Koordinatentransformation

wie ist Lorentz zu verstehen?

R. Sydow, Niederfinow (Deutschland)
(2023)

abstrakt: es ist schon verwunderlich, zu welchen Aussagen die spezielle Relativitätstheorie kommt. Bei näherer Betrachtung gewinnt man den Eindruck, dass mit der Rechnerei und Umstellerei von Formeln jedes beliebige Ergebnis erzielt werden kann.

Hier werden einige Konventionen erläutert, die den wilden Umgang mit den Formeln der Lorentz-Transformation einschränken. Dabei wird sich darauf berufen, dass es sich dabei um einer Transformation von Koordinaten handelt, deren Ausführung an die Konventionen geknüpft ist.

Quellenangabe: Sydow, R. Koordinatentransformation, wie ist Lorentz zu verstehen Niederfinow (Deutschland) 12.05.2023
https://rolfswelt.de/physik/#lt-koordinatentransformation
Revision: 2.2.1.7 vom 19.07.2023

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen

IS	Inertialsystem
SRT	spezielle Relativitätstheorie

Koordinatentransformation von Längen

Für die Galilei-Transformation werden Umrechnungen der Koordinaten von einem Koordinatensystem in das andere nach den klassischen Rechengesetzen vorgenommen. Die in einem Koordinatensystem festgestellten Gleichungen werden nach den Größen des anderen Koordinatensystems umgestellt. Da in der galileischen Physik die Zeit als Invariante, also als eine absolute, angenommen wurde, bezogen sich Umrechnungen von Punkten lediglich auf die Raum-Koordinaten. Galilei erkannte, dass solche Koordinatensysteme, die sich gegeneinander nur gleichmäßig, geradlinig bewegen, völlig gleichwertig sind ([Eck] S. 8 f.).
Er stellte diese Erkenntnis in einem Relativitätsprinzip dar: „Alle Inertialsysteme sind mechanisch vollkommen gleichberechtigt“ ([Eck] S. 9). Dieser Gleichwertigkeit der Koordinatensysteme wegen ist die Umrechnung der Koordinaten auch einfach durchführbar. Es genügt, dass man die Umrechnungsgleichungen invertiert ([Emb]; Galileitransformation). Die Bedeutung der Koordinaten ist vertauscht und die Relativgeschwindigkeit erhält das alternative Vorzeichen ([Emb]).
An den beiden transformierten Gleichungen Gl. 1 wird das Gesagte nachvollzogen:

$$x = x' + vt \quad \rightarrow \quad x' = x - vt \qquad \text{Gl. 1}$$

Es steht nun die Frage, ob mit der SRT und dem ihr zugrunde liegenden Relativitätsprinzip (siehe [Ein] S. 891 f.) die Umrechnung in gleicher Weise uneingeschränkt durchführbar ist. Dem Relativitätsprinzip der SRT: „Die physikalischen Gesetze nehmen in jedem IS dieselbe Gestalt an, inklusive den Werten der darin auftretenden Konstanten“ ([Eck] S. 9) haftet ein neuer, etwas modifizierter Inhalt an. Die Gestalt der physikalischen Gesetze muss bei einer Transformation dieselbe bleiben. Dabei ist die Durchführung der Koordinatentransformation der von Galilei identisch. Es sind die Variablen zu vertauschen und das Vorzeichen der Relativgeschwindigkeit ist umzukehren.

$$x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad \rightarrow \quad x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \qquad \text{Gl. 2}$$

Das Ergebnis dieser Transformation muss dem einer schlichten Umstellung der Formeln entsprechen. Dass eine solche Vertauschung rechnerisch korrekt ist, lässt sich dadurch leicht nachweisen, indem man über den Weg der Umrechnung nach den einschlägigen Rechengesetzen zu demselben Ergebnis der Vertauschung kommt. Diese Umrechnung wurde in [Syd] S. 123 ff. vorgenommen und die Richtigkeit einer Vertauschung für die Koordinatentransformation nach Lorentz nachgewiesen. Dass dieser Nachweis gelingen musste, lässt sich erahnen, wenn man die Transformation der Lichtkugel (siehe [Ein] S. 901) betrachtet, wie sie in [Syd] S. 121 durchgeführt wurde:

$$x^2 + y^2 + z^2 - c^2t^2 = 0 = x'^2 + y'^2 + z'^2 - c^2t'^2 \quad \text{(siehe [Thi] Anhang 3 S. 9)} \qquad \text{Gl. 3}$$

