

# Licht und Masse – Absolutheit und Relativität als intrinsisch zusammengehörende Momente des kinematischen Relativitätsprinzips. Ein Beitrag zu einer Philosophie der Relativitätstheorie

Dieter Wandschneider

bibliografische  
Angaben hinten

## Zusammenfassung

Ausgangspunkt ist die Frage, was Masse ist, wodurch sie insbesondere befähigt ist, *Dauer* zu konstituieren und deshalb – im Sinn des kinematischen Relativitätsprinzips – ebenso als bewegt wie als ruhend betrachtet werden kann. In einem *Gedankenexperiment* wird diese Frage, in Umkehrung der Perspektive, hier nicht von der Masse selbst, sondern von einer *stehenden Lichtwelle* her angegangen. In diesem Modell lassen sich *masse-analoge Strukturen* rekonstruieren, die in *relativer Bewegung* sein können. Die (empirisch bekannte) Unabhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit vom Bezugssystem ist dabei nicht vorausgesetzt. Doch kann gezeigt werden, dass die Lichtgeschwindigkeit *Grenzgeschwindigkeit* solcher relativer Bewegungen ist, dass dies für alle durch masse-analoge Strukturen konstituierte, relativ zueinander gleichförmig bewegten Bezugssysteme gilt und dass die Lichtgeschwindigkeit selbst in allen diesen Systemen *gleich* ist. Die Absolutheit der Lichtgeschwindigkeit und die Relativität der Massebewegungen erweisen sich so als zwar differente, aber intrinsisch zusammengehörende Momente des kinematischen Relativitätsprinzips: ein Beitrag zu einer *Philosophie der Relativitätstheorie*. – Die mathematischen Zusammenhänge werden im Anhang ausführlicher dargelegt.

\*\*\*

1. Einleitung
2. Die Bewegung von Masse und die Lichtbewegung
3. Ein Gedankenexperiment: Stehende Lichtwelle
4. Masse-analoge Bewegungen
5. Fazit
6. Anhang: Kurze mathematische Darstellung des diskutierten Modells der stehenden Welle

## 1. Einleitung

Nicht nur die Konsequenzen der relativistischen Wende von 1905 für Grundbestimmungen der Physik – die Relativität von Raum, Zeit, Masse etc. – müssen auf das klassische Physikverständnis revolutionär gewirkt haben. Als nicht weniger beirrend muss auch das empfunden worden sein, was überhaupt erst zur Entwicklung der Relativitätstheorie geführt hat, nämlich die *Nicht-Relativität* der Lichtbewegung – was üblicherweise als ‚Konstanz der Lichtgeschwindigkeit‘ ausgedrückt zu werden pflegt. Dies ist in der Tat paradox: Dem klassischen Relativitätsbegriff der Bewegung, wonach Bewegung stets relative Bewegung ist, steht in der ‚Relativitätstheorie‘ die Aussage entgegen, dass die Lichtbewegung *Absolutheitscharakter* besitzt. ‚Relativ‘ bedeutet dabei ‚abhängig vom jeweiligen Bezugssystem‘ und ‚absolut‘ dementsprechend ‚unabhängig vom Bezugssystem‘. Dieser merkwürdige Tatbestand einer absoluten Lichtgeschwindigkeit zeigt sich schon in der Maxwell-Gleichung für die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen im Vakuum, indem die Lichtgeschwindigkeit  $c$  darin als eine *Konstante* und somit bezugssystemunabhängige Größe auftritt, während eine Geschwindigkeit nach klassischer Auffassung geradezu der Prototyp einer *relativen* Größe ist. Diese unklare Situation war für Einstein – ganz unabhängig vom negativen Ausgang des Michelson-Morley-Experiments – eines der zentralen Motive für die Entwicklung der speziellen Relativitätstheorie, wobei Einsteins große Leistung nicht zuletzt darin bestand, die Relativität ‚normaler‘ Bewegung und die Absolutheit der Lichtbewegung als mathematisch vereinbar zu erweisen. Naturphilosophisch bleibt der Absolutheitscharakter der Lichtbewegung freilich ein klärungsbedürftiger Tatbestand.

Im Folgenden möchte ich zunächst einige allgemeine Überlegungen zum Bewegungsbegriff entwickeln und in diesem Zusammenhang dann ein Gedankenexperiment diskutieren.

## 2. Die Bewegung von Masse und die Lichtbewegung

Anknüpfen möchte ich hier an eine Argumentation, die ich im Anschluss an Hegels Erörterung des Bewegungsbegriffs entwickelt habe<sup>1</sup>: Zur *Logik* von Bewegung gehört danach, dass es etwas geben muss, auf das Bewegung bezogen und das solchermaßen als *ruhend* bestimmt ist. ‚Ruhe‘ bedeutet aber, dass sich in der Bewegung etwas identisch erhält, d.h. Ruhe ist ihrerseits von vornherein auf Bewegung bezogen. Diese *Einheit* von Ruhe und Bewegung, die sich Hegel

---

<sup>1</sup> Wandschneider, D. (1982) Raum, Zeit, Relativität. Grundbestimmungen der Physik in der Perspektive der Hegelschen Naturphilosophie. Frankfurt/M. 1982; Wandschneider, D. (1986) Relative und absolute Bewegung in der Relativitätstheorie und in der Deutung Hegels, in: Horstmann, R.-P./Petry, M.J. (ed. 1986) Hegels Philosophie der Natur. Stuttgart 1986.

zufolge aus der Logik des Bewegungsbegriffs ergibt, soll empirisch realisiert sein in der Masse eines Körpers: „Die Masse ist die Einheit der Momente der Ruhe und Bewegung; beide sind als aufgehoben in ihr, oder sie ist gleichgültig gegen beides, ebenso wohl der Bewegung als der Ruhe fähig“ (9.65 Zus.)<sup>2</sup>. Dies wird von Hegel weiter mit der Eigenschaft der *Trägheit* in Verbindung gebracht (ebd.); aber im gegenwärtigen Zusammenhang soll nur der kinematische Aspekt betrachtet werden: Als ‚gleichgültig‘ gegen Ruhe und Bewegung kann eine Masse ebenso als ruhend wie als bewegt betrachtet werden, und genau das ist der Inhalt des klassischen *Relativitätsprinzips der Bewegung*.

