

Relativitätstheorie 2.0

Neue Gedankenexperimente zu Zeit, Raum und Materie

Ralf R. Lenke¹, submitted 20.04.2022, Version 1.1

Zusammenfassung

Die Spezielle Relativitätstheorie (SRT) Albert Einsteins ist eine konsequente Umsetzung des Relativitätsprinzips, d.h. der Unabhängigkeit der Naturgesetze vom Bewegungszustand des Beobachters. Bei der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) kommt noch die Annahme der Äquivalenz von Beschleunigung und Gravitation hinzu. Einsteins RT ist eine im Wesentlichen rein mathematische Theorie, bei der die Frage, warum unser Universum das Relativitätsprinzip erfüllt, unbeantwortet bleibt.

In dieser Arbeit führen wir die Überlegungen von *Huygens, Doppler, Lorentz, Poincaré* und *de Broglie* fort und kommen so auf einem alternativen, physikalisch sehr anschaulichen Weg ebenfalls zur Relativitätstheorie. Letztendlich ist bei diesem Weg das Relativitätsprinzip nicht Ausgangspunkt, sondern implizit enthalten. Es zeigt sich, dass für Licht in jedem Fall, aber auch für Materiewellen, die SRT nichts weiter ist als der Dopplereffekt. Damit beruhen dann sowohl das Relativitätsprinzip, und damit die SRT, als auch die Quantenmechanik auf dem Wellencharakter der Natur.

In der Folge scheint es nur natürlich, auch die ART über den Wellencharakter der Natur erklären zu wollen. Es ist ja auch schon allgemein üblich von Gravitationslinsen zu sprechen. Tatsächlich kann dieses Gravitationslinsen-Modell weiter ausgebaut werden, um so zu einer äquivalenten und ebenfalls sehr anschaulichen Darstellung der ART zu kommen.

¹ D-73466 Lauchheim, Häuslenäcker 1, e-mail: Relativitaetstheorie2.0@web.de

1 **Der transversale Lichtweg im Michelson-Morley-Experiment**

2 Das Schlüsselexperiment für die Relativitätstheorie (RT) war das Michelson-Morley-Experiment
 3 (MME), das zum Ziel hatte, ein ausgezeichnetes Bezugssystem für die Ausbreitung
 4 elektromagnetischer Wellen zu finden. Aber das Ergebnis überraschte: Egal wo, wer und wie man
 5 misst, die Vakuumlichtgeschwindigkeit hat immer den gleichen Wert, unabhängig von der
 6 Geschwindigkeit der Lichtquelle und, vor allem, von der Geschwindigkeit des Empfängers. Damit
 7 waren die klassischen Galileo-Transformationen nicht mehr mit dem Relativitätsprinzip vereinbar. Es
 8 folgten die Lorentz-Transformationen und Einsteins RT. Die Idee eines Äthers als Trägermedium
 9 elektromagnetischer Wellen wurde verworfen.

10 Das Michelson-Morley-Interferometer ist bis heute ein wichtiges Messinstrument in der
 11 Experimentalphysik und wurde in jüngster Zeit, im Fall von Gravitationswellendetektoren, zu einer
 12 irrwitzigen Genauigkeit getrieben. Mit diesem Interferometer werden Laufzeitunterschiede des
 13 Lichts auf zwei zueinander senkrechten, exakt gleich langen Lichtwegen gemessen. Dazu wird ein
 14 Lichtstrahl an einem halbdurchlässigen 45°-Spiegel aufgeteilt. An den Enden der beiden Lichtwege
 15 werden die Lichtstrahlen jeweils von einem Spiegel reflektiert, um sich nach dem erneuten
 16 Durchgang durch den 45°-Spiegel wieder zu überlagern. Das Interferenzmuster der beiden wieder
 17 vereinigten Lichtstrahlen gibt dann Auskunft über die Gangunterschiede in den beiden Lichtwegen.
 18 Weitere Details zu diesem Experiment sind andernorts ausführlich beschrieben.

19 Mit dem MME sollte die Geschwindigkeit \vec{v} des Bezugssystems, in dem sich der Beobachter
 20 befindet, relativ zum Trägermedium der elektromagnetischen Wellen, dem sogenannten Äther,
 21 gemessen werden. Dies hätte möglich sein müssen, da nach der klassischen Theorie die Laufzeit des
 22 Lichts in den beiden Interferometerarmen von der Relativgeschwindigkeit \vec{v} abhängt: In einem
 23 Interferometerarm, der senkrecht zu \vec{v} steht, läuft das Licht in Richtung des Interferometerarms nur
 24 mit der reduzierten Geschwindigkeit

$$c_y = \sqrt{c^2 - v^2} = c / \gamma$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

1 wobei hier, wie allgemein üblich, die senkrechte Richtung als y -Achse definiert wurde. Die x -Achse
2 zeigt in Richtung der Geschwindigkeit \vec{v} .

