

8. Konstanz der Phasengeschwindigkeit des Lichts

Die bisher behandelten Themen standen in exakter Übereinstimmung mit den aus der Literatur bekannten Ausführungen. Im Folgenden wird dagegen mit der Beobachtung von ausgesandten Signalen mit konstanter Frequenz ein Aspekt behandelt, der Widersprüche zu gängigen Interpretationen aufweist. Diese lassen sich nur mit den Betrachtungen zur Konstanz der Phasengeschwindigkeit des Lichts auflösen; diese ist damit von großer Relevanz für die spezielle Relativitätstheorie und das wichtigste Ergebnis der hier dargestellten Untersuchungen. Es zeigt sich anschließend, dass die Annahme eines absolut ruhenden Raums zwar im Widerspruch zur SRT steht, aber bei Berücksichtigung der Konstanz der Phasengeschwindigkeit des Lichts nur einen Sonderfall ohne Verletzung experimenteller Ergebnisse darstellt.

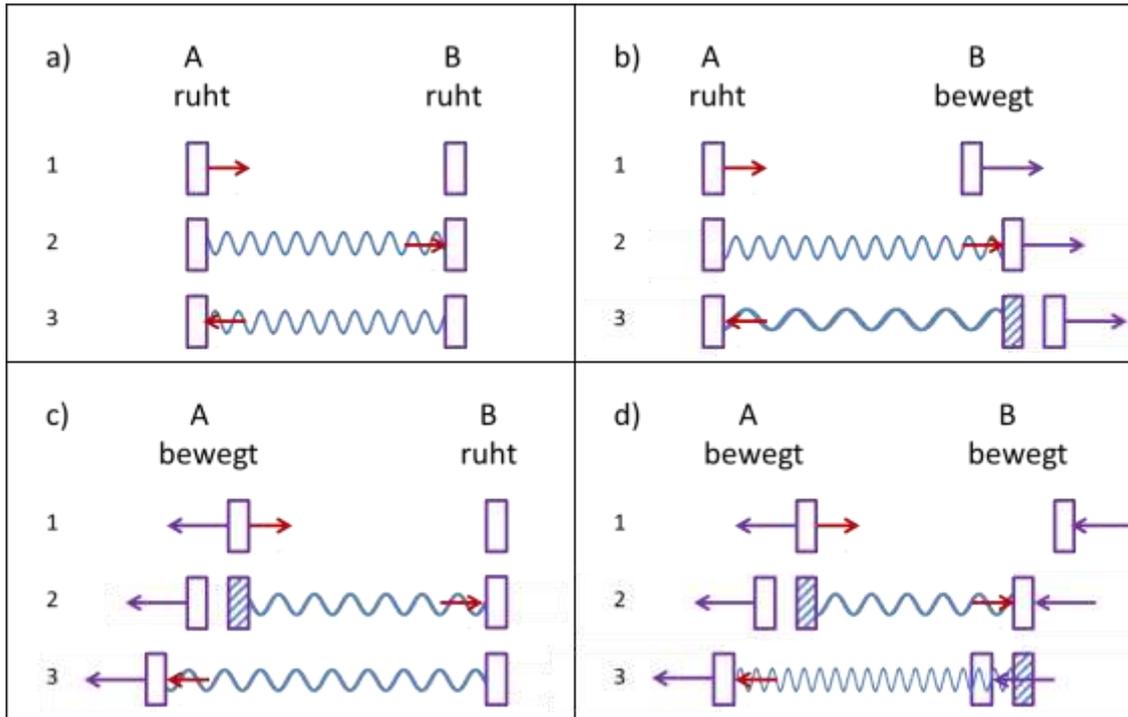
8.1 Unvereinbarkeit mit spezieller Relativitätstheorie bei konventionellem Ansatz

In Bild 8.1a und b ist die Situation dargestellt, dass zwei Beobachter A und B miteinander Signale austauschen. Zum Zeitpunkt 1 wird von A ein Signal ausgesandt, das bei 2 von B aufgenommen und reflektiert wird. Zum Zeitpunkt 3 empfängt A das zurückkommende Signal und der Versuch ist beendet. A und B befinden sich entweder relativ zueinander in Ruhe (Fall a, d und g) bewegen sich voneinander fort (Fall b und c) oder bewegen sich aufeinander zu (Fall e und f). Die ausgesendeten und empfangenen Signale werden untersucht. Wie bekannt wird das ausgesendete Signal eines bewegten Beobachters von einem anderen Beobachter mit höherer Frequenz wahrgenommen, wenn sie sich aufeinander zubewegen; entfernen sie sich voneinander so ist diese geringer. Diese ist

$$f' = \frac{1}{T'} = f_0 \left(\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}} \right)^{1/2} = f_0 \cdot \gamma \left(1 + \frac{v}{c} \right) \quad (8.01)$$

