

# **Das »Prinzip der Dualen Konstanz der Lichtgeschwindigkeit«**

## **Ein die Lichtgeschwindigkeit $c$ betreffender heuristischer Gesichtspunkt**

© Helmut Hansen 2013

### **Abstract:**

In modern physics light is regarded as a quantum phenomenon that has both particle-like and wave-like aspects. Today we know that neither of these two aspects is sufficient to describe the nature of light. This dual characteristic of light is therefore - according to quantum theory - considered of being one of its fundamental properties. Given this quantumtheoretical view it seems to be a natural assumption that not only light itself, but also the speed of light  $c$ , should be of dual nature. In the present paper it was investigated whether and to what extent the theory of special relativity satisfies this assumption.

### **Zusammenfassung:**

In der modernen Physik wird Licht als eine Quantenerscheinung aufgefasst, die sowohl teilchenartige als auch wellenartige Aspekte aufweist. Heute wissen wir, dass keiner dieser beiden Aspekte, für sich genommen, ausreicht, um dem Wesen des Lichtes gerecht zu werden. Diese duale Charakteristik des Lichtes wird daher - entsprechend der Quantentheorie - als eine seiner fundamentalen Eigenschaften aufgefasst. Angesichts dieser quantentheoretischen Auffassung erscheint es als eine natürliche Annahme, dass nicht nur das Licht selbst, sondern auch die Lichtgeschwindigkeit  $c$  dualer Natur sein sollte. In dem vorliegenden Aufsatz ist untersucht worden, ob und inwieweit die Spezielle Relativitätstheorie dieser Annahme genügt.

## Einführung

In der modernen Physik wird Licht als eine Quantenerscheinung aufgefasst, die sowohl teilchenartige als auch wellenartige Aspekte aufweist. Heute wissen wir, dass keiner dieser beiden Aspekte, für sich genommen, ausreicht, um dem Wesen des Lichtes gerecht zu werden. Diese duale Charakteristik des Lichtes wird daher – entsprechend der Quantentheorie – als eine seiner fundamentalen Eigenschaften aufgefasst.

Angesichts dieser quantentheoretischen Auffassung erscheint es als eine natürliche Annahme, dass nicht nur das Licht selbst, sondern auch die Lichtgeschwindigkeit dualer Natur sein sollte. *Das bedeutet, auch die Lichtgeschwindigkeit  $c$  sollte sowohl einen teilchenartigen als auch einen wellenartigen Aspekt haben.* Eben diese Annahme bezeichne ich als das „Prinzip der Dualen Konstanz der Lichtgeschwindigkeit“.

Obwohl dieses Prinzip in der hier verwendeten Form noch nicht mehr ist als ein heuristischer Gesichtspunkt, so eröffnet es gleichwohl die Option, die Spezielle Relativitätstheorie auf eine sehr viel tiefergehende Weise wahrnehmen und verstehen zu können als es bisher der Fall ist.

Da die Lichtgeschwindigkeit  $c$  ein zentrales Element dieser Theorie darstellt, war es naheliegend, der Frage nachzugehen, ob und inwieweit Einstein's Theorie dem *Prinzip der Dualen Konstanz der Lichtgeschwindigkeit* genüge. Auf den ersten Blick schien es, als würde sie in Gestalt ihres 2. Postulates nur dem wellenartigen Aspekt der Lichtgeschwindigkeit genügen. Doch ein in die Tiefe gehender Blick offenbarte, dass sie auch die Möglichkeit in sich barg, *die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit auf eine teilchenartige Weise deuten zu können.*

Obschon diese Möglichkeit bereits als solches registriert worden ist, so sind die mit ihr verbundenen Auswirkungen auf unser Verständnis der Lichtgeschwindigkeit bis heute noch nie eingehender untersucht worden. In dem vorliegenden Aufsatz soll geschildert werden, welcher Art diese Auswirkungen sind und warum sie bis heute weitgehend unbemerkt geblieben sind.

## Das wellenartige Gesicht der Lichtgeschwindigkeit

Obwohl die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit von Einstein als ein universelles Prinzip eingesetzt worden ist, vermittelt dieses Prinzip aus der Perspektive des Prinzips der Dualen Konstanz der Lichtgeschwindigkeit unvermeidlich den Eindruck, mit ihm nur die »Hälfte« des Gesamtbildes der Naturkonstanten  $c$  erfasst zu haben.

In seiner ursprünglich von Einstein formulierten Fassung besagt es, dass sich das Licht im leeren Raum stets mit einer bestimmten, vom Bewegungszustande des emittierenden Körpers unabhängigen Geschwindigkeit  $V$  (i.e.  $c$ ) fortpflanzt. [1]

In und mit diesem Postulat ist eine zentrale Eigenschaft von Wellen bezeichnet: Da die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Wellen *vollständig* von den Eigenschaften des sie tragenden Mediums bestimmt ist, ist diese Geschwindigkeit auch physikalisch von der Geschwindigkeit der emittierenden Quelle unabhängig.

Da man um 1900 herum in dem Licht eine sich in einem spezifischen Medium ausbreitende Welle sah, war es eine völlig natürliche Schlussfolgerung, die Lichtgeschwindigkeit  $c$  als eine von der Geschwindigkeit der Lichtquelle unabhängige Größe aufzufassen.

Obwohl Einstein in seiner Originalarbeit *Über die Elektrodynamik bewegter Körper* (1905) das seinerzeit als *Äther* bezeichnete Medium der Lichtausbreitung für »überflüssig« erklären sollte, so hat er mit seinem 2. Postulat die Lichtgeschwindigkeit gleichwohl so definiert, als ob es sich beim Licht um eine rein klassische Welle handeln würde – ohne jedwede Teilchencharakteristik. [2]

So sehr diese Erkenntnis unter Physikern Allgemeingut ist, so wenig ist die darin liegende Einseitigkeit bis heute zur Kenntnis genommen worden. Hierfür gibt es viele Gründe. Einer der augenscheinlichsten Gründe ist *entwicklungsgeschichtlicher Natur*.

Zu der Zeit, als Einstein seine Spezielle Relativitätstheorie entwickelte, waren die Physiker kollektiv davon überzeugt, dass es sich beim Licht um ein reines Wellenphänomen handelte. Einstein teilte diese Überzeugung – ungeachtet der

Tatsache, dass er kurz zuvor seine Arbeit zur Lichtquantenhypothese veröffentlicht hatte. Sein 2. Postulat ist unmittelbarer Ausdruck dieser Überzeugung. [3] In dem Umstand, dass die Lichtgeschwindigkeit vom Bewegungszustand der Quelle unabhängig war, sah er einen ganz entscheidenden Sachverhalt, dem eine jede zukünftige Theorie zu genügen hatte. [4]

Die Erkenntnis, dass es sich beim Licht um eine Quantenerscheinung handelt, die nicht nur wellenartige, sondern auch teilchenartige Aspekte aufweist, diese Erkenntnis sollte sich erst zwanzig Jahre später durchgesetzt haben. Zu der Zeit aber (um 1925) war die Spezielle Relativitätstheorie schon weithin akzeptiert. Weder Einstein noch seine Kritiker sahen sich daher veranlasst, das 2. Postulat *nachträglich* einer tiefergehenden quantentheoretischen Revision zu unterziehen.

