Über kurz oder lang

eine kritische Analyse

R. Sydow, Niederfinow (Deutschland)
(2023)

abstrakt: Sie sind in aller Munde, die Längenkontraktion und die Zeitdilatation. Es gibt in der Wissenschaft keinen Zweifel, dass bewegte Maßstäbe verkürzt sind und Zeitspannen aufgrund langsamer gehender Uhren gedehnt sind. Diese Auffassung begründet sich auf Einsteins Herleitung ([Ein2] S. 903 f). Er stellte damit heraus, dass für ein Lichtquant, das einen kürzeren Weg zurücklegt, dafür auch nur eine kürzere Zeitspanne benötigt. Das wird durch die langsamer gehende Uhr erreicht.

Überprüft man aber die in der speziellen Relativitätstheorie verwendeten Formeln für die Zeitdilatation, wird man feststellen, dass diese auf eine gedehnte Zeit mit größeren Zeitspannen führt.

Es werden die Ursachen für diesen Fehler gezeigt und die Anwendungskonventionen der Lorentz-Transformation vorgegeben.

Quellenangabe: Sydow, R. Über kurz oder lang, eine kritische Analyse Niederfinow (Deutschland) 21.05.2023
https://rolfswelt.de/physik/#lt-über-kurz-oder-lang
Revision: 1.1.0.4 vom 20.07.2023

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen

IS	Inertialsystem
LK	Längenkontraktion
LT	Lorentz-Transformation
SRT	spezielle Relativitätstheorie
ZD	Zeitdilatation

Einleitung

Die LK und die ZD sind die Ergebnisse der in der SRT angewendeten LT. Sie resultieren aus den Gedanken, dass sowohl das Relativitätsprinzip als auch das Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit gelten müssen.
Den Regeln der LT zu folgen und die Zusammenhänge der Transformation von räumlichen und zeitlichen Koordinaten zu begreifen, ist als mathematischer Akt aufzufassen und somit nachvollziehbar.
Es ergeben sich die folgenden Zusammenhänge:

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \text{ und } x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad \text{(siehe [Syd1] S. 120 Gl. A2.8)} \qquad \text{Gl. 1}$$

$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \text{ und } t = \frac{t' + \frac{v}{c^2}x'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad \text{(siehe [Syd1] S. 120 Gl. A2.10)} \qquad \text{Gl. 2}$$

Diese Zusammenhänge, die sind als die LT hinlänglich bekannt.
In [Syd1] S. 123 f ist gezeigt, dass sich die beiden Gleichungen in Gl. 1 mithilfe der Gleichungen in Gl. 2 direkt ineinander überführen lassen. Also trotz der identischen Form dieser beiden Gleichungen in Gl. 1 sind sie nicht nur durch die zyklische Vertauschung, sondern auch durch eine mathematisch korrekte Umstellung ineinander zu überführen.

Für die weiteren praktischen Überlegungen helfen diese Formeln aber nicht wirklich weiter. Wenn sie also mathematisch korrekt sind, sind sie nicht praktikabel. Niemand[1] kann sich in einem Bewegungsprozess die Transformation des Weges mit gleichzeitiger Transformation der Zeit vorstellen. Das gilt insbesondere dann, wenn wie in den beiden Gleichungen Gl. 1 und Gl. 2 alle Variablen x, x‘ t und t‘ gegenseitig voneinander abhängig sind.
Also wird nach einer Möglichkeit gesucht, die Einflüsse der Zeit auf den Raum und des Raumes auf die Zeit zu trennen. Dem Wunsch liegt der Gedanke zugrunde, dass die Länge eines Stabes sich in IS (also in unbeschleunigten Systemen) bei einer konstanten Relativgeschwindigkeit nicht ändern kann. Ebenso wird sich der Lauf der Uhren unterschiedlicher IS nicht ändern und das Verhältnis von Zeitspannen in diesen beiden IS bleibt auch konstant.
Es muss sich also sowohl für Stecken als auch für Zeitspannen in zwei relativ zueinander bewegten IS ein konstantes Verhältnis errechnen lassen. Der zu diesem Verhältnis gehörende Koeffizient ist der Relativitätsfaktor:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad \text{([Syd2] S. 5 Gl. 8 und Gl. 9)} \qquad \text{Gl. 3}$$

Die zu beantwortende Frage ist an dieser Stelle lediglich, ob durch diesen Relativitätsfaktor eine Kontraktion oder eine Dilatation für physikalische Größen im relativ bewegten System berechnet.

[1] hier soll keine Verabsolutierung verstanden werden.

Es nun zwingend notwendig, dass sich die Streckenlängen im bewegten System verkürzt darstellen (LK) und der Lauf der Uhren im bewegten System langsamer von statten geht (ZD). Formal wäre es an dieser Stelle der Überlegungen auch noch denkbar, dass es eine Längendilatation und eine Zeitkontraktion geben könnte. Letztlich muss zwingend das Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit eingehalten werden. Wird also eine Strecke L mittels Zeitmessung eines die Strecke durchlaufenden Lichtquants gemessen, muss sich unabhängig vom betrachteten IS immer die Lichtgeschwindigkeit c als Quotient aus dieser Strecke L durch die Laufzeit Δt für dieses Photon ergeben.
Es muss also uneingeschränkt gelten:

$$c = \frac{L}{\Delta t} = \frac{L'}{\Delta t'} \qquad \text{Gl. 4}$$

Gibt es also ein Verhältnis k = L/L‘ folgt aus Gleichung Gl. 4, dass ebenso k = Δt/Δt‘ sein muss.

Für den Fall also, dass k = γ (s. Gl. 3) sei, ist L‘ < L und es handelt sich also für L‘ um eine Längenkontraktion. Damit muss die Zeitspanne Δt‘ ebenso Δt‘ < Δt sein. Das kann nur erreicht werden, wenn die Uhr, mit welcher die Zeitspanne Δt‘ gemessen wurde, langsamer gelaufen ist, als die Uhr, mit der die Zeitspanne Δt gemessen wurde. Die langsamer laufende Uhr, wird einem Prozess die geringere Zeitspanne zuordnen, als wenn sie denselben Prozess schneller laufend gemessen hätte.
Wenn Einstein sagt: „Zeit ist das, was man an der Uhr abliest“ ([Ein1]; vgl. [Ein2][2]) sollte die Zeit in dem IS langsamer vergehen, in welchem die Uhr die geringere Zeit für den Messprozess angezeigt hat. Der Logik dieses Absatzes folgend sollte es also die Zeit Δt‘ sein, die die geringere ist. Da Δt‘ für die Zeitspanne im bewegten IS steht, wäre es also nicht unlogisch, dem bewegten IS eine langsamer gehende Uhr zuzuordnen.
Somit erweist sich der Gedankengang Einsteins, der für das bewegte System eine LK und eine ZD proklamiert, als nachvollziehbar und schlüssig.