Jeder Raum-Zeit-Punkt des einen Koordinatensystems, der sich auf der Lichtkugel befindet, entspricht einem eindeutig zuordenbaren Raum-Zeit-Punkt im anderen Koordinatensystem. Die Eindeutigkeit ist durch die Gleichung Gl. 1.2 dargestellt und wird durch den Formalismus der Lorentz-Transformation sichergestellt.

Man kann somit durch die mathematische Untermauerung der Transformation der Lichtkugel sagen, dass die Lorentz-Transformation sich physikalisch auf genau diese Umrechnung bezieht. Das heißt, dass dem Raum-Zeit-Punkt eine untrennbare Zuordnung von Raumkoordinate und Laufzeit des Lichtsignals gegeben ist und das sowohl durch reine Umrechnung als auch durch die Vertauschung der Variablen (incl. Vorzeichenwechsel der Relativgeschwindigkeit) zu einem richtigen Ergebnis führt.

Es so auszudrücken, suggeriert die Frage, ob die Lorentz-Transformation für andere Raum-Zeit-Punkte als die der Lichtkugel überhaupt anwendbar ist?

Natürlich wird es für jeden Punkt des Raumes in einem Koordinatensystem auch eine Transformation in ein beliebiges, anderes Koordinatensystem geben. Die Anwendung der Formeln der Lorentz-Transformation erfordert aber zwingend, dass es Raum-Zeit-Punkte sein müssen, die transformiert werden. Es besteht immer ein Zusammenhang zwischen dem Raumpunkt und der Zeit. Dabei ist als die Zeit gerade jene Dauer heranzuziehen, die das Licht benötigt, um vom Koordinatenursprung zum zu transformierenden Raumpunkt zu gelangen

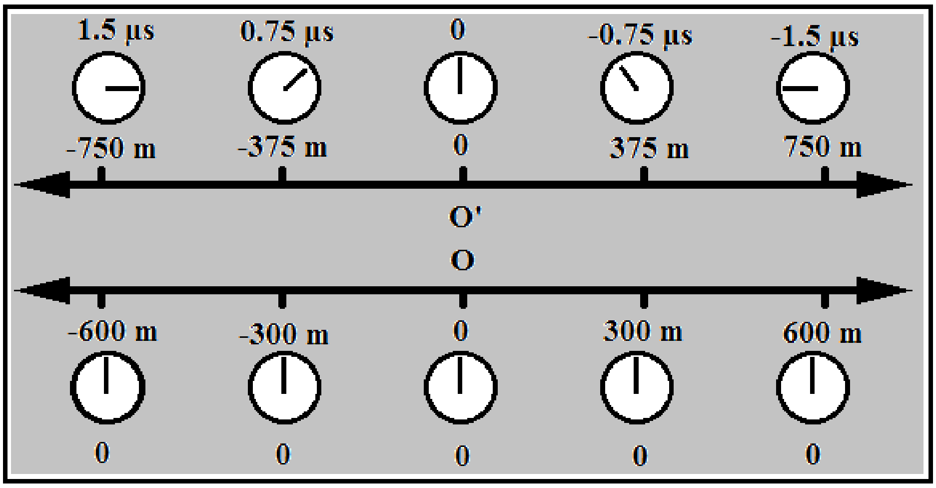

Bild 1: Zeiten synchroner Uhren vom System O aus gesehen (nachgearbeitet [Pet] S. 20)

Alle die Raumpunkte, für die das zutrifft, sind die Punkte einer sich ausbreitenden Lichtkugel, wie sie Einstein ([Ein]) beschrieb (vgl. [Syd] S. 39 f.). Sie werden einfach durch Anwendung der Formeln für x-Koordinaten und die Zeit der Lorentz-Transformation berechnet.