Setzt man jedoch das »Prinzip der Dualen Konstanz der Lichtgeschwindigkeit« als wahr voraus, dann erscheint eine solche Revision als unabweisbar. Es zeigt in unübersehbarer Deutlichkeit, dass Einstein mit seinem zweiten Postulat, sofern wir seinen Status als *Prinzip* zugrunde legen, offenbar nur den wellenartigen, nicht jedoch den teilchenartigen Aspekt der Lichtgeschwindigkeit  $c$  berücksichtigt hat.

Diese Schlussfolgerung, so unabweisbar sie auch anfänglich schien, stand indessen im krassen Widerspruch zu dem bemerkenswerten Erfolg der Speziellen Relativitätstheorie. Wenn Einstein's Theorie tatsächlich so unvollständig war, wie das Prinzip der Dualen Konstanz der Lichtgeschwindigkeit suggerierte, dann wäre es eigentlich zu erwarten gewesen, dass sich diese Unvollständigkeit auch auf die eine oder andere Weise experimentell bemerkbar gemacht haben müsste, was aber offenkundig nicht der Fall war.

In dem Bemühen, diesen Widerspruch aufzulösen, wurde schließlich ein bis heute kaum wahrgenommenes Theoriekonstrukt sichtbar, welches zeigte, dass Einstein's Theorie entgegen dem Eindruck, den *ihr* Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit vermittelte, auch die Möglichkeit beinhaltete, die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit auf eine teilchenartige Weise deuten zu können.

## Das verborgene Gesicht der Lichtgeschwindigkeit

John Stachel ist Physiker, der vor allem durch seine Arbeiten über die Geschichte der Relativitätstheorie und Albert Einstein bekannt geworden ist. Seit 1987 ist er Direktor des *Centers for Einstein-Studies*. In seinem Aufsatz *Einstein's Light-Quantum Hypothesis, or Why Didn't Einstein Propose a Quantum Gas a Decade-and-a-Half Earlier?*, den er im Jahre 2000 in dem Buch *Einstein – The formative Years (1879 – 1909)* veröffentlicht hat, weist er auf eine Merkwürdigkeit hin, der bislang von modernen Physikern keine tiefergehende Beachtung geschenkt worden ist, die jedoch weitreichende Auswirkungen auf unser Verständnis der Lichtgeschwindigkeit hat. [5]

Diese Merkwürdigkeit betrifft eine besondere Eigenschaft der relativistischen Kinematik, auf die bereits Einstein in § 5 *Additionstheorem der Geschwindigkeiten* in seiner 1905b-Arbeit hingewiesen hat. Diese Eigenschaft besteht darin, dass entsprechend dem relativistischen »Additionstheorem der Geschwindigkeiten« die Lichtgeschwindigkeit durch Zusammensetzung mit einer Unterlichtgeschwindigkeit nicht geändert werden kann – ein Ergebnis, das von ihm in seiner Originalarbeit jedoch nicht weiter kommentiert worden ist.[6] Er beschränkt sich in dieser Arbeit lediglich auf die sie abbildende Gleichung:

$$\mathbf{c}' = \frac{c + v}{1 + \frac{cv}{c^2}} = \mathbf{c} \quad (1)$$

Eben dies sollte Stachel verwundern, denn Gleichung (1) beinhaltet die Möglichkeit, die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit auch auf der Grundlage einer Teilchentheorie des Lichtes deuten zu können – eine Möglichkeit, die, wie Stachel anmerkt, für Einstein eigentlich hätte offensichtlich sein müssen. [7] Es stellt sich daher die Frage: Warum hat Einstein diese Möglichkeit nicht erwähnt?

## Einstein's Pro-Welle-Entscheidung

Wir wissen, dass Einstein, als er zu Beginn des 20. Jahrhunderts mit der Entwicklung der Speziellen Relativitätstheorie befasst war, sich in der finalen Entwicklungsphase

mit der Aufgabe konfrontiert sah, zwischen der Wellentheorie und der Teilchentheorie des Lichtes entscheiden zu müssen.

Er erkannte, dass die klassische Teilchentheorie des Lichtes zwar die Möglichkeit bot, das Nullresultat des Michelson-Morley-Experiments (1887) auf der Grundlage des Newton'schen Relativitätsprinzips erklären zu können, ohne hierbei auf die schwerfälligen und z.T. undurchsichtigen Äthertheorien Bezug nehmen zu müssen, dass sie aber im Widerspruch mit der Idee einer universellen Konstanz der Lichtgeschwindigkeit stand.

In der klassischen Teilchentheorie des Lichtes war die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit nur unter sehr eingeschränkten Bedingungen vertretbar. Sie war, um an dieser Stelle schon auf das in diesem Aufsatz thematisierte Experiment von DeSitter <Bewegte Lichtquelle - ruhender Beobachter> Bezug zu nehmen, nur dann gegeben, wenn die Lichtquelle in bezug auf den ruhenden Beobachter ebenfalls ruhte.

Die beiden nachfolgenden Gleichung zeigen, wie das Newton'sche Relativitätsprinzip resp. das von ihm begründete *Galilei'sche Additionstheorem der Geschwindigkeiten* formal aussieht - und welche Gestalt es mit Blick auf den hier ausgewählten Fall annimmt:

$$\mathbf{c}' = \mathbf{c} + \mathbf{v} \quad (2)$$

$$\mathbf{c}' = \mathbf{c} + \mathbf{0} = \mathbf{c} \quad (3)$$

Wie Gleichung (3) zeigt, ist die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit  $c' = c$  unter den geschilderten Voraussetzungen <bewegte Quelle - ruhender Beobachter> formal nur für einen einzigen Fall realisiert, und zwar dann, wenn die Quelle ruht:  $v = 0$ . In allen anderen Fällen führt sie zu einem von  $c$  abweichenden Wert. Bewegt sich die Lichtquelle auf den hier als ruhend angenommenen Beobachter zu, dann errechnet sich die Geschwindigkeit des Lichtteilchens  $c'$  aus *der Addition zweier Geschwindigkeitskomponenten*: Der Geschwindigkeit des Lichtes  $c$  (ausgesendet von einer ruhenden Quelle) *plus* der Geschwindigkeit der Lichtquelle  $v$ . Es zeigt in dieser

Form, dass alle, zu dieser Klasse gehörigen Fälle mit der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit unvereinbar sind.

Es war diese Unvereinbarkeit, die dazu geführt hat, dass sich Einstein in Gestalt des zweiten Postulates für eine wellenartige und gegen eine teilchenartige Deutung der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit entschieden hat. Der Umstand, dass das Licht überall und in jeder Richtung verschiedene Fortpflanzungsgeschwindigkeiten haben sollte, war für ihn der hauptsächlichste Grund, warum er vor Aufstellung der Speziellen Relativitätstheorie die Teilchentheorie des Lichtes verworfen hat. [8]

Mit dem von Einstein formulierten Relativitätsprinzip (resp. dem dadurch begründeten relativistischen Additionstheorem der Geschwindigkeiten) wird diese Entscheidung wider die Teilchentheorie des Lichtes jedoch *gegenstandslos*, denn die Geschwindigkeit des durch die Spezielle Relativitätstheorie beschriebenen Lichtteilchens ist nicht nur bei der Quellengeschwindigkeit  $v = 0$  konstant, sondern auch bei allen Geschwindigkeiten:  $v > 0$ .