Wesentlich ist danach dreierlei: (1) Das Relativitätsprinzip der Bewegung besagt so nicht einfachhin, dass Bewegung stets relative Bewegung sei – in dieser Form wäre es im Blick auf die Lichtbewegung sogar empirisch falsch. Es enthält vielmehr die Aussage, dass eine bewegte *Masse* mit gleichem Recht als ruhend betrachtet werden kann und umgekehrt eine ruhende als bewegt. Das kinematische Relativitätsprinzip formuliert somit recht verstanden die Relativität der *Massebewegung*. Also: Bewegung kann es stets nur relativ zu einer ruhenden Bezugsinstanz geben, aber das *Relativitätsprinzip* der Bewegung besagt darüber hinaus, dass die Relation von Ruhe und Bewegung *symmetrisch* ist, sofern es sich um die Bewegungsrelation von *Massen* handelt. Damit ist, anders gesagt, die *kinematische Gleichwertigkeit aller Massen* ausgedrückt.

(2) Entscheidend dafür ist nun offenbar, dass die Masse stets auch als *ruhend* betrachtet werden kann. Die im Relativitätsprinzip der Bewegung formulierte kinematische Gleichwertigkeit aller Massen beruht somit wesentlich auf der *Fähigkeit der Masse zu ‚ruhen‘* und solchermaßen mögliche Bezugsinstanz von Bewegung zu sein. *Wodurch* die Masse zur Ruhe befähigt ist, scheint mir im Übrigen eine in der Physik bis heute offene Frage zu sein<sup>3</sup>.

(3) Wenn das kinematische Relativitätsprinzip besagt, dass Massebewegung mit relativer Bewegung äquivalent ist, dann ist damit auch impliziert, dass die Bewegung einer *Nicht-Masse* – was immer das sei – eine *nicht-relative* Bewegung

---

<sup>2</sup> Zitationen dieser Art verweisen auf: Hegel-Werkausgabe, ed. E. Moldenhauer und K.M. Michel. Frankfurt/M. 1969 ff, hier Bd. 9, S. 65 Zusatz. Suggestiv ist in diesem Zusammenhang auch das von Hegel verwendete Bild einer rotierenden Kreisfläche: Dies sei eine Bewegung, die zugleich Ruhe einschließt – nämlich im Kreismittelpunkt, der so „der wiederhergestellte Begriff der Dauer, die in sich erloschene Bewegung“ sei; „es ist die *Masse* gesetzt, das Dauernde, das ... die Bewegung als ihre Möglichkeit zeigt“ (9.59 f Zus.); hierzu ausführlich *Wandschneider, D. (1993) The Problem of Mass in Hegel*, in: *Petry, M.J. (1993) Hegel and Newtonianism*. London/Dordrecht/Boston 1993.

<sup>3</sup> Der sogenannte *Higgs-Mechanismus*, mit dem heute das Auftreten nichtverschwindender Ruhmassen von Elementarteilchen erklärt wird, setzt die Existenz eines ‚Higgs-Bosons‘ voraus, das zur Zeit noch hypothetisch ist; vgl. hierzu *Bethge, K./Schrüder, U.E. (1986) Elementarteilchen und ihre Wechselwirkungen*. Darmstadt 1986, 268 ff. Allerdings soll das Higgs-Teilchen selbst schon Ruhmasse besitzen; insofern scheint mir die grundsätzliche Frage, wodurch Ruhmasse konstituiert ist, auch durch die Higgs-Theorie nicht geklärt zu sein.

sein muss. Dies ist eine notwendige, nicht-triviale Konsequenz der angegebenen Deutung des Relativitätsprinzips: Die Möglichkeit einer *nicht-relativen* Bewegung ist danach in der Aussage des Relativitätsprinzips wesentlich *mitenthalten!* Sie steht dieser Auffassung zufolge also nicht mehr im Widerspruch zum Relativitätsprinzip, sondern ist vielmehr ein Implikat desselben.

Was aber ist eine Nicht-Masse? Hegel hat in seiner Naturphilosophie Gründe dafür geltend gemacht, dass es in der Natur etwas Derartiges geben müsse und dieses mit dem *Licht* identifiziert. Darauf soll jetzt nicht weiter eingegangen werden<sup>4</sup>. Empirisch ist es in der Tat so, dass das Licht zwar Energie, aber keine ‚Ruhmasse‘ besitzt. Somit kann es nach dem Gesagten nicht in Ruhe, sondern *nur bewegt* sein. Sicher, Bewegung ist Bewegung nur relativ zu der durch eine Masse realisierten Bezugsinstanz, aber im Hinblick auf das Licht ist wesentlich, dass die Bewegungsrelation in diesem Fall – eben weil das Licht keine Ruhmasse besitzt – nicht mehr umkehrbar ist wie bei der Bewegung von Massen. Das heißt nun aber auch, dass die *Masse* grundsätzlich keinen definierten Bewegungszustand *bezüglich des Lichts* besitzt, und zwar unabhängig davon, welchen Bewegungszustand eine Masse *bezüglich andern Massen* immer haben möge, mit andern Worten: Die kinematische Relation von Masse und Licht ist für alle Massen *identisch*. Infolgedessen kann auch die Lichtbewegung nicht vom Bewegungszustand einer Masse (also relativ zu andern Massen) abhängen, und das bedeutet, dass das Licht in Bezug auf jeden massiven Körper, unabhängig von dessen sonstigem Bewegungszustand, die *gleiche* Geschwindigkeit besitzen muss. Von daher wird verstehbar, dass das Licht, als ‚Nicht-Masse‘, eine nicht-relative, d.h. bezugssystemunabhängige Bewegung ist.