Das Problem

Die in der Einleitung getätigte Aussage ist ohne jegliche Herleitung. Es handelt sich dabei nur um eine Darstellung der Logik, die sich aus dem Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit ergibt.
In dieser Darstellung wäre es ohne Änderung der sich ergebenden Aussage denkbar, dem Verhältnis k = L/L‘ jeden beliebigen anderen Wert beizumessen. Beispielsweise wäre es auch möglich, diesem Verhältnis den Wert k = 1/γ zuzuordnen. Dann wäre das Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit durch eine Längendilatation und eine Zeitkontraktion zu erklären. Die Ermittlung des tatsächlichen Wertes für k erfordert dann eine Herleitung.

[2] Er sagt: „[…] an Stelle der ‚Zeit‘ die ‚Stellung des kleinen Zeigers meiner Uhr‘ setze“ ([Ein2] S. 893)

Damit sollte gezeigt sein, dass bei allen Überlegungen die LK und ZD betreffend das Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit primär ist.
Es ist hier nochmals herauszustellen, dass LK und ZD zur Erklärung der SRT genau in der Weise zu verstehen sind, dass die Länge eines Stabes in einem relativ bewegten IS verkürzt ist[3] und Zeitabschnitte in diesem IS ebenfalls verkürzt sein müssen.
Dilatation der Zeit bedeutet also aus diesem Gedanken abgeleitet, dass die Prozesse in diesem IS wie in Zeitlupe vergehend zu verstehen sind und somit zeitliche Dauern als gedehnt aufgefasst werden, obwohl die von den Uhren im bewegten System abgelesenen Dauern kleinere Werte haben. Diese etwas umständlich erklärte ZD, muss wegen der Einhaltung des Prinzips der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit und des aus der Herleitung abgeleiteten Koeffizienten k = γ immer zur Verkürzung von Zeitdauern führen.
Zur Verdeutlichung und mit den Konventionen aus Gleichung Gl. 1 und Gl. 2 folgt also nach Gleichung Gl. 4:

$$\mathrm{L}' = \frac{\mathrm{L}}{\gamma} \qquad \text{Gl. 5a}$$

$$\Delta t' = \frac{\Delta \mathrm{t}}{\gamma} \qquad \text{Gl. 5b}$$

worin die gestrichenen Größen den Messwerten im relativ bewegten IS entsprechen und die ungestrichenen Größen im IS des darin ruhenden Beobachters gemessen werden.
Weil γ wegen v < c immer größer 1 sein muss, werden die gestrichenen Größen immer kleiner als die ungestrichenen sein.

Schaut man nun aber in die Literatur, wird es chaotisch.
Es gibt gestrichene Größen, die im relativ bewegten IS gelten und ungestrichene Größen, die als Eigengrößen im IS des Beobachters Gültigkeit haben. Manchmal werden griechische und lateinische Buchstaben zur Differenzierung der Variablen der unterschiedlichen IS verwendet. Wesentlich ist aber immer zu bestimmen, welche Größe für die Betrachtung in welchem IS steht. Letztlich sind die Formeln manchmal nach den Größen des relativ bewegten IS aufgelöst und dann gibt es wieder Gleichungen, deren Eigengrößen explizit dargestellt werden.
Es ist also bei der Betrachtung der in der Literatur angegebenen Formeln für die Relation von Längen und Zeitspannen unterschiedlicher IS peinlich genau darauf zu achten, was sie ausdrücken sollen.

Während nun allgemeiner Konsens darüber herrscht, dass für die Längenverhältnisse unterschiedlicher IS mit der Gleichung Gl. 5a die LK nachgewiesen ist, wird üblicherweise für die Zeitdilatation der reziproke Zusammenhang der Gleichung Gl. 5b angenommen (vgl. [Mes] S. 623 (Beispiel); [Reb] S. 42 (3.74); vgl. [Str] S. 12 (30)). Die ZD läuft auf eine

[3] es wird hier bewusst nicht gewertet, ob es sich um eine reale Längenverkürzung handelt oder die Verkürzung nur als solche erscheint

Zeitverlängerung hinaus. Damit wird der Widerspruch offenkundig. Die ZD wird im Allgemeinen als eine Zeitspannenverlängerung interpretiert. Damit spiegelt sich in solchen Formeln für die ZD eine Vergrößerung gemessener Zeitspannen im relativ bewegten IS wider. So scheint dieser Widerspruch auf die Interpretation des Begriffs der Dilatation hinauszulaufen. Wird eine Zeitspanne bei langsamer vergehender Zeit gedehnt und damit durch einen zur ungedehnten Zeitspanne geringeren Wert haben oder bedeutet die Dehnung der Zeitspanne, dass ihr ähnlich einem gedehnten Gummiband ein größerer Wert zugeordnet werden muss?
Diese Problematik soll im Folgenden untersucht werden.

Die Herleitung

Das Nachvollziehen einer schlüssigen Herleitung für LK und ZD gestaltet sich eher schwierig.
Sucht man bei Einstein nach der ursprünglichen Form einer solchen Herleitung, fällt das Ergebnis eher deprimierend aus. Nicht dass Einstein sich des Themas nicht angenommen hätte. Er bietet schon Lösungen für LK und ZD an. Diese aber als hergeleitet zu bezeichnen, wäre weit hergeholt.

Die LK leitet Einstein einfach aus der Transformation einer Kugel von einem bewegten IS (es sei hier mit ‚Σ‘ bezeichnet) in das ruhende IS ‚S‘ des Beobachters ab.

Er stellt fest, dass eine solche Kugel in ihrem IS ‚Σ‘ vermessen der allgemeinen Kugelgleichung in den Koordinaten des IS genügen muss:

$\xi^2 + \eta^2 + \zeta^2 = R^2$ ([Ein2] S. 903) Gl. 6a

Es ist aus der Gleichung Gl. 6 abzuleiten, dass sich die Kugel mit ihrem Mittelpunkt gerade im Koordinatenursprung des IS ‚Σ‘ befindet.

