

P E T E R S T R O H M A Y E R

## Vortrag über die spezielle Relativitätstheorie

### 1. Einleitung:

Das heutige Referat handelt von der speziellen Relativitätstheorie. Mit ihr verbinden wir die Vorstellung, dass die Zeit bei bewegten Beobachtern langsamer vergeht und dass bewegte Strecken sich zusammenziehen. Ein Zwilling, der sich auf eine Reise mit hoher Geschwindigkeit begibt, ist bei seiner Rückkehr jünger als sein daheimgebliebener Bruder. Der Zwilling wird außerdem umso schwerer, je schneller er sich bewegt. Dann gehört noch die berühmteste Formel der Welt dazu,  $E=mc^2$ , bei der man sich fragt, was die Energie mit der "Lichtgeschwindigkeit" zu tun hat, und noch dazu im Quadrat.

Die allgemeine Relativitätstheorie beschäftigt sich mit der Beschleunigung und mit der Gravitation. Lebt jemand im Erdgeschoß, so altert er langsamer als sein Nachbar im ersten Stock. Die Uhren bei den GPS-Satelliten gehen schneller als die auf der Erde und müssen daher immer nachjustiert werden. Schließlich dehnt sich, wie Hubble herausgefunden hat, das Weltall immer weiter aus, und zwar mit immer höherer Geschwindigkeit. Es ist nicht wie nach einer Explosion, wenn Materiebrocken auseinanderfliegen, sondern der Raum selbst dehnt sich aus. Daraus hat man auf den Urknall zurückgerechnet und man glaubt zu wissen, dass die Welt vor dreizehneinhalb Milliarden Jahren entstanden ist und dass es davor weder die Zeit noch den Raum gegeben hat.

### 2. Philosophischer Hintergrund:

Um all das zu verstehen, muss man das Newtonsche Weltbild hinter sich lassen. Zeit und Raum sind keine Substanzen bzw. Behälter, in denen sich die Wirklichkeit abspielt, sondern sie sind Relationen im Sinne Leibniz.

Leibniz und Newton, die großen Gegner, waren sich schon beim Prioritätsstreit über die Differenzialrechnung in die Quere gekommen. Sie führten zu Beginn des 18. Jahrhunderts einen Briefwechsel über das Wesen von Zeit und Raum. Newton ging als Sieger hervor, denn Leibniz war nach der 5. Entgegnung Newtons gestorben und konnte seine Argumente nicht zu Ende führen. Newton meinte noch, seine Überzeugungskraft habe Leibniz wohl das Herz gebrochen.

Die im 19. Jahrhundert entdeckte Konstanz der sogenannten "Lichtgeschwindigkeit" spricht aber für die Position, die Leibniz vertreten hat. Seine Relationen können bei der konstanten Ausbreitung des Lichts ansetzen. Die Zeit ist das Verhältnis zwischen zwei Ereignissen, das durch die Kausalitätsausbreitung (die Ausbreitung eines Lichtstrahls) bestimmt wird. Raum ist das Verhältnis zwischen zwei Ereignissen, das durch die Kausalitätsausbreitung (die Ausbreitung eines Lichtstrahls) bestimmt wird. Ein Lichtstrahl legt immer das an Raum zurück, was er an Zeit dafür benötigt.

Nach dem Weltbild des deutschen Idealismus - ich folge hier Plato, Kant und Schopenhauer - nehmen wir die Welt nicht so wahr, wie sie an sich ist, sondern so, wie das die Kategorien unseres Denkens - das sind Zeit, Raum und Kausalität - vorgeben.

Insbesondere die Kategorie der Kausalität ist unser Denken. Eine Wirkung kann nicht zugleich mit der Ursache eintreten. Der Kausalausbreitung sind Grenzen gesetzt. Die höchstmögliche Kausalausbreitung ist die Ausbreitung des Lichts. Wenn ein Lichtstrahl bei einem Ereignis beginnt und bei einem anderen Ereignis eintrifft, so nennt man den zeitlichen und zugleich räumlichen Abstand, in dem diese Ereignisse eintreten, "lichtartig". Da Kausalität nicht schneller übertragen werden kann als durch das Licht, sind diese Ereignisse auch aus der Sicht jedes anderen, beliebig schnell bewegten Beobachters "lichtartig" voneinander entfernt. Aus diesem Grundsatz kann die relationale Symmetrie des Lichts (die Lorentz-Transformation) abgeleitet werden.