3 Im Interferometerarm, der parallel zu \vec{v} verläuft, hat das Licht dagegen auf dem Hinweg bis
4 zum Reflektor die Relativgeschwindigkeiten $c_{+x} = c - v$ und auf dem Rückweg $c_{-x} = c + v$. Damit
5 ergäbe sich eine um den Faktor γ^2 langsamere mittlere Laufzeit, im Vergleich zu dem Fall, wenn das
6 Interferometer relativ zum Äther ruht.

7 Die Laufzeit in den beiden Interferometerarmen hätte sich also um einen Faktor γ
8 unterscheiden müssen. Da aber kein Effekt gemessen wurde, blieb letztendlich nichts anderes übrig,
9 als anzunehmen, dass Objekte in Bewegungsrichtung um den Faktor γ Lorentz-kontrahiert sind.

10 Erstaunlich ist allerdings, dass entgegen unseres Alltagsverständnis, nur die Relativbewegung
11 relevant ist. Dass also jeder Beobachter bei einem relativ zu ihm bewegten Bezugssystem eine
12 Lorentz-Kontraktion sieht. Genauso ist es mit der Zeitdilatation: Jeder Beobachter sieht, dass bei
13 einem relativ zu ihm bewegten Bezugssystem die Zeit langsamer vergeht. Eine „Lorentz-Expansion“
14 und „Zeit-Konstriktion“ gibt es nicht. Verantwortlich dafür ist das Phänomen der Gleichzeitigkeit von
15 Ereignissen an verschiedenen Orten, die ebenfalls von der Relativbewegung abhängt. Dazu später
16 mehr.

17 Für alle drei Phänomene: Zeitdilatation, Lorentz-Kontraktion und Gleichzeitigkeit gibt es zwar
18 zahlreiche Plausibilitätserklärungen, eine intrinsische Erklärung aber, warum unser Universum so
19 funktioniert, gibt bis heute nicht. Einen Hinweis könnte der transversale Lichtweg beim MME liefern,
20 also der Lichtweg senkrecht zu \vec{v} . Erstaunlicherweise wurde, zumindest unseres Wissens nach, nie
21 genauer untersucht, wieso das Licht nach Reflexion am 45° -Spiegel überhaupt den Reflektor trifft,
22 der sich in der Zwischenzeit ja weiterbewegt hat? Wobei mit „treffen“ exakt genau an der gleichen
23 Stelle gemeint ist, wie im Fall des ruhenden Interferometers. Denn zum einen wäre ansonsten das
24 Relativitätsprinzip verletzt, und zum anderen würde man die kleinste Abweichung an den
25 hochpräzisen Anlagen für die Gravitationswellen-Experimente erkennen können.

26 Also überlegen wir uns, wie das Licht an einem bewegten 45° -Spiegel reflektiert wird. Wie im
27 Fall des zu \vec{v} parallelen Interferometerarms hat das Licht relativ zum Spiegel die

1 Geschwindigkeit $c - v$. Dadurch ergibt sich eine um den Faktor $1 / (1 - v / c)$ gestreckte, virtuelle
 2 Spiegeloberfläche. „Virtuell“, da sich die Spiegeloberfläche bewegt, während sie vom Lichtstrahl
 3 getroffen wird. An dieser virtuellen Spiegeloberfläche wird das Licht allerdings genauso reflektiert,
 4 wie an einer ruhenden, was sich leicht aus dem Huygensschen Elementarwellenprinzip herleiten
 5 lässt. Allerdings würde ein allein um diesen Faktor gestreckter 45° -Spiegel das Licht nicht genau zum
 6 Reflektor des transversalen Interferometerarms lenken. Das ist erst der Fall, wenn der 45° -Spiegel
 7 außerdem noch um den Faktor γ gestaucht ist. Streng genommen bedeutet dies, dass das Ergebnis
 8 des MME, die Lorentz-Kontraktion, schon am 45° -Spiegel vorweggenommen wird.

9 Viel interessanter ist jetzt allerdings das in Abbildung 1 dargestellte Aussehen des reflektierten
 10 Lichtstrahls, das sich sehr einfach anhand von Plausibilitätsbetrachtungen bzw. Rechnungen analog
 11 zum Dopplereffekt herleiten lässt:

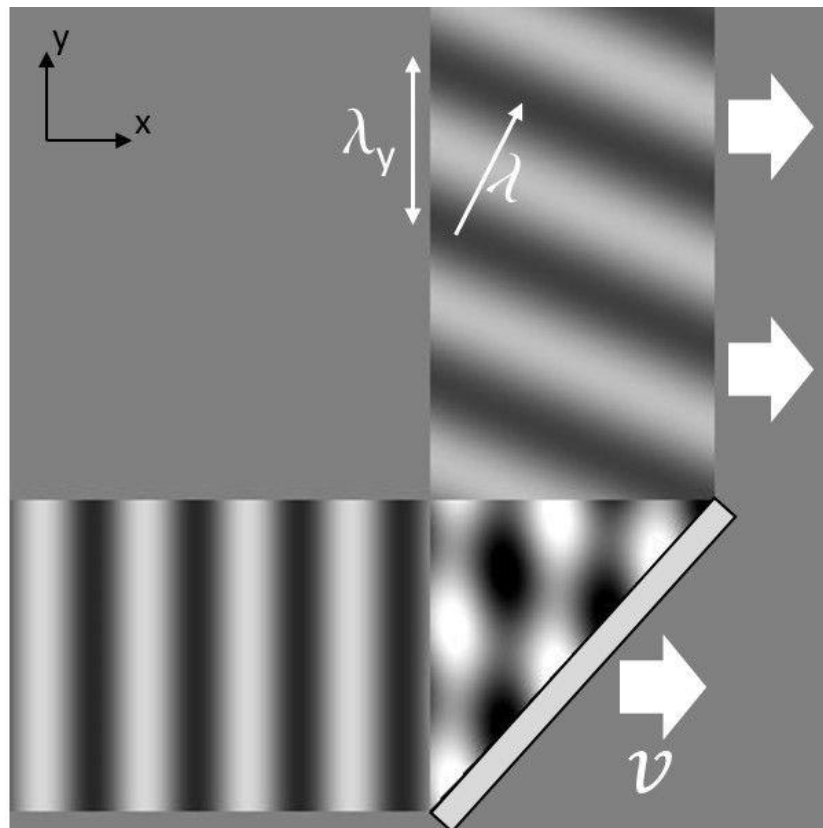
12

13 **Der transversal driftende Lichtstrahl**

14 Dieser transversal driftende Lichtstrahl zeigt genau in y -Richtung, hat aber zusätzlich die transversale
 15 Geschwindigkeitskomponente $c_x = v$. Für die Geschwindigkeitskomponente in y -Richtung
 16 gilt $c_y = c / \gamma$. Die Wellenfronten verlaufen jetzt nicht mehr senkrecht zur Richtung des Lichtstrahls,
 17 sondern es gelten für den Wellenvektor \vec{k} - der nach wie vor senkrecht auf den Wellenfronten steht -
 18 und dessen Komponenten die Beziehungen: $k_x / k = v / c$ und $k_y / k = 1/\gamma$. Da die Länge der
 19 Wellenfronten bei der Reflexion an einer planen (virtuellen) Spiegeloberfläche unverändert bleibt,
 20 folgt daraus, dass der Lichtstrahl nach der Reflexion am bewegten 45° -Spiegel um den Faktor γ
 21 schmaler ist. Das ist die Lorentz-Kontraktion!

22

1
2
3
4
5



6

7 **Abbildung 1:** Der transversal driftende Lichtstrahl wird z.B. erzeugt durch Reflexion an einem
8 bewegten 45°-Spiegel. In dieser Abbildung wandert der Spiegel mit der Geschwindigkeit \vec{v} nach
9 rechts und erzeugt dadurch in y-Richtung einen mit der Geschwindigkeit \vec{v} seitwärts driftenden
10 Lichtstrahl, dessen Amplitude vor und nach Reflexion am Spiegel hier dargestellt ist.

11

1 Aber was sieht ein Beobachter, nennen wir ihn Bob, der sich mit dem Spiegel und dem seitlich
2 driftenden Lichtstrahl mitbewegt? Entsprechend dem Relativitätsprinzip muss er das gleiche sehen,
3 wie eine ruhende Beobachterin, nennen wir sie Alice, bei einem nicht bewegten Michelson-Morley-
4 Interferometer. Das heißt: Einen „normalen“ Lichtstrahl unveränderter Breite, der an einem
5 ruhenden 45°-Spiegel reflektiert wird und sich mit Lichtgeschwindigkeit c in y -Richtung ausbreitet,
6 mit zur x -Achse parallelen Wellenfronten.

7 Und wie verhält es sich mit der Wellenlänge λ ? Wieder anhand von
8 Plausibilitätsbetrachtungen bzw. des Dopplereffekts lässt sich zeigen, dass der Abstand der
9 Wellenfronten in y -Richtung, also sowohl die Länge λ_y (siehe Abbildung 1) beim seitlich driftenden
10 Lichtstrahl, als auch die Wellenlänge λ_0 im Fall des ruhenden Lichtstrahls, sowohl in Alices als auch in
11 Bobs Bezugssystem, gleichbleiben. Damit ist auch sofort offensichtlich, dass es senkrecht zu \vec{v} keine
12 Lorentz-Kontraktion gibt. Wegen $\lambda_0 = \lambda_y$ ist die Frequenz der Wellen in y -Richtung im Fall des
13 ruhenden Lichtstrahls, bzw. parallel zu Bobs seitlich driftender y -Achse, proportional zur
14 entsprechenden Komponente der Lichtgeschwindigkeit c bzw. c_y . Damit ist aus Sicht von Alice die
15 Frequenz des in Bobs Bezugssystem ruhenden Lichtstrahls um den Faktor γ kleiner als beim
16 ruhenden Lichtstrahl in ihrem eigenen System. Folglich gehen aufgrund des Dopplereffekts aus Alices
17 Sicht Bobs Uhren um den Faktor γ langsamer.