Obwohl Stachel dies offenbar klar erkannt hat, so ist er bei dieser Erkenntnis stehengeblieben, ohne ihren Auswirkungen auf unser Verständnis der Lichtgeschwindigkeit weiter nachgegangen zu sein. Tut man dies, dann zeigt sich, dass sich die Wahrheit des 2. Postulates im Rahmen der relativistischen Kinematik als *empirisch unentscheidbar* erweist. Wir stoßen hier auf eine bis heute nicht wahrgenommene Erkenntnisgrenze, die das relativistische Bild von der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit als *unvollständig* erscheinen lässt.

Um diese Konsequenz nachvollziehen zu können, soll zuvor jenes Experiment vorgestellt werden, welches nach Auffassung der modernen Physik die Wahrheit des 2. Postulates »beweist«.

## **β Aurigae oder: Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit**

Als Einstein 1905 die Spezielle Relativitätstheorie veröffentlichte, war das 2. Postulat (i.e. die Unabhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit vom Bewegungszustand der

Quelle) noch kein empirisch bestätigtes Prinzip. Einstein war sich dieser Tatsache sehr wohl bewußt. Er räumte ein, dass es keineswegs selbstverständlich sei, ob dieses Prinzip wirklich in der Natur erfüllt ist. Er rechtfertigte seine Einführung mit dem Hinweis, dass seine Gültigkeit durch die Bestätigungen, welche die auf der Voraussetzung eines absolut ruhenden Äthers gegründete Lorentz'sche Theorie durch das Experiment erfahren habe, wahrscheinlich gemacht sei. [9] Ein direkter experimenteller Nachweis des 2. Postulates fehlte jedoch.

Es tauchte daher die Frage auf, wie ein solcher direkter experimenteller Nachweis geführt werden konnte. Da die von Einstein behauptete Konstanz der Lichtgeschwindigkeit im Widerspruch zu dem bis dahin noch als gültig angenommenen Galilei'schen Additionstheorem der Geschwindigkeiten stand, war es naheliegend, auch von der ihm zugrundeliegenden Gleichung (2) auszugehen und nach Möglichkeiten zu suchen, ihre Gültigkeit experimentell zu überprüfen – also zu überprüfen, ob die von einem ruhenden Beobachter gemessene Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts tatsächlich vom Bewegungszustand der Lichtquelle abhing oder nicht.

1913 zeigte der holländische Astronom *Willem de Sitter* (1872 – 1934), dass sich diese Gleichung mit Hilfe der Beobachtung von Doppelsternsystemen experimentell überprüfen ließ. [10] Bei einigen Doppelsternsystemen lag die Situation vor, dass sich die beiden Sterne während ihres Umlaufs umeinander abwechselnd auf die Erde zubewegten, sodaß die von diesen Sternen emittierte Geschwindigkeit des Lichtes, einen höheren Wert als  $c$  hätte aufweisen müssen, wenn die Lichtgeschwindigkeit tatsächlich von der Geschwindigkeit der Quelle abhing.

Da die bis dahin durchgeführten spektroskopischen Messungen jedoch keinerlei signifikanten Hinweis auf die Existenz einer solchen quellengeschwindigkeitsabhängigen Lichtgeschwindigkeit ergeben hatten, schien der experimentelle Beweis für die Gültigkeit des 2. Einstein'schen Postulates (also für die Behauptung, dass die Lichtgeschwindigkeit von der Geschwindigkeit der Lichtquelle unabhängig ist) erbracht.



Da sich durch spätere Messungen dieses Ergebnis experimentell mit hoher Genauigkeit bestätigen ließ, gilt das 2. Postulat der Speziellen Relativitätstheorie heute als hinlänglich bewiesen. Die Gültigkeit dieses Beweises ist innerhalb der modernen Physik so sehr allgemeiner Konsenz, dass er bis heute noch niemals ernsthaft hinterfragt worden ist.

Dies hat, wie ich im nachfolgenden Kapitel darlegen möchte, ganz entscheidend damit zu tun, dass die entsprechenden experimentellen Daten auch heute noch auf Grundlage von Gleichung (2) beurteilt werden – eine Gleichung, die in physikalischer Hinsicht jedoch keineswegs das abbildet, was ihr gemeinhin zugeschrieben wird.

## **Galilei's obsolete Gleichung**

Als DeSitter im Jahre 1913 Beobachtungen an Doppelsternsystemen als Möglichkeit vorschlug, um die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit experimentell überprüfen zu können, war es noch eine natürliche Vorgehensweise, dies auf Grundlage der Galilei'schen Gleichung (2) zu tun, denn zu dieser Zeit war es noch keineswegs erwiesen, ob die Lichtgeschwindigkeit wirklich eine Konstante in dem von Einstein behaupteten Sinn war oder nicht.

Es war deshalb nicht ungewöhnlich, als der Astrophysiker *Erwin Freundlich* den von deSitter 1913 veröffentlichten Beweis mit der Feststellung kritisierte, dass man auf Grund der vorhandenen Daten noch *keine eindeutige* Folgerung zugunsten der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit ziehen könne. [11]

DeSitter reagierte auf diese Kritik mit der Veröffentlichung des Aufsatzes „Über die Genauigkeit, innerhalb welcher die Unabhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit von der Geschwindigkeit der Quelle behauptet werden kann“.[12] In diesem Aufsatz vertrat er die Auffassung, dass man auf der Grundlage der Galilei'schen Gleichung (2) durch Hinzufügung eines von ihm als  $k$  bezeichneten Parameters die experimentelle Genauigkeit angeben könne, mit der die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit messbar sei.

$$c' = c + kv \quad (4)$$

Dass in dieser parametrisierten Gleichung (4) der *Geschwindigkeitsterm der Lichtquelle*  $v$  durchgängig als *Zusatzgeschwindigkeit* auftritt, ist dem bereits an anderer Stelle erwähnten Umstand geschuldet, das sich in dem von DeSitter untersuchten Experiment die Lichtquelle (i.e. der Stern) direkt auf den als ruhend angenommenen Beobachter zubewegt.

Wenn also die Lichtgeschwindigkeit von der Geschwindigkeit der Quelle in irgendeiner Weise abhängig war, dann musste die Lichtgeschwindigkeit  $c'$  im Rahmen dieses Experimentes - entsprechend dem Grad der Abhängigkeit - stets erhöht sein. Sie musste also formal größer als  $c$  sein:  $c' > c$ .

Durch die besondere Art und Weise, wie deSitter diesen Parameter  $k$  einführte, war es ihm möglich, das gesamte Spektrum physikalisch möglicher Abhängigkeitsgrade interpolieren zu können. Er erreichte dies dadurch, dass er dieses Spektrum durch zwei spezifische Werte, und zwar durch den Wert  $k = 0$  und den Wert  $k = 1$  begrenzt sah.