Konstanz der "Lichtgeschwindigkeit" bedeutet also, dass kein Photon (kein Lichtstrahl) ein anderes Photon überholen kann, ganz gleich, wie schnell sich eine Lichtquelle bewegt. In der Ausbreitung des Lichts begegnen wir unserem eigenen Denken. Die Relationen gehen von unserem Denken aus.

### 3. Die Wahrnehmung von Ereignissen:

Die Welt besteht aus Ereignissen. Wahrnehmen im wissenschaftlichen Sinn ist die Verzeichnung, wo ein Ereignis wann eingetreten ist. Die einfachste Methode ist die, dass ein Beobachter überall synchronisierte Uhren aufstellt, deren Ort bekannt ist, die alle gleich schnell gehen und die alle dieselbe Zeit anzeigen. Die Synchronisation geht so vor sich, dass ein gleichförmig bewegter Bote bei der Uhr des Beobachters startet und bei seinem Eintreffen bei einer anderen Uhr die Zeit dazuzählt, die seine Reise gedauert hat. Wir denken uns unendlich viele Uhren in geringen Abständen voneinander aufgestellt. Wenn irgendein Ereignis bei einer der Uhren eintritt, dann weiß man durch ihren Standort und durch die von ihr angezeigte Zeit, wo das Ereignis wann eingetreten ist.

### 4. Relationale Symmetrie des Lichts:

Wenn zwei zueinander bewegte Feuerwerkskörper explodieren, so entfernen sich die beiden expandierenden Kugeln aus Licht samt den Feuerwerkskörpern voneinander.

Wenn aber zwei zueinander bewegte Beobachter bei ihrer Begegnung jeweils eine Kugelwelle aus Licht aussenden, dann können sich die gemeinsam ausgesendeten Photonen an der Spitze dieser Lichtstrahlen nicht gegenseitig überholen. Sie breiten sich für immer gemeinsam aus. Diese Photonen bilden eine gemeinsame Ausbreitungsfläche, die aber keine definierte Form hat. Jeder Beobachter behauptet zu Recht, dass er sich im Zentrum der von ihm ausgesendeten Kugelwelle befindet und dass die Photonen an der Spitze seiner Lichtstrahlen eine Ausbreitungsfläche in der Form einer Kugel bilden. Wenn sich aber ein Beobachter im Zentrum einer Kugelwelle aus Licht befindet, kann der andere Beobachter nicht auch dort sein, denn er hat sich während der Ausbreitung der Lichtstrahlen vom ersten Beobachter wegbewegt.

Betrachten wir das mit der Skizze:

Die Beobachter A bzw. B bewegen sich mit 60% der "Lichtgeschwindigkeit" aneinander vorbei. Zum Zeitpunkt ihrer Begegnung sendet jeder Beobachter einen Lichtstrahl in die Bewegungsrichtung und einen gegen die Bewegungsrichtung aus (wir greifen also aus den beiden Kugelwellen aus Licht je zwei besonders markante Lichtstrahlen heraus).