Dann behauptet er, dass er diese Kugel zu einem Zeitpunkt t = 0 in das IS ‚S‘ eines Beobachters überführen kann und benutzt die Gleichungen der LT (vgl. Gl. 1):

„$\frac{x^2}{\left(\sqrt{1-\left(\frac{v}{V}\right)^2}\right)^2} + y^2 + z^2 = R^2$“ (ebd.)[4] Gl. 6b

In der Gleichung Gl. 6b wurde dabei schon berücksichtigt, dass der Zeitpunkt t mit null angenommen wurde. Es wurde also gerade der Zeitpunkt gewählt, als die Koordinatenursprünge der beiden IS ‚Σ‘ und ‚S‘ übereinander lagen.

Dann schlussfolgerte Einstein, dass das x in Gleichung Gl. 6b kleiner als der Radius R sein muss. Er konstatiert: „Ein starrer Körper, welcher in ruhendem Zustande ausgemessen die Gestalt einer Kugel hat, hat also in bewegtem Zustande […] die Gestalt eines Rotationsellipsoides [..]“ (ebd.). Damit war die LK begründet.

[4] das große ‚V‘ steht bei Einstein für die Lichtgeschwindigkeit

Welche interessante Schlussfolgerung lässt sich aber aus dieser Rechnung noch ableiten? Diese wäre, dass bei der Transformation der Kugelgeometrie von einem IS ‚Σ' in das IS ‚S' der Radius R erhalten bleibt. Diesem Umstand liegt sicherlich der Gedanke zugrunde, dass die zur Bewegungsrichtung orthogonalen Koordinaten bei der Transformation unbeeinflusst bleiben sollen. Die maximale Ausdehnung der Kugel in diese Richtungen y und z sollen auch im IS ‚S' den Wert R haben.
Doch welchen Makel hat diese Betrachtung der Kugeltransformation? Warum wird in der modernen Physik nicht auf diese sehr einfache Herleitung zurückgegriffen?
Die Antwort auf diese Fragen ist 2 Seiten vor dieser Herleitung in derselben Arbeit Einsteins zu finden (siehe [Ein2] S. 901). Dort zeigt er, dass die Transformation einer „Kugelwelle" (ebd.) ausgesendeten Lichts wiederum auf eine Kugelwelle führt. Eine solche Lichtkugel:
$\xi^2 + \eta^2 + \zeta^2 = V^2\tau^2$ ([Ein2] S. 901) Gl. 7a
ist in jedem IS eine Kugel:
$x^2 + y^2 + z^2 = V^2t^2$ ([Ein2] S. 901). Gl. 7b
Wenn Einstein diesen Zusammenhang „nach einfacher Rechnung" erhält, dann ist dieser in [Syd1] S. 121 f Anl. 3 nachvollzogen.
Unterstellt man also, dass in jedem IS eine Kugel als starrer Körper durch eine Lichtkugel ersetzbar ist, muss auch bei jeder Transformation einer solchen starren Kugel in Analogie zur Lichtkugel die Kugelform erhalten bleiben.

Die Herleitung einer ZD fällt bei Einstein ([Ein2] S. 904) noch einfacher aus. Er geht von der Transformationsgleichung für die Zeit aus (siehe Gleichung Gl. 2) und ermittelt einen Weg x = vt, den eine bewegte Uhr im ruhenden System gemessen voranschreitet:
$t' = \frac{t-\frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1-v^2/c^2}} = \frac{t-\frac{v}{c^2}vt}{\sqrt{1-v^2/c^2}} = \frac{t\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)}{\sqrt{1-v^2/c^2}} = t\sqrt{1-v^2/c^2}$ (vgl. ebd.) Gl. 7
Damit ergibt sich in einfachster Weise eine mögliche Herleitung der ZD. Sie korrespondiert exakt mit der oben beschriebenen Form der ZD in Gleichung Gl. 5b.
Doch ist sie auch schlüssig?
Es ist doch noch zu diskutieren, inwieweit die Annahme und das Einsetzen der Beziehung von x = vt in die Gleichung der LT zulässig ist.
So zeigt Petry (in [Pet] S. 20 Abb. 17), dass es durch die LT eine direkte Abhängigkeit zwischen dem Ort und der Zeit bei der Transformation von raumzeitlichen Koordinaten gibt. Diese Abhängigkeit resultiert aus der Herleitung der LT selbst. Einstein zeigte bei seiner Herleitung der Gleichungen der LT, dass wegen der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit x = ct anzusetzen ist (vgl. [Ein2] S. 899). Auch ist gezeigt ([Syd1] S. 119 Anl. 2), dass die LT nur die bekannten Ergebnisse (siehe Gleichungen Gl. 1 und Gl.2) ergibt, wenn:
$\frac{x}{t} = \frac{x\prime}{t\prime} = c$ (ebd. Gl. A2.6; vgl. auch [Rös]) Gl. 8
eingehalten ist. Ohne diese Bedingung wäre die LT nicht auflösbar. Dass daraus zu schließen sein könnte, dass die LT ausschließlich für Licht gilt, wäre noch zu diskutieren.

Ohne hier einen möglichen Fehler in Einsteins Herleitung der ZD andeuten zu wollen, sei auf die Diskussionswürdigkeit derselben hingewiesen. Die Frage, ob in diesem Raum-Zeit-Kontinuum und der Anwendung der LT bei den Variablen x und t von unabhängigen Variablen gesprochen werden kann (vgl. [Kre] 1. Kapitel), ist noch nicht eindeutig dargelegt.

Insofern sind die moderneren Versuche der Ableitung von LK und ZD weitestgehend auf den Formeln der LT basierend. Damit ist der Ausgangspunkt für die Transformation von Strecken und Zeitspannen von einem zu einem anderen IS immer die von Einstein entwickelte[5] LT (siehe Gleichungen Gl. 1 und Gl. 2). Es werden die Strecken und Zeitspannen durch raumzeitliche Punkte in einem IS definiert und dann mittels der LT in ein anderes IS transformiert.
Hier sei erwähnt, dass die Festlegung der Koordinatenursprünge von IS rein willkürlich ist. Insofern kann auch immer ein raumzeitlicher Punkt eines IS durch dessen Ursprung repräsentiert werden. Damit würde sich der Rechenaufwand halbieren, wenn man für übereinanderliegende Koordinatenursprünge zweier IS die Beziehung $x_0 = x_0' = t_0 = t_0' = 0$ ansetzte. Es ergäbe sich, dass die Transformation eines raumzeitlichen Punktes hinsichtlich einer Dehnung oder Verkürzung zu identischen Ergebnissen führen würde.