Daraus folgt zwingend, dass zur Umrechnung des Punktes eines Systems in das andere ein Betrachtungsnullpunkt zu definieren ist, bei dem die Uhren beider Systeme auf null gesetzt,

respektive verglichen werden. An diesem Nullpunkt würde die Umrechnung von Zeit und Weg ohne Einfluss der Relativgeschwindigkeit sein und direkt von einem System ins andere zu übertragen gehen. Es ergibt sich x = x‘ = 0 und t = t‘ = 0.
Grundsätzlich ergibt sich aus diesem Gedanken und aus der Linearität der Formeln der Lorentz-Transformation, dass eine Strecke, wie z. B. die Länge eines Maßstabes, durch die Transformation von Anfangs- und Endpunkt transformiert werden kann. Diese Punkte sind als Raum-Zeit-Punkte aufzufassen und entsprechend der Konvention nach Gl. 3 wie folgt zu transformieren:

$$\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2 - c^2 \Delta t^2 = 0 = \Delta x'^2 + \Delta y'^2 + \Delta z'^2 - c^2 \Delta t'^2 \qquad \text{Gl. 4a}$$

Zur leichteren Verständlichkeit der Interpretation kann hier der Spezialfall gezeigt werden, in welchem die Strecke Δx in Richtung der x-Achse liegt und die Koordinaten Δy und Δz zu null angenommen werden:

$$\Delta x^2 - c^2 \Delta t^2 = 0 = \Delta x'^2 - c^2 \Delta t'^2 \qquad \text{Gl. 4b}$$

Damit wird klar, dass die Zeiten Δt und Δt’ gerade die Zeitdauern sind, die das Licht benötigt, um die Strecke Δx resp. Δx’ zurück zu legen. Diese Δt sind also keine frei wählbaren Zeitspannen! Also Raum-Zeit-Punkte zu transformieren, worin man die Δx und Δt als unabhängige Größen annimmt, wäre falsch. Die Gleichung Gl. 4b macht unmissverständlich klar, dass im Rahmen der SRT c = dx/dt = dx‘/dt‘ nicht nur zur Ermittlung der Lichtgeschwindigkeit gelten muss, sondern dass diese Beziehung bei der Anwendung der Lorentz-Transformation ebenso zwingend einzuhalten ist.

Diese Erkenntnis ist hier bei der Längentransformation von einem in ein anderes Koordinatensystem zu beachten. Die folgenden Beispiele zeigen, was passiert, wenn man diese Grundlage der Lorentz-Transformation ignoriert:

1. Beispiel: es soll die Länge eines Stabes von einem als ruhend angenommenen System S in ein dazu bewegtes Koordinatensystem S‘ transformiert werden. Dabei befinde sich der Anfang des Stabes zum Zeitpunkt $t_0 = 0$ im Koordinatenursprung ($x'_1 = x_1 = 0$) des Systems S und die Gleichzeitigkeit der zu transformierenden Ereignisse ‚Stabanfang‘ und ‚Stabende‘ sein mit $t_0 = 0$ gegeben. Seine Länge ist mit $\Delta x = x_2 - x_1$ gegeben. Nach der bekannten Transformationsgleichung ergibt sich für die transformierte Länge der Strecke:

$$x'_2 - x'_1 = \frac{x_2 - vt_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - \frac{x_1 - vt_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \qquad \text{Gl. 5}$$

   Daraus ergibt sich nach Einsetzen der angegebenen Bedingungen $x_1 = 0$ und $t_0 = 0$:

$$x'_2 = \frac{x_2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \qquad \text{Gl. 6}$$

   So schön diese Gleichung auch aussieht, so wenig korrespondiert sie mit der Transformationsgleichung der Lorentz-Transformation, die sich für die Transformation des Endpunktes des Stabes hier hätte ergeben müssen. Größter Makel dieser Formel ist, dass sie keine Längenkontraktion, sondern eine Längenstreckung darstellt.

