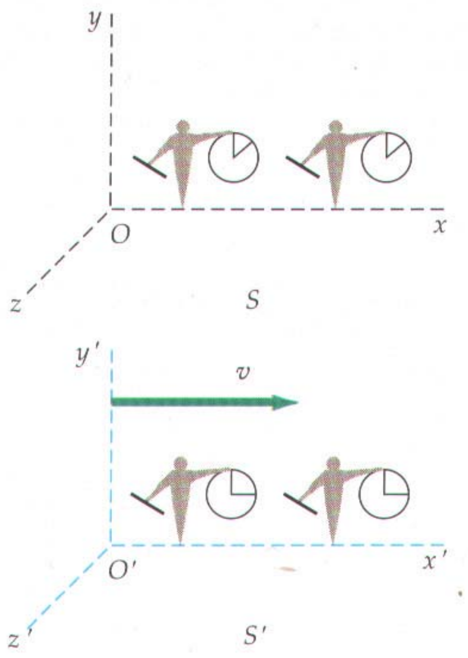
Die Gleichzeitigkeit von Ereignissen

Man war bis 1905 überzeugt, dass es eine absolute, für alle Systeme gleichmäßig ablaufende Zeit gibt. EINSTEIN unterzog den Zeitbegriff einer kritischen Betrachtung. Dazu muss zuvor erklärt werden, was man unter Gleichzeitigkeit zweier Ereignisse verstehen soll.

Uhrensynchronisation und Gleichzeitigkeit

Auf Grund der **Lorentz – Transformation** kann gezeigt werden, dass die Eigenzeit das Zeitintervall zwischen zwei Ereignissen ist, die in einem Bezugssystem am selben Ort stattfinden. Sie kann daher mit einer einzigen Uhr gemessen werden. In einem anderen Bezugssystem, dass sich relativ zum ersten bewegt, finden diese Ereignisse jedoch an verschiedenen Orten statt. Der Zeitpunkt jedes Ereignisses muss also mit verschiedenen Uhren gemessen werden, und das Zeitintervall ergibt sich durch Subtraktion der Zeitpunkte. Dazu müssen die Uhren jedoch synchronisiert sein.



34.7 Die Bezugssysteme S und S′ mit einer Relativgeschwindigkeit v. In jedem Bezugssystem existiert ein dichtes Netz von Beobachtern mit Uhren und Maßstäben, die im Ruhezustand vollkommen identisch sind.

Es ist also zu zeigen:

Zwei Uhren, die in einem Bezugssystem synchronisiert sind, gehen in keinem relativ zum ersten Bezugssystem synchron.

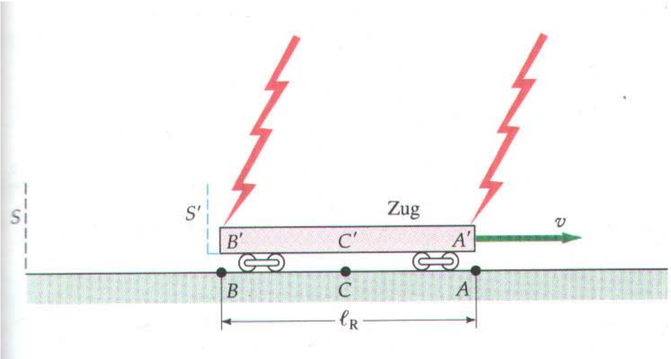
Eine Folgerung daraus ist:

Zwei Ereignisse, die in einem Bezugssystem gleichzeitig (simultan) stattfinden, sind in einem relativ zum ersten bewegten Bezugssystem nicht simultan.