Wäre dies nicht zutreffend, hätte die Lichtgeschwindigkeit also bezüglich relativ zueinander bewegter Bezugsinstanzen unterschiedliche Werte, so könnte das Licht entweder keine Nicht-Masse sein, oder die Lichtausbreitung wäre an ein Medium gebunden (wie zum Beispiel Wasserwellen) – eine Annahme, wie sie etwa dem Michelson-Morley-Experiment zugrunde lag. Beide Möglichkeiten sind empirisch ausgeschlossen worden. Dann aber ist nach der angegebenen präzisierten Deutung des kinematischen Relativitätsprinzips – Massebewegung ist äquivalent mit relativer Bewegung – die Konsequenz unausweichlich, dass die Lichtbewegung nicht-relativen, absoluten Charakter besitzt.

Relative und absolute Bewegung sind damit nicht nur als vereinbar, sondern *gleichermaßen* als Implikat des – in der angegebenen Weise präzisierten – kinematischen Relativitätsprinzips bestimmt. Trotzdem bleiben in diesem Zusammenhang grundsätzliche Fragen offen. Eine der wichtigsten ist sicher die, wodurch eigentlich der dargelegte essenzielle Unterschied von Masse und Licht begründet ist: Was befähigt die Masse, im Unterschied zum Licht, zur Ruhe? Oder – sprachlich eingängiger: Wieso ist durch Masse *Dauer* konstituiert, durch Licht

---

<sup>4</sup> Vgl. hierzu die in Fußnote 1 genannten Arbeiten.

hingegen nicht? Ich möchte im Folgenden anhand eines Gedankenexperiments einige Anmerkungen hierzu machen.

### 3. Ein Gedankenexperiment: Stehende Lichtwelle

Die Rätselhaftigkeit einer nicht-relativen Bewegung beruht nicht zuletzt auch darauf, dass die alltäglich als Bewegung wahrgenommenen Prozesse Massebewegungen und damit relative Bewegungen sind. Eine nicht-relative Bewegung hat in dieser Perspektive etwas Exotisches, Unerklärliches. Zugleich ist das *Factum brutum*, dass durch Masse Dauer konstituiert ist, nicht weniger rätselhaft.

In dem folgendem Gedankenexperiment möchte ich nun einen *Wechsel der Perspektive* versuchen: Statt von der Massebewegung werde ich von der Lichtbewegung ausgehen, um so möglicherweise ein Verständnis dafür zu gewinnen, was eigentlich *Dauer* ist.

Vorausgesetzt seien zwei entgegengesetzt bewegte Lichtwellen, Einfachheit halber in der Form ebener Wellen gleicher Amplitude (die hier außerdem gleich 1 gesetzt ist). Die Superposition zweier solcher entgegelaufender Wellen hat mathematisch die Gestalt<sup>5</sup>:

$$(a) \quad \cos \omega_1 \left( t - \frac{x}{c} \right) + \cos \omega_2 \left( t + \frac{x}{c} \right),$$

mit  $\omega_i = 2\pi\nu_i$ , den Frequenzen  $\nu_i$  und der Lichtgeschwindigkeit  $c$ .  $x, t$  sind die Raum- und Zeitkoordinaten. Die Superposition beider Wellen ergibt für gleiche Frequenzen  $\omega_1 = \omega_2$  bekanntlich eine sogenannte *stehende Welle*. Diese ist dadurch charakterisiert, dass es ‚Knoten‘, d.h. *stationäre Nullstellen* der Feldstärke gibt, im Fall des Lichts also der elektrischen Feldstärke, und dass zwischen diesen Knoten die Feldstärke periodisch zwischen ihren Extremwerten *oszilliert*. Man hat somit eine Serie von äquidistanten Orten, an denen die Feldstärke konstant null ist (‚Knoten‘), und zwischen diesen periodische Oszillationen der Feldstärke. Dadurch ist nun gewissermaßen ein raum-zeitliches Bezugssystem realisiert: eine regelmäßige Abfolge *ruhender Orte*, verbunden mit *synchronen Oszillationen*<sup>6</sup>.

Um nicht missverstanden zu werden: Für die Beschreibung der Wellenbewegung ist zunächst ein ‚normales‘ Bezugssystem  $S$  zugrunde gelegt worden, und in diesem Rahmen lässt sich die Feststellung treffen, dass unter den gegebenen Umständen eine stehende Wellen existiert, dass deren Knoten gleichsam ruhende Orte und die periodischen Oszillationen zwischen ihnen synchrone Uhren repräsentieren. Mit diesen Eigenschaften kann das durch die stehende

<sup>5</sup> Die mathematischen Zusammenhänge sind im *Anhang* ausführlicher dargelegt.

<sup>6</sup> Synchron sind die Oszillationen, wenn die entgegenlaufenden Wellen gleiche Geschwindigkeit haben, was hier nach Voraussetzung der Fall ist.

Welle realisierte System nun offenbar selbst die Funktion des Bezugssystems *S* übernehmen. Man hat auf diese Weise gewissermaßen ein Modell, an dem studiert werden kann, was ein Bezugssystem ausmacht und wodurch insbesondere *Dauer* charakterisiert ist.

Was sich dem Modell diesbezüglich unmittelbar entnehmen lässt, ist dies, dass *Dauer* so etwas wie Identität in der Veränderung ist. Wichtig ist dabei der Zusatz, dass es sich um eine *in der Veränderung erhaltene* Identität handelt. Dies ist in der Tat ein Charakteristikum der *stehenden* Welle. Auch eine *einzelne* Welle weist Unveränderliches auf, nämlich den Feldstärkebetrag einer bestimmten Wellenphase, der in der Wellenbewegung unverändert bleibt. Aber das ist sozusagen nur ‚von außen‘ feststellbar durch Rekurs auf ein externes Bezugssystem. Für sich genommen enthält die einzelne Welle einfach eine fixierte Phasenfolge, ohne jeden Zeitbezug und damit ohne Affinität zu Ruhe und Bewegung. Erst die stehende Welle enthält ein *intrinsisches Zeitmoment* – und zwar in Gestalt periodischer Oszillationen zwischen den ‚Knoten‘. An dem beschriebenen Modell lässt sich so in gewissem Sinn der Charakter von *Dauer* studieren.

