiegelung lautet:

Lichtgeschwindigkeit bleibt Lichtgeschwindigkeit.
Das Ergebnis ist, dass Projektionen eines Intervalls länger als das projizierte Intervall sind, Prozesse in einem bewegten Objekt langsamer abzulaufen scheinen als Vergleichsprozesse am Ort des Beurteilenden. Das ist die Zeitdilatation. In einem Dreieck aus den Registrierkurven eines Zugvogels und der eines Nesthockers zeigt sich, dass der Umweg (auf dem Registrierstreifen) jetzt **kürzer** als die direkte Verbindung ist. Wenn der Zugvogel wieder beim Nesthocker ankommt, sind die Uhren und anderen Prozesse noch nicht so weit wie beim Nesthocker.

Zeitdilatation und Zwillingsparadoxon

Der einfachste Zugang zu den elementaren Aussagen der Relativitätstheorie führt über die Geometrie auf dem Registrierstreifen einer eindimensionalen (in den folgenden Bildern horizontalen) Bewegung.

Das erste Newtonsche Axiom (das Galileische Axiom) stellt fest, dass die kräftefreie Bewegung gerade Linien (gerade Weltlinien) auf den Registrierstreifen zeichnet. Die Neigung dieser Linien gegen die Vertikale ist die Geschwindigkeit. Wir rollen den Registrierstreifen so schnell ab, dass die Neigung der Weltlinie eines Photons 45 Grad beträgt. Das heißt, die Zeit wird durch die horizontale (räumliche) Distanz gemessen, die das Licht in der gegebenen Zeit zurücklegt.

Auf dem Registrierstreifen können wir nicht mehr mit dem Zirkel arbeiten: Eine horizontale Strecke ist kein Zeitablauf. Was Drehungen auf dem Registrierstreifen sind, muss mit Spiegelungen neu konstruiert werden, und was Spiegelungen sind, muss uns die mechanische Erfahrung sagen. Die geometrischen Aussagen sollen ja schliesslich physikalische Sachverhalte wiedergeben.

Die Spiegelung des Tennisballs am Racket sind wir gewohnt, und sie sieht so aus, als würde die Differenz der Geschwindigkeiten von Ball und Racket das Vorzeichen umkehren. Der Ball bewegt sich also nach einer kräftigen Vorhand schneller als er angekommen ist. Diese Spiegelungsvorschrift lässt sich ausbauen, sie ist aber leider bei großen Geschwindigkeiten falsch.

Lichtgeschwindigkeit bleibt Lichtgeschwindigkeit, unabhängig von der Geschwindigkeit des Spiegels.

Wir konstruieren die Spiegelung eines Ereignisses an einem bewegten Spiegel, indem wir die beiden Lichtlinien durch das Ereignis ziehen und diese am Spiegel in die jeweils andere Richtung wenden. Der Schnittpunkt der gespiegelten Lichtlinien ist dann das Spiegelbild des Ereignisses. Wir konstruieren also immer mit solchen Lichtecken, die nach einem üblichen Rechteck aussehen, wenn wir den Registrierstreifen mit einem Lichtjahr pro Jahr herausziehen.

Mit solchen Spiegelungen können und müssen wir nun Strecken (und Winkel) vergleichen. Strecken auf einer Registriergeraden zeigen nun die Zeit, die wir am Ablauf der physikalischen Prozesse erkennen, die in dem Objekt ablaufen, das die Registrierkurve gezeichnet hat. Wir können nicht erwarten, dass die den Registrierstreifen steuernde Uhr diese Dauer angibt. Schließlich müssen wir auch ein normales Lineal an der zu messenden Strecke orientieren und können es nicht irgendwie auf die Zeichenebene legen. Auch die Uhr, die die Zeitdauer messen soll, muss angelegt werden, d.h. ihre Registrierkurve muss parallel zur Registrierkurve des gemessenen Prozesses liegen.

Nun fällt ganz vordergründig ins Auge, dass Projektionen jetzt länger als die projizierten Strecken sind. So ist die Dauer auf der Uhr, die den Registrierstreifen steuert, größer als die Dauer auf der Uhr, die richtig angelegt ist. Diese Zeitdilatation ist symmetrisch, wie der entsprechende Effekt der euklidischen Geometrie auch.

