

(Dies ist ein Teil des Buchs [Der Begriff der Wirklichkeit.pdf](#))

Inhalt:

2.1. Einleitung.....	2
2.2. Warum gehorcht die Natur den durch Licht bestimmten Raum-Zeit-Verhältnissen?.....	3
2.3. Einsteins Szenario.....	4
2.4. Das zweite Szenario.....	8
2.5. Die Antwort.....	12
2.6. Der kurze Weg zur Materie.....	14
2.7. Relativitätstheorie ohne Relativität.....	16
2.8. Ableitung der Lorentz-Transformation.....	22
2.9. Ergänzungen.....	25
2.10. Was wurde erreicht?.....	27
2.11. Naturphilosophische Anmerkungen.....	29
Die Problematik des Verhältnisses der Konzepte <i>Existenz</i> und <i>Zeit</i> in der Physik.....	29
Was ist Zeit?.....	30
Substanz oder Form?.....	31
2.12. Was bleibt offen?.....	31
2.13. Michelson-Morley: Die übersehene Möglichkeit.....	33

2. Neue Interpretation und Erklärung der Speziellen Relativität

2.1. Einleitung

In der Physik der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts gab es einen Bruch zwischen Mechanik und Elektromagnetismus:

Im Bereich der *Mechanik* galten alle gleichförmig bewegten Systeme als physikalisch ununterscheidbar, das heißt: gleiche Experimente und Messungen innerhalb verschiedener gleichförmig bewegter Systeme sollten stets zu identischen Ergebnissen führen. Hier war Bewegung also *relativ*. Die Umrechnung von einem System auf ein anderes (Galilei-Transformation) stimmte dabei vollkommen mit der apriorischen Raum-Zeit-Vorstellung überein. (Insbesondere entsprach die Differenz der Geschwindigkeiten eines Objekts in bezug auf zwei verschiedene Systeme genau der Differenz der Geschwindigkeiten dieser Systeme selbst.)

Da die elektromagnetischen Feldgleichungen *nicht* kovariant bezüglich Galilei-Transformationen sind, musste im Bereich des *Elektromagnetismus* dagegen ein ausgezeichnetes System existieren – der Äther, Träger der elektromagnetischen Wellen – in dem die Naturbeschreibung ihre einfachste Form annahm. Dieses System wurde als ruhend gedacht. Gleiche Experimente und Messungen in verschiedenen gleichförmig bewegten Systemen sollten bei elektromagnetischen Phänomenen zu *verschiedenen* Ergebnissen führen. Daher war hier Bewegung *absolut*.

Demgemäß hätte sich die Bewegung der Erde in bezug auf den Äther durch Messungen an geeigneten elektromagnetischen Phänomenen feststellen lassen müssen. Im Widerspruch zu dieser Erwartung scheiterten aber alle Versuche, eine solche Bewegung mit Hilfe der Geschwindigkeitsunterschiede von Lichtwellen zu messen, die in verschiedene Richtungen laufen: Niemals trat eine Differenz auf.

Die Spezielle Relativitätstheorie beseitigte den Bruch zwischen Mechanik und Elektromagnetismus und löste zugleich den Widerspruch zum Experiment auf, indem sie zwei Postulate aufstellte:

1. Die Ununterscheidbarkeit gleichförmig bewegter Systeme in bezug auf *alle* physikalischen Phänomene; das ist das Spezielle Relativitätsprinzip.
2. Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit für alle gleichförmig bewegten Beobachter.

Das zweite Postulat bestimmt, welche Transformation zu wählen ist: jene, bezüglich der die elektromagnetischen Gleichungen kovariant sind (die Lorentz-Transformation).

Die apriorische Galilei-Transformation ist also nur näherungsweise gültig; die mit ihr verbundene Mechanik muss korrigiert werden.

2.2. Warum gehorcht die Natur den durch Licht bestimmten Raum-Zeit-Verhältnissen?

In den ersten Jahren nach der Geburt der Relativitätstheorie waren alle Beteiligten (und Unbeteiligten) so sehr damit beschäftigt, ihre Begeisterung bzw. Ablehnung zum Ausdruck zu bringen, dass sie gar nicht daran dachten, die *wirklich* wichtige Frage zu stellen:

Warum fügt sich die Natur eigentlich den raumzeitlichen Verhältnissen, die durch Lichtsignale festgesetzt werden?

Später, als die Richtigkeit der Relativitätstheorie nicht mehr bezweifelt werden konnte, wurde der Umgang mit dem relativistischen Formalismus so alltäglich, dass diese Frage niemandem mehr in den Sinn kam – warum nach dem Grund für etwas fragen, was so sicher und selbstverständlich ist? Tatsächlich ermöglicht aber erst die konsequente Untersuchung dieser Frage ein echtes Verständnis der relativistischen Phänomene. Doch nicht nur deshalb ist es wichtig, nach dem ontologischen Grund der Relativität zu fragen, sondern vor allem deshalb, weil die Antwort eine völlige Umstellung der begrifflichen Grundlagen der Naturbeschreibung erzwingt und so zu einer tiefgreifenden Umgestaltung unseres Verständnisses der Wirklichkeit führt. Um es mit dem der Sache angemessenen Pathos in den Worten John Archibald Wheelers zu sagen:¹

Eine Tür geht auf und lässt den blitzenden zentralen Mechanismus der Welt in all seiner Schönheit und Einfachheit sichtbar werden.

Bemerkenswert ist, dass dafür weder physikalische noch mathematische Kenntnisse erforderlich sind. Ich bin versucht zu sagen: im Gegenteil! Es kann hier durchaus vorteilhaft sein, solche Kenntnisse nicht zu besitzen. Der alltägliche Umgang mit mathematischen Formeln führt Physiker allzu leicht in Versuchung, Beschreibung und Wirklichkeit gleichzusetzen, oder besser: sie miteinander zu

¹ In: *Gravitation*, Freeman, San Francisco 1973, S.1197. (Wheeler selbst glaubte nicht an einen solchen Mechanismus.)

verwechseln. Dann aber verschwindet die im Titel des Abschnitts formulierte Frage, denn wenn die Natur der Formalismus *ist*, dann ist es nicht mehr sinnvoll zu fragen warum sie ihm *gehört*. Dafür ist ein Begriff von Natur notwendig, der den Formalismus begründet und der ihm stets wieder gegenübergestellt werden kann.²

Die Natur ist *niemals* mit ihrer formalen Beschreibung identisch. Die Wirklichkeit *ist kein* vierdimensionaler Minkowski-Raum mit den Koordinaten x_1, x_2, x_3 und ict – ebenso wenig wie eine Fischpopulation die logistische Gleichung *ist*. Die Wirklichkeit ist *Bewegung von Objekten im dreidimensionalen Raum*, und es stellt sich die Frage, *warum* es angemessen ist, diese Wirklichkeit durch den Minkowski-Raum zu beschreiben, mit anderen Worten: warum die Lichtgeschwindigkeit für alle gleichförmig bewegten Beobachter denselben Wert hat.

Ohne die Vorstellung bewegter Objekte im Raum gäbe es gar kein Relativitätsprinzip; bekanntlich hat dieses Prinzip seinen Ausgangspunkt in der Erkenntnis, dass gegenüber dem (leeren) Raum keine Bewegung definiert werden kann. Bewegung eines Objekts kann es nur relativ zu einem anderen Objekt geben. Der Raum selbst ist kein solches Objekt.

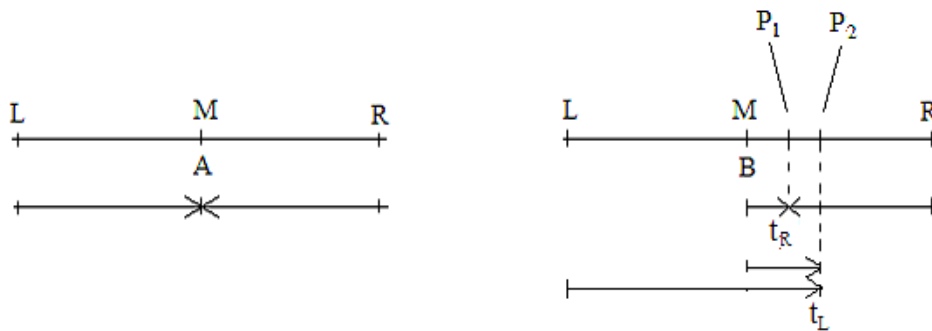
2.3. Einsteins Szenario

Auf dem jetzigen Niveau physikalischer Erkenntnis kann die Notwendigkeit der SRT eingesehen werden, die relativistischen Phänomene *als solche* müssen aber einfach hingenommen werden. Ein Modell, das es erlauben würde, diese Phänomene durch Einsicht in die zugrunde liegenden Zusammenhänge zu *verstehen*, wäre jedenfalls vorzuziehen.

Ein solches Modell wird im Folgenden präsentiert. Es liegt allerdings weit außerhalb des üblichen physikalischen Denkens. Um dorthin zu gelangen werden, wie erwähnt, keine formalen Hilfsmittel benötigt; Es ist eine reine Interpretationsfrage, oder sagen wir: eine Frage geometrisch-logischer Schlussfolgerungen.

Begeben wir uns zunächst in das wohlbekannteste Szenario, das Einstein zur Illustration der Relativität der Gleichzeitigkeit entworfen hat:

² Der erste Schritt zu dieser Verwechslung ist die verbreitete Überzeugung, dass "Mathematik die Sprache der Natur" ist. Das mag sein! – wenn man jedoch meint, mit Mathematik *alles* sagen zu können, greift man zu kurz und gerät auf Abwege.



(S1)

In der Skizze ist M der Mittelpunkt der Strecke zwischen L und R.

A und B sind zwei Beobachter, die beide zur Zeit $t_0 = 0$ in M sind. A bleibt in M, B verlässt M und bewegt sich (gleichförmig) in Richtung R.

Von L und R zur gleichen Zeit t_0 (von A aus gesehen) gesendete Lichtsignale, die gleichzeitig bei A eintreffen, erreichen B *nicht* gleichzeitig: das Signal von R trifft *früher* bei B ein (im Punkt P_1 zur Zeit t_R) als das Signal von L (das im Punkt P_2 zur Zeit t_L eintrifft).