Hierzu wäre weiter folgendes zu bedenken: Jede Wellenphase (einer einzelnen Welle) ist offenbar Resultat einer Störung des ihr vorausgehenden Zustands. Man kann zur Veranschaulichung etwa an eine Reihe aufgestellter Dominosteine denken: Kippt ein Stein, so kippt er auch den nächsten, dieser wiederum den nächsten usf. Es ist dies eine sich selbst beständig neu erzeugende Störung eines Zustands, von dem man annehmen muss, dass er ohne diese Störung – wie auch immer – im Gleichgewicht ist. Das ist grundsätzlich die Situation bei einer *einzelnen* Welle (wobei das Dominogleichnis natürlich auf *jede* Wellenphase zu übertragen wäre): Diese ist gewissermaßen ein beständig sich immer neu erzeugender, ubiquitärer ‚Kippprozess‘.

Von daher erscheint die *stehende* Welle in einem neuen Licht: Der mit einer Welle verbundene beständige Kippprozess wird durch die entgegenlaufende Welle gleichsam beständig ‚zurückgekippt‘. Ist die einzelne Welle die beständige Störung eines Gleichgewichts, ist die entgegenlaufende Welle die beständige Wiederherstellung desselben. *Dauer* ist danach das wiederhergestellte Gleichgewicht in Gestalt einer stehenden Welle, Aufhebung der mit der einsinnigen Wellenbewegung verbundenen Asymmetrie und Wiederherstellung der ursprünglichen Symmetrie eines Zustands, der *aus sich heraus existieren* kann. Jede Phase einer *einzelnen* Welle ist demgegenüber das Gegenteil von *Dauer*. Als ein beständig sich neu erzeugender Kippprozess kann sie *nur bewegt* sein.

Nach dem Gesagten stellt sich allerdings die Frage, wieso es dann überhaupt einer *Überlagerung* von Wellen bedarf, um *Dauer* zu exemplifizieren, oder anders gefragt: Warum hat erst das *wiederhergestellte* Gleichgewicht den Charakter von *Dauer* und nicht schon das in diesen Überlegungen vorausgesetzte ursprünglich ungestörte Gleichgewicht – was immer darunter zu verstehen wäre? Die Antwort ist hier wohl, dass ein Zustand, der als Bezugsinstanz fungieren soll, von seinen Nachbarzuständen ja irgendwie unterschieden sein muss, um eine solche

Bezugnahme zu ermöglichen, und das ist auf der hier betrachteten energetischen Ebene nur in energetischer Form möglich. Das völlig homogene Vakuum kann kein Bezugssystem sein, weil es in ihm keine Unterschiede gibt. Mit der in der *einzelnen* Welle enthaltenen Energie sind zwar immer schon Unterschiede realisiert, aber, wie angedeutet, in der Form beständig ‚kippender‘ Zustände. Erst die *stehende* Welle kann diesen Kippprozess aufhalten und führt so wieder zu Gleichgewichtszuständen, die als solche aus sich zu existieren vermögen und damit *Dauer* konstituieren – dies aber nicht in der Weise homogener Gleichförmigkeit des Vakuums, sondern energetischer Unterschiede im Raum, die als solche erst Bezugsinstanzen sein können. Die stehende Welle konstituiert demzufolge *Dauer* durch die Realisierung von Gleichgewichtszuständen, die zugleich als energetische Unterschiede im Raum realisiert sind. Dieser *energetische* Aspekt liegt ersichtlich auch dem eben schon geltend gemachten *Zeitmoment* zugrunde: Dass die stehende Welle interne Oszillationen ausführt, ist ja wesentlich Ausdruck der in ihr enthaltenen Energie.

Das sind zugegebenermaßen nicht empirisch fundierte Reflexionen, die sich als Deutungsversuche von dem betrachteten Modell der stehenden Welle her indes nahelegen. Zugleich ist damit ein Wechsel der Perspektive vollzogen worden: Ausgangspunkt ist nicht mehr die Masse, die als solche immer schon das Moment der *Dauer* enthält, sondern die Bewegung von Lichtwellen, an der gewissermaßen studiert werden kann, wie durch Superposition von Wellen so etwas wie *Dauer* – also eine Wesenseigenschaft von Masse – konstituiert wird. Ich möchte in diesem Sinn von *masse-analogen Strukturen* sprechen<sup>7</sup>. In dieser Perspektive erscheint die Wellenbewegung als das Primäre und der mit den *masse-analogen* Wellenknoten verbundene Charakter der *Dauer* als ein *Epiphänomen* der Wellenbewegung. Damit drängt sich die Frage auf, ob in diesem Modell auch das *Analogon einer bewegten Masse* rekonstruierbar ist.