18 Anmerkung: Zur Herleitung der relativistischen Zeitdilatation haben wir hier nicht die sonst
19 übliche, aber unpraktikable Lichtuhr eines zwischen zwei Spiegeln propagierenden Lichtpulses
20 verwendet. Denn sowohl technische als auch biologische Uhren zählen Schwingungen.

21 Und was hat es jetzt mit den schiefen Wellenfronten auf sich? Warum sieht Bob waagrechte
22 Wellenfronten, obwohl Alice einen transversal driftenden Lichtstrahl mit schiefen Wellenfronten
23 sieht. Nun, das hängt mit der Gleichzeitigkeit zusammen. Bobs Zeit vergeht nicht nur langsamer, sie
24 erfährt in Richtung von \vec{v} auch noch eine Verzögerung, also einen negativen Phasenschub. In
25 Abbildung 1 z.B. um gerade die Zeit, die die rechte Seite einer Wellenfront braucht, um auf die
26 ursprüngliche Höhe der linken Seite zu kommen. Bisher wird dieses Phänomen der Gleichzeitigkeit
27 immer mit einem Schaffner erklärt, der von der Mitte eines fahrenden Zugs einen Lichtpuls zum

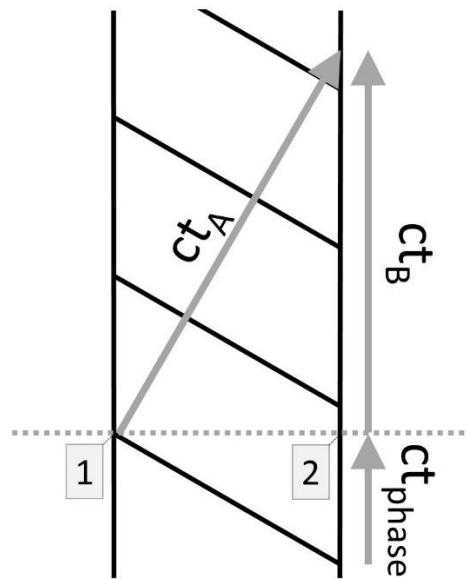
1 Zugende und Zuanfang schickt. Für ihn kommen nach dem Relativitätsprinzip die beiden Lichtpulse
2 gleichzeitig an, aus Sicht von Alice auf dem Bahnsteig aber nicht. Im Folgenden wird aber
3 offensichtlich werden, dass die hier hergeleitete Erklärung mit den schiefen Wellenfronten viel
4 tiefgründiger ist.

5 Man könnte jetzt annehmen, dass der transversal driftende Lichtstrahl einfach nur ein
6 Lichtstrahl mit einer etwas ungewöhnlichen geometrischen Form ist. Dem ist aber nur in erster
7 Näherung so: Entsprechend der Fourier-Optik hat ein Lichtstrahl immer eine endliche Kohärenzlänge,
8 eine gewisse Divergenz und im Idealfall ein Gauß-Profil. Daraus folgt eine gewisse Spektralbreite in
9 der Frequenz und Tangentialkomponente des Wellenvektors. Die Verteilung dieser
10 Spektralkomponenten ändert sich beim Wechsel vom ruhenden zum transversal driftenden
11 Lichtstrahl, genauso wie die Amplituden der elektromagnetischen Felder und, wenn man ins
12 Photonenbild wechselt, deren Frequenz und Teilchenstromdichte. Daraus ergeben sich weitere
13 Transformationsgleichungen, auf die wir an dieser Stelle aber nicht weiter eingehen können. Wir
14 beschränken uns hier auf die erste Näherung eines parallelen Lichtstrahls und auf die
15 Transformationsgleichungen von Raum und Zeit.

16 Bisher wurde gezeigt, wie sich mit dem transversal driftenden Lichtstrahl auf einfache
17 geometrische und intuitive Weise Zeitdilatation, Längenkontraktion und Gleichzeitigkeit darstellen
18 lassen. Baut man diese Gedankengänge weiter aus, so kommt man z.B. auch auf das relativistische
19 Additionstheorem von Geschwindigkeiten, Lichtbrechung und Beugung an einer rotierenden
20 Glasscheibe bzw. einem rotierenden Gitter usw. In Abbildung 2 wird explizit gezeigt, wieso Bob die
21 gleiche relativistische Zeitdilatation bei Alice sieht, wie Alice bei ihm.