Die Zeitdifferenz zwischen dem Eintreffen des linken und rechten Signals sei Δt , also

$$t_L - t_R = \Delta t$$

Soviel zur Relativität der Gleichzeitigkeit. Die Diskussion des Szenarios soll aber diesmal ein Stück weiter geführt werden.

Nennen wir den Zeitpunkt $t_0 = 0$ in L und R die *Gegenwart* von A. Die Aufhebung der Gleichzeitigkeit bezüglich B bedeutet dann, dass der Zeitpunkt des Aussendens des Lichtsignals in R für B *in die Vergangenheit* versetzt werden muss: B bewegt sich auf das Signal zu, es erreicht ihn daher früher als es A erreicht, also ist es im Vergleich zu A früher abgeschickt worden – somit muss das Aussenden des Lichtsignals für B ein *vergangenes* Ereignis sein. Ebenso gilt: Das Aussenden des Signals von L ist für B ein *zukünftiges* Ereignis.

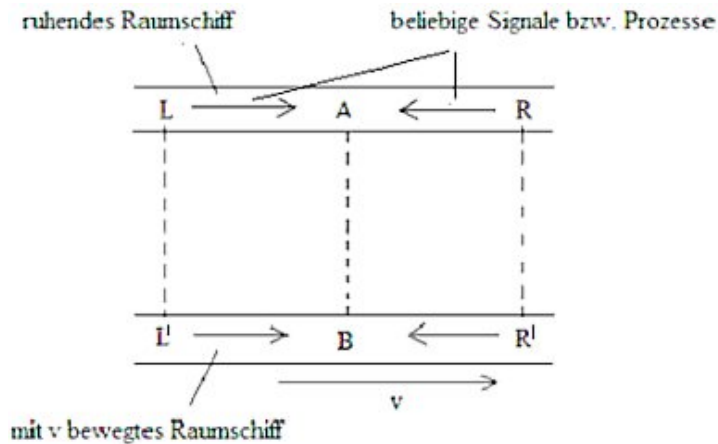
Diese Versetzung des einen Ereignisses in die Vergangenheit und des anderen in die Zukunft von B – immer im Vergleich mit A – ist aber nur dann möglich und notwendig, wenn Folgendes der Fall ist:

Jedes zum System des bewegten Beobachters B gehörende Paar gleichartiger Signale, die in L und R zum selben Zeitpunkt t_0 erzeugt werden wie die Lichtsignale (oder allgemeiner: jedes beliebige Paar gleichartiger physikalischer Prozesse, die in L und R zur selben Zeit t_0 beginnen) und auf geradem Weg auf B zulaufen, trifft bei B mit derselben Zeitdifferenz Δt ein wie die Lichtsignale.

Nur unter dieser Voraussetzung wird die Aufhebung der Gleichzeitigkeit – und damit zugleich die Festlegung der für B in L und R geltenden, veränderten Zeiten – zu einem notwendigen Akt. Gäbe es irgendein Paar von Signalen oder Prozessen, das diese Bedingung nicht erfüllte, dann wäre die Festlegung der Zeit gemäß der Vorgabe durch die Lichtsignale ungültig.

Wenn man nun nicht, wie gewohnt, sofort auf den relativistischen Formalismus übergeht, sondern den Sachverhalt weiterhin von derjenigen Wirklichkeit aus beurteilt, von der das Einsteinsche Szenario handelt – *Objekte, die sich im (dreidimensionalen) Raum bewegen* –, dann wird klar, was für eine ungeheuer starke Bedingung dieser Wirklichkeit dadurch auferlegt wird.

Führen wir uns das durch ein Beispiel vor Augen: Nehmen wir an, A und B seien Beobachter in Raumschiffen. Nennen wir das Raumschiff von A das ruhende. Das Raumschiff von B bewege sich relativ zu A mit der Geschwindigkeit v .



(S2)

$LA = AR = L'B = BR'$ (in Bezug auf A zu dem Zeitpunkt, der in der Skizze dargestellt ist)

In R und R', L und L' werden – von A aus gesehen gleichzeitig – Lichtsignale erzeugt. Sie erreichen A gleichzeitig und B wieder mit der Zeitdifferenz Δt .

Zugleich mit den Lichtsignalen – und an denselben Orten – werden nun aber auch andere Signale erzeugt, sagen wir: Schallsignale im Metallkörper der Raumschiffe oder in der darin enthaltenen Luft. (Man könnte aber auch Gewehrkugeln abschießen oder anderswie Allotria treiben.) Zuerst treffen die Lichtsignale bei B ein, und dann, mit verschiedenen zeitlichen Abständen, die anderen Signale. Aber für *alle* Paare identischer Signale bzw. Prozesse muss gelten: die Zeitdifferenz Δt , mit der sie B erreichen, ist immer die gleiche, und sie entspricht der Zeitdifferenz der Lichtsignale.

Bei den Lichtsignalen ist die Zeitdifferenz selbstverständlich. Man "sieht" ja, dass B dem einen Signal entgegenläuft und deshalb früher auf dieses Signal trifft als auf das andere, dem er davonläuft. Bei den Schallsignalen ist das aber völlig anders: sie sind im Raumschiff von B *mitgeführte* Signale, und es ist nicht einzusehen, warum bei ihnen überhaupt irgendeine Zeitdifferenz auftreten sollte.

Um zu demonstrieren, wie seltsam das trotz mehr als hundert Jahren SRT noch immer anmutet, wollen wir die Schallsignale im Metall herausgreifen.

In bezug auf A werden sie gleichzeitig erzeugt. Irgendein ruhender Beobachter A', der bezüglich der Bewegungsrichtung von B *vor* A postiert ist, kann A später mitteilen, dass die Schallsignale bei B zeitversetzt eingetroffen sind. Für A bedeutet das, dass das *im Raumschiff von B mitgeführte* Signal von vorn *schneller* gewesen sein muss als das von hinten. Einerseits ist es also für A vollkommen einsichtig, dass die gleichzeitig erzeugten Lichtsignale beim (bewegten) Beobachter B zeitversetzt ankommen müssen, und andererseits ist für ihn überhaupt nicht einzusehen, warum auch die Schallsignale, die sich im Metallkörper von B's Raumschiff fortpflanzen, mit der gleichen Zeitdifferenz bei B eintreffen. Es gibt dafür einfach keinen ersichtlichen Grund.

Natürlich verschwindet das Problem sofort, wenn wir einbeziehen, was wir ja schon wissen – dass nämlich *für B* die Ereignisse in L' und R' *nicht* gleichzeitig sind und dass daher die Signalgeschwindigkeiten in bezug auf B identisch sind. Mit dieser "Lösung" würden wir aber genau das, was erklärt werden soll, als Erklärung einsetzen!

Der Sachverhalt ist aus folgendem Grund paradox:

Einerseits gilt, dass gegenüber dem Raum keine Bewegung definiert werden kann.

Andererseits gilt Folgendes: A *sieht*, dass die Schallsignale gleichzeitig erzeugt werden. Er *weiß*, dass die Entfernungen zwischen den Orten ihrer Erzeugung und dem Beobachter B identisch sind, und er *erfährt*, dass das Signal von vorn bei B früher eingetroffen ist als das von hinten. Er *muss* daraus schließen, dass die Bewegung gegen den Raum – *die es gar nicht geben darf* – die Geschwindigkeit der Schallsignale beeinflusst hat: das von vorn wurde beschleunigt, das von hinten verlangsamt.

Noch einmal: Man kann den SRT-Formalismus anwenden und so das Problem eliminieren. Aber dadurch verschwindet es ja nicht wirklich. Dann hat man über die Natur verfügt und festgelegt, dass sie sich entsprechend verhalten muss. Und das tut sie ja auch! – Aber es ist nicht im geringsten klar geworden warum. Die Beziehung zwischen Wirklichkeit (bewegte Objekte im dreidimensionalen Raum) und Formalismus (Lorentz-Transformation) bleibt unerklärt.

Der Raum, in dem das Problem sich auflöst, ist der vierdimensionale Minkowski-Raum. Der Raum, in dem die eben angeführten Erfahrungen und Schlussfolgerungen des Beobachters A beschrieben wurden, ist dagegen der normale dreidimensionale Raum mit den darin bewegten Objekten – also genau der Raum, auf den sich auch Einsteins Überlegungen zur Relativität der Bewegung beziehen. Und in ebendiesem Raum, der gleichgültig gegenüber der Bewegung sein sollte, tritt jetzt – für A – eine Änderung der Schallgeschwindigkeit im Metall als Folge der Bewegung dieses Metalls auf, und es muss geklärt werden, was der Grund für diese Geschwindigkeitsänderung ist.

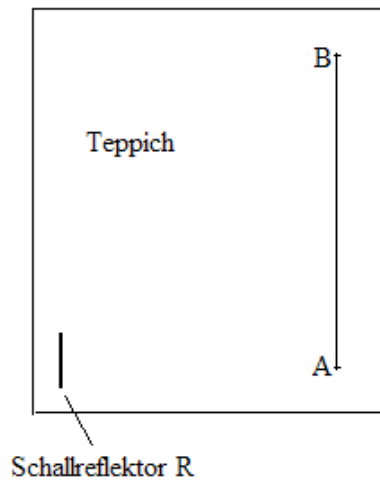
Die allgemeine Frage, die anfangs gestellt wurde: "Warum gehorcht die Natur den Beziehungen für zeitliche und räumliche Maße, die durch Licht vorgegeben werden?" hat sich in unserem Beispiel konkretisiert zu der Frage:

Warum erreicht das Schallsignal von vorn den bewegten Beobachter früher als das von hinten – und zwar mit derselben Zeitdifferenz Δt , mit der das vordere Lichtsignal früher eintrifft als das hintere?

Um uns dieser Frage zu nähern, begeben wir uns noch in ein anderes Szenario. Es ist völlig trivial, aber für die Argumentation deshalb nützlich, weil hier Fragen und Antworten ohne die sonst unvermeidliche Einschränkung durch fest eingefahrene Denkgewohnheiten möglich sind.