Die Herleitung von LK und ZD aus der LT ist nun sehr einfach. Man nehme die Gleichungen der LT (siehe Gleichung Gl. 1 und Gl. 2) und betrachte diese für 2 raumzeitliche Punkte. Mit der Differenz dieser Punkte lässt sich dann auf eine LK oder eine ZD schließen, wenn die Differenz zu einem Zeitpunkt oder an einem Ort betrachtet wird.
So ist für die Herleitung der Längenkontraktion eine Differenz $x_2' - x_1'$ zu bilden. Das kann zu einem Zeitpunkt $t = t_1 = t_2$ im ungestrichenen System gemacht werden:

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

Da die Gleichung Gl. 9 aber eine Längendilatation ausdrückt, wird sie noch umgestellt. Es folgt:

$$x_2 - x_1 = \sqrt{1 - v^2/c^2}\,(x_2' - x_1') \quad \text{(vgl. [Str] S. 11 (28))} \qquad \text{Gl. 9b}$$

Die LK kann aber auch zur einem Zeitpunkt $t' = t_2' = t_1'$ im gestrichenen System ermittelt werden, sodass die Zeiten t_1 und t_2 in Gleichung Gl. 9a durch ihre transformierten Zeiten zu ersetzen sind:

$$x_2' - x_1' = \frac{x_2 - vt_1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} - \frac{x_1 - vt_2}{\sqrt{1-v^2/c^2}} = \frac{x_2 - v\frac{t_2' + \frac{v}{c^2}x_2'}{\sqrt{1-v^2/c^2}}}{\sqrt{1-v^2/c^2}} - \frac{x_1 - v\frac{t_1' + \frac{v}{c^2}x_1'}{\sqrt{1-v^2/c^2}}}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \qquad \text{Gl. 10a}$$

Für die genannte Bedingung führt die Auflösung der Gleichung Gl. 10a zu:

$$x_2' - x_1' = \sqrt{1 - v^2/c^2}\,(x_2 - x_1) \quad \text{(siehe [Syd2] S. 5 f; vgl. [Kuc] S. 599)} \qquad \text{Gl. 10b}$$

[5] also die LT unter Einbeziehung einer veränderlichen Zeit

In Analogie zu dieser Rechnung lässt sich auch die ZD ermitteln. Hier wird angenommen, dass die Zeitmessungen am selben Ort x des ungestrichenen Systems stattfinden müssen.
Es ergibt sich für die beiden Zeitpunkte t'_2 und t'_1:

$$t'_2 - t'_1 = \frac{t_2 - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1-v^2/c^2}} - \frac{t_1 - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1-v^2/c^2}} = \frac{t_2 - t_1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \quad \text{(vgl. [Str] S. 12 (30))} \qquad \text{Gl. 11}$$

Damit erhält man direkt eine ZD.
Dass es möglich sein wird, auch hier ein reziprokes Ergebnis zu berechnen, wenn man den Ort $x' = x'_1 = x'_2$ im gestrichenen System wählt, wird wie folgt ausgeführt.

$$t'_2 - t'_1 = \frac{t_2 - \frac{v}{c^2}\frac{x'_2 + vt'_2}{\sqrt{1-v^2/c^2}}}{\sqrt{1-v^2/c^2}} - \frac{t_1 - \frac{v}{c^2}\frac{x'_1 + vt'_1}{\sqrt{1-v^2/c^2}}}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \qquad \text{Gl. 12a}$$

$$t'_2 - t'_1 = \frac{t_2 - t_1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} - \frac{v}{c^2}\frac{x'_2 - x'_1 + v(t'_2 - t'_1)}{1-v^2/c^2} \qquad \text{Gl. 12b}$$

$$t'_2 - t'_1 = \frac{t_2 - t_1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} - \frac{v^2}{c^2}\frac{(t'_2 - t'_1)}{1-v^2/c^2} \qquad \text{Gl. 12c}$$

$$(t'_2 - t'_1)\frac{1}{1-v^2/c^2}\left(1 - \frac{v^2}{c^2} + \frac{v^2}{c^2}\right) = \frac{t_2 - t_1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \qquad \text{Gl. 12d}$$

$$t'_2 - t'_1 = (t_2 - t_1)\sqrt{1 - v^2/c^2} \qquad \text{Gl. 12e}$$

So erhält man wie vorher bei der Transformation der Länge auch hier ein reziprokes Ergebnis für die Zeitdauer. Interessanter Weise korrespondiert diese Herleitung der Zeitdilatation von Gleichung Gl. 12e mit der Herleitung Einsteins (Gleichung Gl. 7), der einen ganz anderen Ansatz verfolgte (siehe oben).

Die Interpretation

Mit der Herleitung der verschiedenen Formeln für die LK und die ZD sollte klar geworden sein, dass mittels Mathematik jedes gewünschte Ergebnis nachgewiesen werden kann.
Zu guter Letzt und zur vollständigen Verwirrung fordert das Relativitätsprinzip, dass in den Gleichungen Gl. 9 bis Gl. 11 die gestrichenen Größen durch die ungestrichenen und die ungestrichenen durch die gestrichenen ersetzt werden können, ohne die Richtigkeit der Formeln einzuschränken (siehe [Kuc] S. 599 f).
Beachtenswert ist der Umstand, dass der in der Literatur so oft zu findende Kunstgriff zur Umwandlung einer Längendilatation in eine LK (siehe von Gleichung Gl. 9a zu Gl. 9b) mit einer Änderung des physikalischen Systems einhergeht (wie in Gleichung Gl. 10 gezeigt)[6]. Solche Kunstgriffe sind zwar mathematisch einwandfrei. Sie setzen aber das Verfahren der LT außer Kraft, sodass sie nur mit entsprechender Sorgfalt angewendet werden dürfen.

Es geht also darum, das physikalische System der LT nachvollziehbar zu analysieren. Dabei hilft es nicht, wenn bei Einstein von einem ruhenden und einem bewegten System die

[6] in Gleichung Gl. 9 wird die LK für den Fall der gleichen Zeitpunkte im ungestrichenen IS gezeigt, während in Gleichung Gl. 10 dieselbe LK wegen der Gleichheit der Zeitpunkte im ungestrichenen System gezeigt wurde.

Rede ist und dann davon gesprochen wird, dass da eine Kugel ist „[…] welche relativ zum bewegten System k ruht […]“([Ein2] S. 903). Selbst wenn es formal korrekt ist, wie Einstein die Beziehungen von Gemessenem und Messenden darstellt, so sollte im Rahmen der SRT von ruhenden und bewegten Systemen gar nicht die Rede sein.
Geht man davon aus, dass alles, was an Beziehungen gegeneinander bewegter Objekte betrachtet wird, durch die LT begründet ist, sollte man sich ausschließlich auf die IS beziehen.

