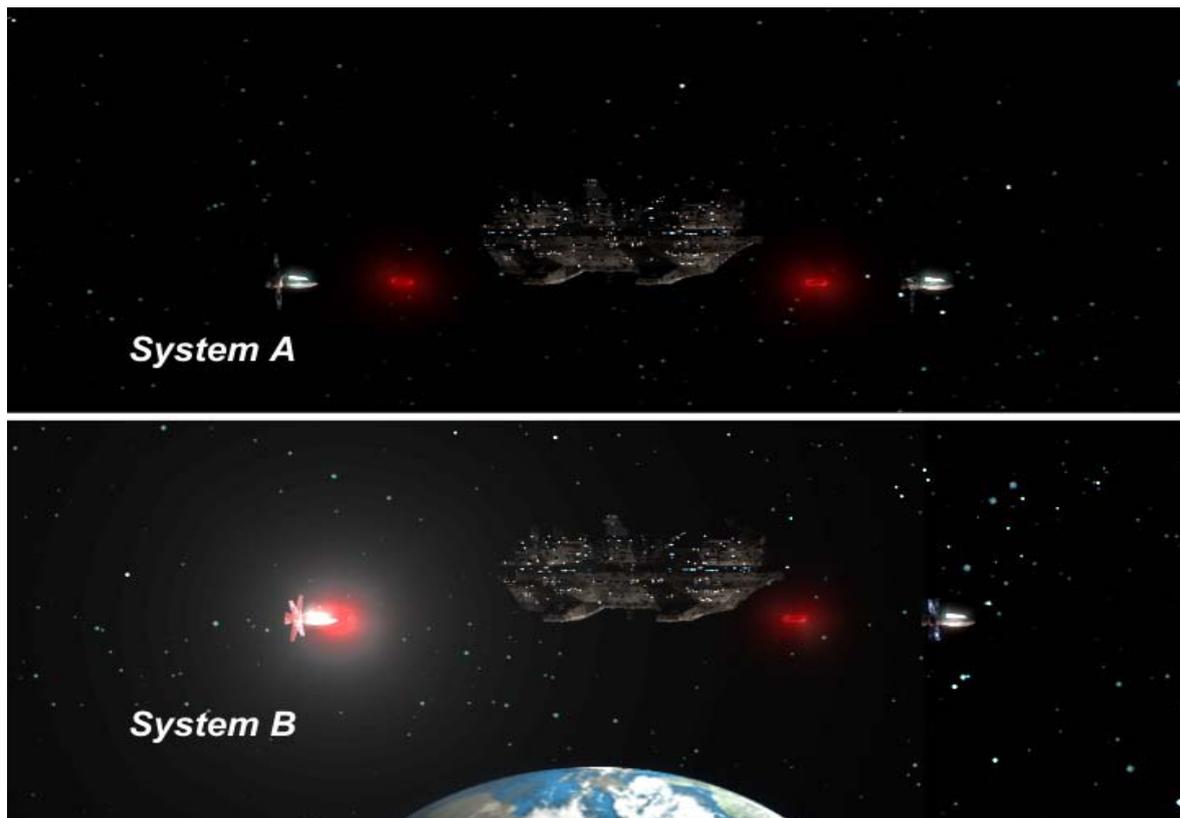


## Gleichzeitigkeit

Wir betrachten ein Raumschiff, das von zwei Shuttles begleitet wird. Ein Shuttle fliegt hinter dem Raumschiff, das zweite in gleicher Entfernung vor dem Raumschiff. Das Raumschiff sendet von einer Stelle, die sich genau in der Mitte der beiden Shuttles befindet, einen Lichtblitz aus. Wir betrachten die Zeitpunkte, zu denen die Photonen bei den Shuttles eintreffen.



Zuerst betrachten wir die Situation in einem System, in dem das Raumschiff und die Shuttles ruhen (System A). Die Abstände der Shuttles von der Lichtquelle sind gleich und die Photonen bewegen sich in alle Richtungen mit derselben Geschwindigkeit. Deshalb sind sie von der Lichtquelle zu den beiden Shuttles gleich lang unterwegs. Das Eintreffen der Photonen geschieht also gleichzeitig.