2.4. Das zweite Szenario

Wir befinden uns auf einer weit ausgedehnten Ebene. Über der Ebene ist Luft, von gewöhnlichem Druck und unbewegt. Wir blicken von oben auf einen fliegenden Teppich, der jetzt aber auf der Ebene aufliegt.



(S3)

Auf dem Teppich sind zwei Beobachter A und B und ein Schallreflektor R.

A und B haben ebenfalls beide einen Schallreflektor bei sich, außerdem jeder zwei Uhren von folgender Beschaffenheit: ein leeres Zifferblatt mit einem einzelnen Zeiger, der sich gleichmäßig dreht. Beide Beobachter haben einen Stift zur Beschriftung der Zifferblätter.

Es läuft nun folgender Vorgang ab:

1. A sendet in Richtung B und gleichzeitig zum Reflektor R wiederholt Schallsignale. B reflektiert die Signale zu A zurück. A winkt B zu sich heran, bis beide reflektierten Signale gleichzeitig bei ihm eintreffen. Genau von diesem Moment an verbleibt B auf seiner Position.
2. A sendet ein Schallsignal zu B und beschriftet gleichzeitig den Ort auf dem Zifferblatt einer seiner Uhren, auf den die Zeigerspitze gerade weist, mit **0**.
3. B empfängt das Signal, reflektiert es zu A zurück und schreibt gleichzeitig **1** auf sein Zifferblatt.
4. A empfängt das Signal, reflektiert es zu B zurück und schreibt gleichzeitig **2** auf sein Zifferblatt.
5. B empfängt das Signal und schreibt **3** auf sein Zifferblatt.

Damit haben wir ein vollständiges Maßsystem für Längen und Zeiten definiert. A und B können ihre Skalen ergänzen. (A hat die Zeitpunkte 0 und 2, B hat 1 und 3.) Die Zeiteinheit nennen wir eine *Sekunde*, die Längeneinheit sei eine *Schallsekunde*, also die Strecke AB (bzw. AR). Die Schallgeschwindigkeit ist 1.

Nun erhebt sich der Teppich und fliegt mit annähernd Schallgeschwindigkeit parallel zur Verbindungslinie von A und B, und zwar so, dass B voran liegt.

A und B nehmen ihre anderen Uhren zur Hand und führen denselben Vorgang aus wie zuvor. Wieder liegt danach ein vollständiges Maßsystem vor. Wieder bezeichnen wir die Zeiteinheit als *Sekunde* und die Längeneinheit AB (bzw. AR) als *Schallsekunde*.

Bei der Durchführung können folgende Phänomene beobachtet werden (A und B können einige davon direkt durch den Vergleich der im Flug mit den in Ruhe beschrifteten Uhren ablesen):

- a) Bei 1.: B muss näher an A heranrücken.
- b) Bei 2. und 3.: Es dauert lange, bis das Signal B erreicht, da B dem Schallsignal mit fast Schallgeschwindigkeit davonfliegt. (A schreibt trotzdem **0**, und B schreibt **1** auf sein Zifferblatt.)
- c) Bei 3. und 4.: Der Rückweg erfolgt dagegen sehr schnell: A eilt dem Signal entgegen.
- d) aus a) folgt, dass in Bewegungsrichtung die Längeneinheit verkürzt ist.
- e) aus b) und c) folgt, dass die jetzt gültige *Sekunde* gegenüber der *Sekunde*, die auf dem ruhenden Teppich definiert wurde, gedehnt ist (Flöge der Teppich mit Schallgeschwindigkeit, würde sie ewig dauern).
- f) aus b) und c) folgt auch, dass die Uhren – im Vergleich zu vorher – nicht mehr gleichzeitig gleiche Zeigerstellungen einnehmen. (Man könnte sagen: die Sekunde nach vorn dauert viel länger als die Sekunde nach hinten.)
- g) Die Schallgeschwindigkeit ist wieder 1: Wenn ein Schallsignal von vorne oder von hinten kommt und den ersten Beobachter bei der Zeigerstellung n passiert, dann wird dieses Signal den zweiten Beobachter bei der Zeigerstellung $n+1$ passieren. Die Uhren sind so eingerichtet. (Die Schallgeschwindigkeit ist aber auch für alle anderen Richtungen 1.)

Was wir gemacht haben, ist klar. Wir haben auf dem fliegenden Teppich ein Maßsystem errichtet, das gegenüber dem Maßsystem auf dem ruhenden Teppich in bezug auf die Schallgeschwindigkeit lorentz-transformiert ist. Alle relativistischen Phänomene lassen sich bequem beobachten.

Und jetzt stellen wir eine völlig unsinnige Frage:

Auf dem fliegenden Teppich dauert die Zeiteinheit *Sekunde* wesentlich länger als auf dem ruhenden. Die Zeit der fliegenden Beobachter vergeht also viel langsamer als die der ruhenden. Bedeutet das nun, dass die fliegenden Beobachter A und B langsamer altern als irgendwelche Bewohner der Ebene?

Selbstverständlich *nicht!* – und warum sind wir da so sicher?

Weil das, was wir getan haben, völlig willkürlich ist. Die Zeit durch Schallsignale einzurichten (und dadurch die Schallgeschwindigkeit konstant zu machen), ist eine Vorgabe, um die sich die Natur nicht im geringsten kümmert.

Der Grund für diese Überzeugung ist die Gewissheit:

Die durch Schall eingerichtete Zeit gilt nur für Schallgeschwindigkeit und daraus abgeleitete Phänomene und für nichts sonst.

Was wäre ein solches aus Schallgeschwindigkeit abgeleitetes Phänomen? Z.B. die Geschwindigkeiten, mit denen sich Überlagerungen von Schallwellen fortpflanzen. Sie könnten durch das auf der Ebene und auf dem fliegenden Teppich eingerichtete Zeit- und Längensystem, also *relativistisch* beschrieben werden, eben so, wie das für gewöhnlich bei der Beschreibung von Licht der Fall ist. Auch würde für Schallwellen der relativistische Dopplereffekt gelten. Uhren, die irgendwie auf der Basis von Schallreflexion funktionierten, würden die "richtige" – also die "Teppich"-Zeit zeigen, allerdings nur, wenn sie offen wären (d.h. wenn die Luft nicht in ihnen eingeschlossen wäre) und wenn ihre Ausdehnung in der Bewegungsrichtung des Teppichs entsprechend der schallrelativistischen Längenänderung korrigiert wäre.

Die Antwort ist einfach und klar. Sie betrifft das Wesen der Sache: Was Schall ist oder daraus abgeleitet, gehorcht dem auf Schallsignalen basierenden Maßsystem. Für alles andere gilt dieses Maßsystem nicht.

Nun ist alles dafür vorbereitet, die Antwort auf die anfangs gestellte Frage zu geben.

2.5. Die Antwort

Soeben war zu sehen: Wenn Zeit- und Längenmaße durch *irgendwelche* Wellen-Signale bestimmt werden, dann gilt dieses Maßsystem nur für diese Wellen selbst und die daraus abgeleiteten Phänomene. Nichts sonst gehorcht diesem Maßsystem.

Nur bei Licht scheint das anders zu sein: Dem auf Lichtsignalen beruhenden Maßsystem gehorchen *alle* Phänomene.

Der Erklärung dieses Faktums steht aber ein scheinbar unüberwindliches Problem im Weg: Es ist einfach kein Grund zu erkennen, warum die Geschwindigkeiten *aller* Prozesse – die ja im dreidimensionalen Raum ablaufen und nicht im Minkowskiraum – in anderen Bezugssystemen in genau der Weise verändert sein sollten, dass sie sich dem durch Licht vorgegebenen Schema fügen. Die Tatsache selbst erscheint ontologisch unmöglich, und der kausale Zusammenhang zwischen Wirklichkeit und Formalismus bleibt ein Geheimnis.

Allerdings nur, solange vorausgesetzt wird dass die Phänomene in derselben Weise von Licht unabhängig sind wie von Schall! Damit ist Folgendes gemeint:

Im Teppichsystem gilt: Die biologischen Prozesse (das Altern der Beobachter) sind *keine Schallgeschwindigkeitsphänomene*. Deshalb gehorchen sie dem durch Schall festgelegten Maßsystem *nicht*.

Im Maßsystem, das durch Lichtsignale definiert ist, gilt dagegen scheinbar: Die Schallausbreitung im Metall, oder wiederum das Altern von Beobachtern, sind *keine Lichtgeschwindigkeitsphänomene*. Deshalb *sollten* sie dem durch Licht festgelegten Maßsystem ebenfalls *nicht* gehorchen, und es ist nicht einzusehen, warum sie es dennoch tun.

Dieser Widerspruch wird durch folgende Annahme beseitigt:

Es besteht zwischen Licht und Schall überhaupt kein Unterschied bezüglich des Gültigkeitsbereichs des darauf beruhenden Maßsystems: dieses gilt in beiden Fällen nur für die jeweils daraus abgeleiteten Phänomene.

Für die Tatsache, dass diese Annahme aber im Fall von Licht – anders als bei Schall – keine Einschränkung darstellt (*alles* Existierende fügt sich ja dem Lichtsystem) gibt es dann nur einen einzigen möglichen Grund:

Die Natur gehorcht den Beziehungen für zeitliche und räumliche Maße, die durch Licht vorgegeben werden, weil es nur Lichtgeschwindigkeit und daraus abgeleitete Phänomene gibt.

Was ist dann mit *anderen* Geschwindigkeiten? Die Annahme "es gibt nur Lichtgeschwindigkeit" lässt nur eine Möglichkeit zur Erzeugung anderer Geschwindigkeiten offen, nämlich *Interferenz*.

Alles, was existiert und was sich ereignet, ist ein Interferenzphänomen, ein Muster aus Superpositionen von Wellen mit Lichtgeschwindigkeit.