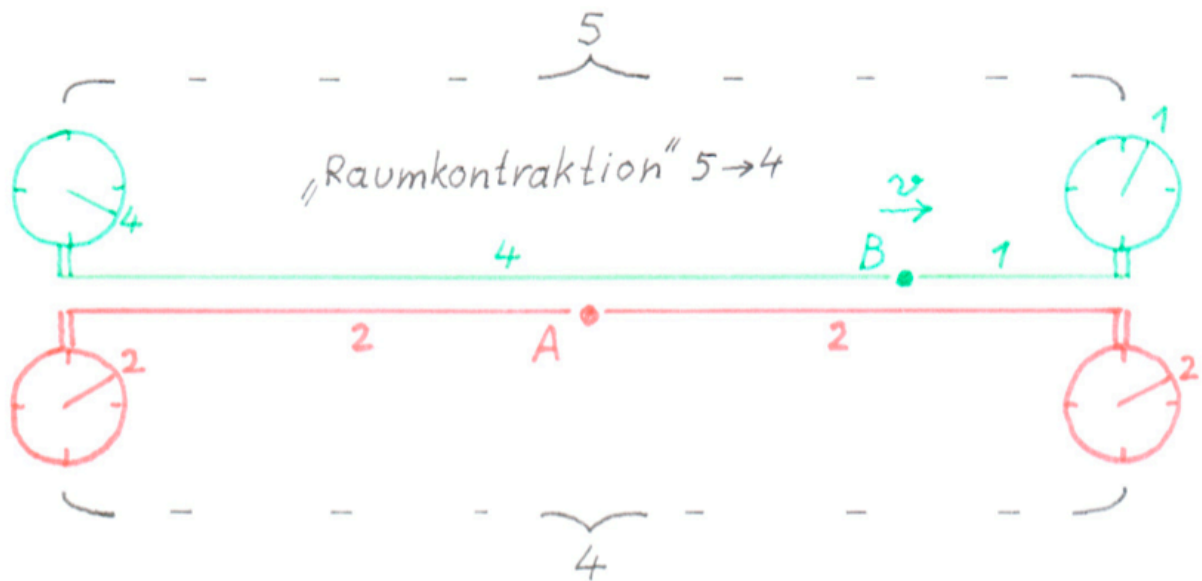
Je zwei Photonen an der Spitze der Lichtstrahlen sind gemeinsam zur Zeit "0" gestartet. Sie breiten sich gemeinsam nach links bzw. nach rechts aus, weil sie sich nicht gegenseitig überholen können (sie sind "koordiniert"). Wenn die Spitzen der zwei Lichtstrahlen vom Beobachter A nach der Zeit "2" je "2" entfernt sind, haben seine beiden Lichtstrahlen jeweils die Länge "2". Nun können die zwei koordinierten Lichtstrahlen beim Beobachter B aber nicht auch gleich lang sein, weil B sich mittlerweile nicht mehr bei A befindet. Nach der (gesondert hergeleiteten) relationalen Symmetrie des Lichts sind die Lichtstrahlen des B, wenn sie bei den beiden Ereignissen eintreffen, in seine Bewegungsrichtung "1" und gegen seine Bewegungsrichtung "4" lang. Nur bei diesem Verhältnis der Länge der Lichtstrahlen zueinander (man nennt es Lorentz-Transformation) bleiben zwei koordinierte Photonen unter Berücksichtigung von Raum, Zeit und Bewegung zusammen. Es gibt nur diese eine Lösung. Sie ist nur möglich, weil Zeit und Raum Relationen sind. Die Lösung ist symmetrisch. Auch wenn wir bei B einen Lichtstrahl von "2" annehmen, dann würde ein koordinierter Lichtstrahl des A in Bewegungsrichtung "1" und gegen die Bewegungsrichtung "4" lang sein.

Man könnte nun sagen: gut, diese Lichtstrahlen haben unterschiedliche Längen. Das soll uns nicht weiter berühren. Aber erinnern wir uns daran, dass wir die Zeit und den Ort von Ereignissen mit synchronisierten Uhren bestimmt haben, die wir überall um den jeweiligen Beobachter herum aufgestellt hatten. Es bewegen sich also mit den beiden Beobachtern auch ihre jeweilige Uhrenreihe in gerader Linie aneinander vorbei, wobei jede Uhr des einen Systems ununterbrochen irgendeiner Uhr des anderen Systems begegnet. (Das wird am Beispiel zweier Zuhörer demonstriert).

Die Frage ist jetzt, welche Uhren begegnen sich und welche Zeit zeigen sie dabei an. Es ist unmöglich, das nach Newtonscher Mechanik anhand der Geschwindigkeit der Uhren und ihrer jeweiligen Positionen zu berechnen. Wer das versucht, landet in einer Sackgasse. Es gibt aber einen ganz einfachen Weg, die Uhrenbegegnungen zu ermitteln.