Es ist hierbei berücksichtigt, dass die Frequenz des bewegten Beobachters aufgrund der Zeitdilatation um den Faktor γ niedriger ist. Die jeweiligen Werte für die berechnete Frequenz f , den zurückgelegten Weg a , die erforderliche Zeit t und die Anzahl n der in diesem Intervall auftretenden Schwingungen sind in einer Tabelle beigefügt.

8. Konstanz der Phasengeschwindigkeit des Lichts

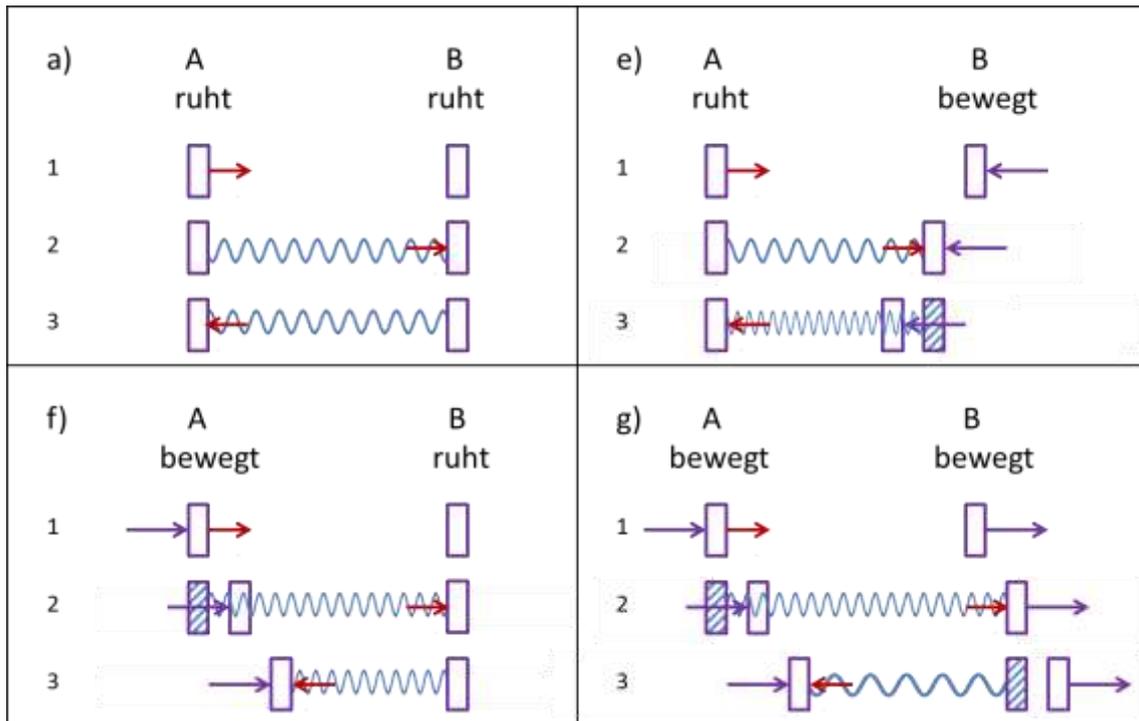


- 1: Abstrahlung Lichtimpuls von A
 2: Empfang bei B, Reflektion nach A
 3: Empfang bei A