Damit stellt sich die Situation der Betrachtung relativ zueinander bewegter Objekte für die Durchführung einer LT in einfachster Weise wie folgt dar:

- Es gibt 2 IS, die sich mit der Relativgeschwindigkeit v gegeneinander bewegen.
  Ist die Relativgeschwindigkeit $v = 0$ handelt es sich um ein und dasselbe IS.
- Den IS sind Objekte zugeordnet, die relativ zu ihrem IS keine Bewegung aufweisen. Haben sie doch eine Geschwindigkeit $v \neq 0$, sind sie einem anderen IS zuzuordnen.
- Die Objekte sind in ihren IS durch physikalische Größen beschrieben (hier vorrangig durch Längen und deren Kombinationen).
- Zur Beschreibung zeitlicher Änderungen sei jedem IS ein eigener Gang der Zeit zugeordnet.
- Die Darstellung der physikalischen Größen und ihrer zeitlichen Änderungen in einem anderen IS bedarf der LT.

Das sind die Bedingungen zur Darstellung des Sachverhalts, die als Voraussetzungen für eine LT erforderlich sind.
Dabei ergeben sich schon 2 Ungereimtheiten:

- wie soll eine Bewegung in einem IS registriert werden, wenn die zeitliche Änderung einer physikalischen Größe dem IS zugeordnet werden muss, in welchem diese zeitliche Änderung zu null wird, in welchem die physikalische Größe als ruhend angenommen werden kann
- wenn jedem IS ein bestimmter Lauf der Zeit, der mit dem Gang der dem IS zugeordneten Uhren bestimmt ist, dann führt das auf eine absolute Auffassung von der Zeit für dieses IS

Abstrahiert man aber von diesen Einwänden zum Aufbau von IS, kann man sich der Frage widmen, in welcher Weise LK und ZD mittels LT begründet werden können.

Das nun zu lösende Problem ergibt sich aus den Gleichungen Gl. 9 bis Gl. 12. Welche der Gleichungen ist korrekt? Welcher Herleitung ist zu folgen?
Um zuerst dieser Frage bezüglich der ZD nachgehen zu können, werden zwei IS (siehe Bild 1) betrachtet. Das als ‚ruhend‘ anzunehmende System S(x; y) ist das rötliche IS, von dem aus die Betrachtung einer bewegten Uhr stattfinden soll. Die Uhr ist Bestandteil des relativ bewegten und blau dargestellten IS S‘(x‘; y‘). Sie bewegt sich mit der Relativgeschwindigkeit v zum System S.

Um eine Zeitspanne zu registrieren, wird die LT auf die Zeit t‘ zu den Zeitpunkten t‘ = 0 und t‘ = t_1 angewendet.
Der Skizze (Bild 1) ist nun eindeutig zu entnehmen, dass es die Koordinaten x_1‘ ist, an welcher sich die Uhr im bewegten System S‘ über die Zeit aufhält. Der zwingende Schluss ist damit der, dass die Gleichung Gl. 12 Anwendung finden muss.

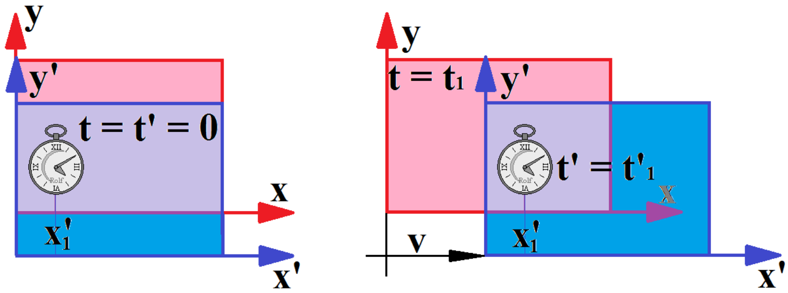

Bild 1: Zeitdilatation in IS

Dieser Schluss führt dann darauf, dass die Zeitspanne im gestrichenen System S‘ kleiner ist, als die im ungestrichenen System S:

$\Delta t' = \Delta t\sqrt{1 - v^2/c^2}$ Gl. 12f

Wie in Gleichung Gl. 7 gezeigt, fällt Einsteins Einschätzung konform aus. Einstein unterlässt es aber, diesen Effekt der der langsamer gehenden Uhr als eine Zeitdilatation zu bezeichnen. Der Gedanke, dass dieser Effekt der kürzeren Zeitspannen einer Dehnung der Zeit gleichzusetzen ist, kam erst später (vgl. [Pet] S. 31). Das bedeutet, dass der Begriff der ZD auf die kürzere Wahrnehmung von Zeitspannen im ‚ruhenden‘ IS zurückzuführen ist.
Dass die Dilatation in der Literatur pragmatisch als Dehnung aufgefasst wird, führt zu dem Umstand einer Formelanwendung nach Gleichung Gl. 11. Dort wird für die Zeitspanne Δt‘ im gestrichenen System S‘ eine gegenüber der Zeitspanne Δt im System S längere Dauer berechnet.

Für die LK ist sind nun dieselben Gedankengänge zu absolvieren. In Analogie zur eben durchgeführten Herleitung der ZD ist auch bei der Herleitung der LK davon auszugehen, dass es die im bewegten System S‘ betrachteten Zeitpunkte sind, die mit durch die LT in das unbewegte S zu transformieren sind.
Es ergibt sich der Zusammenhang nach Gleichung Gl. 10b. Die LK als verkürzte Darstellung der Längen eines bewegten Systems im unbewegten System ist unbestritten.

Es lässt sich zusammenfassen, dass für die Anwendung der LT auf die Belange der SRT das folgende Ergebnis konstatiert werden muss:

$\Delta x' = x\sqrt{1 - v^2/c^2}$ (siehe Gl. 10b) Gl. 13

$\Delta t' = \Delta t\sqrt{1 - v^2/c^2}$. Gl. 12f

Dieses Ergebnis geht einerseits konform mit den von Einstein ermittelten Zusammenhängen und bestätigt andererseits das in der Einleitung geforderte Gesetz der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit (siehe Gleichung Gl. 4).

Schlussfolgerungen

das Durcheinander

Einstein lag konsequenter Weise richtig mit LK und ZD (siehe Gleichungen Gl. 13 und Gl. 12f). Dass damit seine Weise der Herleitung korrekt ist, sollte unterstellt werden können.
Er erfüllte mit dieser Herleitung allemal die Forderung, die sich aus dem Gesetz der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit ergibt (siehe Gleichung Gl. 4). Sein Ergebnis erfordert nur, dass für die LK und die ZD dieselben Grundsätze an die Herleitung zu stellen sind (vgl. Gleichungen Gl. 10 und Gl. 12).