Nach diesem Satz (der, sollte er wahr sein – was ich nicht bezweifle – jedenfalls einer der wichtigsten jemals gedachten Sätze wäre) nun einfach in der engen, an naturwissenschaftlichen Arbeiten orientierten Art der Darstellung – diesem zwar unvermeidlichen, aber emotional so flachen und faden Einerlei von Voraussetzung, Behauptung und Beweis – zu verbleiben, als wäre nichts geschehen, fände ich völlig unangemessen. Deshalb frage ich:

Ist das nicht eine phantastische Hypothese von geradezu wunderbarer Erklärungsmacht?

Sie ist nicht nur notwendig und hinreichend für die Erklärung der Relativität, sondern sie gewährt auch, wie versprochen, einen ersten Blick auf den *glitzernden Mechanismus der Welt in all seiner Schönheit und Einfachheit*. Allerdings ist es zunächst ein Blick aus großer Distanz, und um den Mechanismus klar und deutlich sehen zu können – aber auch, um vor der physikalischen Inquisition überhaupt zu rechtfertigen, was hier von Ferne, vergleichbar den Jupitermonden in Galileis einfachem Teleskop, gesehen wird – müssen noch viele Schritte zurückgelegt werden.³

³ Die Beziehung zwischen meiner Hypothese und dem System gegenwärtiger Überzeugungen ist, meine ich, von genau derselben Art wie die Beziehung zwischen der Hypothese Aristarchs (dass die Erde sich dreht und um die Sonne bewegt) und dem damaligen Weltbild. *Eigentlich* wird dadurch alles ungeheuer einfach. Doch scheinbar sicheres Wissen stellt sich dieser Einfachheit in den Weg.

Sind aber die wissenschaftlich begründeten Einwände, die gegen meine Hypothese sprechen, nicht von ganz anderer Qualität als die damals gegen Aristarch geäußerten? Kann man wirklich ein Argument von der Art, dass – wenn die Erde sich bewegte – Stürme auftreten müssten, mit dem Argument vergleichen, dass *Teilchen* ein unverzichtbarer Bestandteil der physikalischen Naturbeschreibung seien? Aber ja! – Und ich sehe mich sogar in einer wesentlich besseren Ausgangsposition als Aristarch. Er konnte das Sturm-Argument nicht entkräften, weil der Begriff der gleichförmigen Bewegung noch nicht entwickelt war, ich aber kann zeigen, dass – zumindest in etlichen Fällen von grundlegender Bedeutung – die Teilchenvorstellung nicht nur entbehrlich ist, sondern dass der Verzicht auf dieses Konzept sogar die Voraussetzung für die Beseitigung interpretativer Unklarheiten und Paradoxien ist.

Manchem mag die Antwort allerdings nicht wunderbar, sondern verrückt erscheinen. Ich glaube, das liegt daran, dass wir durch ein doppeltes Vorurteil – bezüglich des Seins und bezüglich seiner physikalischen Beschreibung – in unserem Verständnis behindert sind. Das Sein ist uns in unserer Erfahrung *substanziell* gegeben, und die Physik ist in diesem Erfahrungsbereich entstanden und hat ihre Herkunft nie wirklich transzendiert – jedenfalls nicht, was die *Interpretationen* physikalischer Theorien betrifft.

Gerade eben erschien es selbstverständlich, dass eine Zeit, die durch Schall bestimmt wird, nur für Schallgeschwindigkeitsphänomene gilt. Im Teppichsystem stellten wir die Frage: "Altern die fliegenden Beobachter langsamer als die ruhenden?" und nannten diese Frage zu Recht *unsinnig*.

Wäre nun aber die Frage, ob im Fall der durch Licht definierten Zeit bewegte Beobachter langsamer altern als ruhende, nicht genauso unsinnig – *es sei denn*, auch das Altern wäre *letztlich* ein Lichtgeschwindigkeitsphänomen, eine Veränderung von Mustern, die aus Wellen geformt sind?

Warum sollte nicht für die Lichtzeit dasselbe angenommen werden wie für die Schallzeit? Weil daraus eben gefolgert werden müsste, dass es nur Lichtgeschwindigkeit und daraus abgeleitete Phänomene gibt, und weil es scheint, als könnten die Objekte unserer Erfahrung nicht auf solche Phänomene zurückgeführt werden. Der folgende einfache Zusammenhang lässt allerdings vermuten, dass dies doch möglich ist.

2.6. Der kurze Weg zur Materie

In einem Universum, in dem es nichts gibt außer Lichtgeschwindigkeit, müssen *Objekte* Wellenüberlagerungen sein.

Da sich (bei geeigneter Wahl der Koordinaten) in der Speziellen Relativitätstheorie beim Übergang von einem Bezugssystem in ein anderes nur die Maße zweier Dimensionen ändern – die der Zeitdimension und die der Raumdimension parallel zur Richtung der Relativbewegung der beiden Bezugssysteme – ist für die nun folgenden Analysen relativistischer Sachverhalte ein einfaches Modell völlig ausreichend ist, in dem Bewegung nur entlang der x-Achse stattfindet.⁴

Es hat den Anschein, als läge die Hypothese "*Es gibt nur Lichtgeschwindigkeit*" weit außerhalb, in einer geradezu absurden Distanz zur "normalen" Physik. Deshalb soll zunächst gezeigt werden, dass

⁴ Dieses Modell dient im Folgenden dem Aufbau der relativistischen Raum-Zeit-Struktur.

das nicht der Fall ist, sondern dass im Gegenteil sogar ein sehr kurzer Weg zu den gewohnten physikalischen Modellbildungen zurückführt.

Sei S1 ein ruhendes Bezugssystem, S2 ein relativ zu S1 mit der Geschwindigkeit v bewegtes System. Ein bezüglich S2 ruhendes Objekt wird durch eine Wellenüberlagerung in Form einer *stehenden Welle* repräsentiert:

$$y = \sin(2\pi f t) \cos(2\pi x \frac{1}{\lambda}) \quad (f \lambda = c)$$

Transformation ins Ruhesystem S1 ergibt dann die Wellenüberlagerung

$$y = \sin 2\pi \left(t f \frac{1}{k} - x f \frac{v}{c^2} \frac{1}{k} \right) \cos 2\pi \left(t v \frac{1}{\lambda k} - x \frac{1}{\lambda k} \right) \quad \left(k = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \right)$$

Die *erste* der beiden Wellen ist eine *de Broglie'sche Materiewelle*.

Sie hat die Frequenz $f \frac{1}{k}$, die Wellenlänge $\frac{1}{f} \frac{c^2}{v} k = \lambda \frac{c}{v} k$ (λ Compton-Wellenlänge)

und die Phasengeschwindigkeit $u = \frac{c^2}{v}$.

Die *zweite* Welle hat die Geschwindigkeit v – das ist die Geschwindigkeit des Teilchens, das mit der Materiewelle verknüpft ist.

Es gilt also Folgendes: ***Eine stehende Welle in einem bewegten System, die durch zwei mit Lichtgeschwindigkeit laufende Wellen erzeugt wird, ist – vom Ruhesystem aus betrachtet – die Überlagerung einer Materiewelle und einer Welle mit der Geschwindigkeit der Gruppe, d.h. des assoziierten Teilchens.***

Mit anderen Worten: Gerade das substanzielle Sein, die Materie – also genau das, was zu der Behauptung "Es gibt nur Lichtgeschwindigkeit" in krassem Widerspruch zu stehen scheint, kann aus genau dieser Annahme auf kürzestem Weg rekonstruiert werden; – jedenfalls in der de Broglie'schen Darstellung, was aber natürlich auch das Maximum dessen ist, was mit unserem einfachen, eindimensionalen Modell erreichbar ist.

2.7. Relativitätstheorie ohne Relativität

Das Ziel dieses Abschnitts ist die explizite Bestimmung der räumlichen und zeitlichen Verhältnisse der Erscheinungen, und zwar

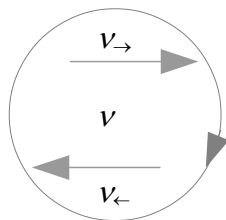
1. ohne die Relativität und die Gleichheit der Lichtgeschwindigkeit für alle gleichförmig bewegten Beobachter zu postulieren;
2. in einer Weise, die diese Verhältnisse unmittelbar einsichtig macht;
3. auf die Voraussetzung gestützt, dass *alles*, was existiert – jedes Objekt und jeder Prozess – *letztlich* eine Superposition von Wellen mit Lichtgeschwindigkeit darstellt.

Ruhende Objekte werden durch stehende Wellen repräsentiert, bewegte Objekte durch Superpositionen von Wellen mit verschiedenen Frequenzen. Frequenzen und Wellenlängen der gegenlaufenden Wellen werden mit Richtungspfeilen (\rightarrow oder \leftarrow) indiziert. Alle Wellen haben Lichtgeschwindigkeit.

Nennen wir S das Ruhesystem. Ψ' sei eine Superposition von zwei entgegengesetzt laufenden Wellen mit den Frequenzen ν_{\rightarrow}' und ν_{\leftarrow}' . Gesucht ist die Geschwindigkeit v des relativ zu S bewegten Systems S' , in dem Ψ' als stehende Welle mit einer Frequenz ν_T erscheint.⁵

Die Verhältnisse sind dann wie beim gewöhnlichen Dopplereffekt, wo ein mit v bewegter Beobachter *dieselbe* Frequenz bei entgegenkommenden und nacheilenden Wellen misst.

⁵ Die Vorstellung von Wellenüberlagerungen ist aber nicht nur auf stehende Wellen anwendbar. Sie lässt sich z.B. auch auf den Fall übertragen, dass sich die Ausbreitungsrichtung der Wellen so stark krümmt, dass eine rotierende Wellenstruktur entsteht:



ν ist die Frequenz der rotierenden Wellenstruktur. Wenn diese Struktur relativ zum Beobachter ruht, dann ist $\nu_{\rightarrow} = \nu_{\leftarrow} = \nu$. Falls sie sich in der Ebene normal zur Rotationsachse bewegt, dann wird ν_{\rightarrow} zu ν_{\rightarrow}' , ν_{\leftarrow} zu ν_{\leftarrow}' , ν zu ν_T , und es gelten die nachfolgenden Ausführungen.