2. Beispiel: es wird ein Stab betrachtet, der auf der x-Achse der beiden sich gegeneinander bewegenden Koordinatensysteme liegt. Der Ansatz zur Ermittlung der transformierten Länge ist mit dem vorhergehenden identisch, nur dass der Anfangspunkt des Stabes nicht im Koordinatenursprung des ISs liegt:

$$x_2' - x_1' = \frac{x_2 - vt_2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - \frac{x_1 - vt_1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \qquad \text{Gl. 7}$$

Hier wird die Gleichzeitigkeit der Messung der beiden Punkte für Anfang und Ende des Stabes unterstellt. Diese drückt sich in $t_1 = t_2$ aus. (vgl. [Fre] S. 33) Es ergibt sich wiederum eine sehr einfache Beziehung:

$$\Delta x' = \frac{\Delta x}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \qquad \text{Gl. 8}$$

Auch die Gleichung kann eigentlich nicht richtig sein, da sie eine Längenstreckung mit $\Delta x' > \Delta x$ (wegen $v < c$) zeigt.

Üblicherweise wird in der Literatur nach rechentechnischem Ermessen diese Gleichung einfach umgestellt. Dann führt die Aussage der Gleichung zu der gesuchten Längenkontraktion für das Δx. Mit dieser Umstellung der Gleichung wird der physikalische Gehalt der Gleichung völlig geändert. Es wird aus einer Längendehnung eine Längenkontraktion gemacht. Daraus ergibt sich der absolute Charakter der Gleichung, der wie folgt auszudrücken wäre: Je nach Auflösung der Gleichung folgt eine Dehnung oder ein Zusammenziehen des betrachteten Stabes.
Die Lösung des Problems hat Einstein (siehe [Ein] S. 895 f) eindeutig beantwortet. Es kommt auf die Messmethode an, wie Anfangs- und Endpunkt des Stabes ermittelt werden. Dabei stellt er heraus, dass es ein als ruhend anzunehmender Beobachter ist, dem nichts anderes übrig bleibt, als die gesuchten Punkte des relativ zu ihm bewegten Stabes über ein Zeitmessverfahren zu ermitteln, weil er wegen der Geschwindigkeit des Stabes ein Anlegen seines Messnormals nicht durchführen kann. Nach Einstein ist es „die Länge des [bewegten] Stabes im ruhenden System" ([Ein] S. 896), die sich nach der Gleichung Gl. 8 berechnet.

3. Beispiel: Um die Hürde mit dem Umstellen zu umgehen, wäre es möglich und auch nicht unlogisch, wenn man behaupten würde, dass die Gleichzeitigkeit der Messung von Anfangs- und Endpunkt der Strecke im gestrichenen System gegeben sein muss. Die Gleichzeitigkeit der Messung soll also für das System gelten, für das auch die Länge ermittelt werden soll. Dann folgte ein anderer Rechenweg mit demselben Ansatz (vgl. [Kuc] S. 599):

$$x_2' - x_1' = \frac{x_2 - vt_2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - \frac{x_1 - vt_1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \text{ mit } k = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \qquad \text{Gl. 9}$$

in welchen nun die Beziehung der Zeit für die ungestrichenen Größen zu substituieren ist:

$$t = k\left(t' + \frac{v}{c^2}x'\right) \qquad \text{Gl. 10}$$

und es folgt:

$$x_2' - x_1' = k\left(x_2 - vt_2 - x_1 + vt_1\right) \text{ [Kurzschreibweise von Gl. 9]} \qquad \text{Gl. 11}$$

$$x_2' - x_1' = k\left(x_2 - vk\left(t_2' + \frac{v}{c^2}x_2'\right) - x_1 + vk\left(t_1' + \frac{v}{c^2}x_1'\right)\right). \qquad \text{Gl. 12}$$