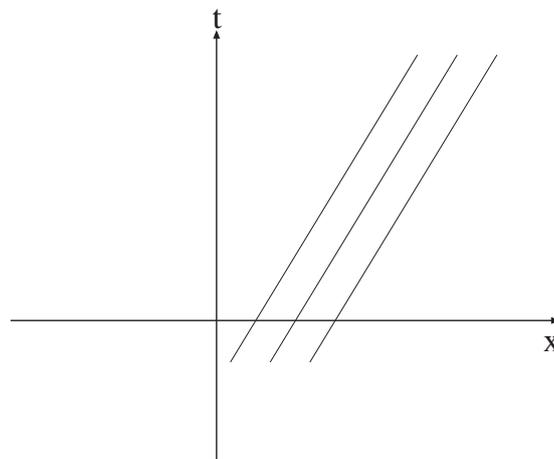
Nun betrachten wir diesen Vorgang von einem System aus, in dem das Raumschiff und die Shuttles nicht ruhen (System B). So ein System könnte eines sein, in dem die Erde ruht, an der sich der Konvoi vorbeibewegt. Die Abstände der beiden Shuttles von der Lichtquelle sind wieder gleich groß. Auch von der Erde aus betrachtet bewegen sich die Photonen in alle Richtungen mit Lichtgeschwindigkeit. Dem nach hinten laufenden Photon kommt aber das hintere Shuttle entgegen, dem

nach vorne laufenden fliegt das vordere Shuttle davon. Das nach hinten laufende Photon legt also von der Erde aus betrachtet einen kürzeren Weg zurück und das nach vorne laufende einen längeren Weg. Die Zeit, die das nach hinten laufende Photon braucht, um auf das Shuttle zu treffen, ist somit kürzer als die Zeit, die das nach vorne laufende Photon braucht. Demnach trifft von der Erde aus gesehen das nach hinten laufende Photon früher beim Shuttle ein als das nach vorne laufende Photon.

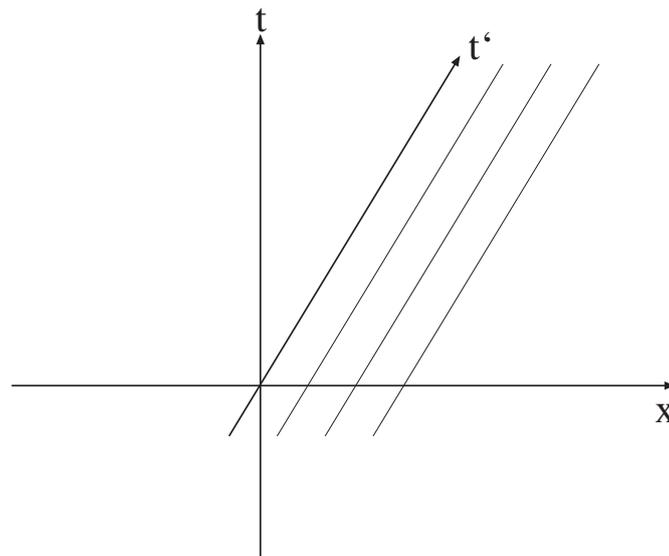
Die Ereignisse „nach hinten laufendes Photon trifft hinteres Shuttle“ und „nach vorne laufendes Photon trifft vorderes Shuttle“ sind in einem System gleichzeitig (System A) und in einem anderen nicht (System B). Ob zwei Ereignisse gleichzeitig stattfinden oder nicht, ist keine Eigenschaft der Ereignisse selbst, sondern hängt davon ab, in welchem System man die beiden Ereignisse beobachtet.

Wir werden nun Schritt für Schritt konstruieren, wie man diese Tatsache in einem [Raumzeit-Diagramm](#) darstellen kann. Wir verwenden dafür die zweidimensionale Raumzeit. Raumschiff und Shuttles sollen sich gleichförmig nach rechts bewegen. Die Erde soll ruhen.