Fügen wir diese beiden Werte in die parametrisierte Gleichung (4) ein, dann erhalten wir mit  $k = 0$  eine Lösung, in der die Lichtgeschwindigkeit von der Geschwindigkeit der Quelle *vollständig* unabhängig ist, während wir mit  $k = 1$  eine Lösung erhalten, in der die Lichtgeschwindigkeit von der Geschwindigkeit der Quelle *vollständig* abhängig ist. Nachfolgend sind die beiden »Lösungen« dieser Gleichung zu sehen:

$$c' = c \quad (5)$$

$$c' = c + v \quad (6)$$

Dass durch diese beiden »Lösungen« begrenzte Spektrum umfasst mithin alle physikalisch denkbaren Abhängigkeitsgrade, die die Lichtgeschwindigkeit  $c$  von der Geschwindigkeit der Quelle haben kann.

Da die so parametrisierte Gleichung (4) auch zwischen 0 und 1 liegende Werte zuließ, bot sie nach Auffassung von DeSitter die Möglichkeit, experimentell den Grad der Genauigkeit bestimmen zu können, mit der die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit meßbar war.

Geleitet von dieser Auffassung gab er für das gut bekannte Doppelsternsystem  $\beta$  *Aurigae* den experimentell gemessenen Wert von  $k$  mit

$$k < 0.002 \quad (7)$$

an. Aus der Tatsache, dass  $k$  kleiner als zwei Tausendstel war, zog er den Schluss, dass das Beobachtungsmaterial klar zugunsten des Parameterwertes  $k = 0$  und damit klar zugunsten der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit entschieden habe. [13] Dieser Messwert konnte durch spätere Experimente erheblich präzisiert werden. Der heutige Wert von  $k$  wird mit kleiner als zwei Milliardstel

$$|k| < 2 \times 10^{-9} \quad (8)$$

angegeben. [14]

All diese Messungen haben in Physikern die Überzeugung gestärkt, dass Einstein's 2. Postulat zutrifft und dass die Lichtgeschwindigkeit stets denselben Wert hat, unabhängig davon, mit welcher Geschwindigkeit  $v$  sich die emittierende Quelle auf den ruhenden Beobachter zubewegt. Doch diese Überzeugung steht auf tönernen Füßen, denn sie fußt im Kern auf einer Gleichung, die von der Speziellen Relativitätstheorie *in physikalischer Hinsicht* längst als obsolet entlarvt ist.

Wie die parametrisierte Gleichung (4) zeigt, basiert sie im Kern auf Gleichung (2). Das bedeutet, wir beurteilen das deSitter'sche Experiment auf einer kinematischen Grundlage, die durch die Spezielle Relativitätstheorie längst als überholt gelten darf. Daher müssen wir annehmen, dass auch nicht das Galilei'sche Additionstheorem, sondern das relativistische Additionstheorem die eigentlich korrekte kinematische Grundlage ist, um das deSitter'sche Experiment sachgerecht beurteilen zu können.

Beurteilen wir jedoch das DeSitter'sche Experiment auf dieser gültigeren Grundlage, dann zeigt sich, dass das Galilei'sche Theorem, streng genommen, überhaupt nicht sinnvoll auf dieses Experiment <bewegte Lichtquelle - ruhender Beobachter>

anwendbar ist. Tatsächlich besitzt es, wie das relativistische Additionstheorem zeigt, nur in einem einzigen Fall Gültigkeit, und zwar dann, wenn, wie bereits eingangs geschildert, die Lichtquelle ruht – also gerade dann, wenn sie nicht-bewegt ist. In allen, die Bewegung der Lichtquelle betreffenden Fällen  $v > 0$  gilt es jedoch, streng genommen, nicht.

Daher wäre zur sachgerechten Beurteilung und Auswertung des deSitter'schen Experimentes eigentlich das relativistische Theorem und die mit ihr verknüpfte Gleichung (1) anzuwenden, was aber weder 1913 noch später der Fall sein sollte. Tatsächlich wird auch heute noch in Protokollen über moderne Messungen auf die historisch längst obsolete Gleichung (2) Bezug genommen. [15]

Obwohl Gleichung (4) im Kern auf der physikalisch längst als obsolet erwiesenen Galilei'schen Gleichung (2) basiert, so ist die mit ihr ursprünglich verknüpfte Zweckbestimmung bis heute tradiert worden. So wird auch heute noch die Genauigkeit, mit der die Unabhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit von der Geschwindigkeit der Quelle messbar ist, stets unter Bezugnahme auf Gleichung (4) angegeben.

Angesichts der besonderen Bedeutung, die dem 2. Postulat innerhalb der modernen Physik zukommt, verwundert es, dass zeitgenössische Physiker diesen eklatanten ‚Verfahrensfehler‘ übersehen haben, obwohl er spätestens in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts offenkundig war, denn zu dieser Zeit hegte kein Physiker mehr ernste Zweifel an der physikalischen Gültigkeit der Speziellen Relativitätstheorie und den von ihr begründeten Theoremen.

Warum also verwendeten Physiker eine Gleichung, die, streng genommen, gar nicht sinnvoll auf das deSitter'sche Experiment anwendbar war? Tatsächlich bietet nur Gleichung (2) die Möglichkeit, etwas *empirisch unterscheiden* zu können, was die relativistische Gleichung (in ihrer parametrisierten Form) als *empirisch unentscheidbar* ausweist.

## Galilei'sische Kinematik versus Relativistische Kinematik

Obwohl der Parameter  $k$  von deSitter zu dem *alleinigen* Zweck eingeführt worden ist, um experimentell die Genauigkeit bestimmen zu können, mit der Unabhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit von der Bewegung der Quelle behauptet werden konnte, so beinhaltet er *mit Blick auf die Lichtgeschwindigkeit* die Möglichkeit, sehr dezidiert zwischen dem Teilchenaspekt und dem Wellenaspekt unterscheiden zu können; eine Möglichkeit, die bislang nicht ausreichend zur Kenntnis genommen wurde, die aber, wie ich in diesem Kapitel zeigen möchte, dramatische Auswirkungen auf unser Verständnis des 2. Postulates der Speziellen Relativitätstheorie hat.

Dass der Parameter  $k$  eben diese gleichsam quantentheoretische Unterscheidungsmöglichkeit bietet, lässt sich anhand von Gleichung (4) umstandslos nachvollziehen. Setzen wir in sie die Parameterwerte  $k = 0$  und  $k = 1$  ein, dann erhalten wir »zwei Lösungen«, die der klassischen Wellentheorie und der klassischen Teilchentheorie entsprechen.

So führt Gleichung (4) mit dem Wert  $k = 0$  unmittelbar auf die Lösung:  $c = c'$ . Diese Gleichung besagt, dass die Lichtgeschwindigkeit, wie von der klassischen Wellentheorie (nach H. Lorentz) behauptet, unabhängig von der Geschwindigkeit der Quelle ist.

Setzen wir in Gleichung (4) hingegen den Wert  $k = 1$  ein, dann führt dies auf die nachfolgende Lösung:  $c' = c + v$  - eine Lösung, die dem klassischen Teilchenbild des Lichtes entspricht. Sie beinhaltet als solches die Behauptung, dass die Geschwindigkeit des Lichtes von der Geschwindigkeit der Lichtquelle  $v$  *vollständig abhängig ist*, da die Zusatzgeschwindigkeit, die der Lichtgeschwindigkeit durch die bewegte Quelle erteilt wird, *exakt der Geschwindigkeit der Lichtquelle  $v$  entspricht*. Diese Beschreibung korrespondiert physikalisch mit dem Bewegungsverhalten eines Projektils, welches von einem bewegten Bezugssystem, wie z.B. einem fahrenden Zug, abgefeuert worden ist.