In die Gleichung werden die Differenzen von Stellen mit Δ gekennzeichnet und die Gleichheit der Zeitpunkte $t_2' - t_1' = 0$ beachtet. Diese Gleichzeitigkeit bedeutet, dass es der mitbewegte Beobachter ist, der hier die Messung durchführt:

$$\Delta x' = k\left(\Delta x - vk\frac{v}{c^2}\Delta x'\right) = k\Delta x - k^2\frac{v^2}{c^2}\Delta x' \qquad \text{Gl. 13}$$

und es folgt nach einigen Umstellungen:

$$\Delta x'\left(1 + k^2\frac{v^2}{c^2}\right) = k\Delta x \qquad \text{Gl. 13a}$$

$$k^2\Delta x'\left(\frac{1}{k^2} + \frac{v^2}{c^2}\right) = k\Delta x \qquad \text{Gl. 13b}$$

$$k^2\Delta x'\left(1 - \frac{v^2}{c^2} + \frac{v^2}{c^2}\right) = k\Delta x \qquad \text{Gl. 13c}$$

$$k^2\Delta x' = k\Delta x \qquad \text{Gl. 14}$$

was zu:

$$\Delta x' = \Delta x\sqrt{1 - v^2/c^2} \qquad \text{Gl. 15}$$

führt.

Selbst wenn diese Gleichung nun das gewünschte Ergebnis bringt, dass nämlich die Länge kontrahiert, so ist dennoch die Perspektive, aus der die Kontraktion festgestellt wird, nicht die von Einstein vorhergesagte.

Es ist nun zu zeigen, wie eine Längen-Transformation im 4-dimensionalen Raum korrekt durchzuführen wäre. Dazu ist wiederum von dem bekannten Ansatz Gl. 9 auszugehen.

In diesem Ansatz sind die bekannten Transformationsgleichungen der Lorentz-Transformation zu substituieren:

$$x_2' - x_1' = k\left(x_2 - vt_2 - x_1 + vt_1\right) \qquad \text{Gl. 11}$$

Aber in Abweichung vom vorherigen Rechengang ist diese Gleichung nun ohne weitere Einschränkungen aufzulösen und es folgt:

$$\Delta x' = k\left(\Delta x - v\Delta t\right) \qquad \text{Gl. 16}$$

Hierin ist das Δt wie in Gl. 4 beschrieben durch Δx/c ersetzbar:

$$\Delta x' = k\left(\Delta x - \frac{v}{c}\Delta x\right) \qquad \text{Gl. 17}$$

Es lässt sich nun umstellen zu:

$$\Delta x' = \frac{\Delta x}{\sqrt{1-v^2/c^2}}\left(1-\frac{v}{c}\right) = \Delta x\sqrt{\frac{1-\frac{v}{c}}{1+\frac{v}{c}}} \qquad \text{Gl. 18}$$

Diese Form der Transformation zeigt das gewünschte Verhalten. Die Gleichung ist nach mathematischen Regeln umzustellen oder sie kann nach der bekannten Konvention – tausche die ungestrichenen mit den gestrichenen Größen und vertausche die Vorzeichen vor der Relativgeschwindigkeit v – verändert werden. Beide Verfahren bringen dasselbe Ergebnis. Diesem Ergebnis ist vorerst eine eindeutige Zuordnung der Kontraktion oder Streckung der transformierten Länge gegeben. Sie ergibt sich aus der Festlegung des Vorzeichens der Relativgeschwindigkeit. Das bedeutet, dass der Effekt mit dem Doppler-Effekt identisch ist.

So bleibt die Frage nach dem Relativitätsprinzip. Kann ein Beobachter erkennen, ob er sich im ‚bewegten' oder ‚ruhenden' System befindet? Diese Frage lässt sich erst beantworten, wenn die Konvention der Relativgeschwindigkeit v festgelegt wurde. Stellt man sich vor, dass das Entfernen zweier Objekte mit einer positiver und das Zusammenkommen derselben mit einer negativen Geschwindigkeit verbunden wird, ergibt sich für jeden Beobachter dasselbe Vorzeichen der von ihm interpretierten Geschwindigkeit, obwohl die betrachteten Geschwindigkeiten für die beiden Beobachter gerade konträr gerichtet sind. Es gilt die Beziehung v = - v' (siehe [Syd] S. 117 Gl. 13).
Beachtet man diesen Umstand in Gleichung Gl. 2, sehen die Beziehungen für beide Beobachter identisch aus:

$$x = \frac{x' - \mathrm{v}'t'}{\sqrt{1-\mathrm{v}'^2/c^2}} \rightarrow \qquad x' = \frac{x - \mathrm{v}t}{\sqrt{1-\mathrm{v}^2/c^2}} \qquad \text{Gl. 19}$$

Diese etwas ungewohnt wirkende Darstellung der Transformationsgleichungen deutet nun unmissverständlich auf das Relativitätsprinzip hin. Die Verkürzung von Strecken ist aus jedem IS für Strecken eines relativ bewegten Systems ableitbar.