22

1
2
3
4
5



6

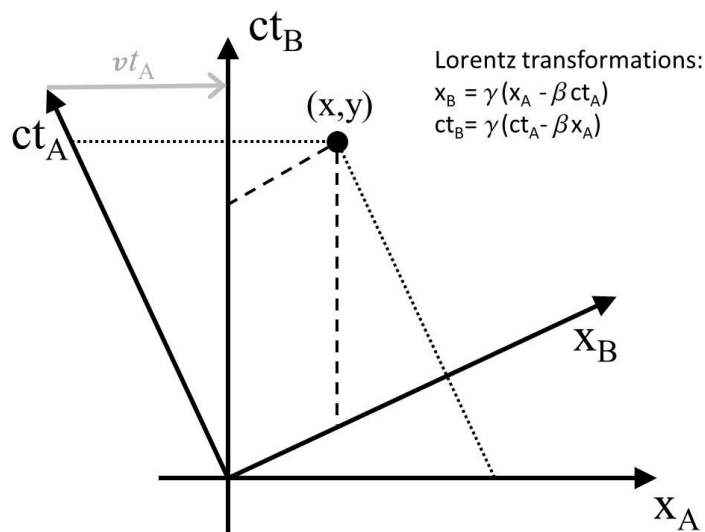
7 **Abbildung 2: Darstellung des Relativitätsprinzips bei der Zeitdilatation.** Während der seitlich
8 driftende Lichtstrahl über seine gesamte Breite von 1 nach 2 wandert, legt ein Punkt auf einer
9 Wellenfront aus Alices Sicht die Strecke ct_A zurück. Für Bob dagegen vergeht währenddessen die
10 Zeit, die der seitlich driftende Lichtstrahl braucht, um die Strecke ct_B zurückzulegen. Aus Alices Sicht
11 vergeht also Bobs Zeit um den Faktor γ langsamer. Betrachten wir nun Alice aus Bobs Sicht, während
12 sie an Bob von 2 zu 1 vorbeizieht. Zwischen 1 und 2 erfährt die Zeit in Bobs System noch einen
13 Phasenschub entsprechend der Länge ct_{phase} . Die Gesamtlänge $ct_B + ct_{phase}$ ist jetzt aber gerade
14 um den Faktor γ länger als ct_A . Damit geht auch aus Bobs Sicht Alices Zeit um den Faktor γ
15 langsamer.

16

1 **Die Lorentz-Transformationen**

2 Im Zusammenhang mit dem normalen und seitlich driftenden Lichtstrahl gibt es 4 ausgezeichnete
3 Richtungen: Wellenfronten die parallel zur x-Achse sind, gekippte Wellenfronten, sowie die Strecken
4 ct_A und ct_B in Abbildung 2. Aus diesen 4 Strecken lassen sich auf grafischem Weg die Raum-Zeit-
5 Transformationen zwischen Alices und Bobs Bezugssystemen, d.h. die Lorentz-Transformationen,
6 herleiten. Dazu müssen wir uns bewusst machen, dass Wellenfronten Linien (in 2D) konstanter Zeit
7 sind und durch ihre Breite Entfernungen vorgegeben werden. Folglich liegt es nahe, die x-Achse als
8 Alices x_A -Achse zu wählen, da im Fall des ruhenden Lichtstrahls auf den Wellenfronten, die parallel
9 zur x-Achse sind, alles gleichzeitig passiert. Im relativ zu Alice bewegten Bezugssystem dagegen
10 passiert alles auf den schiefen Wellenfronten gleichzeitig. Sie geben damit die x_B -Achse vor. Alices
11 Zeit ist durch die Strecke ct_A in Abbildung 2 gegeben und Bobs Zeit, aus Alices Sicht, durch die
12 Strecke ct_B . Allerdings müssen die ct_A - und ct_B -Achsen dem Lichtstrahl entgegenlaufen.
13 Entsprechend diesen Überlegungen sind in Abbildung 3 Alices und Bobs „Raum-Zeit-Koordinaten“
14 dargestellt. Diese Darstellung entspricht dem sogenannten *symmetrische Minkowski-Diagramm*, aus
15 dem sich sofort die Lorentz-Transformationen ableiten lassen.

16

1
2

3

4 **Abbildung 3: Das symmetrische Minkowski-Diagramm.** Aus Konventionsgründen verläuft in dieser

5 Darstellung der normale bzw. seitlich driftende Lichtstrahl von oben nach unten, also in die negative

6 y -Richtung. Die x_A - und x_B -Achsen entsprechen den jeweiligen Wellenfronten des ruhenden bzw. des

7 transversalen Lichtstrahls. Die ct_A - und ct_B -Achsen laufen dem seitlich driftenden bzw. normalen

8 Lichtstrahl entgegen. Testen lässt sich diese Kombination am einfachsten durch die Überlegung, wie

9 sich die Ursprünge der Bezugssysteme relativ zueinander bewegen und wie sich Längen, d.h. wie sich

10 die Punkte $(0, ct_B)$, $(0, ct_A)$, $(x_B, 0)$ und $(x_A, 0)$ ins jeweils andere Bezugssystem transformieren.

11 Diese Darstellung ist bekannt als das *symmetrische Minkowski-Diagramm*. Stellt man den Punkt

12 (x, y) sowohl im $x_A t_A$ - als auch im $x_B t_B$ -System dar, erhält man nach Umformung sofort die Lorentz-

13 Transformationen.

14

1 **$E_0=mc^2$**

2 Betrachten wir statt eines seitlichen driftenden Lichtstrahls einen seitlich driftenden Resonator. Dann
 3 ist im Resonator Energie in Form einer elektromagnetischen Welle gespeichert. Da sich der
 4 Resonator seitlich bewegt, ändern sich der Abstand der Resonator-Spiegel und die Wellenlänge λ_y in
 5 Richtung des Resonators nicht. Aus Alices Sicht ist allerdings die tatsächliche Wellenlänge λ , wie in
 6 Abbildung 1 zu sehen, um den Faktor γ kleiner.