Was diese beiden Lösungen indessen auszeichnet, ist die durch sie offerierte Möglichkeit, im Hinblick auf die Lichtgeschwindigkeit zwischen ihrem

teilchenartigen und ihrem wellenartigen Aspekt *empirisch unterscheiden* zu können, und zwar *eindeutig*.

In der nachfolgenden Tabelle sind diese beiden »Lösungen« der Gleichung (4) inklusive ihrer empirischen Konsequenzen noch einmal tabellarisch zusammengefaßt:

<b>»Prinzip der Dualen Konstanz der Lichtgeschwindigkeit«</b>		
Aspekt	Welle	Teilchen
Quellenabhängigkeit	$k = 0$	$k = 1$
<b>Newton'sches Relativitätsprinzip</b>		
Kinemat. Grundgleichung	$c' = c + kv$	
Lösungen der Gleichung	$c' = c$	$c' = c + v$
Physikalischer Inhalt	Unabhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit von Quellengeschwindigkeit $v$	Abhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit von Quellengeschwindigkeit $v$
Empirische Vorhersage	$c$ ist konstant.	$c$ ist <b>nicht</b> konstant.

Tabelle Nr. 1 – Das Newton'sche Relativitätsprinzip

Wie diese Tabelle zeigt, sind im Rahmen des Galilei'schen Additionstheorems der Geschwindigkeiten beide »Lösungen« der parametrisierten Gleichung (4) in allen wissenschaftlich relevanten Kategorien (*i.e. formal, physikalisch & empirisch*) unterscheidbar.

Parametrisiert man jedoch das relativistische Additionstheorem der Geschwindigkeiten in derselben Weise wie das Galilei'sche Theorem, indem man dem Quellengeschwindigkeitsterm  $v$  den Parameter  $k$  hinzufügt, dann zeigt sich, dass ihre beiden Lösungen *zwar formal und physikalisch, nicht jedoch empirisch unterscheidbar* sind, da sie beide zu ein- und demselben empirischen Ergebnis führen: der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit!

$$\mathbf{c}' = \frac{c + kv}{1 + \frac{ckv}{c^2}} = \mathbf{c} \quad (9)$$

$$\mathbf{c}' = \frac{c + 0v}{1 + \frac{c0v}{c^2}} = c \quad (10)$$

$$\mathbf{c}' = \frac{c + v}{1 + \frac{cv}{c^2}} = \mathbf{c} \quad (11)$$

Wie die beiden Lösungen der parametrisierten Gleichung (9) zeigen, können wir mit Hilfe des deSitter'schen Experimentes nicht entscheiden, ob die Lichtgeschwindigkeit von der Geschwindigkeit der Quelle abhängig ist oder nicht, da sich diese für die Spezielle Relativitätstheorie so zentrale Aussage in ihrem kinematischen Kontext als *empirisch unentscheidbar* erweist. In der nachfolgenden Tabelle Nr. 2 ist auch dieses Ergebnis in Analogie zur Tabelle Nr. 1 noch einmal zusammengefaßt.

<b>»Prinzip der Dualen Konstanz der Lichtgeschwindigkeit«</b>		
Aspekt	Welle	Teilchen
Quellenabhängigkeit	k = 0	k = 1
<b>Spezielles Relativitätsprinzip</b>		
Kinemat. Grundgleichung	$\mathbf{c}' = \frac{c + kv}{1 + \frac{ckv}{c^2}} = \mathbf{c}$	
Lösungen der Gleichung	$\mathbf{c}' = \mathbf{c}$	$\mathbf{c}' = \frac{c + v}{1 + \frac{cv}{c^2}} = \mathbf{c}$
Physikalischer Inhalt	Unabhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit von Quellengeschwindigkeit $v$	Abhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit von Quellengeschwindigkeit $v$
Empirische Vorhersage	<b>c ist konstant.</b>	<b>c ist konstant.</b>

Tabelle Nr. 2 - Das Spezielle Relativitätsprinzip

Angesichts dieses überraschenden Ergebnisses stellt sich daher Frage: Wenn die Spezielle Relativitätstheorie *a priori* die Möglichkeit ausschließt, die von deSitter angeführten Daten *in unzweideutiger Weise* als Beweis für die Gültigkeit des 2. Postulates zu interpretieren, was ist dann die Bedeutung von Gleichung (4)?

Mit ihr ist, wie ich behaupten möchte, genau das gemessen worden, was deSitter im Jahre 1913 auch vorgab, gemessen zu haben, nämlich den Grad an Genauigkeit angeben zu können, mit der sich die *Konstanz der Lichtgeschwindigkeit* anhand der ihm zur Verfügung stehenden Daten experimentell bestätigen ließ. Es ist bezeichnend, dass sein Aufsatz den Titel trägt: *Über die Genauigkeit, innerhalb welcher die Unabhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit von der Bewegung der Quelle behauptet werden kann*, während *im* Aufsatz selbst lediglich die Rede davon ist, den Grad an Genauigkeit angeben zu wollen, mit der die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit experimentell messbar ist. DeSitter betont in diesem Aufsatz ausdrücklich, dass man die Konstanz irgendeiner Größe ja experimentell niemals behaupten könne, sondern nur die Konstanz innerhalb gewisser Grenzen – und tatsächlich ist auch nicht mehr als dies gemessen worden, zumindest dann, wenn wir das relativistische Additionstheorem der Geschwindigkeiten (i.e. Gleichung (9)) in seiner parametrisierten Form zugrundelegen. [16]

Was jedoch *nicht* gemessen worden ist, ist der Grad der Genauigkeit, mit der die Unabhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit von der Bewegung der Quelle behauptet werden kann. In der modernen Physik ist man bislang von der stillschweigenden Voraussetzung ausgegangen, dass die *Konstanz der Lichtgeschwindigkeit* und ihre *Unabhängigkeit von der Geschwindigkeit der Quelle* lediglich zwei Seiten ein- und derselben Münze seien. Man ist daher ganz selbstverständlich zu der Schlussfolgerung gelangt, dass mit dem experimentellen Nachweis der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit, wie er mit dem deSitter'schen Experiment aus dem Jahre 1913 erstmals gegeben war, auch zugleich der Nachweis für die Gültigkeit des 2. Postulates erbracht worden sei – eine Schlussfolgerung, deren Geltung sich jedoch im Rahmen der Speziellen Relativitätstheorie, wie der in ihr implizit steckende teilchenartige Aspekt der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit nahelegt, als *empirisch unentscheidbar* erweist.



Angesichts dieses überraschenden Ergebnisses stellt sich beinahe zwangsläufig die Frage: Warum ist diese Zweideutigkeit im Herzen der Speziellen Relativitätstheorie bis heute unbemerkt geblieben? Hierfür gibt es mehrere Gründe – und jeder dieser Gründe ist hinreichend, um den Blick auf die Wahrnehmung dieser fundamentalen Ambiguität zu verstellen oder doch wenigstens zu verschleiern.