Schlussfolgerungen

Einstein hat in seiner Arbeit von 1905 ([Ein]) eine solche Rechnung, wie sie zur Findung der Gleichung Gl. 8 hier gezeigt wurde, nicht durchgeführt. Zur Visualisierung der von ihm gefundenen Formeln (siehe [Ein] S. 902) konstruiert er einfach einen Fall, für den er den Zeitpunkt der Betrachtung gerade mit t = 0 festlegte. Er betrachtete eine bewegte Kugel, deren Abmessungen im System des mit der Kugel mitbewegte Beobachters vom Radius R ist.

Wenn Einstein davon spricht, dass er „eine starre Kugel vom Radius R" ([Ein] S. 903) „betrachtet" (ebd.), dann wäre zu untersuchen, wie er das anstellt. Natürlich kann die Existenz der Kugel vorausgesetzt werden. Die Gestalt der Kugel sollte auch unabhängig von der Zeit unverändert bleiben.

Doch will man die Gestalt aus unterschiedlichen ISen betrachten und diese miteinander vergleichen, muss man sich über das Messverfahren unterhalten, mit welchem die Gestalt der Kugel aus diesen mit einer Relativgeschwindigkeit gegeneinander bewegten ISen ermitteln möchte (vgl. [Ein] S. 895 f). Dieses für die SRT grundlegende Messverfahren ist nach Einstein (ebd.) der Vergleich von Lichtlaufzeiten.
Jeder Beobachter wird dazu eine Lichtkugel zu dem Zeitpunkt initiieren, an dem er sich im Zentrum der Kugel befindet. Sollte es ihm dann auf irgendeine Weise möglich sein, die sich mit der Zeit ausbreitende Lichtkugel zu beobachten, wird er zu einem Zeitpunkt t = R/c feststellen, dass seine Lichtkugel mit der zu betrachtenden starren Kugel übereinstimmt. Diesen Umstand hat Einstein in seiner Veröffentlichung ([Ein] S. 901) dargelegt. In [Syd] S. 121 ff. ist diese Rechnung ausführlich nachzuvollziehen. Dass gemäß der speziellen Relativitätstheorie dazu in jedem IS ein anderer Zeitlauf zu unterstellen ist, sollte einleuchten.

Nur zwei Seiten nach dieser grandiosen Erkenntnis, die sich aus der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit ableitet, zeigt Einstein (ebd. S. 903), dass die relativ bewegte Kugel für den relativ ruhenden Beobachter ein „Rotationsellipsoid“ (ebd.) wird.
Der hier von Einstein gedachte Gedankengang ist in der modernen Schreibweise wie folgt:

- ausgehen von der Lorentz-Transformation der x-Komponente
  $$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \qquad \text{Gl. 20}$$
- folgt für den Zeitpunkt t = 0
  $$x' = \frac{x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \qquad \text{Gl. 21}$$
- sodass die Kugel im bewegten System gemessen
  $$x'^2 + y'^2 + z'^2 = R^2 \qquad \text{Gl. 22}$$
- und dass die Kugel im bewegten System gemessen zu
  $$\frac{x^2}{\left(\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}\right)^2} + y^2 + z^2 = R^2 \qquad \text{Gl. 23}$$
  wird.
- Betrachtet man nun die die x-Komponente auf der x-Achse, sodass y und z gerade zu null werden, folgt
  $$x^2 = R^2 \left(\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}\right)^2 \qquad \text{Gl. 24}$$
  resp.
  $$x = R\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \qquad \text{Gl. 24a}$$
  was zu einer Verkürzung des x gegenüber R führt.