Ein gründliches Verständnis dieser Zusammenhänge löst im allgemeinen alle Paradoxa der speziellen Relativitätstheorie. Es ist jedoch oft schwierig, die intuitive Vorstellung von einer absoluten Gleichzeitigkeit aufzugeben.
Betrachten wir nun **zwei** Uhren, die in einem Bezugssystem ***S*** im Abstand ***l*** voneinander an den Punkten **A** und **B** ruhen. Wie kann man diese Uhren synchronisieren?
Wenn der Beobachter im Punkt **A** einfach die Zeit auf der Uhr **B** abliest und seine Uhr danach stellt, sind die Uhren damit nicht synchronisiert, da das Licht die Zeit $\frac{l}{c}$ benötigt, um den Weg von **B** nach **A** zurückzulegen.
Um die Uhren zu synchronisieren, muss der Beobachter im Punkt **A** daher seine Uhr um $\frac{l}{c}$ relativ zur Uhr **B** vorstellen. Er sieht die Uhr im Punkt B zwar nachgehen, aber er kann schnell ausrechnen, dass die Uhren synchronisiert sind, wenn er die Laufzeit des Lichtes berücksichtigt.
Für alle anderen Beobachter, die sich nicht von beiden Uhren gleich weit weg befinden, zeigen die Uhren verschiedene Zeiten an. Berücksichtigen sie jedoch die verschiedenen Laufzeiten des Lichtes, so stellen auch sie die Synchronisation der Uhren fest.
Äquivalent zu dieser Methode der Synchronisation ist das Verfahren, einen Beobachter in einem Punkt **C** in der Mitte zwischen zwei Punkten **A** und **B** ein Lichtsignal aussenden zu lassen. Die Beobachter in **A** und **B** stellen ihre Uhren dann auf den Zeitpunkt ein, zu dem das Lichtsignal sie erreicht.
Wir untersuchen nun den Begriff der **Gleichzeitigkeit**. Dazu nehmen wir an, die Uhren in A und B seien synchronisiert. Die Beobachter in A und B vereinbaren, zum Zeitpunkt t_0 ein Lichtsignal loszuschicken. Der Beobachter C sieht die Lichtsignale zur selben Zeit. Da er von A und B gleich weit entfernt ist, schließt er, dass die Lichtsignale gleichzeitig ausgesendet werden. Andere Beobachter im Bezugssystem S sehen, abhängig von ihrem Ort, die Lichtsignale nicht zur selben Zeit. Berücksichtigen sie jedoch die verschiedenen Laufzeiten des Lichtes, so stellen auch sie fest, dass die Lichtsignale gleichzeitig ausgesendet wurden.
Man kann daher sagen:

In einem Bezugssystem sind zwei Ereignisse gleichzeitig, wenn die von den Ereignissen ausgesendeten Lichtsignale einen Beobachter, der sich in der Mitte zwischen den Ereignissen befindet, zur selben Zeit erreichen.

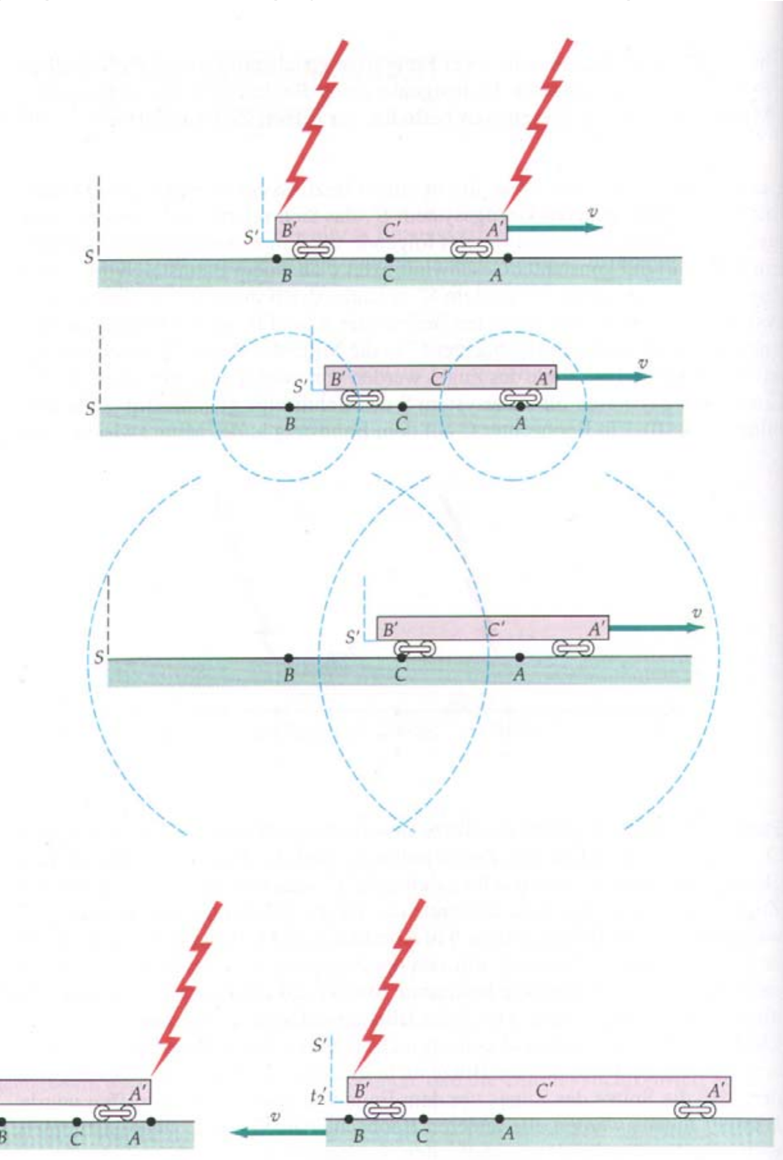
Um zu zeigen, dass Ereignisse, die in einem Bezugssystem **S** gleichzeitig stattfinden, in einem anderen Bezugssystem **S´**, das sich relativ zu **S** bewegt, nicht gleichzeitig sind, betrachtet man das folgende von Einstein eingeführte Beispiel.
Ein Zug fährt mit konstanter Geschwindigkeit *v* an einem Bahnsteig vorbei. Der Zug befindet sich im Bezugssystem **S´** in Ruhe, der Bahnsteig ruhe im Bezugssystem **S**. Man setzt jeweils einen Beobachter **A´** und **B´** an den Anfang und das Ende und einen weiteren Beobachter **C´** in die Mitte des Zuges.
Nimmt man nun an, die Spitze und das Ende des Zuges werden von zwei Blitzen getroffen und die Einschläge passierten im Ruhesystem **S** des Bahnsteiges gleichzeitig.