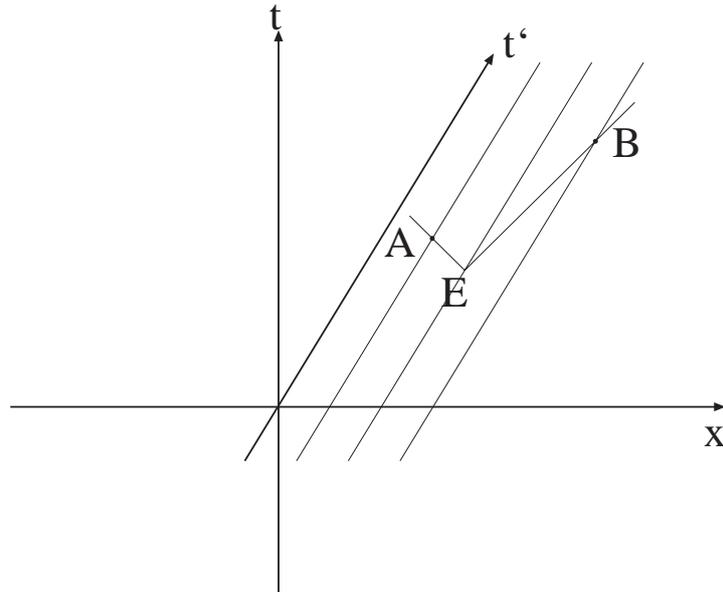
Die nächste Abbildung zeigt die Weltlinien des Raumschiffs (mittlere Weltlinie) und die Weltlinien der Shuttles (äußere Weltlinien). Die Erde ruht in diesem System, ihre x-Koordinate ändert sich somit nie. Die Weltlinie der Erde ist also parallel zur der t-Achse. Wir legen den Koordinatenursprung auf die Erde, sodass ihre Weltlinie mit der t-Achse identisch ist.



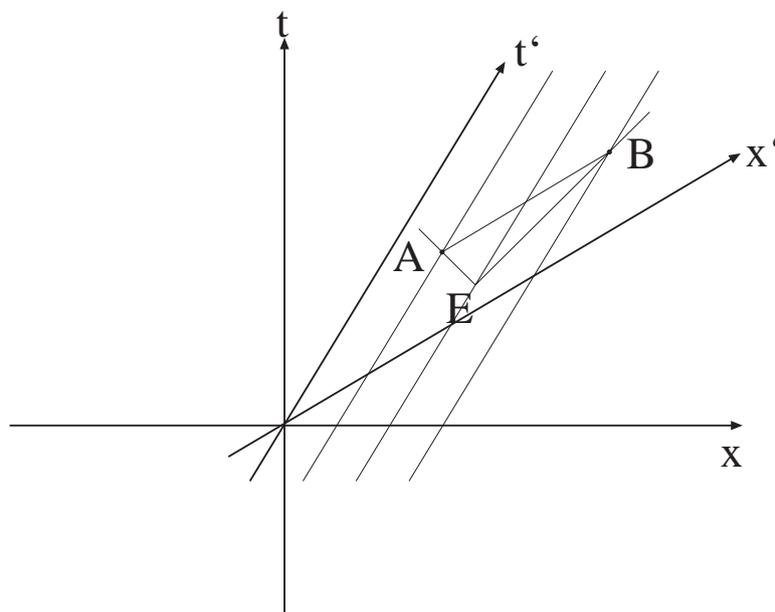
Wir wollen nun die Koordinatenachsen des Systems  $S'$  einzeichnen, in dem der Konvoi ruht. Da der Konvoi in  $S'$  ruht, ändern sich die  $x'$ -Koordinaten des Raumschiffs und der beiden Shuttles nicht. Die  $t'$ -Achse muss also parallel zu den Weltlinien von Raumschiff und Shuttle sein. Hat man es so eingerichtet, dass sowohl die Uhr auf der Erde als auch die Uhr im Raumschiff auf Null steht, wenn  $x = 0$  und  $x' = 0$  übereinander liegen, so verläuft die  $t'$ -Achse durch den Ursprung von  $S$  (nächste Abbildung).



Zur Konstruktion der  $x'$ -Achse: Alle Ereignisse, die in  $S'$  zu einem gegebenen Ereignis A gleichzeitig sind, haben die gleichen  $t'$ -Werte. Ereignisse, die in  $S'$  gleichzeitig sind, liegen demnach auf einer Linie, die zur  $x'$ -Achse parallel ist. Wir konstruieren daher zwei Ereignisse, die in  $S'$  gleichzeitig sind. Parallel zu ihrer Verbindungslinie ist die  $x'$ -Achse. Dazu betrachten wir die Weltlinie zweier Photonen, die vom Raumschiff im Ereignis E ausgesandt werden. Ein Photon läuft nach hinten eines nach vorne (nächste Abbildung). Die Weltlinien der Photonen haben Steigung 1 bzw.  $-1$ . Das nach hinten laufende Photon trifft im Ereignis A das hintere Shuttle. Das nach vorne laufende Photon trifft das vordere Shuttle im Ereignis B. A und B finden in  $S'$  gleichzeitig statt.