(Es ist klar, dass dieses Bild nicht realistisch verstanden werden will; das Einzige, was davon benötigt wird, ist die Existenz der beiden entgegengesetzten Wellenrichtungen.)

Daher gilt:
$$v_{\rightarrow}' (1 - v/c) = v_{\leftarrow}' (1 + v/c) = v_T \quad (1)$$

woraus sich ergibt:
$$v_{\leftarrow}' / v_{\rightarrow}' = (c - v) / (c + v) \quad (2)$$

und
$$v / c = (v_{\rightarrow}' - v_{\leftarrow}') / (v_{\rightarrow}' + v_{\leftarrow}') \quad (3)$$

sowie
$$v / c = (\lambda_{\leftarrow}' - \lambda_{\rightarrow}') / (\lambda_{\leftarrow}' + \lambda_{\rightarrow}') \quad (4)$$

Aus (3) folgt, dass die Geschwindigkeit v des durch die Superposition repräsentierten Objekts von den Frequenzen der gegenlaufenden Wellen abhängt. Eine Änderung der Geschwindigkeit ist also gleichbedeutend mit einer Änderung dieser Frequenzen.

Nach Voraussetzung ist Ψ' in bezug auf S' eine stehende Welle mit Frequenz v_T . Nehmen wir nun an, Ψ' sei durch *Beschleunigung* entlang einer Strecke AB aus einer in bezug auf S stehenden Welle Ψ mit der Frequenz v hervorgegangen. (Ein ruhendes Objekt wurde auf die Geschwindigkeit v beschleunigt.) Welche Frequenzänderungen der gegenlaufenden Wellen entsprechen dieser Beschleunigung?

Für die Frequenzen der nach rechts laufenden Wellen soll im Fall einer Geschwindigkeitsänderung ganz allgemein gelten

$$\forall v_{\rightarrow}: v_{\rightarrow} \mapsto v_{\rightarrow}' = f(v_{\rightarrow}) \quad (5)$$

und – da jede Welle, die die Strecke AB durchlaufen hat, nach dem umgekehrten Durchlaufen dieser Strecke wieder die ursprüngliche Frequenz haben soll – für die Frequenzen der nach links laufenden Wellen:

$$\forall v_{\leftarrow}: v_{\leftarrow} \mapsto v_{\leftarrow}' = f^{-1}(v_{\leftarrow}) \quad (6)$$

Die Geschwindigkeitsänderung soll frequenzunabhängig sein. Durch Einsetzen von (5) und (6) in (3)

$$v / c = (f(v) - f^{-1}(v)) / (f(v) + f^{-1}(v)) \quad (\text{Man beachte: } v_{\rightarrow} = v_{\leftarrow} = v) \quad (7)$$

ist leicht zu erkennen, dass diese Forderung am einfachsten dadurch zu erfüllen ist, dass

$$v_{\rightarrow}' = f(v_{\rightarrow}) = q v_{\rightarrow} \quad \text{und} \quad v_{\leftarrow}' = f^{-1}(v_{\leftarrow}) = q^{-1} v_{\leftarrow} \quad (q \in \mathbb{R}, q > 0) \quad (8)$$

gesetzt wird. Die Gleichung für die Geschwindigkeit der stehenden Welle lautet dann:

$$v/c = (q v - q^{-1} v) / (q v + q^{-1} v)$$

oder – nach dem Herauskürzen der Frequenz

$$v/c = (q - q^{-1}) / (q + q^{-1})$$

$$v/c = (q^2 - 1) / (q^2 + 1) \quad (9)$$

Es gilt nach (1) und (8):

$$v_T = v q (1 - v/c) = v q^{-1} (1 + v/c)$$

also $v_T^2 = v^2 (1 - v^2/c^2)$

und somit $v_T = v (1 - v^2/c^2)^{1/2}$ (10)

Die Frequenz von Ψ' hat sich also gegenüber der Frequenz von Ψ um den Faktor $(1 - v^2/c^2)^{1/2}$ vermindert.

In diesem Modell sind Zeiten und Längen durch die Frequenzen und Wellenlängen stehender Wellen *definiert*. Deshalb bedeutet (10):

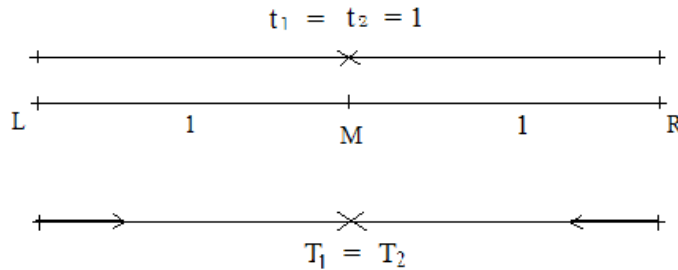
In einem relativ zu S mit der Geschwindigkeit v bewegten System S' vergeht die Zeit langsamer, und zwar um den Faktor

$$k = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (11)$$

Nun zur grundlegenden Frage der speziellen Relativität, die im Abschnitt 2.3. vorgestellt wurde – der Frage also, warum alle Signale (oder Objekte, oder Prozesse), die bei einem ruhenden Beobachter *gleichzeitig* eintreffen, einen bewegten Beobachter stets *mit der gleichen Zeitdifferenz* erreichen wie Lichtsignale, die zur selben Zeit und an denselben Orten ausgesendet wurden.

Da hier weder die Gültigkeit des Relativitätsprinzips noch die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit vorausgesetzt wird, kann die Gleichheit dieser *Zeitdifferenzen* nicht *postuliert*, sondern muss erst *gezeigt* werden.

Wir betrachten zunächst das ruhende System S. M sei der Mittelpunkt der Strecke LR.



(S4)

Die oberen Pfeile bezeichnen Lichtstrahlen. t_1 bzw. t_2 sind die Zeitpunkte des Eintreffens der Lichtstrahlen von R bzw. L bei M ($t_1 = t_2$).

Die unteren Pfeile stellen Objekte dar, die sich von L und R auf M zu mit gleich großer Geschwindigkeit bewegen. T_1 und T_2 bezeichnen die Zeitpunkte ihres Eintreffens ($T_1 = T_2$). Die Entfernung zwischen M und R sowie zwischen M und L ist 1.

Das Objekt in L wird durch eine Überlagerung von Wellen mit den Frequenzen $\nu_{\rightarrow} = a$ und $\nu_{\leftarrow} = b$ repräsentiert, das in R daher durch Wellen mit den Frequenzen mit $\nu_{\rightarrow} = b$, $\nu_{\leftarrow} = a$ ($a > b$). In M befindet sich ein ruhendes Objekt mit $\nu_{\rightarrow} = \nu_{\leftarrow} = m$.

Die Geschwindigkeit des Objekts bei L sei v_L , die des Objekts bei R sei v_R ($v_L = -v_R$) und die des Objekts bei M sei v_M ($v_M = 0$).

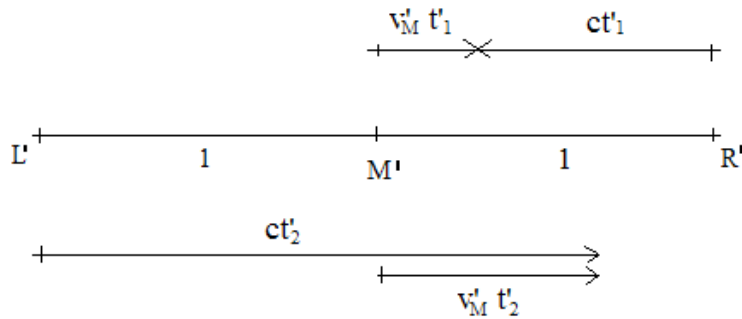
Wir gehen nun auf ein gleichförmig mit der Geschwindigkeit v_M' in Richtung \rightarrow bewegtes System S' über, das folgendermaßen definiert ist: Zur selben Zeit $t = 0$ und an denselben Orten – die wir jetzt aber als L', M' und R' bezeichnen – befinden sich *dieselben* Objekte wie zuvor in S, aber *nach einer Beschleunigung*, d.h. transformiert gemäß (8). Ihre Frequenzen lassen sich also dadurch bestimmen,

dass die Frequenzen der entsprechenden Objekte von S mit einer reellen Zahl $q > 0$ multipliziert bzw. durch diese Zahl dividiert werden.

Mit dieser Voraussetzung soll nun die Gleichheit der Zeitdifferenzen des Auftreffens der Lichtsignale und der auf M' zu bewegten Objekte gezeigt werden.

Zunächst berechnen wir die Zeitdifferenz, mit der die Lichtsignale, die gleichzeitig (bezogen auf das Ruhesystem) von L' und R' ausgesendet werden, in M' eintreffen.

Aus der nachstehenden Skizze



(S5)

lassen sich folgende Beziehungen ablesen:

$$v_M' t_1' + c t_1' = 1, \quad -v_M' t_2' + c t_2' = 1$$

Nach (9) gilt

$$v_M' = c(q^2 - 1)/(q^2 + 1)$$

Demnach ist

$$(c(q^2 - 1)/(q^2 + 1)) t_1' + c t_1' = 1, \quad t_1' = (1/c) ((q^2 + 1)/(2q^2))$$

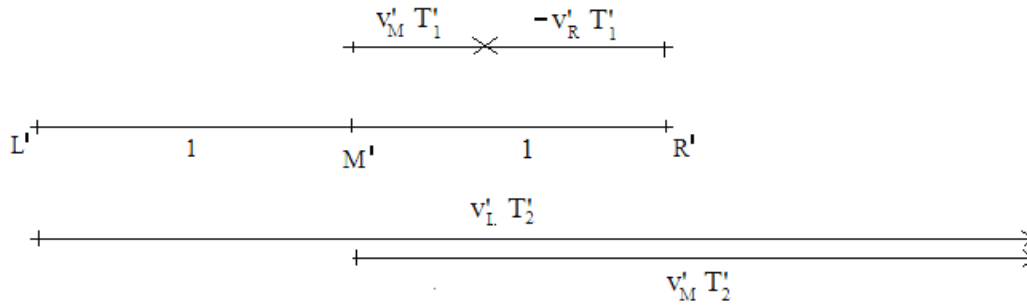
$$-(c(q^2 - 1)/(q^2 + 1)) t_2' + c t_2' = 1, \quad t_2' = (1/c) ((q^2 + 1)/2)$$

Daraus folgt

$$t_2' - t_1' = (1/c) \left((q^4 - 1)/(2q^2) \right). \quad (12)$$

Das ist also die Zeitdifferenz, mit der die *Lichtstrahlen* in M' eintreffen.