#### 4. Masse-analoge Bewegungen

Für gleiche Frequenzen  $\omega_1 = \omega_2$  der entgegenlaufenden Einzelwellen, so hat sich gezeigt, ergibt sich eine stehende Welle mit stationären Knoten, die im System *S* ruhen und deshalb ihrerseits auch als Konstituenten dieses Systems betrachtet werden können. Für unterschiedliche Frequenzen  $\omega_1 \neq \omega_2$  hingegen ergeben sich *bewegte* Knoten, die mit der konstanten Geschwindigkeit  $u = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1 + \omega_2} c$  in Richtung der Welle mit der größeren Frequenz wandern (siehe Anhang). Daraus folgt

<sup>7</sup> Vgl. hierzu auch das in Fußnote 2 schon erwähnte, von Hegel verwendete Bild einer rotierenden Kreisfläche, die als Bewegung zugleich Ruhe einschließt – nämlich den Kreismittelpunkt, der so „der wiederhergestellte Begriff der *Dauer*, die in sich erloschene Bewegung“ sei; „es ist die *Masse* gesetzt, das Dauernde, das ... die Bewegung als ihre Möglichkeit zeigt“ (9.59 f Zus.); vgl. Wandschneider (1993).

unmittelbar die bemerkenswerte Tatsache, dass  $u$  hier stets kleiner als  $c$  ist, d.h. die Lichtgeschwindigkeit hat in dem betrachteten Modell die Rolle einer *Grenzgeschwindigkeit*, die von der masse-analogen Bewegung wandernder Knoten prinzipiell nicht übertroffen werden kann – ein für die Attraktivität des Modells sicher nicht unerheblicher Umstand<sup>8</sup>.

Die im System  $S$  mit der konstanten Geschwindigkeit  $u < c$  wandernden Knoten konstituieren ein neues Bezugssystem  $S'$ , in dem sie selbst ruhen.  $S$  ist als Inertialsystem vorausgesetzt;  $S'$  ist dann ein gegenüber  $S$  gleichförmig bewegtes System und damit ebenfalls ein Inertialsystem<sup>9</sup>. In diesem Sinn seien zwei Paare entgegelaufender Wellen angenommen: Das eine realisiert das System  $S$ , das andere das relativ zu diesem gleichförmig bewegte System  $S'$ . Alle beteiligten Wellen haben in  $S$  voraussetzungsgemäß die Geschwindigkeit  $c$ . Es stellt sich nun die Frage, welche Geschwindigkeit sie mit Bezug auf  $S'$  haben (d.h. wir ignorieren hier, dass die Lichtgeschwindigkeit empirisch schon als bezugssystemunabhängig bekannt ist). Zur Beantwortung dieser Frage muss die zwischen  $S$  und  $S'$  vermittelnde *Transformation* genauer betrachtet werden. Allgemeine Forderungen an diese sind<sup>10</sup>: (1.) Sie muss homogen und linear sein, (2.) das Relativitätsprinzip verlangt Reziprozität der Übergänge von  $S$  nach  $S'$  und umgekehrt. Beide Forderungen sind grundsätzlich durch eine Drehung der Koordinatensysteme zueinander erfüllbar. Dies führt zu einem allgemeinen Transformationsansatz der Form:

$$(b) \quad \begin{pmatrix} x \\ t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma & \alpha \\ \beta & \gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x' \\ t' \end{pmatrix}$$

mit erst noch zu bestimmenden Konstanten  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ . Die klassische Galilei-Transformation ist demgegenüber sehr viel spezieller, indem sie  $t = t'$  annimmt, während hier  $t = \beta x' + \gamma t'$  ist,  $t$  also außer dem Faktor  $\gamma$  zusätzlich noch einen

<sup>8</sup> Interessant ist, daß außerdem bewegte Knoten auftreten, die sich mit der Geschwindigkeit

$$u^* = \frac{\omega_1 + \omega_2}{\omega_1 - \omega_2} c, \text{ d.h. ausschließlich mit Überlichtgeschwindigkeit bewegen; im Grenzfall}$$

gleicher Frequenzen  $\omega_1 = \omega_2$  sind diese nicht-stationären Nulldurchgänge mit unendlicher Geschwindigkeit bewegt oder genauer gesagt: Sie sind in diesem Fall mit der gesamten x-Achse identisch und bilden so den synchronen Nulldurchgang der schon erwähnten Oszillationen zwischen den Knoten der stehenden Welle.

<sup>9</sup> Der Übergang von den in  $S$  ruhenden zu bewegten masse-analogen Knoten durch Frequenzänderung kann auch als eine *Beschleunigung* in  $S$  verstanden werden, hervorgebracht entweder durch Frequenzerhöhung und damit Energiezufuhr von außen bei einer der beiden entgegelaufenden Wellen (vergleichbar etwa einer Stoßeinwirkung) oder durch Frequenzerniedrigung einer der beiden Wellen, was einer Energieabgabe nach außen entspricht (vergleichbar etwa dem Energieverbrauch eines Motorantriebs).

<sup>10</sup> Vgl. hierzu etwa *Hund, F. (1969) Grundbegriffe der Physik. Mannheim 1969, S. 87ff.*

räumlichen Anteil  $\beta x'$  enthält. Werden nun in das Wellenpaar  $\cos \omega_1 \left( t - \frac{x}{c} \right)$ ,

$\cos \omega_2 \left( t + \frac{x}{c} \right)$   $x$  und  $t$  aus den Transformationsgleichungen (b) eingesetzt, so

ergeben sich daraus Beziehungen zwischen den Koeffizienten  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  sowie den unbekanntenen Größen  $\omega_1'$ ,  $\omega_2'$ ,  $c'$ . Hier ist allerdings nur  $c'$  von Interesse. Nun sollen die in  $S$  bewegten Knoten aber in  $S'$  *ruhen*, was nach dem früher Gesagten der Bedingung  $\omega_1' = \omega_2'$  entspricht. Wird diese Bedingung berücksichtigt, so ergibt sich für die Geschwindigkeit  $c'$  der Lichtwellen in  $S'$  der gleiche Wert wie im ursprünglichen, relativ zu  $S'$  bewegten System  $S$ ,

$$c' = c,$$

mit anderen Worten: Auch in dem diskutierten Modell erweist sich die Lichtgeschwindigkeit als eine *bezugssystemunabhängige, absolute* Größe – ein Resultat, das hier aus sehr allgemeinen Voraussetzungen hergeleitet worden ist.