Warum gibt es nun aber so viel Konfusion beim Verständnis der SRT?
Wie hier mit den Gleichungen Gl. 9 bis Gl. 12 gezeigt wurde, lässt der mathematische Formalismus jedes mögliche Ergebnis zu. Also je nachdem, wie die LT angewendet wird, führt sie zu einem anderen Ergebnis. Wenn nicht zwingende Gründe vorliegen, die nur eine bestimmte Weise der Herleitung von LK und ZD zulassen, dann werden zwangsläufig in der Wissenschaft alle diese Ergebnisse unterschiedlicher Herleitung kursieren.
Welche Gründe sind hier nun anzuführen oder auszuschließen, um zu entscheiden, welche Herleitung die korrekte ist?

Da ist der Begriff der ZD zu diskutieren. Eine Dilatation lässt sich einfach als Dehnung oder Ausdehnung auffassen. Nun suggeriert der Begriff der Dehnung eine Verlängerung und mit der Verlängerung sollte etwas länger oder größer werden.
Dass im Sinne der LT die ZD aus einer langsamer gehenden Uhr abzuleiten ist, ist nicht jedermann gegenwärtig. Insofern ist zu vermuten, dass bei der Herleitung der Formel für die ZD eine Form erwartet wird, die auf eine Verlängerung und damit auf einen größeren Wert abzielt. Es wird also erwartet, dass die bewegte Uhr eine Zeitdauer (siehe Gleichung Gl. 11) größer darstellt, als sie von der ruhenden Uhr angezeigt wird.
Das korrespondiert nicht mit Einsteins Aussage, dass die bewegten Uhren langsamer gehen. Nach Einstein werden sie also zwingend einen geringeren Wert anzeigen, als es eine ruhende Uhr[7] macht.
Da ist es auch nicht hilfreich, wenn man feststellt: „Von einem relativ zur Uhr bewegten Inertialsystem aus betrachtet, scheint die Uhr langsamer zu laufen“ ([Str] S. 12). Abgesehen davon, dass bei den Annahmen der SRT immer eine Uhr langsamer und damit die andere Uhr schneller geht, kann man sich zur Begründung einer gefundenen Formel nicht wahlweise

[7] Nun wurde hier in den Jargon Einsteins verfallen, von einer ruhenden und einer bewegten Uhr zu sprechen. Das wurde aber bewusst so vereinfacht, da damit die korrektere aber umständlichere Ausdrucksweise ohne Einbuße der Verständlichkeit umgangen werden kann.

aussuchen, welche Uhr die langsamere sein soll. Offensichtlich hängt das langsamere Gehen einer Uhr immer vom Betrachter ab.
Bei der Anwendung der LT handelt es sich nicht um einen allgemeinen mathematischen Zusammenhang. Es handelt sich um eine Transformation von Koordinaten in ein anderes Koordinatensystem. Das erfordert strikte Konventionen. Und diese sind, dass es einen im ungestrichenen System S befindlichen Bobachter gibt, der seine gefundene Zeitspanne für einen physikalischen Prozess in das relativ zu ihm bewegte IS transformiert.

das Bezugssystem

Es wird also grundsätzlich das Ergebnis einer Messung auf ein Bezugssystem bezogen. Die Bezugssysteme dabei auseinanderzuhalten, ist sinnvoll möglich durch eine Indizierung der betrachteten Größen (vgl. [Syd1] S. 96 ff.). Dabei drücken die Indizes aus, von welchem System aus eine physikalische Größe betrachtet wird und welchem System diese Größe zugeordnet ist.
Diese Indizierung wurde bis dato umgangen, indem man einen Beobachter in einem ‚ruhenden' IS definierte, der eine physikalische Größe in einen relativ zu ihm bewegten IS betrachtete. Insofern sind die Begrifflichkeiten ‚ruhend' und ‚bewegt' zu verstehen.
Wendet man nun die LT auf einen physikalischen Prozess an, hat man festzulegen, von welchem System der Prozess betrachtet wird. Man legt also das ‚ruhende' IS fest, in welchem ein Beobachter positioniert sein soll, der diesen Prozess beobachtet. Was er beobachtet, spielt sich aber in dem ‚bewegten' System ab.
Die Gleichungen der LT drücken also grundsätzlich aus, dass ein Beobachter im ungestrichenen, ruhenden und seinem eigenen IS Koordinaten hernimmt und überlegt, welche Koordinaten im gestrichenen, bewegten IS diesen Koordinaten entsprechen. Diese Betrachtung ist dann relativ. Unabhängig vom Beobachter, wird jeder grundsätzlich sein eigenes IS als das ungestrichene annehmen und Koordinaten seines Systems zu transformieren versuchen. Andere als seine eigenen Koordinaten, die er transformieren könnte, hat er ja nicht.

Aus dieser Betrachtung der LT leitet sich ab, dass es ein Beobachter[8] ist, der einen Prozess betrachtet und annimmt, dass sich dieser Prozess im bewegten[9] IS so abspielt, wie er durch die Transformation ermittelt. Die oben angedeutete Betrachtung ([Str] S. 12) aus der Sicht eines bewegten IS kann es nicht geben.
Wenn sich die Gleichungen der LT von einem IS in ein anderes problemlos überführen lassen (siehe [Syd1] S. 123 f) und mit einem mal die gestrichenen in die ungestrichenen vertauscht sind (siehe Gleichungen Gl. 1 und Gl. 2), bedeutet das nicht, dass sich auch die Sicht des betrachteten physikalischen Prozesses geändert hat.

[8] und es erübrigt sich nun mit den zuvor bemachten Konventionen, darauf hinzuweisen, dass sich dieser in dem als ruhend angenommenen IS befindet
[9] auch hier ist die Zuordnung zum relativ bewegten System als gegeben hinzunehmen

Das, was mit der Überführung der Gleichungen der LT mathematisch exakt vollzogen wird, ist die Überführung von ungestrichenen zu gestrichenen Größen. Diese Rechnung ist auch von den gestrichenen zu den ungestrichenen Größen umkehrbar. Der Vorgang entspricht in einfacher Weise dem folgenden Verfahren:

- Die Rolle der gestrichenen und der ungestrichenen Koordinaten ist vertauscht, [sic] und
- v ist durch –v ersetzt.“ ([Emb] Unterpunkt „Lorentztransformation“)

So schön nun diese Vereinfachung der Formeln beim Wechsel des IS ist, so fragwürdig ist die letztere der beiden Bedingungen. Mit dem Vorzeichenwechsel der Relativgeschwindigkeit v muss sich ein Beobachter im gestrichenen IS bewusst werden, dass die für ihn anzunehmende Geschwindigkeit v bereits festliegt und er sich entgegen der Richtung dieser Geschwindigkeit bewegt.
Dann wäre aber der Prozess der LT als ein absoluter zu betrachten. Die Richtung der Geschwindigkeit ist festgelegt und jeder Beobachter könnte sich dementsprechend als der ruhende oder der bewegte einordnen.