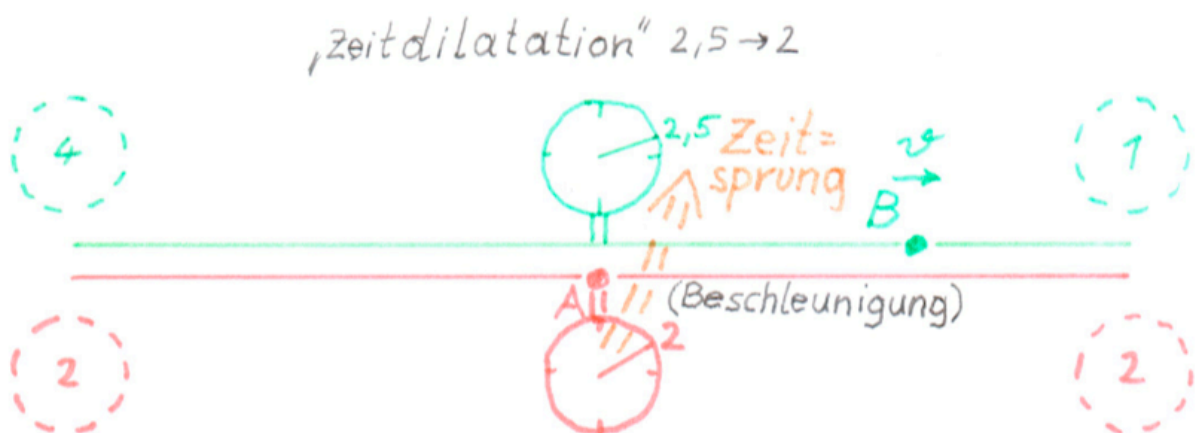
Wenn ein Beobachter an seiner Uhrenreihe einen Lichtstrahl entlang sendet und wir die Uhren herausgreifen, die jeweils im Abstand "1" voneinander aufgestellt sind, dann kommt das Photon an der Spitze des Lichtstrahls bei der ersten Uhr vorbei, wenn diese die Zeit "1" anzeigt, an der zweiten Uhr, wenn diese die Zeit "2" anzeigt, und so weiter. Synchronisierte Uhren bilden die Ausbreitung eines Lichtstrahls ab (sie können ja auch durch einen solchen Lichtstrahl synchronisiert werden).

Wenn die Spitzen der sich gemeinsam ausbreitenden Lichtstrahlen der beiden Beobachter bei irgend einem Ereignis eintreffen, dann ist auch jeweils eine Uhr der betreffenden Uhrenreihe vor Ort dabei. Bei jedem Ereignis begegnen sich die beiden Photonen, eine Uhr des A und eine Uhr des B. Jede Uhr zeigt dabei gerade die Zeit an, die der Länge des Lichtstrahls entspricht, der sich die eigene Uhrenreihe entlang ausgebreitet hat. Sehen wir uns die Situation auf der folgenden Skizze an:



Wenn die Lichtstrahlen wegen der relationalen Symmetrie des Lichts nicht gleich lang sind, dann kann auch die Zeitangabe der Uhren, die sich beim Ereignis begegnen, nicht die gleiche sein. Intuitiv sagen wir zwar, die Zeit vergeht überall gleich, daher müssten alle Uhren bei ihren Begegnungen die gleiche Zeit anzeigen. Aber diese Intuition beruht auf der newtonschen Vorstellung, dass die Zeit eine Substanz wäre. Sie trifft nicht zu. Die unterschiedlichen Uhrenstellungen bei den verschiedenen Uhrenbegegnungen können vor Ort überprüft werden. An dem in der Skizze dargestellten Beispiel würden zB zwei Freunde des Beobachters A, die sich bei den "2" entfernten Uhren befinden, dem Beobachter telefonisch melden, dass bei ihnen zur Zeit "2" eine Uhr des anderen Beobachters mit dem Stand "1" bzw. mit dem Stand "4" vorbeigekommen ist. Das gilt umgekehrt auch für den anderen Beobachter für seine zwei Uhren im Abstand von "2" mit dem Stand von "2". Der Abstand zwischen den beiden Ereignissen ist beim A "4", bei B "5". Diesen (wiederum für beide Beobachter symmetrischen) Effekt nennt man Raumkontraktion.