34.10 Zwei Blitze schlagen gleichzeitig an den Enden eines Zuges ein, der sich mit Geschwindigkeit v relativ zum Ruhesystem S des Bahnsteigs bewegt. Das Licht dieser beiden gleichzeitigen Ereignisse erreicht den Beobachter C in der Mitte zur selben Zeit. Die Entfernung zwischen den Einschlagstellen ist $\ell_{R,\text{Bahnsteig}}$.

Ein Beobachter C auf den Bahnsteig in der Mitte zwischen den Punkten **A** und **B**, an denen die Blitze einschlagen, sieht diese zu derselben Zeit.
Da **C´** sich in der Mitte des Zuges befindet, sind die Blitze in **S´** genau dann gleichzeitig, wenn **C´** sie zur selben Zeit sieht.
C´ sieht den Blitz an der Spitze des Zuges jedoch vor dem Blitz am Ende des Zuges.
Betrachten wir dazu die Bewegung von **C´** im Bezugssystem **S** in der Abbildung 34.11.

34.11 Das Licht von dem Blitz, der in die Spitze des Zuges einschlägt, erreicht den Beobachter C′ in der Mitte des Zuges vor dem Licht, das von dem Blitz am Ende des Zuges ausgeht.



34.12 Die Blitzeinschläge aus Abbildung 34.10 vom Bezugssystem S′ des Zuges aus gesehen. In diesem System ist der Abstand zwischen A und B auf dem Bahnsteig kleiner als die Ruhelänge $\ell_{R,\text{Bahnsteig}}$. Die Ruhelänge $\ell_{R,\text{Zug}}$ ist größer als $\ell_{R,\text{Bahnsteig}}$. Der erste Blitz schlägt in der Spitze des Zuges ein, wenn A und A′ zusammenfallen. Der zweite Blitz schlägt erst dann am Ende des Zuges ein, wenn B und B′ zusammenfallen.

In der Zeit, die das Licht des vorderen Blitzes benötigt, um von der Zugspitze bis zum Beobachter **C´** zu gelangen, hat **C´** sich um eine bestimmte Strecke auf die Zugspitze zu- und vom hinteren Ende wegbewegt.
Das beim Blitzeinschlag vom Zugende ausgehende Licht hat **C´** in dieser Zeit also noch nicht erreicht. Der Beobachter **C´** kommt damit zu dem Schluss, dass die Blitze nicht gleichzeitig eingeschlagen sind, sondern dass die Spitze des Zuges vor dem Ende von einem Blitz getroffen wurde.
Darüber hinaus werden alle anderen Beobachter in **S´** mit **C´** übereinstimmen, wenn sie die verschiedenen Laufzeiten des Lichtes berücksichtigt haben.
Sei nun $l_{R,Zug}$ die Ruhelänge des Zuges, also die Länge des Zuges im Bezugssystem **S´**, in dem er sich nicht bewegt. Sei außerdem $l_{R,AB}$ die Ruhelänge der Strecke zwischen den Einschlagstellen **A** und **B** auf dem Bahnsteig. Im Bezugssystem **S** fallen die Einschlagstellen der Blitze zum Zeitpunkt des Einschlages mit der Spitze bzw. dem Ende des Zuges zusammen. Daher ist die Strecke $l_{R,AB}$ zwischen den Einschlagstellen gleich der im Ruhesystem **S** des Bahnsteigs gemessenen Länge l_{Zug} des Zuges. Da sich der Zug in diesem Bezugssystem bewegt, ist diese Länge auf Grund der Längenkontraktion kleiner als die Ruhelänge des Zuges:

$$l_{Zug} = l_{R,Bahnsteig} < l_{R,Zug} \quad .$$

Die Abbildung 34.12 zeigt die Ereignisse im Ruhesystem **S´** des Zuges, in dem sich der Bahnsteig bewegt. In diesem Bezugssystem ist die Distanz zwischen den Einschlagstellen auf dem Bahnsteig kontrahiert, also kürzer als in **S**. Der Zug ruht, ist also länger als in **S**. In dem Moment, in dem der Blitz in die Spitze **A´** des Zuges einschlägt, befindet sich diese im Punkt **A** in **S**, das Ende des Zuges **B´** hat den Punkt **B** noch nicht erreicht. **B´** kommt erst bei **B** an, wenn der Blitz am Ende des Zuges einschlägt.
Im Bezugssystem S schlagen die Blitze gleichzeitig ein.
Wir betrachten nun zwei im Bezugssystem synchronisierte Uhren, die sich an den Punkten **A** und **B** auf dem Bahnsteig befinden. Vom Ruhesystem **S´** des Zuges aus gesehen, bewegen sich Uhren und Bahnsteig am Zug vorbei. In diesem Bezugssystem schlägt zunächst ein Blitz im Punkt **A** an der Spitze des Zuges ein und etwas später ein weiterer Blitz am Ende des Zuges, das sich nun im Punkt **B** befindet.
Zeigt beispielsweise die Uhr am Punkt **A** im Augenblick des Blitzeinschlags 12.00 Uhr an, so muss, vom Bezugssystem **S´** aus gesehen, im selben Augenblick die Uhr am Punkt **B** eine Zeit **vor** 12.00 Uhr anzeigen. Auf der **B** – Uhr ist es erst etwas später, nämlich wenn der Blitz im Punkt **B** einschlägt, genau 12.00 Uhr. Im Bezugssystem **S´** sind die Uhren also nicht synchronisiert, die Uhr im Punkt **A** geht relativ zur Uhr im Punkt **B** vor. In dieser Uhrenkonstellation wird die Uhr in **A** auch „***führende***“ Uhr genannt.
Der sich im Bezugssystem **S´** ergebende Zeitunterschied zweier im Bezugssystem **S** synchronisierten Uhren lässt sich mit den Gleichungen für die Lorentz – Transformation berechnen. Dazu betrachten wir zwei in **S** synchronisierte Uhren an den Punkten x_1 und x_2 und berechnen die Zeitpunkte t_1 und t_2, die diese Uhren für einen Zeitpunkt t_0' in **S´** anzeigen.

Aus $t' = \gamma\left(t - \frac{vx}{c^2}\right)$ folgt:

$$t_0' = \gamma\left(t_1 - \frac{vx_1}{c^2}\right)$$

und

$$t_0' = \gamma\left(t_2 - \frac{vx_2}{c^2}\right)$$

und damit

$$t_2 - t_1 = \frac{v}{c^2}\left(x_2 - x_1\right).$$

Die führende Uhr am Punkt x_2 geht gegenüber der Uhr am Punkt x_1 um einen Betrag, der proportional zum Ruheabstand $\left(x_2 - x_1\right)$ der Uhren ist, vor.

Werden zwei Uhren in ihrem Ruhesystem synchronisiert, so sind sie in keinem anderen Bezugssystem synchron. In dem Bezugssystem, in dem die Uhren sich bewegen, geht die führende Uhr um den Betrag

$$\Delta t_S = l_R \frac{v}{c^2}$$

vor (zeigt eine spätere Zeit an), wobei l_P ***der Ruhezustand der Uhren ist.***

Man kann den Zusammenhang auch in allgemeineren, aber anschaulicheren Worten ausdrücken:

Von irgendeinem Bezugssystem aus beurteilt, scheinen die Uhren jedes anderen dagegen bewegten Systems nachzugehen.