Nun entspricht die Forderung der Gleichheit der Frequenzen  $\omega_1' = \omega_2'$ , die zu  $c' = c$  führt, wie gesagt, einfach der Bedingung, dass die im System  $S$  bewegten masse-analogen Knoten im transformierten System  $S'$  ruhen und so zugleich  $S'$  konstituieren, anders formuliert: Die durch masse-analoge Knoten konstituierten Systeme  $S$  und  $S'$ , die relativ zueinander gleichförmig bewegt sind, sind beide gleichermaßen als ruhend oder als bewegt bestimmt. Das ist aber nichts anderes als die Aussage des kinematischen Relativitätsprinzips in der eingangs präzisierten Form: ‚Massebewegung ist äquivalent mit relativer Bewegung‘. Wird  $S'$  nun als ruhend betrachtet, so ergibt sich daraus die gleiche Geschwindigkeit für das Licht wie in dem als ruhend betrachteten System  $S$ , mit anderen Worten: Auch in dem betrachteten Modell der stehenden Lichtwelle bestätigt sich der im Anschluss an Hegels Bewegungsbegriff formulierte Tatbestand, dass durch das Relativitätsprinzip auch noch die Absolutheit der Lichtbewegung impliziert ist.

Die Lichtgeschwindigkeit ist danach eine für alle Bezugssysteme identische Größe und dergestalt eine alle Systeme übergreifende Eigenschaft. Dieser *bezugssystemübergreifende* Charakter ist keineswegs verwunderlich, denn das Relativitätsprinzip selbst macht schon eine bezugssystemübergreifende und in diesem Sinn *absolute* Aussage: ‚Alle Bezugsinstanzen können ebenso bewegt sein wie ruhen‘. Auch die Vielfalt möglicher Bewegungen verweist so letztlich auf eine *übergreifende Ganzheit* der Natur.

Es bleibt die Frage, warum dieses in der Natur konstatierbare Absolute eine *Bewegung* und nicht eine räumliche, zeitliche oder irgendeine andere Größe ist. Die Antwort lautet: Weil es ein Relativitätsprinzip für die *Bewegung*, also für die Verbindung von Raum und Zeit, gibt, nicht aber für Raum und Zeit je für sich. Und das beruht offenbar darauf, dass das Naturseiende wesentlich auch durch Prozessualität charakterisiert ist, die als solche nicht nur ein räumliches, sondern

auch zeitliches Moment enthält. Das Naturseiende ist stets räumlich *und* zeitlich und in diesem Sinn grundsätzlich als *bewegt* bestimmt.

### 5. Fazit

Das diskutierte Gedankenexperiment hat zu der Frage, was Masse ist und insbesondere wodurch sie befähigt ist, Dauer zu konstituieren, folgendes ergeben: Die Frage wird hier, in einer Umkehrung der Perspektive, nicht von der Masse selbst, sondern von einer *stehenden Lichtwelle* her angegangen. In diesem Modell lassen sich *masse-analoge Strukturen* rekonstruieren, die in *relativer Bewegung* sein können. Die (empirisch bekannte) Unabhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit vom Bezugssystem ist dabei nicht vorausgesetzt. Doch kann gezeigt werden, dass die Lichtgeschwindigkeit *Grenzwertgeschwindigkeit* solcher relativer Bewegungen ist, dass dies für alle durch masse-analoge Strukturen konstituierte, relativ zueinander gleichförmig bewegten Bezugssysteme gilt und dass die Lichtgeschwindigkeit selbst in allen diesen Systemen *gleich* ist. Die Absolutheit der Lichtgeschwindigkeit und die Relativität der Massebewegungen erweisen sich so als zwar differente, aber intrinsisch zusammengehörende Momente des kinematischen Relativitätsprinzips – ein Beitrag zu einer *Philosophie der Relativitätstheorie*.

### 6. Anhang

Kurze mathematische Darstellung des diskutierten Modells der stehenden Welle

Ausgegangen wird von zwei entgegenlaufenden, ebenen Lichtwellen im Vakuum in einem Bezugssystem *S*. Hierbei ist einfachheitshalber der Feldstärkevektor weggelassen und außerdem angenommen, dass beide Wellen die gleiche Amplitude 1 haben; es bleiben die reinen Welleneigenschaften:

$$\cos \omega_1 \left( t - \frac{x}{c} \right), \cos \omega_2 \left( t + \frac{x}{c} \right); \quad c \quad \text{ist} \quad \text{die} \quad \text{Lichtgeschwindigkeit};$$

$\omega_1 = 2\pi\nu_1, \omega_2 = 2\pi\nu_2;$   $\nu_1, \nu_2$  sind die Frequenzen der Lichtwellen. Superposition beider Wellen ergibt:

$$(1) \quad \cos \omega_1 \left( t - \frac{x}{c} \right) + \cos \omega_2 \left( t + \frac{x}{c} \right)$$

oder umgeformt:

$$(1') \quad 2 \cos \frac{1}{2} \left( (\omega_1 - \omega_2)t - (\omega_1 + \omega_2) \frac{x}{c} \right) \cdot \cos \frac{1}{2} \left( (\omega_1 + \omega_2)t - (\omega_1 - \omega_2) \frac{x}{c} \right)$$

Für  $\omega_1 = \omega_2 = \omega$  ergibt dies bekanntlich eine *stehende Welle*. (1') vereinfacht sich dann zu:

$$(2) \quad 2 \cos \frac{\omega}{c} x \cdot \cos \omega t.$$

Aufgrund der linken cos-Funktion ist deutlich, dass es hier zeitunabhängige Nullstellen gibt und damit stationäre Orte mit der Feldstärke 0: die ‚Knoten‘ der stehenden Welle. Aufgrund der rechten cos-Funktion ist deutlich, dass die Superposition (2) zeitlich-periodische Oszillationen zwischen den stationären Knoten enthält, wobei der ganze Ausdruck periodisch 0 wird, und zwar unabhängig von  $x$ , so dass *diese* Nullstellen momentan mit der gesamten x-Achse identisch sind. Für  $\omega_1 \neq \omega_2$  kann es allgemein keine stehende Welle geben. Man erkennt dies durch Nullsetzen des Ausdrucks (1'): Jede der beiden cos-Funktionen kann dabei für sich 0 sein. Nullsetzen der linken cos-Funktion liefert für das Argument die Bedingung:

$$(3a) \quad \frac{1}{2} \left( (\omega_1 - \omega_2)t - (\omega_1 + \omega_2) \frac{x}{c} \right) = k_1 \cdot \pi, \quad k_1 = 1, 2, \dots ;$$