## **Über das verborgene quantentheoretische Herz der Relativität**

Wie in allen anderen Lebensbereichen so gilt auch in der Wissenschaft die Regel: Erfolg heiligt die Mittel. Die Spezielle Relativitätstheorie ist unbestreitbar eine der erfolgreichsten Theorien der modernen Physik. Da sie auf Prinzipien basiert und die auf diesen Prinzipien gegründete Theorie experimentell bis heute allen Prüfungen standgehalten hat, genießt sie den Status einer *Fundamentaltheorie* – einer Theorie, die nicht mehr den Forderungen anderer Theorien, wie z.B. der Quantentheorie, zu genügen hat, sondern die selbst Forderungen in diese Richtung ausspricht. Aufgrund dieses Umstandes sind daher auch gewisse, in der Speziellen Relativitätstheorie lediglich implizit angelegte quantentheoretische Aspekte bis heute niemals *systematisch* und *gezielt* herausgearbeitet worden.

Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit *via relativistische Kinematik* auf eine teilchenartige Weise deuten zu können, ist, wie ich behaupten möchte, ein solcher bislang nicht gesehener quantentheoretischer Theoriestrang. Wie Stachel's Kommentar zeigt, ist zwar die Existenz dieses Theoriestranges registriert worden, nicht aber die in ihm liegende Bedeutung.

Diese Bedeutung tritt in der Tat nur dann in aller Deutlichkeit hervor, wenn man die Spezielle Relativitätstheorie systematisch und gezielt mit „quantentheoretischen“ Konzepten, wie z.B. dem *Welle-Teilchen-Dualismus*, konfrontiert. Erst diese Konfrontation bringt es mit sich, innerhalb der Einstein'schen Theorie systematisch und gezielt nach einem »teilchenartigen Äquivalent« zu dem 2. Postulat der Speziellen Relativitätstheorie (i.e. ihrer wellenartigen Deutung der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit) zu fragen.

Obwohl die Wahrnehmung und ‚Entdeckung‘ dieses teilchenartigen Äquivalentes entscheidend von dieser quantentheoretisch orientierten Denkweise abhing, so ist dieses Äquivalent, wie ich an dieser Stelle betonen möchte, nichts, was der Einstein’schen Theorie von außen zugetragen wurde. Dieses Äquivalent ist ein in ihr implizit angelegtes Gegenstück zu dem von ihr explizit ausgewiesenen 2. Postulat. Es verkörpert in dieser Eigenschaft eine Art relativistisches »Schattenprinzip«, dessen Existenz bis heute schlicht unbemerkt geblieben ist. Es gibt nur wenige Hinweise in den zeitgenössischen Quellen, die darauf hinweisen, dass die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit auch im Geiste des Teilchenbildes formulierbar ist. [17] Doch es gibt (meines Wissens) keinen Text, der die damit einhergehende Argumentationslinie systematisch bis ins prinzipielle Zentrum der Speziellen Relativitätstheorie (i.e. bis zu ihrem 2. Postulat) durchgezogen hat.

Ein weiterer Grund, der erheblich dazu beigetragen hat, warum die Existenz dieses relativistischen Schattenprinzips bis heute verborgen geblieben ist, ist Einstein’s eigener entschiedener Widerstand gegen die Quantentheorie, der bis heute nachwirkt.

## **Einstein’s Votum wider die Quantentheorie**

Obwohl Einstein’s Lichtquantenhypothese aus dem Jahre 1905 als die Geburtsstunde des Konzepts des *Welle-Teilchen-Dualismus* gilt, stand er selbst diesem Konzept von Anfang an ablehnend gegenüber. Er hielt es lediglich für das Ergebnis eines unzureichenden Verständnisses der physikalischen Wirklichkeit; eine Auffassung, die ihn in Widerspruch mit der später von der Quantentheorie behaupteten Position bringen sollte, die in diesem Dualismus einen *prinzipiellen* Zug der Natur sah.[18]

Diese Auffassung bestimmte von Anfang an Einstein’s Denkweise als theoretischer Physiker. Es ist, wie der Physiker *Abraham Pais* betont, ein auffälliger Zug von Einsteins frühen wissenschaftlichen Schriften, dass er die Relativitätstheorie selbst dann von der Quantentheorie getrennt hielt, wenn es natürlich gewesen wäre,

zwischen beiden einen Zusammenhang herzustellen. Diese Trennung sei bereits in seiner allerersten Arbeit über die spezielle Relativitätstheorie offenkundig. [19]

Obwohl Einstein entdeckt hatte, dass sich die Energie und Frequenz eines Lichtkomplexes nach demselben Gesetz wie der Bewegungszustand des Beobachters änderte, nutzte er diese offensichtliche Gelegenheit nicht, um auf seine Arbeit über die Lichtquanten hinzuweisen, die er nur wenige Monate zuvor vollendet hatte. Da sich in dieser Arbeit die von Planck formulierte Beziehung zwischen Energie und Frequenz des Lichtquants ( $E = h\nu$ ) findet, sei es, wie Pais betont, auffallend, dass Einstein die Ähnlichkeit zwischen den Transformationseigenschaften von  $E$  und  $\nu$  bemerkenswert findet, ohne sich jedoch auf seine eigene Quantenbeziehung zwischen Energie und Frequenz des Lichtes zu beziehen, die ihn, so Pais, offensichtlich beschäftigt haben muss. So bemerkenswert dieses Schweigen Einsteins sei, so unerklärlich sei es, wie Pais weiter ausführt, freilich nicht. Einstein sei sein ganzes Leben lang der Überzeugung gewesen, dass die Quantentheorie lediglich Vorläufer zu einer wahrhaft fundamentalen Theorie sei, während er in der Relativitätstheorie den Königsweg zu einer solchen Theorie sah. Diese Überzeugung gründete auf der Annahme, dass es sich im Gegensatz zur Quantentheorie bei den der Speziellen Relativitätstheorie zugrundeliegenden Postulaten um klar definierte, fundamentale Prinzipien der Natur handelte. [20]

Diese Überzeugung prägte auch Einstein's Auffassung von dem Welle-Teilchen-Dualismus. Er war der Auffassung, dass es sich bei dem Wellen- und Teilchencharakter des Lichtes lediglich um zwei Seiten *ein- und derselben* Sache handelte und dass der dem Licht durch die Quantentheorie zugeschriebene Dualismus eines Tages – im Zuge der weiteren Entwicklung der Physik – aufgelöst würde. Diese Auffassung vertrat er bereits 1909 in Salzburg, als er in seinem Vortrag über das Wesen und die Konstitution der Strahlung die These vertrat, dass die nächste Phase der Entwicklung der theoretischen Physik eine Theorie des Lichtes bringen würde, welche eine Art von »Verschmelzung« von Wellentheorie und Teilchentheorie sei – eine Aufgabe, die, wie der vorliegende Aufsatz zeigt, seine Spezielle Relativitätstheorie tatsächlich leistet, freilich um den Preis, dass sich ihr 2.