7 Wobei das im seitlich driftenden Resonator nicht mehr so direkt zu erkennen ist, da sich hin- und
 8 rücklaufende Wellen überlagern. Dies resultiert in einer stehenden Welle mit zur x-Achse parallelen
 9 Wellenfronten, denen aber noch eine in x-Richtung laufende Welle überlagert ist.

10 Eine um den Faktor γ kleinere Wellenlänge bedeutet aber, dass die Frequenz f und damit die
 11 Energie eines Photons um den Faktor γ größer ist im Vergleich zum ruhenden Resonator. Die Anzahl
 12 der Photonen ändert sich dagegen nicht. Die Energie wächst also im bewegten Resonator um den
 13 Faktor γ an. Wenn aber Energie aufgewendet werden muss, um etwas in Bewegung zu versetzen,
 14 dann heißt das, etwas hat eine träge Masse. Ist E_0 die Energie im ruhenden Resonator, dann muss
 15 man die Energie $(\gamma - 1)E_0$ hineinstecken, um ihn in Bewegung zu versetzen. Für kleine
 16 Geschwindigkeiten konvergiert dieser Term gegen $\frac{1}{2} v^2 / c^2 E_0$. Andererseits ist im klassischen Fall
 17 die kinetische Energie $\frac{1}{2}mv^2$. Gleichsetzen beider Terme ergibt:

$$18 \quad E_0 = mc^2$$

19 Aber was bedeutet dieser Ausdruck eigentlich? Auf der linken Seite steht die Energie eines
 20 Wellenpakets. Wir befinden uns also im Wellenmodell der Physik. Auf der rechten Seite steht eine
 21 Masse, d.h. wir befinden uns im Teilchenmodell. Die Formel $E_0 = mc^2$ spiegelt somit in gewissem
 22 Sinne den Welle-Teilchendualismus unseres physikalischen Verständnisses der Welt wider. Diese
 23 stehende Welle in einem Resonator ist somit das einfachste Modellsystem für ein Masse behaftetes
 24 „Teilchen“ mit Geschwindigkeit \vec{v} . So lassen sich mit ihm z.B. Beugungsexperimente Masse
 25 behafteter Teilchen simulieren.

26 Bisher hatten wir beim Wechsel von Alices in Bobs Bezugssystem immer noch das
 27 Relativitätsprinzip herangezogen: Bob sieht parallele Wellenfronten, weil er nach dem

1 Relativitätsprinzip bei einem relativ zu ihm ruhenden Lichtstrahl das Gleiche sehen muss, wie Alice.
 2 Verwenden wir jetzt aber das Wellenmodell in der Physik, also Materiewellen aus der
 3 Quantenmechanik, dann ist das Relativitätsprinzip eine Folge unserer Überlegungen: Die
 4 Wellenfunktionen der Materiewellen, die im hochrelativistischen Grenzfall ja auch der
 5 Dispersionsrelation $\omega = ck$ (mit $\omega = 2\pi f = E / \hbar$, $|\vec{k}| = 2\pi / \lambda = |\vec{p}| / \hbar$, E Energie, \vec{p} Impuls)
 6 folgen, erfahren den gleichen Dopplereffekt wie elektromagnetische Wellen, d.h. die gleiche Kippung
 7 der Wellenfronten und damit genauso eine Längenkontraktion, einen zeitlichen Phasenschub in
 8 Richtung von \vec{v} und eine Verringerung der Frequenz, d.h. eine Zeitdilatation. Damit sieht Bob den
 9 gleichen Lichtstrahl wie Alice, weil sich seine Maßstäbe und er selbst zusammen mit dem Lichtstrahl
 10 „verbiegen“. Damit ist alles in sich konsistent und RT und Quantenmechanik basieren auf dem
 11 gleichen Prinzip: Dem Wellcharakter der Natur.

12

13 **Gravitation**

14 Die ART Albert Einsteins beruht auf dem Postulat der Äquivalenz von Beschleunigung und
 15 Gravitation. Dementsprechend wird auch ein seitlich driftender Lichtstrahl in einem Gravitationsfeld
 16 beschleunigt. Abbildung 4 zeigt näherungsweise einen frei fallenden transversal driftenden
 17 Lichtstrahl zu zwei Zeitpunkten. Aufgrund der Fallbeschleunigung hat der rechte Lichtstrahl eine
 18 größere transversale Geschwindigkeit und damit stärker gekippte Wellenfronten. Entsprechend der
 19 bisherigen Interpretation der ART hängt das mit der Krümmung der Raumzeit zusammen. Allerdings
 20 ziehen wir dieser eher mathematischen Interpretation eine physikalisch anschaulichere vor.
 21 Tatsächlich erinnert Abbildung 4 an die Lichtbrechung beim Übergang von einem optisch dünneren in
 22 ein optisch dichteres Medium, wobei das Verhältnis der Brechungsindizes jetzt durch das Verhältnis
 23 der γ -Faktoren ersetzt wird. Diese Interpretation ist auch insofern gerechtfertigt, da nach den
 24 bisherigen Überlegungen nichts mehr gegen die Annahme eines Trägermediums für
 25 elektromagnetischen Wellen und – das ist unsere erste und einzige Hypothese - auch für
 26 Materiewellen spricht. Allerdings hat dieses Trägermedium, nennen wir es einmal
 27 „Vakuumdielektrikum“ eine besondere Eigenschaft, wie wir gleich sehen werden:

1 Dass diese beiden Lichtstrahlen in Abbildung 4 zumindest lokal, und somit insbesondere was
 2 die Kippung der Wellenfronten anbelangt, so aussehen müssen, lässt sich aus der Analogie zwischen
 3 Beschleunigung und Gravitation ableiten. Abbildung 4 kann sowohl einen frei fallenden Lichtstrahl
 4 aus Sicht eines Beobachters in einem Gravitationsfeld darstellen, als auch einen ruhenden Lichtstrahl,
 5 der von einem beschleunigten Bezugssystem heraus beobachtet wird. Aufgrund des
 6 Relativitätsprinzips sehen alle Beobachter im jeweils anderen Bezugssystem einen mit der
 7 Geschwindigkeit \vec{v} transversal driftenden Lichtstrahl mit gleichem Kippwinkel. Der genaue Kippwinkel
 8 der Wellenfronten hängt aber sowohl von der relativistischen Zeitdilatation, also der Laufzeit des
 9 Lichts in y-Richtung als auch der Lorentz-Kontraktion in x-Richtung ab. Das heißt aber, dass wir, wie
 10 beim MME in y-Richtung einen Faktor γ und in x-Richtung einen Faktor γ^2 haben. Folglich muss
 11 unser Vakuumdielektrikum einen anisotropen Brechungsindex haben mit $n_y = n_{\parallel} = \gamma$ und $n_x =$
 12 $n_{\perp} = \gamma^2$ haben.

13 Und wie groß ist γ bzw. v^2 ? Eine ausführliche Herleitung ist in den Lehrbüchern zur ART zu
 14 finden. Letztendlich muss im Newtonschen Grenzfall kleiner Geschwindigkeiten folgender
 15 Zusammenhang zwischen v^2 , der kinetischen Energie E_{kin} und der potenziellen Energie E_{pot} gelten:
 16 $v^2 = 2E_{kin}/m = 2E_{pot} / m$. Für das Gravitationsfeld mit einer Masse M in ihrem Zentrum gilt
 17 daher:

$$18 \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{2GM}{rc^2}}}$$

19 Dabei ist G die Gravitationskonstante. Der Radius r ist der Abstand zum Gravitationszentrum aus
 20 Sicht eines weit entfernten Beobachters außerhalb des Gravitationsfelds ohne Lorentz-Kontraktion
 21 oder besser gesagt, der Kreisumfang dividiert durch 2π , da Längen senkrecht zur Richtung des
 22 Gravitationsfelds unverändert bleiben.

23 Damit gehen Uhren in einem Gravitationspotential um den Faktor γ langsamer und in Richtung
 24 des Gravitationsfeldes sind Längen Lorentz-kontrahiert. Außerdem divergiert γ , wenn r_s gegen
 25 $2GM / c^2$ geht. Das ist der sogenannte *Schwarzschild-Radius*, der Radius eines Schwarzen Lochs.

1 Der Raum um ein einfaches Gravitationszentrum lässt sich also durch eine Gravitationslinse
 2 beschreiben mit einem anisotropen Brechungsindex:

$$3 \quad n_{\perp} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{2GM}{rc^2}}}$$

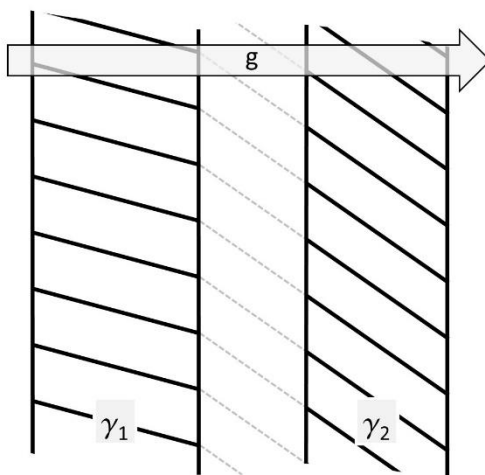
$$4 \quad n_{\parallel} = n_{\perp}^2$$

5 wobei sich \perp und \parallel auf die Richtung zum Gravitationszentrum beziehen. Dies entspricht der exakten,
 6 sogenannten *Schwarzschild-Lösung* der ART für ein einfaches Gravitationszentrum und diese
 7 Anisotropie in der Geschwindigkeit ist bekannt als *Shapiro-Verzögerung*. Mit der hier vorgestellten
 8 Interpretation, d.h. einer optisch anisotropen Linse, kann die Ablenkung $\Delta\varphi$ eines Lichtstrahls an
 9 einem Gravitationszentrum mit Radius R_M in wenigen Zeilen hergeleitet werden. In erster Näherung
 10 erhält man:

$$11 \quad \Delta\varphi \approx \frac{4GM}{R_M c^2}$$

12 Dies ist der Wert, der auch bei der Sonnenfinsternis vor rund 100 Jahren gemessen und von Einstein
 13 vorhergesagt wurde, wodurch er über Nacht berühmt wurde.