Einzige Lösung aus dieser Misere ist, dass die LT als einfache Transformation aufzufassen ist. Ein Beobachter in einem als ruhend angenommenen IS S transformiert von ihm festgelegte Koordinaten seines Systems S in ein relativ dazu bewegtes IS S‘. Eine Rücktransformation dieser so erhaltenen gestrichenen Koordinaten in das ruhende IS S erfolgt dann wiederum aus der Sicht des Beobachters im ruhenden IS S, sodass dieser seine Ausgangskoordinaten erhält.
Damit hat die Rücktransformation von Koordinaten nichts mit der Betrachtung oder einer Transformation von Koordinaten aus dem gestrichenen IS zu tun. Alles was der Beobachter im gestrichenen IS wahrnimmt, nimmt er als ruhender Beobachter seines Systems wahr.

Diese schlichte Aussage ist von grundlegender Bedeutung! Die Formeln der LT (vgl. Gleichungen Gl. 1 und Gl. 2) sind reine Transformationsgleichungen zur Überführung von Koordinaten eines IS in ein anderes.
Zur Beantwortung der Frage, was ein Beobachter sieht oder misst, sind spezielle Konventionen heranzuziehen. So wird ein Beobachter ein für sich gültiges IS definieren. Er kann damit festlegen, dass er in diesem IS ruht und ordnet jedem relativ zu ihm bewegten IS eine Geschwindigkeit v zu.
Geht man davon aus, dass dieser Beobachter damit für sich ein ausgezeichnetes System findet, wird er es als das ungestrichene System S bezeichnen. Will er dann Längen- und Zeitmessungen in einem relativ zu ihm bewegten IS S‘ durchführen, sollten die Ergebnisse seiner Messung bei Richtigkeit der SRT entsprechend der Gleichung Gl. 1 ausfallen.
Die Aussage, dass damit ein Beobachter im System S‘ entsprechende Längen- und Zeitmessungen nach der Gleichung Gl. 2 erhalten muss, ist unbewiesen. Ganz im Gegenteil wird dieser Beobachter im gestrichenen System für sich dieselben Konventionen festlegen,

wie es der Beobachter im ungestrichenen System tat. Damit nutzt er dann auch für seine Rechnung die Gleichungen Gl. 1 und wird zum selben Ergebnis kommen, wie der erstere Beobachter.
Eine Interpretation von Formeln, die beispielsweise von ungestrichenen nach gestrichenen Größen umgestellt wurden, als Wechsel der IS anzusehen, führt damit immer in die Irre.

Diese Einschränkung in der Auffassung der SRT schreit nach einer Begründung. Es ist die Ursache für diesen Umstand der eingeschränkten Interpretation der Gleichungen für ZD und LK aufzuzeigen. Sind doch die Gleichungen der LT (siehe Gleichungen GL. 1 und Gl. 2) mathematisch absolut korrekt. Und das sowohl in der Herleitung als auch in der Möglichkeit der Umstellung.
Aber abgesehen von der Verabsolutierung der Richtung der Geschwindigkeit (s. S. 13) findet sich auch noch ein mathematisch relevanter Umstand, der den simplen Wechsel des Beobachters durch Umstellen von Gleichungen verbietet.
Zur Ermittlung von Längen und Zeitspannen im relativ bewegten System sind Zeitpunkte und Orte des bewegten Systems anzuwenden. Mit der Umstellung von Gleichungen zum Wechsel des IS unterschlägt man, dass damit auch die Zeitpunkte und Orte des nunmehr anderen Systems anzuwendenden sind. Dass sich in jeder Rechnung letztlich diese Zeitpunkte und Orte eliminieren, bedeutet nicht, dass sie vernachlässigbar sind. In den Gleichungen Gl. 9 und Gl. 10 sowie Gl. 11 und Gl. 12 ist gezeigt, dass sich durch die entsprechende Wahl der Zeitpunkte und Orte das Resultat der Herleitung von Längen und Zeitspannen völlig ändert.

Dieser Umstand, dass sich der Wechsel des Beobachters nicht durch Umstellen von Gleichungen darstellen lässt, wird in Kuchling eindeutig durch die Angabe der Gleichungen für ZD und LK gezeigt:
„$\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1-\beta^2}} \geq \Delta t$“[10] (siehe [Kuc] S. 599) Gl. 14a
„$\Delta t = \frac{\Delta t\prime}{\sqrt{1-\beta^2}} \geq \Delta t'$“ (siehe ebd.) Gl. 14b
„$l' = (x_2 - x_1)\sqrt{1-\beta^2}$“ (siehe ebd.) Gl. 14c
„$l = (x'_2 - x'_1)\sqrt{1-\beta^2}$“ (siehe ebd. S. 600) Gl. 14d
Sieht man davon ab, dass die Formeln für die Zeitdilatation (Gleichungen Gl. 14a und Gl. 14b) wie oben gezeigt nicht richtig sein können, zeigen diese Formeln eindrucksvoll, dass der Wechsel des Beobachters eben nicht mit der Umstellung der Formeln einhergehen kann.
Die Ursache dafür ist im vorigen Absatz begründet. Die Umstellung in der Weise der Division des Wurzelausdrucks zur Darstellung des Wechsels des Beobachters ist damit zu verbieten.

[10] mit β ist v/c gemeint

die Lichtuhr

Es bleibt zu fragen, in welcher Weise die Herleitung der ZD mit dem Gedankenexperiment der Lichtuhr zu werten ist.
Wie mittels Lichtuhr die ZD erklärt werden kann, ist dem Bild 2 zu entnehmen. Darin sieht man die Darstellung des Zeitvergleichs von Uhren unterschiedlicher IS.