Wir fragen nun, welcher Uhr eigentlich jene Uhr begegnet, die sich beim Beobachter A befindet und "2" anzeigt. Dazu wieder eine Skizze:



Der Uhr des A begegnet eine Uhr des Beobachters B mit einer Zeigerstellung in der Mitte zwischen "1" und "4", die also "2,5" anzeigt. Bei A ist also die Zeit "2" vergangen, bei B die

Zeit "2,5". Diesen (wiederum für beide Beobachter symmetrischen) Effekt nennt man Zeitdilatation.

Im weiteren Verlauf wird dieser Zeitabstand immer größer. Das gilt umgekehrt auch für die Begegnungen mit der Uhr beim Beobachter B. Bei keinem Beobachter vergeht die Zeit schneller oder langsamer. Auch bewegte Uhren laufen gleich schnell. Der beschriebene Effekt betrifft nur die Relation der Zeit und beruht auf der Endlichkeit der Kausalausbreitung. Jeder Beobachter lebt in einer "gleichzeitigen" Gegenwart, in der sozusagen immer alle Photonen zu jedem Zeitpunkt gleich weit von ihm entfernt sind. Aber zwei Ereignisse, die aus der Sicht des einen Beobachters in seiner Gegenwart zugleich stattfinden, finden aus der Sicht des anderen Beobachters nicht in seiner Gegenwart zugleich statt, sondern das eine Ereignis findet in einer früheren Gegenwart statt (in der alle seine Uhren "1" zeigen), das andere Ereignis in einer späteren Gegenwart (in der alle seine Uhren "4" zeigen). Das gleiche gilt umgekehrt: was für den anderen gleichzeitig ist, tritt für den ersten nacheinander ein. Die Zeitangaben der beiden Beobachter für beliebige Ereignisse greifen wie zwei Zahnräder ineinander. Es kommt zu keinem Widerspruch, nur können eben Ereignisse nicht für beide Beobachter gleichzeitig stattfinden. Die Gegenwart der Beobachter ist wegen der Relationalität von Zeit und Raum niemals dieselbe.

5. Zu einer echten (also nicht mehr symmetrisch für beide Beobachter geltenden) Zeitverschiebung kommt es erst, wenn ein Beobachter, bei dem eine Zeit von "2" vergangen ist, einen Sprung (viele infinitesimale Sprünge) hinüber zur Uhr des anderen Beobachters macht, bei dem schon eine Zeit von "2,5" vergangen ist. Der Übertritt des Beobachters in das andere System ist mit einer Beschleunigung verbunden. Die bewahrte Jugend des reisenden Zwillinges beruht darauf, dass er beim Start, bei der Umkehr und bei der Rückkehr jeweils beschleunigt wird, der andere aber nicht. Darauf beruht auch der Effekt, dass in einem starken Gravitationsfeld, ebenfalls ein Phänomen der Beschleunigung, eine Zeitverschiebung eintritt.

6. Wenn wir Zeit und Raum im Sinn des Idealismus als Kategorien des Denkens auffassen und die Relativitätstheorie aus diesem Blickwinkel heraus verstehen, hat das weltanschauliche und theologische Konsequenzen. Zum einen wird ein Weg eröffnet, die Freiheit des Willens zu bejahen. Zum anderen erweist sich die Ewigkeit nicht als eine unendlich lange Zeit, die wir damit zubringen, die Herrlichkeit Gottes zu besingen. Wir können uns mit Papst Benedikt XVI. (Enzyklika "spe salvi") einen Augenblick in unserem Leben vorstellen, in dem wir vollkommen glücklich waren. Die zeitlose Ewigkeit wird sein wie dieser erfüllte Augenblick.

8. Juni 2017

\*\*\*