Hier ergibt sich ein wesentlicher Widerspruch. Eine Lichtkugel bleibt für jeden Beobachter unabhängig von seinem Bewegungszustand eine Kugel. Eine Kugel, die sich in ihrem eigenen IS mit einer Lichtkugel decken kann, die also zu einem bestimmten Zeitpunkt t = R/c kongruent der Lichtkugel ist, wird von einem relativ zu Kugel bewegten Beobachter als Rotationsellipsoid gesehen, obwohl der Beobachter die deckungsgleiche Lichtkugel als solche Kugel wahrnimmt.

Dieser Widerspruch ist sicherlich noch zu diskutieren, soll aber hier nicht vorschnell zur Bewertung der SRT als eine fehlerhafte Theorie führen.
Interessant ist aber dieser kurze Schluss, der hier zur Längenkontraktion führt. Die große Frage dabei ist die, ob dasselbe Ergebnis einer Längenkontraktion zustande gekommen wäre, wenn man nicht den Zeitpunkt t = 0 (siehe Gleichung Gl. 21) gewählt hätte.
Offen ist auch die Frage, warum es bei grundsätzlich zu einer Längenkontraktion kommen muss und es nicht auch eine Längendilatation geben kann, so wie sich aus den Gleichungen Gl. 6 und Gl. 8 ergibt. Hier spielt sicherlich die Interpretation von Lorentz hinein, der bei der Auswertung des Michelson-Experiments die Lösung in der Längenkontraktion sah.
Also bleibt zu überlegen, ob es die Längenkontraktion gar nicht geben kann (siehe [Ein] S. 901; vgl. Gl. 22).

Wenn es aber eine Längenkontraktion geben sollte, dann –so zeigt die Herleitung des durchexerzierten Beispiels 3- darf die Gleichzeitigkeit von Ereignissen nicht im messenden System abgenommen werden. Das Beispiel 3 zeigt eindeutig, dass zur Bestimmung der Länge eines relativ bewegten Stabes die Gleichzeitigkeit der abgegebenen Signale im System des Stabes wichtig ist.
Nach den Forderungen der SRT würde das bedeuten, dass der Beobachter im ruhenden System die Signale nicht gleichzeitig empfangen kann. Das aber ist auch nachvollziehbar, denn der Beobachter ermittelt die Länge des zu messenden Stabes gerade aus dem zeitlichen Unterschied der empfangenen Signale und diese kommen eben nicht gleichzeitig bei ihm an.

Literatur

[Eck] Eckstein, D.: Epstein erklärt Einstein
genius media AG Frauenfeld (Schweiz) 14.10.2008
http://www.relativity.li/epstein/pdf-downreads.html

[Ein] Einstein, A.: Zur Elektrodynamik bewegter Körper
Annalen der Physik, Jg. 17, 1905, S. 891-921 Bern Juni 1905
http://www.pro-physik.de/Phy/pdfs/ger_890_921.pdf

[Emb] Embacher, F.: SRT
metager Wien (Österreich) cited 04.12.2008
http://homepage.univie.ac.at/franz.embacher/SRT

[Fre] Freund, J.: SRT für Studienanfänger, ein Lehrbuch
vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich (UTB) Zürich 3. Aufl. (03/2007) cited 29.10.2018
http://www.relativity.ch/kap06.pdf

[Kuc] Kuchling, H.: Taschenbuch der Physik
Carl Hanser Verlag München 24. Aufl. 08.10.2014

[Pet] Petry, S.: Die Spezielle Relativitätstheorie, 1. Teil: Eine (fast) allgemein verständliche Einführung
google unbekannt 07.01.2008
http://home.vrweb.de/~si.pe/Spezielle%20Relativitaetstheorie%20-%201.%20Teil.pdf

[Syd] Sydow, R.: Der jüngere Zwilling, eine wissenschaftlich angehauchte Diskussion
Cuvillier Verlag Göttingen 2014

[Thi] Thim, H.: Falsifizierung der Relativitätstheorie, Wellenausbreitung und Relativität
Johannes Kepler Universität Linz (google) Linz (15.03.2010) cited 18.12.2011
http://www.wissenschaftliche-physik.com/Anhaenge/Hartwig-Thim-Paper.pdf