Nullsetzen der rechten cos-Funktion liefert für das Argument die Bedingung:

$$(3b) \quad \frac{1}{2} \left( (\omega_1 + \omega_2)t - (\omega_1 - \omega_2) \frac{x}{c} \right) = k_2 \cdot \pi, \quad k_2 = 1, 2, \dots .$$

Die Nullstellen von (1') sind dann gegeben durch:

$$(4a) \quad x_a = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1 + \omega_2} ct - \frac{k_1 \cdot 2\pi}{\omega_1 + \omega_2} c$$

bzw.

$$(4b) \quad x_b = \frac{\omega_1 + \omega_2}{\omega_1 - \omega_2} ct - \frac{k_2 \cdot 2\pi}{\omega_1 - \omega_2} c .$$

Aus (4a) folgt weiter: Da  $\omega_1 \neq \omega_2$  ist, gibt es keine stationären Knoten, sondern Knoten, die sich mit der Geschwindigkeit

$$(5a) \quad u_a = \frac{dx_a}{dt} = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1 + \omega_2} c < c$$

in Richtung der Welle mit der größeren Frequenz *bewegen*. Die Lichtgeschwindigkeit  $c$  erweist sich dabei als *Grenzgeschwindigkeit* für  $u_a$ . Im Unterschied dazu folgt aus (4b):

$$(5b) \quad u_b = \frac{dx_b}{dt} = \frac{\omega_1 + \omega_2}{\omega_1 - \omega_2} c > c ,$$

d.h. diese Knoten können sich grundsätzlich nur mit *Überlichtgeschwindigkeit* bewegen (und erinnern insofern an den in der Physik diskutierten Begriff der ‚Tachyonen‘). Im Fall gleicher Frequenzen  $\omega_1 = \omega_2$  handelt es sich hierbei, wie schon bemerkt, um die – momentan mit der x-Achse zusammenfallenden – synchronen Nulldurchgänge der periodischen Oszillationen zwischen den stationären Knoten.

**Übergang in ein anderes Bezugssystem:** Die im System  $S$  mit der konstanten Geschwindigkeit  $u_a$  bewegten Knoten sollen als Konstituenten eines neuen Bezugssystems  $S'$  betrachtet werden, in dem sie selbst ruhen. Eine Transformation von  $S$  nach  $S'$  muss nach Hund (1969, s.o.), (1.) die Bedingung erfüllen, dass die Transformationsgleichungen (wegen der Homogenität von Raum und Zeit) homogen und linear sind und (2.) bezüglich der Übergänge von  $S$  nach  $S'$  und umgekehrt (aufgrund des Relativitätsprinzips) reziprok sind. Beide Forderungen sind grundsätzlich durch eine Drehung der Koordinatensysteme zueinander erfüllbar. Dies führt zu einem allgemeinen Transformationsansatz der Form:

$$(6) \quad \begin{pmatrix} x \\ t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma & \alpha \\ \beta & \gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x' \\ t' \end{pmatrix}$$

mit erst noch zu bestimmenden Koeffizienten  $\alpha, \beta, \gamma$ . Diese Transformation ist sehr viel allgemeiner als die Galilei-Transformation, die z.B. die Zeitkoordinate unverändert lässt,  $t = t'$ , während in (6)  $t = \beta x' + \gamma t'$  ist, also  $t$  außer dem Faktor  $\gamma$  zusätzlich noch einen räumlichen Anteil  $\beta x'$  enthält. Werden nun  $x$  und  $t$  gemäß (6) in die Superposition der Wellen (1) eingesetzt, so ergibt sich:

$$(7) \quad \cos \omega_1 \left( \gamma - \frac{\alpha}{c} \right) \left( t' - x' \frac{\frac{\gamma}{c} - \beta}{\gamma - \frac{\alpha}{c}} \right) + \cos \omega_2 \left( \gamma + \frac{\alpha}{c} \right) \left( t' + x' \frac{\frac{\gamma}{c} + \beta}{\gamma + \frac{\alpha}{c}} \right)$$

Nun hat die Superposition beider Wellen im Bezugssystem  $S'$  die allgemeine Form:

$$(8) \quad \cos \omega_1' \left( t' - \frac{x'}{c'} \right) + \cos \omega_2' \left( t' - \frac{x'}{c'} \right).$$

Vergleich der Ausdrücke (7) und (8) liefert:

$$(9) \quad \omega_1' = \omega_1 \left( \gamma - \frac{\alpha}{c} \right), \quad \omega_2' = \omega_2 \left( \gamma + \frac{\alpha}{c} \right),$$

$$(10) \quad \frac{1}{c'} = \frac{\frac{\gamma}{c} - \beta}{\gamma - \frac{\alpha}{c}} \quad \text{und} \quad \frac{1}{c'} = \frac{\frac{\gamma}{c} + \beta}{\gamma + \frac{\alpha}{c}}.$$

Gleichsetzung der Ausdrücke für  $\frac{1}{c'}$  ergibt  $\frac{2\alpha\gamma}{c^2} = 2\beta\gamma$  oder

$$(11) \quad \beta = \frac{\alpha}{c^2}.$$

Wird nun außerdem von der Bedingung Gebrauch gemacht, dass die in  $S$  bewegten Knoten in  $S'$  *ruhen*, so muss  $\omega_1' = \omega_2'$  sein, also mit (9):

$$(12) \quad \omega_1 \left( \gamma - \frac{\alpha}{c} \right) = \omega_2 \left( \gamma + \frac{\alpha}{c} \right)$$

oder

$$(13) \quad \gamma = \frac{\alpha}{c} \cdot \frac{\omega_1 + \omega_2}{\omega_1 - \omega_2}.$$