Postulat als empirisch unentscheidbar erweist, was auf eine ihr innewohnende Unvollständigkeit hinweist. [21]

Es gibt jedoch auch theorieimmanente Gründe, die bezüglich dieses Schattenprinzips als Blickfang gewirkt haben. Tatsächlich vermittelt die Spezielle Relativitätstheorie sehr stark den Eindruck, dass die Beziehung zwischen dem relativistischen Additionstheorem und dem 2. Postulat konsistent ist. Wenn man sich in ihrem Theoriekontext bewegt, dann ist es kaum möglich, zu einer anderen als dieser Schlussfolgerung zu gelangen. Die Beziehung besticht durch ihre Geradlinigkeit und innere Schlüssigkeit. Dass diese Beziehung jedoch *in realiter* inkonsistent ist, dieses Erkenntnis tritt in der Tat erst dann zu Tage, wenn man sie mit dem hier postulierten quantentheoretischen Prinzip der Dualen Konstanz der Lichtgeschwindigkeit konfrontiert.

### **Ein kinematisches »Quantenschema«**

In der modernen Physik wird, wie das Lehrbuch „Klassische Elektrodynamik“ von John David Jackson zeigt, das relativistische Additionstheorem der Geschwindigkeit, insbesondere in Form der Gleichung (1), als „ein explizites Beispiel für das zweite Einstein'sche Postulat“ gesehen. [22] Die Tatsache, dass die Lichtgeschwindigkeit bei allen Geschwindigkeiten der Lichtquelle  $v$  formal stets zu ein- und demselben Ergebnis führt, nämlich zu  $c' = c$ , wird innerhalb der modernen Physik ausdrücklich als ein Beweis gewertet, dass das relativistische Additionstheorem der Geschwindigkeiten und ihr 2. Postulat eine *konsistente* Beziehung zueinander aufweisen.

Parametrisiert man jedoch die relativistische Gleichung (1) in derselben Weise, wie es in und mit der Galilei'schen Gleichung (2) geschehen ist, dann zeigt sich, dass die vorgehen. Beziehung keineswegs konsistent ist. Augenscheinlich wird dies vor allem dann, wenn wir die beiden Lösungen der Galilei'schen Kinematik und der relativistischen Kinematik einander vis-à-vis gegenüberstellen.

»Prinzip der Dualen Konstanz der Lichtgeschwindigkeit«		
Aspekt	Welle	Teilchen
Quellenabhängigkeit	$k = 0$	$k = 1$
<b>Galilei'sche Kinematik versus Relativistische Kinematik</b>		
<b>Galilei'sche Gleichung</b>	$c' = c + kv$	
Lösungen der Gleichung	$c' = c$	$c' = c + v$
<b>Relativistische Gleichung</b>	$c' = \frac{c + kv}{1 + \frac{ckv}{c^2}} = c$	
Lösungen der Gleichung	$c' = c$	$c' = \frac{c + v}{1 + \frac{cv}{c^2}} = c$
Physikalischer Inhalt	Unabhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit von Quellengeschwindigkeit $v$	Abhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit von Quellengeschwindigkeit $v$

Tabelle Nr. 3 – Kinematiken im Vergleich

Wie diese Tabelle zu erkennen gibt, hat Gleichung (1) in diesem dem Welle-Teilchen-Dualismus folgenden kinematischen Schema einen vollkommen anderen Platz inne als den, der ihr heute im Rahmen der Speziellen Relativitätstheorie zugeschrieben wird. Aufgrund dieser veränderten Platzzuweisung ist auch ihre physikalische Bedeutung eine andere.

Auf ihrem neuen Platz beschreibt Gleichung (1), in welcher formalen Weise die Geschwindigkeit von Lichtteilchen von der Geschwindigkeit der emittierenden Quelle  $v$  abhängig ist – eine Beschreibung, die mit dem 2. Postulat ganz offenkundig

unverträglich ist. In der nachfolgenden Tabelle Nr. 4 ist diese veränderte Platzzuweisung noch einmal anschaulich eingefangen.

<b>Prinzip der Dualen Konstanz der Lichtgeschwindigkeit</b>	
Welle $k = 0$	Teilchen $k = 1$
<b>Spezielle Relativitätstheorie</b>	
$c' = \frac{c + kv}{1 + \frac{kv}{c^2}} = c$	
$c' = c$	$c' = \frac{c + v}{1 + \frac{cv}{c^2}} = c$
Unabhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit von Quellengeschwindigkeit $v$	Abhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit von Quellengeschwindigkeit $v$

2. Postulat:  
Korrekte  
*duale*  
Lesart

2. Postulat:  
Fehlerhafte  
*relativist.*  
Lesart

Tabelle Nr. 4 – Fehlerhafte Lesart des 2. Postulates

Doch müssen wir diese so offenkundige Unverträglichkeit ernstnehmen? Ist das dem Teilchenaspekt der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit geltende Schattenprinzip, welches diese Inkonsistenz nach sich zieht, überhaupt in physikalischer Hinsicht begründbar?

Der vorliegende Aufsatz beruht auf der Annahme, dass dies in der Tat der Fall ist. Auf den ersten Blick scheint dieses Schattenprinzip jedoch den gegenteiligen Eindruck zu vermitteln, denn es widerspricht in hohem Maße unserer physikalischen Anschauung von sich bewegenden Teilchen: *Wie ist es möglich, dass ein ruhender Beobachter für Lichtteilchen stets dieselbe Geschwindigkeit  $c$  misst, unabhängig davon, mit welcher Geschwindigkeit sich die teilchenemittierende Quelle auf ihn zubewegt?*

Spätestens seit Einführung der Speziellen Relativitätstheorie wissen wir jedoch, dass ein solcher Widerspruch mit der physikalischen Anschauung kein Argument ist, wodurch ein Prinzip *a priori* als physikalisch unbegründet resp. unbegründbar konstituiert ist. So haben sich Physiker wieder und wieder gefragt: *Wie ist es möglich, dass ein Beobachter für das von einer als ruhend angenommenen Lichtquelle emittierte Licht stets dieselbe Geschwindigkeit  $c$  mißt, unabhängig davon, mit welcher Geschwindigkeit er sich auf diese Quelle zubewegt?*

Einstein hat uns gezeigt, dass sich ungeachtet dieses Bruches mit der physikalischen Anschauung sehr wohl eine außerordentlich erfolgreiche Theorie begründen lässt. Es ist dann auch genau dieser Erfolg der Speziellen Relativitätstheorie, der die physikalische Geltung des vorgehen. Schattenprinzips legitimiert. Obwohl Einstein's Theorie das Newton'sche Bild von Raum und Zeit grundlegend verändert hat, so gilt dies jedoch nicht für das Newton'sche Relativitätsprinzip. So hat die von Einstein in seiner 1905b-Arbeit konstatierte Unverträglichkeit zwischen der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit und dem Relativitätsprinzip ihren Ursprung nicht in dem Relativitätsprinzip *selbst*, sondern in der mit ihm verknüpften Galilei-Transformation. Substituiert man diese Transformation durch die Lorentz-Transformation, dann geht das Newton'sche Relativitätsprinzip bruchlos in das Spezielle Relativitätsprinzip über. Das bedeutet, dass sich das Galilei'sche Additionstheorem von dem relativistischen Additionstheorem lediglich *in einem Punkt* unterscheidet, und zwar hinsichtlich der Geschwindigkeit des Lichtes. Würde sich das Licht mit unendlicher (und nicht mit endlicher) Geschwindigkeit ausbreiten, dann könnten wir statt der relativistischen Gleichung (1) ebensogut die Galilei'sche Gleichung (2) verwenden. Das bedeutet, dass die mit diesen beiden Prinzipien verknüpften Additionstheoreme *physikalisch* auch denselben Inhalt haben: Sie besagen, *dass die Lichtgeschwindigkeit von der Geschwindigkeit der Quelle abhängig ist.* Was sie voneinander unterscheidet, ist lediglich der diesen Inhalt beschreibende Formalismus.