14



15

16 **Abbildung 4:** In einem Gravitationsfeld \vec{g} fallender Lichtstrahl. Näherungsweise Darstellung eines in
 17 x-Richtung fallbeschleunigten transversal driftenden Lichtstrahls zu zwei Zeitpunkten. In y-Richtung
 18 ändert sich der Abstand der Wellenfronten nicht, was durch die gestrichelten Linien angezeigt ist.

1 **Die Grenze unseres Wissens**

2 Somit haben wir ein etwas anderes, physikalisch anschaulicheres und in sich konsistentes Modell für
3 die Umsetzung des Relativitätsprinzips gefunden. Die alternative Herleitung der Speziellen RT gelang
4 dabei allein anhand bekannten Wissens aus der Wellenoptik und des Relativitätsprinzips. Geht man
5 allerdings davon aus, dass der Dopplereffekt genauso für Materiewellen gilt, die schließlich der
6 gleichen Dispersionsrelation wie elektromagnetische Wellen folgen, dann ist das Relativitätsprinzip
7 nicht mehr Postulat, sondern eine Folge des Wellencharakters der Natur. Damit wäre das
8 verbindende Glied zwischen RT und QM gefunden.

9 Anmerkung: In diesem Artikel haben wir nur den transversalen Dopplereffekt verwendet, da
10 anhand dessen die SRT sehr anschaulich zu Tage tritt. Wellen in x-Richtung führen zusammen mit
11 dem longitudinalen Dopplereffekt natürlich zu den gleichen Ergebnissen. Das wird an anderer Stelle
12 beschrieben werden.

13 Jedes gute Modell wirft viele neue Fragen auf: Sind Materiewellen nun real oder nur ein
14 mathematisches Hilfsmittel? Die Antwort liefert vielleicht *Ockhams Rasiermesser Prinzip* - „keep it
15 simple“ - dem auch Einstein öfters folgte. Warum sollte etwas, das sich wie eine Welle verhält, nicht
16 auch Welle sein? Das einfachste Modellsystem für ein Materie behaftetes Teilchen ist die stehende
17 elektromagnetische Welle in einem Resonator. Was allerdings die „Resonator-Spiegel“ bei einer
18 Materiewelle sind, d.h. was die Materiewellen in einem gebundenen Zustand hält, wissen wir nicht?
19 Und so gibt es viele weitere offenen Fragen. Akzeptiert man allerdings Materiewellen als real und
20 damit die Existenz eines „Vakuumdielektrikums“ mit variablem, anisotropen „Brechungsindex“, wie
21 im Abschnitt „Gravitation“ beschrieben, dann kommt man zu folgender Schlussfolgerung: Die
22 Äquivalenz von träger und schwerer Masse bedeutet nichts anderes, als dass das
23 „Vakuumdielektrikum“ ein völlig dispersionsfreies Medium ist, nicht nur für jegliche Art
24 elektromagnetischer Wellen, sondern auch für Gravitationswellen und Materiewellen! Aber damit
25 haben wir die Grenze unseres Wissens erreicht, denn solch ein Medium ist mit keinem unserer
26 heutigen Modelle erklärbar. Das faszinierende dabei ist, dass wir diese Grenze damit jetzt in Worte
27 fassen können.

1 **Danksagung**

2 Was die Physik anbelangt gilt mein besonderer Dank Georg Maret, Gérard Martinez und Peter Wyder
3 vom Hochfeldmagnetlabor Grenoble bzw. Institut Charles Sadron, Strasbourg, und Universität
4 Konstanz, sowie Klaus Heidemann und Bruno Nelles vom Gitterlabor Carl Zeiss, Oberkochen. Am
5 meisten bedanken aber muss ich mich bei meiner Familie und insbesondere meiner Frau, dass sie
6 mich, obwohl selbst keine Naturwissenschaftlerin, die ganzen Jahre unterstützt hat.

7

8

9

10 **Referenzen**

11 Zur SRT gibt es eine große Auswahl an Lehrbüchern. Bei der ART habe ich mich hauptsächlich am
12 Buch von Michael Ruhrländer, *Aufstieg zu den Einsteingleichungen*, Pro BUSINESS GmbH (2014),
13 orientiert.

14 Nachtrag: Erst bei der Übersetzung dieses Artikels ins Englische, tauchte eine im allgemeinen
15 unbekannte Quelle auf, die unter Verwendung des longitudinalen Dopplereffekts, hinsichtlich der
16 SRT zu ähnlichen Schlussfolgerungen wie den hier gemachten kommt, siehe: [https://heinz-](https://heinz-heinzmann.eu/Speziell-Relativ.pdf)
17 heinzmann.eu/Speziell-Relativ.pdf