Das Interesse hier gilt der Lichtgeschwindigkeit  $c'$  in dem gegenüber  $S$  bewegten System  $S'$ : Einsetzen von  $\beta$  und  $\gamma$  aus (11) und (13) in eine der beiden Beziehungen (10) liefert schließlich die *Bezugssystemunabhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit*:

$$(14) \quad c' = \frac{\gamma - \frac{\alpha}{c}}{\frac{\gamma}{c} - \beta} = \frac{\frac{\alpha}{c} \cdot \frac{\omega_1 + \omega_2}{\omega_1 - \omega_2} - \frac{\alpha}{c}}{\frac{\alpha}{c^2} \cdot \frac{\omega_1 + \omega_2}{\omega_1 - \omega_2} - \frac{\alpha}{c^2}} = c.$$

Der explizite Wert von  $\alpha$  wird zur Gewinnung dieses Resultats also gar nicht benötigt und damit auch nicht der von  $\gamma$ .

Die Beziehung  $c' = c$  zeigt im Übrigen, dass die Transformation (6) faktisch

die bekannte ‚Lorentztransformation‘ ist mit  $\gamma$  als ‚Lorentzfaktor‘  $1/\sqrt{1 - \left(\frac{u}{c}\right)^2}$

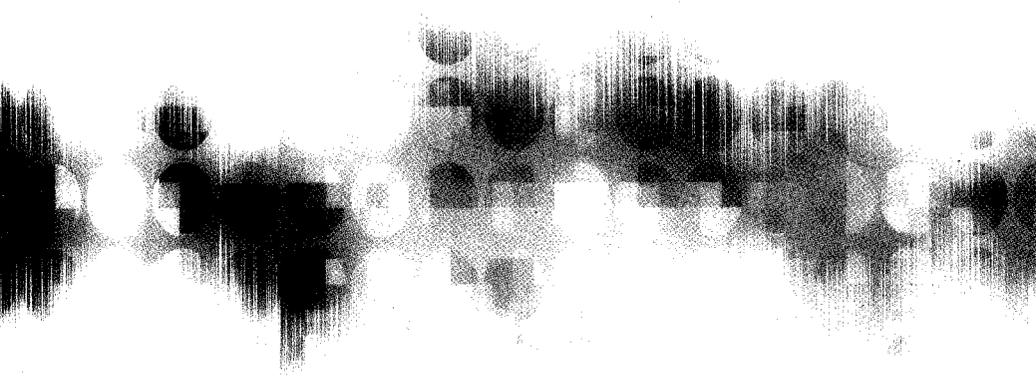
und  $\alpha$  als Relativgeschwindigkeit  $u'$  der Systeme  $S$  und  $S'$  (in  $S'$ ):

$u = \frac{dx}{dt} = \frac{dx}{dt'} \cdot \frac{dt'}{dt} = \frac{\alpha}{\gamma}$  (gemäß (6)), also  $\alpha = \gamma u$ , was nach der Lorentztransformation gleich  $u'$  ist.

### Literatur

Bethge, K./Schröder, U.E., Elementarteilchen und ihre Wechselwirkungen. Darmstadt 1986.  
 Hegel, G.W.F., Naturphilosophie, Werke Bd. 9, Frankfurt a.M. 1969.  
 Hund, F., Grundbegriffe der Physik. Mannheim 1969.

- Wandschneider, D., Raum, Zeit, Relativität. Grundbestimmungen der Physik in der Perspektive der Hegelschen Naturphilosophie. Frankfurt/M. 1982.
- Wandschneider, D., Relative und absolute Bewegung in der Relativitätstheorie und in der Deutung Hegels, in: Horstmann, R.-P./Petry, M.J. (ed. 1986) Hegels Philosophie der Natur. Stuttgart 1986.
- Wandschneider, D., The Problem of Mass in Hegel, in: Petry, M.J. (1993) Hegel and Newtonianism. London/Dordrecht/Boston 1993.



Wolfgang Neuser / Jens Kohne (Hrsg.)

# Hegels Licht-Konzepte

Zur Verwendung eines metaphysischen  
Begriffs in Naturbetrachtungen

Königshausen & Neumann

*Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek*

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

© Verlag Königshausen & Neumann GmbH, Würzburg 2008

Gedruckt auf säurefreiem, alterungsbeständigem Papier

Umschlag: Hummel / Lang, Würzburg

Bindung: Buchbinderei Diehl+Co. GmbH, Wiesbaden

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk, einschließlich aller seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt.

Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist

ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere

für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung

und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Printed in Germany

ISBN 978-3-8260-3766-5

[www.koenigshausen-neumann.de](http://www.koenigshausen-neumann.de)

[www.buchhandel.de](http://www.buchhandel.de)

[www.buchkatalog.de](http://www.buchkatalog.de)

# Inhaltsverzeichnis

Einführung.....	7
Licht und Dunkel	
Rudolf Prinz zur Lippe .....	11
Licht als Metapher einer medizinischen Naturphilosophie – von Paracelsus bis Mesmer	
Heinz Schott .....	27
Licht-Konzepte	
Wolfgang Neuser .....	47
Der Lichtäther von Newton bis Arago	
Jan Frercks .....	59
Licht und Masse – Absolutheit und <del>Realität</del> <sup>Relativität</sup> als intrinsisch zusammengehörende Momente des kinematischen Relativitätsprinzips. Ein Beitrag zu einer Philosophie der Relativitätstheorie.	
Dieter Wandschneider.....	79
Das Licht als Selbst (Seele) der Materie?	
Klaus J. Schmidt .....	93
Literaturverzeichnis .....	107