Nun zur Differenz der Zeiten, die die *Objekte* von L' und R' bis M' benötigen.



(S6)

$$-v_R' T_1' + v_M' T_1' = 1, \quad v_L' T_2' - v_M' T_2' = 1$$

Nach (3) und (8) gilt

$$v_L'/c = (a q - b(1/q)) / (a q + b(1/q)) = (a q^2 - b) / (a q^2 + b)$$

$$v_R'/c = (b q - a(1/q)) / (b q + a(1/q)) = (b q^2 - a) / (b q^2 + a)$$

Wie zuvor ist $v_M' = c(q^2 - 1)/(q^2 + 1)$

Die kurze Rechnung ergibt:

$$T_2' - T_1' = (1/c) \left((q^4 - 1)/(2q^2) \right). \quad (13)$$

Der Vergleich mit (12) zeigt:

$$T_2' - T_1' = t_2' - t_1'.$$

Die Zeitdifferenz des Eintreffens der bewegten Objekte bei M' ist gleich der des Eintreffens der Lichtsignale.

Damit ist gezeigt:

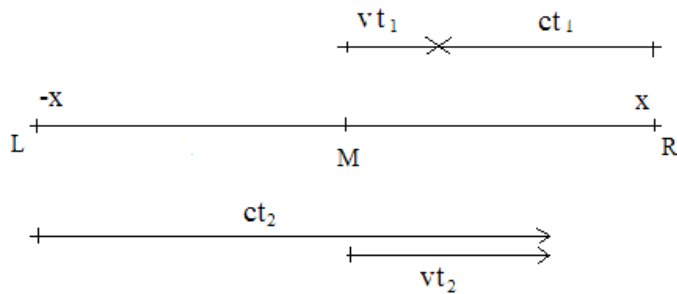
Wenn ein ruhendes System S durch Transformation aller Objekte gemäß (8) in ein gleichförmig bewegtes System S' übergeht, dann erreichen alle *mit Lichtgeschwindigkeit oder mit beliebigen anderen Geschwindigkeiten* bewegten symmetrischen Signale (Prozesse, Objekte), die in S beim Punkt M gleichzeitig eintreffen, in S' den Punkt M' mit *derselben* Zeitdifferenz Δt . Punkte, die *vor* M' liegen, müssen also für einen Beobachter in M' in die Vergangenheit versetzt werden, und analog Punkte *hinter* M in die Zukunft.

2.8. Ableitung der Lorentz-Transformation

Wenn *jetzt* die Zeit- und Längenverhältnisse durch Licht (auf der Basis von Δt) bestimmt werden, dann ist dies *nicht* wegen des Relativitätsprinzips und wegen des Prinzips der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit für alle gleichförmig bewegten Beobachter gerechtfertigt, sondern deshalb, weil durch das eben abgeleitete Resultat schon bekannt ist, dass die durch Licht bestimmten Verhältnisse für *alle* physikalischen Vorgänge gelten.

Der Einfachheit halber lassen wir im Folgenden die Striche weg, durch die die Größen des bewegten Systems gekennzeichnet waren, und bezeichnen v_M' mit v .

Das in der Skizze dargestellte Szenario ist nun wieder das von Einstein entworfene. Von L und R aus werden, bezogen auf einen in M ruhenden Beobachter gleichzeitig, Lichtsignale ausgesendet.



(S7)

Die Skizze zeigt, dass

$$t_1 = x/(v + c) \quad t_2 = x/(-v + c)$$

$$t_2 - t_1 = 2vx/(c^2 - v^2) = 2(vx/c^2)/(1 - v^2/c^2)$$

Wenn also, bezogen auf das Ruhesystem, das Signal vom Punkt R zur Zeit $t_R = 0$ ausgesendet wird, dann muss für den bewegten Beobachter dieser Zeitpunkt um

$$(vx/c^2) / (1 - v^2/c^2)$$

in die Vergangenheit verschoben werden: das Signal erreicht ihn früher als den ruhenden Beobachter. (Die Hälfte der Zeitdifferenz deshalb, weil der Koordinatenursprung beider Systeme in der Mitte zwischen L und R liegt und die Abhängigkeit der Zeitdifferenz von x linear ist.)

Für den Zeitpunkt t_R° des Aussendens des Signals von R (bezogen auf den bewegten Beobachter) gilt somit:

$$t_R^\circ = -(vx/c^2)/(1 - v^2/c^2)$$

Nehmen wir nun an, das Signal werde nicht zur Zeit 0, sondern zu einer beliebigen Zeit t von jenem Punkt gesendet, der denselben Abstand x vom ruhenden Beobachter hat. Dann hat sich für den

bewegten Beobachter die x-Koordinate dieses Punkts um vt verringert und es folgt (durch Einsetzen für x und Addition von t)

$$\begin{aligned}
 t^\circ &= t - (v(x - vt)/c^2)/(1 - v^2/c^2) \\
 t^\circ &= (t - v^2t/c^2 - vx/c^2 + v^2t/c^2)/(1 - v^2/c^2) \\
 t^\circ &= (t - vx/c^2)/(1 - v^2/c^2)
 \end{aligned} \tag{14}$$

Die Koordinate x° , die zu dieser veränderten Zeit t° gehört, ergibt sich aus

$$\begin{aligned}
 x^\circ &= x - vt^\circ \\
 x^\circ &= x - v(t - vx/c^2)/(1 - v^2/c^2) \\
 x^\circ &= (x - xv^2/c^2 - vt + xv^2/c^2)/(1 - v^2/c^2) \\
 x^\circ &= (x - vt)/(1 - v^2/c^2)
 \end{aligned} \tag{15}$$

Bisher wurde lediglich die Versetzung der Zeit entlang der x-Achse durchgeführt. Jetzt berücksichtigen wir das gemäß (11) um den Faktor k verlangsamte Vergehen der Zeit im bewegten System.

Wir setzen also

$$t' = t^\circ \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Aus Gleichung (14) folgt dann:

$$\begin{aligned}
 t' &= ((t - vx/c^2)/(1 - v^2/c^2)) \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \\
 t' &= (t - vx/c^2) / \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}
 \end{aligned} \tag{16}$$

Da Längen und Zeiten durch $x^\circ = ct^\circ$ verbunden sind, muss auch gelten:

$$x' = x^\circ \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$x' = (x - vt) / \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (17)$$

(16) und (17) sind zwei von den vier Gleichungen der Lorentz-Transformation. Über die beiden anderen muss nichts weiter gesagt werden.

2.9. Ergänzungen

1. Ausgangspunkt unserer Überlegungen war die Zeitdifferenz Δt . Wir hätten aber auch von der Formel für die Addition von Geschwindigkeiten ausgehen können, die hier nach (9) folgende Form annimmt:

$$\text{Sei } v = c(q_1^2 - 1) / (q_1^2 + 1), \quad w = c(q_2^2 - 1) / (q_2^2 + 1)$$

Dann kann durch eine einfache Rechnung gezeigt werden, dass für die aus v und w zusammengesetzte Geschwindigkeit W gilt:

$$W = c \frac{q_1^2 q_2^2 - 1}{q_1^2 q_2^2 + 1} = \frac{v + w}{1 + vw/c^2}$$

(q entspricht übrigens dem Faktor des relativistischen Dopplereffekts:

$$\text{aus Gleichung (9) folgt } q = \sqrt{\frac{1 + v/c}{1 - v/c}})$$

2. Ich habe hier die spezielle Relativität aus der Annahme abgeleitet, dass es nur Lichtgeschwindigkeit gibt.

Der Gedankengang, durch den man zur Erkenntnis gelangt, dass es nur eine einzige Geschwindigkeit geben kann, ist ohne jede physikalische Voraussetzung durchgeführt worden. Die spezielle Relativität erscheint somit als Ergebnis einer Reihe ontologischer Schlussfolgerungen. Hier eine kurze Wiederholung:

Der erste Schritt besteht in der Einsicht, dass die Zusammenhänge zwischen den an verschiedenen Orten geltenden Zeiten nicht aufgrund einer hypothetischen Wesenheit bestehen, die *universelle Zeit* genannt werden könnte, sondern dass sie durch physikalische Prozesse vermittelt werden müssen: Wenn ich mich *jetzt hier* befinde und wissen will, *welche Zeit dort* ist, dann kann ich das nur durch Signale bzw. Prozesse herausfinden.

Die auf diese Weise festgelegten Zeiten ändern sich mit dem Bewegungszustand eines Systems: Die zur Ermittlung der Zeiten verwendeten Signale erreichen einen Beobachter A nicht zur selben Zeit wie einen relativ zu A bewegten Beobachter B.

An die Zeiten, die durch Signale bzw. Prozesse ermittelt werden, ist die *Forderung der Eindeutigkeit* zu richten: gleichgültig, welche Prozesse zur Zeitbestimmung verwendet werden, sie müssen für jeden Beobachter (in seinem Bezugssystem) in jedem Fall zu denselben Ergebnissen führen.

Damit sind wir zu dem Punkt gelangt, an dem wiederum die Überlegungen der Abschnitte 2.3, 2.4 und 2.5 greifen: Die Forderung der Eindeutigkeit kann ausschließlich dadurch erfüllt werden, dass es *nur eine einzige Geschwindigkeit* gibt. Das bedeutet: *Die Wirklichkeit ist aus fundamentalen Prozessen gebildet, die sich alle mit derselben Geschwindigkeit im Raum ausbreiten.* (Es ist auch möglich, dass nur ein einziger solcher Prozess existiert.)