Wie diese Überlegungen zeigen, ist das Schattenprinzip durchaus physikalisch begründbar, was zur Folge hat, dass wir auch die damit einhergehende Inkonsistenz ernstzunehmen haben.

Während die Aufdeckung dieser Inkonsistenz in dem vorgegen. dualen Schema, wie es in Tabelle Nr. 4 dokumentiert ist, als eine beinahe triviale Erkenntnis erscheint, so ist sie bis auf den heutigen Tag verborgen geblieben. In der modernen Physik ist man nach wie vor fast kollektiv der Überzeugung, mit Gleichung (1) das 2. Postulat der Speziellen Relativitätstheorie auf eine kinematisch zutreffende Weise gedeutet zu haben.

Angesichts der inneren Widersprüchlichkeit dieser Deutung, drängt sich unvermeidlich die Frage auf: Warum haben moderne Physiker - ungeachtet dieses schwerwiegenden erkenntnistheoretischen Defektes - in Gleichung (1) und nicht in Gleichung  $c' = c$  die zutreffende formale Beschreibung des 2. Postulates gesehen?

Wie diese »wellenspezifische« Gleichung  $c' = c$  uns schwer erkennen lässt, unterscheidet sie sich von Gleichung (1) *formal* durch die radikale Abwesenheit des Geschwindigkeitsterms  $v$ . Diese formale Eigentümlichkeit der wellenspezifischen Gleichung ist im Rahmen der prärelativistischen Physik nichts ungewöhnliches und steht *physikalisch* in vollem Einklang mit dem Bild einer sich im Äther ausbreitenden Lichtwelle. Ist die Lichtgeschwindigkeit *vollständig* von den Eigenschaften des Äthers bestimmt, dann erweist sich die Quellengeschwindigkeit  $v$  per se als eine in diesem theoretischen Kontext physikalisch völlig irrelevante Größe.

Im Rahmen der Speziellen Relativitätstheorie ist diese Erklärung jedoch nicht möglich, da mit dieser Theorie der Äther eliminiert wurde. Wir sind daher mit der Erkenntnislage konfrontiert, dass die Unabhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit von der Quellengeschwindigkeit  $v$  mit diesem Akt der Eliminierung zugleich ihre physikalisch angestammte Grundlage verliert, was zur Folge hat, dass wir den in dieser Aussage explizit ausgewiesenen Geschwindigkeitsterm  $v$  nicht mehr mit Verweis auf die Existenz des Äthers für irrelevant erklären können. Das bedeutet, dass wir eines wie auch immer gearteten Geschwindigkeitsbegriffes bedürfen, um diesem durch Einstein »freigesetzten« Term einen physikalisch verstehbaren Sinn geben zu können. Eben diese Forderung ist es, die innerhalb der Speziellen Relativitätstheorie die Anwendung von Gleichung (1) geradezu erzwingt, denn von



den beiden relativistischen Lösungen ist allein Gleichung (1) diejenige, die diese Forderung erfüllt.

Die Tatsache, *dass* sie diese Forderung erfüllt, ist in der modernen Physik als Beleg gewürdigt worden, dass das 2. Postulat und die relativistische Kinematik eine in sich konsistente Beziehung aufweisen – eine Schlussfolgerung, die in dem von der Speziellen Relativitätstheorie aufgespannten Kontext so unmittelbar einleuchtend und überzeugend wirkt, dass die Inkonsistenz dieser speziellen Beziehung bis heute unbemerkt geblieben ist.

Der Umstand, dass diese die Lichtgeschwindigkeit betreffende Inkonsistenz im Rahmen der relativistischen Kinematik empirisch unauflösbar, weil unentscheidbar ist, deutet daraufhin, dass die Spezielle Relativitätstheorie uns *mit Blick auf die Fundamentalkonstante  $c$*  ein nur unvollständiges und womöglich irreführendes Bild liefert. Worin diese Irreführung besteht, ist indessen nicht mehr Gegenstand des vorliegenden Aufsatzes.

## Referenzen:

[ 1] Einstein, Albert; *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*, 1905

[ 2] Hoffmann, Banesh; *Einsteins Ideen*, 1992, S. 116

[ 3] Einstein, Albert: *Relativität und Gravitation. Erwiderung auf eine Bemerkung von M. Abraham*. In: *Annalen der Physik*. 38, 1912, S. 1059–1064

[ 4] Einstein, Albert; *Über die vom Relativitätsprinzip geforderte Trägheit der Energie*. *Annalen der Physik* 23 (1907): 371–384

[ 5] Stachel, John; *Einstein's Light-Quantum Hypothesis, or Why Didn't Einstein Propose a Quantum Gas a Decade-and-a-Half Earlier?* In: *Einstein – The formative Years (1879 – 1909)*, 2000, p. 240

[ 6] Einstein, Albert; *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*, 1905

[ 7] Stachel, John; *ib.* p. 240

- [ 8] Stachel, John; EINSTEIN and MICHELSON - The Context of Discovery and the Context of Justification, *Astron. Nachr.*, 1982, 303: 47–53
- [ 9] Einstein, Albert; *Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen*, *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik*, 4, 1907, S. 416
- [10] DeSitter, Willem; *Ein astronomischer Beweis für die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit*, 1913, *Physikalische Zeitschrift*, 14: 429
- [11] Freundlich, Erwin; *Zur Frage der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit*. *Physikalische Zeitschrift* 14 (1913), S. 835–38
- [12] DeSitter, Willem; *Über die Genauigkeit, innerhalb welcher die Unabhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit von der Bewegung der Quelle behauptet werden kann*, 1913, *Physikalische Zeitschrift*, 14: 1267
- [13] DeSitter; Willem; *ibd.*
- [14] Giulini, Domenico; *Spezielle Relativitätstheorie*, Frankfurt a. Main 2004, S. 106
- [15] Alväger, T.; Farley, F. J. M.; Kjellman, J.; Wallin, L.; *Test of the second postulate of special relativity in the GeV region*, *Physics Letters*, vol. 12, Issue 3, pp. 260-262
- [16] DeSitter, Willem; siehe [12]
- [17] Dombrowski, Paul; *Wege in Euklidischen Ebenen: Kinematik Der Speziellen Relativitätstheorie*, 1999, S. 207
- [18] Fölsing, Alrecht; *Albert Einstein – Eine Biographie*, 1993, S. 656
- [19] Pais, Abraham; *Raffiniert ist der Herrgott...*; 2009, S. 144
- [20] Pais; Abraham; *ibd.* S. 145
- [21] Einstein; Albert: *Über die Entwicklung unserer Anschauungen über das Wesen und die Konstitution der Strahlung*. In: *Physikalische Zeitschrift*. 10, Nr. 22, 1909, S. 817–825
- [22] Jackson, John D.; *Klassische Elektrodynamik*, S. 606