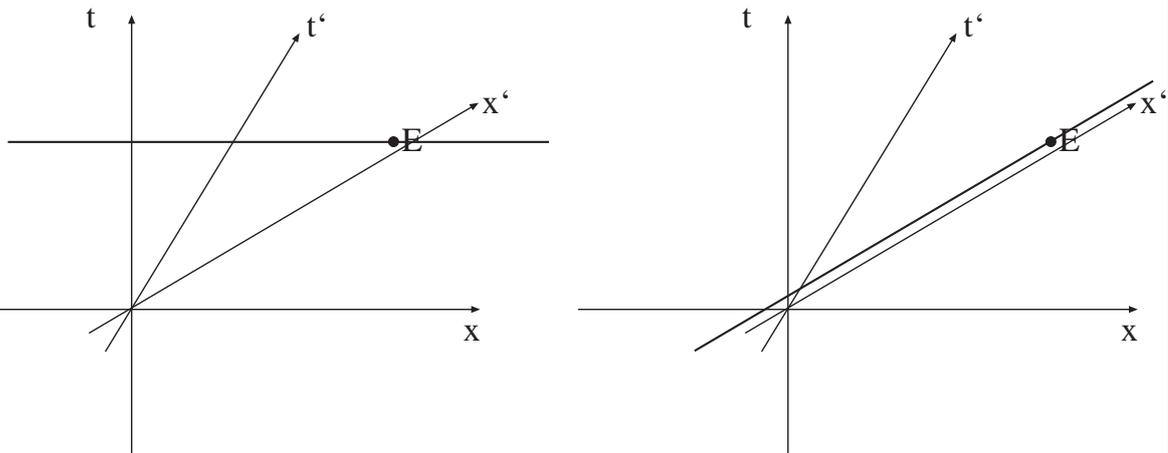
Die  $x'$ -Achse verläuft parallel zur Verbindungslinie von A und B. Hat man es so eingerichtet, dass zur Zeit  $t = t' = 0$  die Nullpunkte von S und  $S'$  übereinander liegen, so verläuft die  $x'$ -Achse durch den Ursprung von S (nächste Abbildung). Man kann zeigen, dass der Winkel, den die  $x$ -Achse mit der  $x'$ -Achse einschließt, genauso groß ist wie der Winkel, den die  $t$ -Achse mit der  $t'$ -Achse einschließt.



Die Ereignisse A und B finden gleichzeitig in  $S'$  statt, da ihre Verbindungslinie parallel zur  $x'$ -Achse verläuft. Sie finden aber nicht gleichzeitig in S statt, da ihre Verbindungslinie nicht parallel zur  $x$ -Achse verläuft. In S findet A früher als B statt, da die  $t$ -Koordinate von A kleiner ist als die  $t$ -Koordinate von B.

In der nächsten Abbildung links sieht man alle Ereignisse, die gleichzeitig in  $S$  zu einem gegebenen Ereignis  $E$  sind. Alle diese Ereignisse haben dieselbe  $t$ -Koordinate. Sie liegen alle auf einer Parallelen zur  $x$ -Achse.

In der nächsten Abbildung rechts sieht man alle Ereignisse, die gleichzeitig in  $S'$  zu einem gegebenen Ereignis  $E$  sind. Alle diese Ereignisse haben dieselbe  $t'$ -Koordinate. Sie liegen alle auf einer Parallelen zur  $x'$ -Achse.



Der Winkel zwischen der  $t$ -Achse und der  $t'$ -Achse hängt von der Relativgeschwindigkeit der beiden Systeme ab. Ist diese klein gegenüber der Lichtgeschwindigkeit, so ist dieser Winkel fast Null. Ebenso ist der Winkel zwischen der  $x$ -Achse und der  $x'$ -Achse fast Null. Die Achsen fallen fast zusammen und damit auch ihre jeweiligen Parallelen durch  $E$ . Die Ereignisse, die gleichzeitig mit  $E$  in  $S$  bzw. in  $S'$  stattfinden, sind somit nahezu dieselben. Im Alltag merkt man daher nichts von der Relativität der Gleichzeitigkeit.