Aus den Überlegungen der Abschnitte 2.6 und 2.7 geht hervor, dass diese fundamentalen Prozesse *wellenartig* sein müssen; Alle anderen Geschwindigkeiten werden also durch Wellenüberlagerungen erzeugt.

Daraus folgt, dass alles, was existiert, *alle* Objekte und Wechselwirkungen, letztlich als Superposition der fundamentalen wellenartigen Prozesse aufgefasst werden muss. Die Grenzgeschwindigkeit dieser Superpositionen ist dann natürlich die Geschwindigkeit der Wellen selbst.⁶

⁶ Im zweiten Teil werden dieselben Aussagen aus völlig anderen Voraussetzungen abermals abgeleitet.

Wie in 2.7 gezeigt, ist in einer solchermaßen bestimmten Wirklichkeit die Forderung nach Eindeutigkeit der Zeiten erfüllt, die in verschiedenen Bezugssystemen gelten. Gemäß 2.8 folgt schließlich, dass die Transformation zwischen relativ zueinander bewegten Systemen die Lorentz-Transformation ist.

2.10. Was wurde erreicht?

1. Die relativistischen Raum- und Zeitphänomene sind vollkommen einsichtig.

Die Annahme: "*Alles, was existiert und was sich ereignet, ist eine Superposition von Wellen mit Lichtgeschwindigkeit*" macht es möglich, von der Wirklichkeit (Dynamik im dreidimensionalen Raum) her kommend die relativistischen Raum-Zeit-Verhältnisse zu *konstruieren* und dadurch zu verstehen.

Damit erübrigt sich eine *Begründung* des Relativitätsprinzips, was deshalb wichtig ist, weil dieses im Rahmen der üblichen Modellvorstellungen gar nicht begründet werden *kann*. Folgendermaßen:

Wenn es keine Bewegung gegen den Raum gibt, sondern nur Bewegung relativ zu Objekten, dann muss das für *jede* – also auch für beschleunigte Bewegung gelten: gegen den Raum kann auch keine Beschleunigung behauptet werden. Es gibt also keinen Grund für die Auszeichnung gleichförmig bewegter Bezugssysteme.

Die Allgemeine Relativitätstheorie löst dieses Problem nicht. Eine Verallgemeinerung der SRT stellt sie nur formal dar, und zwar hinsichtlich berechtigter Koordinatensysteme, aber nicht hinsichtlich der Relativität der Bewegung: diese wird durch die ART *nicht* auf beschleunigte Systeme erweitert. Tatsache ist, dass als Folge einer Beschleunigung *Trägheitskräfte* auftreten. Natürlich kann man diese Trägheitskräfte lokal als Folge eines zeitlich veränderlichen Gravitationsfeldes interpretieren – aber das ist ein rein formaler Akt. Hat man dadurch die Relativität beschleunigter Bewegung gezeigt? Keineswegs! – da *ist* eben kein Gravitationsfeld, und die Frage bleibt offen, *worauf* die beschleunigte Bewegung zu beziehen sei und warum die Natur gleichförmige Bewegung auszeichnet.

Es könnte scheinen, als wäre der Vorschlag Machs ein Ausweg, dass Bewegung relativ zu den Massen im Universum definiert werden müsse. Dann könnte auf die Behauptung der Beschleunigung gegen den Raum verzichtet werden. Wenn allerdings die Masse als Bezugspunkt für beschleunigte Bewegung dienen soll, dann muss nicht nur die Bewegung selbst, sondern auch das damit verbundene Phänomen, d.h. die *Trägheit*, auf die umgebende Masse bezogen werden. Aber auch in der ART ist die gesamte Masse, die irgendein – relativ zu dieser Masse beschleunigtes, z.B. rotierendes – Objekt

umgibt, nicht die Quelle der infolge der Beschleunigung auftretenden Trägheitskraft, sondern sie liefert nur einen kleinen Beitrag dazu.⁷

Es steht also in der Frage nach der Bewegungsrelativität, entgegen allgemeiner Überzeugung, zwischen Einstein und Newton 1:1 *unentschieden*: gleichförmige Bewegung ist *relativ*, und beschleunigte Bewegung ist *absolut*. Das ist aber kein mögliches Resultat, sondern ein Widerspruch im Konzept der Bewegungsrelativität, und das bedeutet, dass das spezielle Relativitätsprinzip im Rahmen der üblichen Modellvorstellungen nicht konsistent begründet werden kann.

Tatsache ist jedoch, dass das Relativitätsprinzip *gilt*. Aber so klar und einfach der Gedanke auch scheinen mag, dass es keine Bewegung gegen den Raum geben kann und *deshalb* Bewegung relativ sein muss – das Relativitätsprinzip lässt sich dennoch aus diesem Gedanken nicht ableiten.

Bei unserer Zugangsweise verschwindet dieses Problem. Das Relativitätsprinzip bildet hier nicht den notwendigen Ausgangspunkt der SRT. An seine Stelle tritt die Grundannahme "*Es gibt nur Lichtgeschwindigkeit*", aus der sich der direkte Aufbau der relativistischen Raum-Zeit-Verhältnisse ergibt, wie er im vorigen Abschnitt durchgeführt wurde. Das Problem der Bewegung gegenüber dem Raum tritt gar nicht auf, weil Bewegung als Interferenzphänomen *definiert* ist und sich als solches *von selbst* relativistisch verhält. Daraus *folgt* das Relativitätsprinzip.

2. Aus der hier vorgeschlagenen Interpretation der SRT ergibt sich eine maximale Erweiterung des naturgesetzlichen Status der Lichtgeschwindigkeit und der Bedeutung der Konstanten *c*: "*Es gibt nur Lichtgeschwindigkeit*" kann in dieser Hinsicht nicht überboten werden.

3. Wenn es nur Lichtgeschwindigkeit gibt, dann sind Teilchen Wellenüberlagerungen. Daraus folgt unmittelbar, dass die Größen Energie und Impuls durch Frequenz und Wellenlänge definiert werden müssen, und dass Beschleunigung Frequenzänderung ist. Die Ableitung der de Broglie'schen Materiewellen in 2.6. zeigt außerdem, dass zur Definition des Impulses eine Phasenwellenlänge erforderlich ist.

4. Formal ist die Spezielle Relativitätstheorie zunächst nichts anderes als das System der Transformationsgleichungen. Einstein übernahm es von Lorentz. Der einzige – aber bedeutende! – Unterschied bestand in der Interpretation: die von Lorentz – als mechanische Deformation des Äthers – war *ad hoc*, die von Einstein ergab sich dagegen aus allgemein gültigen Prinzipien. Nur durch Einsteins Interpretation konnte die Lorentz-Transformation zur Grundlage der neuen Physik werden.

⁷ Siehe z.B. H. Thirring: *Über die Wirkung rotierender ferner Massen in der Einsteinschen Gravitationstheorie*, Phys. Zeitschr. 19, 33 (1918).

Nun wird die Transformation abermals neu interpretiert, und zwar so, dass die bisher existierende rein formale Sichtweise durch das Verständnis des Begründungszusammenhangs vertieft wird.

An der Transformation selbst und ihrer Gültigkeit für alle physikalischen Phänomene ändert sich nichts. Aber durch dieses Verständnis kommt erstmals die fundamentale Ebene der Wirklichkeit in den Blick, und es muss wohl nicht eigens hervorgehoben werden, dass die Folgen mindestens so gravierend sind wie beim ersten Wechsel der Interpretation: mit einem Schlag ändert sich die begriffliche Basis der Physik, und unsere Vorstellung von der Wirklichkeit wird radikal umgestaltet.⁸

2.11. Naturphilosophische Anmerkungen

Die Problematik des Verhältnisses der Konzepte *Existenz* und *Zeit* in der Physik

Jedes Konzept der Wirklichkeit, dessen konstituierende Elemente *Raum* und *materielle Objekte* sind – d.h. *im Raum* existierende elementare Entitäten –, unterwirft unser Verständnis der *Zeit* einer prinzipiellen Beschränkung:

Der Begriff des materiellen Objekts ist hier *zeitlos*. Daher ist es – in einem Konzept dieser Art – auch der Begriff der *Existenz*.

Der Vorstellung eines materiellen Körpers im Raum *fehlt Zeit*. Sie wird als *zusätzliches*, diesem Bild an sich fremdes Element hinzugefügt. Es gibt *Existenz*, *und* es gibt *Zeit*.

Bei Newton ist das explizit der Fall: die *Zeit* fließt vermöge ihres "Wesens", unaufhaltsam und geheimnisvoll.

Diese Vorstellung wird zwar durch Quantentheorie und Relativitätstheorie korrigiert – durch die Quantentheorie, weil infolge der Tatsache, dass die Energie nicht Null werden kann, ein vollständig statisches Szenario unmöglich ist, und durch die Relativitätstheorie, weil *Raum* und *Zeit* formal zur *Raumzeit* vereinigt werden – aber dennoch gibt es immer noch die Vorstellung von *etwas*, *was* sich bewegt. Und dieses "etwas" ist *als bloß Existierendes* zeitfrei; in ihm bleibt der Begriff der *zeitlosen materiellen Existenz* erhalten. (Bewegung ist nur ein Akzidens des Existierenden.)

⁸ An dieser Stelle ist dazu nicht mehr zu sagen. Alle Ausführungen des ersten Teils weisen auf diese neue Sicht der Wirklichkeit hin. Eine deutlichere Gestalt wird sie aber erst im zweiten Teil der Arbeit annehmen.

Dem Begriff der Existenz fehlt also die Beziehung zur Zeit; Diese konzeptuelle Unverbundenheit von Zeit und Existenz ist ein im Rahmen der Standardphysik unbehebbarer Mangel.

Im hier vorgeschlagenen Modell ist die Wirklichkeit *dynamische Form*. Eine Welle ist – anders als ein Teilchen – ohne Bewegung *undenkbar*. Es gibt also keine Wirklichkeit ohne Bewegung und somit auch nicht ohne Zeit. Zeit ist daher kein *zusätzliches*, sondern ein *notwendiges* Element des Konzepts "Existenz". Ihr Fließen ist nicht aus ihrem "Wesen" bedingt (und deshalb geheimnisvoll), sondern folgt unmittelbar aus der Definition der Wirklichkeit. Es gibt nicht die Vorstellung eines Objekts als materieller Entität, die sich bewegen kann oder nicht; Die Wirklichkeit *ist* Bewegung.