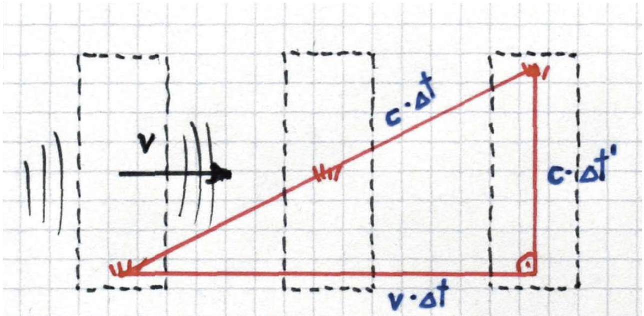

Bild 2: Erklärung der ZD mittels Lichtuhr ([Eck] S. 23)

So oder in ähnlicher Weise (vgl. [Mes] S. 623) wird das Prinzip der Lichtuhr und erklärt:
- eine Lichtuhr sei hier als schwarzer Kasten mit gestrichelten Linien dargestellt
- die Lichtuhr bewegt sich im ihrem IS mit der relativen Geschwindigkeit v
- in der Lichtuhr wird ein durch 4 rote Striche angedeuteter Lichtimpuls von unten nach oben gesendet
- damit ist die Länge der Lichtuhr durch die Lichtlaufzeit c·Δt‘ gegeben
- ein Beobachter, der als der relativ zu diesem bewegten IS als ruhend angenommen werden kann, sieht den Lichtimpuls mit der Geschwindigkeit c·Δt
- da er die Relativbewegung v·Δt der Lichtuhr bekannt ist, kann der Beobachter nun den Vergleich der Bewegungen anstellen.

Dieser Vergleich ist dann in der folgenden Weise auszuführen:

$$(c \cdot \Delta t)^2 = (v \cdot \Delta t)^2 + (c \cdot \Delta t')^2 \qquad \text{Gl. 15a}$$

$$c^2 \cdot (\Delta t)^2 = v^2 \cdot (\Delta t)^2 + c^2 \cdot (\Delta t')^2 \qquad \text{Gl. 15b}$$

$$(\Delta t')^2 = (\Delta t)^2 (1 - v^2/c^2) \qquad \text{Gl. 15c}$$

$$\Delta t' = \Delta t \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \qquad \text{Gl. 15d}$$

(siehe [Eck] S. 23).

Dass dieser Rechengang nicht immer so angewendet wird und damit zu einem Ergebnis entsprechend der Formel Gl. 5b führt, ist in [Mes] S. 623 gezeigt. Doch mit den hier angestellten Vorüberlegungen wird schnell klar, dass dort der Fehler mit dem Wechsel des Beobachters gemacht und dann das reziproke Ergebnis erhalten wurde.
Das zeigt, dass auch die Überlegungen zur ZD, die aus der Lichtuhr abgeleitet wurden, widersprüchlich sein können.

die Tests der SRT

Die Mathematik der LT macht es nicht nur möglich, dass LK und ZD in verschiedenster Weise dargestellt werden können, sondern sie werden auch in der Literatur in verschiedener Weise hergeleitet und angewendet.
Das führt zu Irritationen und macht die SRT völlig unverständlich.

Will man den Nachweis für die LK und die ZD führen, indem man die Richtigkeit der Formeln für diese Effekte mittels Experimenten nachweist, sollte im Vorhinein geklärt sein, welche der möglichen Formeln dabei Anwendung finden.
Entscheidet man sich dann, dass es nur eine korrekte Formel geben kann, muss nachweislich dargelegt werden, dass die Versuchsbedingungen diese Formel rechtfertigen.
Mit der Wahl der Formel muss aber immer die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit erhalten sein. Die Annahme, dass die Formeln für LK und ZD der Gleichung Gl. 5 entsprechen, ist somit gerechtfertigt. Sollte aber von der reziproken Darstellung der ZD (siehe Gleichung Gl. 11) ausgegangen werden, muss auch zwingend der experimentelle Nachweis geführt werden, dass die reziproke Gleichung der LK (siehe Gleichung Gl. 9a) richtig ist. Ohne diesen Nachweis ist das Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit nicht garantiert.

Eine eigentümliche Konsequenz ergibt sich aus den hier getätigten Überlegungen. Diese bezieht sich auf die am Kreisbeschleuniger durchgeführten Experimente zum Nachweis der Zeitdilatation.
Wenn mit diesen Experimenten der unumstößliche Nachweis einer ZD nach Gleichung Gl. 11 als erbracht anzusehen ist, aber für die ZD von der Gleichung Gl. 5b auszugehen war, dann stellt sich die Frage nach der Ursache dieser nachgewiesenen ZD.
Diese Ursache könnte allemal die Radialbeschleunigung sein, der die untersuchten Teilchen im Speicherring zwangsläufig ausgesetzt sind. Das würde dann aber bedeuten, dass eine ZD aus der Geschwindigkeit der Teilchen nicht existierte.
An dieser Stelle bleibt Raum für weitere Überlegungen.

Literatur

[Eck] Eckstein, D.: Epstein erklärt Einstein
genius media AG Frauenfeld (Schweiz) 14.10.2008 cited 02.05.2014
http://www.relativity.li/epstein/pdf-downloads.html

[Ein1] Einstein A.: ohne
Metager: Sprüche-Suchmaschine unbekannt cited 23.10.2008

[Ein2] 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.: Spezielle Relativitätstheorie
metager Wien (Österreich) cited 04.12.2008
http://homepage.univie.ac.at/franz.embacher/SRT

[Kre] Kretzschmar, H.: Die Ganzheitstheorie
Ram & Sterk (NL) Lichtenvoorde 1. Aufl. cited 15.10.2008
http://www.ram-sterk.net/index.htm

[Kuc] Kuchling, H.: Taschenbuch der Physik
Carl Hanser Verlag Leipzig 20. Aufl. (2011) cited 28.04.2013
http://www.amazon.de/Taschenbuch-Physik-Horst-Kuchling/

[Mes] Meschede, D.: Gerthsen Physik
Springer Verlag Heidelberg 24. Aufl. (2010) cited 26.02.2012
http://www.springerlink.com/content/978-3-642-12894-3#section=782231&page=1&locus=6

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

[Reb] Rebhan, E.: Theorietische Physik, Relativitätstheorie und Kosmologie
Spektrum Akademischer Verlag Berlin 2012

[Rös] Rösler, F.: Einleitung zur SRT
google unbekannt cited 08.04.2013
http://www.antigauss.de/inf/tech/srt.pdf

[Str] Straumann, U.: Relativitätstheorie, Ergänzendes Scriptum zur Vorlesung Physik II
Physik - Institut Universität Zürich Zürich (19.03.2013) cited 25.10.2015
http//www.physik.uzh.ch/

[Syd1] Sydow, R.: Der jüngere Zwilling, eine wissenschaftlich angehauchte Diskussion
Cuvillier Verlag Göttingen 2014

[Syd2] Sydow, R.: Koordinatentransformation
www (google) Niederfinow 14.05.2023
https://rolfswelt.de/physik/#lt-koordinatentransformation