Wir können aber ein Dreieck zusammenbauen, das wir als Registrierung eines Nesthockers und eines Zugvogels ansehen müssen. Kommt der Zugvogel zum Nesthocker zurück, ist die Uhr des Zugvogels noch nicht so weit vorangekommen wie die des Nesthockers: Der Umweg auf dem Registrierstreifen ist *kürzer* als der direkte Weg. Das kennen wir aus der üblichen Geometrie, nur dass dort der Umweg *länger* ist.

Die Zeitanzeigen sind verschieden, weil beide Uhren völlig gleich sind, so wie in der üblichen Geometrie der Umweg länger als der direkte ist, wenn sich das Lineal beim Drehen (Anlegen) eben nicht ändert. Der Zugvogel unterscheidet sich vom Nesthocker dadurch, dass in den beiden Phasen seines Fluges verschiedene Projektionen und Lagen der Uhr verglichen werden müssen. Der Effekt ist aber *nicht* unmittelbar einem Einwirken der Beschleunigung bei der Umkehr auf die Uhr geschuldet! Einmal kann man den Nesthocker den gleichen Beschleunigungen unterwerfen, zum anderen könnte man auch drei unbeschleunigte Uhren verwenden, die beim gegenseitigen Treffen die Zeigerstellung übernehmen. Es gibt auch keine 'Lösung', die irgendwie der allgemeinen Relativitätstheorie zugerechnet werden müsste.

Die mir der Zeitdilatation verbundenen Effekte sind experimentell ohne Zweifel bestätigt und bereits technisch wichtig. Die entwickelte Geometrie ist die der speziellen Relativitätstheorie, deren Gültigkeit durch die Existenz der Antiteilchen bereits jenseits kleiner Effekte gesichert ist.

Was geschieht, wenn wir eine Sternenreise mit fast Lichtgeschwindigkeit unternehmen? Wir kommen hin und zurück, ohne Zeit zu haben, ein Tagebuch zu führen, aber auf der Erde vergehen zwanzig lange Jahre, bis Vater zurückkommt und nicht älter aussehen muss als seine inzwischen herangewachsenen Söhne. Zwei Dinge sollten diesen Gedankenflug aber bremsen. Es ist nicht so einfach, auf genügend große Geschwindigkeiten zu kommen, wenn die maximale Beschleunigung 4 g beträgt. Wir müssen ja zweimal beschleunigen und wieder bremsen. Viel schlechter sieht es aber mit den Hindernissen aus, die durch den Weltraum schweben: Wir haben kaum Reaktionszeit, ihnen auszuweichen, und die maximale Beschleunigung setzt auch dem Ausweichvorgang Grenzen.

Ergänzende Bemerkungen

Das Wort Relativitätsprinzip ist zunächst ausgesprochen einschüchternd. Es ist aber nichts anderes gemeint als die Erwartung, dass Galileos Beobachtung (dass geradlinige gleichförmige Bewegung - wie auch Position, Orientierung und Zeitpunkt - eines abgeschlossenen und abgeschirmten Raums in Innern nicht festgestellt werden kann, wie fein auch die Messapparaturen seien, die ich zur Verfügung habe) uneingeschränkt gilt. Geschwindigkeit, Position, Orientierung und Zeitpunkt können nur bezogen auf andere, äußere Objekte (Schlaglöcher, Starkästen, Sterne, kosmische Hintergrundstrahlung) benannt werden.

Das erste Newtonsche Axiom (die Idee ist von Galileo, wenn man die undokumentierten, aber erschließbaren Kenntnisse der Mathematiker zwischen Euklid und Archimedes beiseite lässt) muss heißen: *Die Gesamtheit der unbeeinflussten Bewegungen zeichnen in Raum und Zeit eine Geradenschar*. Bezugssysteme kommen noch gar nicht vor, müssen es auch nicht. Auch das Wort kräftefrei sollte vermieden werden, denn Kraft wird erst später genauer definiert. Geraden sind eben nicht über Koordinaten definiert, sondern durch ihre Eigenschaft, sich höchstens einmal zu schneiden, und durch zwei verschiedene Punkte eindeutig bestimmt zu sein. Das ist alles. Koordinaten kommen erst hinein, weil man zu einer Geradenschar immer Koordinaten (eben ein Bezugssystem) finden kann, in dem die Geraden durch lineare Beziehungen beschrieben werden. Diese Bezugssysteme heißen lineare Bezugssysteme. Inertialsysteme werden daraus erst nach Definition von Masse und Impuls.