Was ist Zeit?

"Zeit" ist eine Wesenheit, über die wir mit großer Selbstverständlichkeit verfügen, von der wir aber keinen Begriff haben.

Ganz anders verhält es sich im Fall von "Bewegung". Dafür gibt es ein intuitives Verständnis. Wir wissen, was Bewegung ist.

Durch die Hypothese "*Es gibt nur Lichtgeschwindigkeit*" wird nicht nur jede Art von Dynamik, sondern auch jede Art von Existenz an eine Bewegung mit stets derselben Geschwindigkeit geknüpft. Es ist dadurch möglich, nicht mehr *Zeit*, sondern *Bewegung* als Grundbegriff aufzufassen.

Die Wirklichkeit ist dann also *Raum und Bewegung* – so, wie sie in diesem Kapitel immer schon verstanden worden ist.

Formal ändert sich dadurch nichts. Aber wir verstehen nun, was *Zeit* ist. Als Grundgröße ist sie für uns unzugänglich; aber als abgeleitete Größe, die dem Grundbegriff *Bewegung* entstammt, wird sie verständlich.

Diese Änderung betrifft die Basis unseres Weltverständnisses. Wir werden sicher weiterhin sagen, dass "die Zeit vergeht". Wegen der Unzugänglichkeit des Zeitbegriffs war dieser Satz aber bisher bloß rein assoziativ mit sich verändernden Sachverhalten verknüpft, genau genommen war jedoch völlig unklar, *was* da eigentlich *vergeht*.

Jetzt aber erhält dieser Satz eine Bedeutung, die ihm durch das intuitiv gegebene Konzept der Bewegung vermittelt wird: Die *in der Zeit* sich ereignenden Veränderungen der Erscheinungen sind

der Ausdruck einer einzigen, immerwährenden Bewegung, die Muster bildet, verändert und wieder auflöst.

Substanz oder Form?

Wenn Materie aus *Teilchen* bestehend gedacht wird, dann ist sie *statisch*.

Wenn sie dagegen aus *Wellen* besteht, dann ist sie *dynamisch*.

Dann aber ist es eigentlich nicht angemessen zu sagen, Materie *besteht* aus Wellen – sie ist vielmehr ein dynamischer Prozess fortwährender Gestaltbildung durch Wellen.

Was über die Zeit gleich bleibt, ist also nicht die *Substanz* eines Objekts, sondern seine *Form* – als stationärer (oder annähernd stationärer) Zustand.

2.12. Was bleibt offen?

Die SRT enthält einen konzeptuellen Defekt, den wir nicht beseitigt haben.

Dieser zeigt sich auf mehrere verschiedene Arten. Am einfachsten wird er durch die Frage offenbar:

*Was schwingt eigentlich im Fall von Lichtwellen?*⁹

Die Entgegnung: *Der elektrische und magnetische Feldvektor* kann nicht als Antwort gelten – das wäre, als würde man im Fall von Wasserwellen das Wasser entfernen und dann behaupten, kinetische und potentielle Energie würden nun die Stelle des Wassers einnehmen. Das *Subjekt* der periodischen Veränderung, die der Wellenbewegung zugrunde liegt, kann nicht einfach durch allgemeine Beschreibungsgrößen ersetzt werden.

Dieselbe Frage tritt uns auch im *Problem der Vermittlung* entgegen:

⁹ Die schon erwähnte Gleichsetzung von Wirklichkeit und Beschreibung hat dazu geführt, dass diese Frage aus dem Bewusstsein der Physiker verschwunden ist. Aber Licht *ist nicht* einfach eine Wellengleichung – Licht *existiert*.

Zwei Raumschiffe befinden sich in großer Entfernung voneinander. Die Frage ist:

Wodurch wird bewirkt, dass das Vergehen der Zeit in beiden Raumschiffen genau so erfolgt, dass bei einer späteren Begegnung der Raumschiffe der Uhrenvergleich der Voraussage der Relativitätstheorie entspricht? Wodurch wird die Beziehung zwischen den beiden Systemen vermittelt?

Die Relativitätstheorie selbst bietet hier nichts an. Das absolute System ist verschwunden, stattdessen existieren nur Koordinatensysteme. Ein Koordinatensystem ist aber nichts Seiendes – es kann also das Vergehen der Zeit nicht vermitteln.

Besonders deutlich tritt diese Frage nach dem "was" – d.h. nach dem Subjekt der Schwingung, die die Lichtwellen erzeugt, bzw. nach dem Subjekt der Vermittlung des Zeitvergehens – im folgenden Szenario auf:

Man denke sich ein geschlossenes zweidimensionales Universum, dessen geometrische Struktur der einer Kugeloberfläche entspricht.

In diesem Universum befinden sich zwei Beobachter A und B, die sich entlang desselben Großkreises auf der Kugeloberfläche relativ zueinander gleichförmig bewegen. Bei der ersten Begegnung stellen beide ihre Uhren auf 0.

Die Frage ist: *Wie wird der nächste Uhrenvergleich ausfallen?*

Darauf gibt es tatsächlich keine Antwort. Es herrscht völlige Symmetrie zwischen A und B. Beide bewegen sich auf Geodäten. Von A aus gesehen vergeht bei B die Zeit langsamer, von B aus gesehen bei A. Es können aber natürlich auch noch andere auf diesem Großkreis gleichförmig bewegte Beobachter mit verschiedenen Geschwindigkeiten eingeführt werden, die alle mit gleichem Recht die Vorgänge von ihrem Bezugssystem aus beurteilen und ein jeweils anderes Ergebnis erwarten. Erst der wirklich durchgeführte zweite Uhrenvergleich gibt darüber Auskunft, wie sich die verschiedenen Beobachterzeiten zueinander verhalten.

Unter allen überhaupt möglichen Beobachtern gibt es genau *einen*, der "im Recht" ist: Es ist derjenige, dessen Zeit am schnellsten vergeht. Sein Bezugssystem ist tatsächlich als *das absolut ruhende Bezugssystem* aufzufassen.

Würden wir den Großkreis öffnen und die Enden in unbegrenzte Entfernung hin ausdehnen, dann gäbe es kein Problem: A und B würden sich nur dann wieder begegnen, wenn einer der beiden umkehrte, wodurch die Symmetrie aufgehoben wäre. Alles bliebe dann relativ. Wenn wir die Enden wieder

schließen, sind wir aber sofort wieder gezwungen, das absolute Ruhesystem einzuführen. Ein höchst eigenartiger Sachverhalt: Die Topologie des Universums, d.h. eine *globale* Eigenschaft, bestimmt unmittelbar, was *lokal* anzunehmen ist.

Entspricht die hier erzwungene Annahme eines Systems, das sich in absoluter Ruhe befindet, nicht einer Wiedereinführung des Äthers – umso mehr, als ja die Widersprüche der alten Ätherhypothese durch die Annahme, dass es nur Wellen gibt, eliminiert wären?¹⁰

Obwohl dieser Schluss eigentlich unausweichlich erscheint, ist er tatsächlich *nicht* notwendig. Im zweiten Teil wird geklärt warum – zugleich mit der Frage, was bei Lichtwellen schwingt und wodurch die relativistischen Zeitverhältnisse vermittelt werden.

2.13. Michelson-Morley: Die übersehene Möglichkeit

Durch das Experiment, das Michelson und Morley 1887 durchführten, sollte die Geschwindigkeit der Erde relativ zum Äther gemessen werden. Als sie keinen Unterschied zwischen den Geschwindigkeiten des Lichts in verschiedene Richtungen feststellen konnten, hielten sie ihr Experiment für gescheitert.

Die gegenwärtig für richtig gehaltene Schlussfolgerung ist jedoch, dass die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit für alle gleichförmig bewegten Beobachter ein Naturgesetz ist, dass der Äther nicht existiert und dass Licht für seine Ausbreitung kein Medium benötigt.

Hier wurde gezeigt, dass eine weitere Möglichkeit besteht: Das Medium existiert, aber es gibt keine Teilchen – jedenfalls nicht in der Form, wie sie gegenwärtig verstanden werden –, sondern nur Wellen. Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit für alle gleichförmig bewegten Beobachter ist nicht naturgesetzlich festgelegt, sondern ableitbar.

Die Alternative, vor die wir uns gestellt sehen, lautet also wie folgt:

A: Wir verzichten auf die Annahme eines Mediums für die Lichtwellen.

B: Wir lassen die Annahme unteilbarer, stets mit sich selbst identischer *substanzieller* Objekte fallen.

¹⁰ Das Problem des Äthers war, dass er einerseits – wegen des hohen Werts der Lichtgeschwindigkeit – von großer Härte sein musste, andererseits aber den materiellen Körpern überhaupt keinen Widerstand bieten durfte. Eine offensichtlich absurde Begriffsbildung! In einem Modell, in dem es keine Teilchen gibt, sondern nur Wellen, wäre dieser Widerspruch aufgehoben.

Die Variante A ist – obwohl sie nun schon mehr als ein Jahrhundert lang für wahr gehalten wird und deshalb selbstverständlich erscheint – letztlich doch dem Verdacht ausgesetzt, bloß eine ontologische Verirrung zu sein: eine Welle ohne Medium ist unsinnig. Eine solche Annahme *kann* nur dann in Frage kommen, wenn sie unausweichlich ist, weil keine Alternative zur Verfügung steht.

Es existiert jedoch die Alternative B, und, wie sich im Folgenden herausstellen wird, ist sie – auch wenn sie mehr als hundertjährigen Überzeugungen widerspricht – durchwegs vernünftig und gut begründet.

Im Fall von A ist es unmöglich, die relativistischen Phänomene zu verstehen. Relativität ist eine rein formale Tatsache.

Dagegen kann im Fall von B die spezielle Relativität abgeleitet *und* erklärt werden.