Fall	f_A	$f_{A \rightarrow B}$	f_B	$f_{B \rightarrow A}$	f_A	
a	f_0	f_0	f_0	f_0	f_0	
b	f_0	f_0	$f_0 \left(\frac{1 - \frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c}} \right)^{1/2}$	$f_0 \left(\frac{1 - \frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c}} \right)$	$f_0 \left(\frac{1 - \frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c}} \right)$	
c	$\frac{f_0}{\gamma}$	$\frac{f_0}{\gamma} \cdot \left(\frac{1 - \frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c}} \right)^{1/2}$	$\frac{f_0}{\gamma} \cdot \left(\frac{1 - \frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c}} \right)^{1/2}$	$\frac{f_0}{\gamma} \cdot \left(\frac{1 - \frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c}} \right)^{1/2}$	$\frac{f_0}{\gamma} \cdot \left(\frac{1 - \frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c}} \right)$	
d	$\frac{f_0}{\gamma}$	$\frac{f_0}{\gamma} \cdot \left(\frac{1 - \frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c}} \right)^{1/2}$	$\frac{f_0}{\gamma}$	$\frac{f_0}{\gamma} \cdot \left(\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}} \right)^{1/2}$	$\frac{f_0}{\gamma}$	
Fall	$a_{A \rightarrow B}$	$a_{B \rightarrow A}$	$t_{A \rightarrow B}$	$t_{B \rightarrow A}$	$n_{A \rightarrow B}$	$n_{B \rightarrow A}$
a	a_0	a_0	t_0	t_0	n_0	n_0
b	$a_0 \frac{1}{1 - \frac{v}{c}}$	$a_0 \frac{1}{1 - \frac{v}{c}}$	$t_0 \frac{1}{1 - \frac{v}{c}}$	$t_0 \frac{1}{1 - \frac{v}{c}}$	$n_0 \frac{1}{1 - \frac{v}{c}}$	$n_0 \frac{1}{1 + \frac{v}{c}}$
c	a_0	$a_0 \left(\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}} \right)$	t_0	$t_0 \left(\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}} \right)$	$n_0 \left(1 - \frac{v}{c} \right)$	$n_0 \left(1 + \frac{v}{c} \right)$
d	$a_0 \frac{1}{1 + \frac{v}{c}}$	$a_0 \frac{1}{1 - \frac{v}{c}}$	$t_0 \frac{1}{1 + \frac{v}{c}}$	$t_0 \frac{1}{1 - \frac{v}{c}}$	$n_0 \left(\frac{1 - \frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c}} \right)$	$n_0 \left(\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}} \right)$

Abb. 8.1a: Signalaustausch zwischen Beobachtern A und B und Analyse der dabei auftretenden Frequenzen und der Schwingungsdauer.

8.1 Unvereinbarkeit mit spezieller Relativitätstheorie bei konventionellem Ansatz



- 1: Abstrahlung Lichtimpuls von A
 2: Empfang bei B, Reflektion nach A
 3: Empfang bei A

Fall	f_A	$f_{A \rightarrow B}$	f_B	$f_{B \rightarrow A}$	f_A
a	f_0	f_0	f_0	f_0	f_0
e	f_0	f_0	$f_0 \left(\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}} \right)^{1/2}$	$f_0 \left(\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}} \right)$	$f_0 \left(\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}} \right)$
f	$\frac{f_0}{\gamma}$	$\frac{f_0}{\gamma} \cdot \left(\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}} \right)^{1/2}$	$\frac{f_0}{\gamma} \cdot \left(\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}} \right)^{1/2}$	$\frac{f_0}{\gamma} \cdot \left(\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}} \right)^{1/2}$	$\frac{f_0}{\gamma} \cdot \left(\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}} \right)$
g	$\frac{f_0}{\gamma}$	$\frac{f_0}{\gamma} \cdot \left(\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}} \right)^{1/2}$	$\frac{f_0}{\gamma}$	$\frac{f_0}{\gamma} \cdot \left(\frac{1 - \frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c}} \right)^{1/2}$	$\frac{f_0}{\gamma}$

Fall	$a_{A \rightarrow B}$	$a_{B \rightarrow A}$	$t_{A \rightarrow B}$	$t_{B \rightarrow A}$	$n_{A \rightarrow B}$	$n_{B \rightarrow A}$
a	a_0	a_0	t_0	t_0	n_0	n_0
e	$a_0 \frac{1}{1 + \frac{v}{c}}$	$a_0 \frac{1}{1 + \frac{v}{c}}$	$t_0 \frac{1}{1 + \frac{v}{c}}$	$t_0 \frac{1}{1 + \frac{v}{c}}$	$n_0 \frac{1}{1 + \frac{v}{c}}$	$n_0 \frac{1}{1 - \frac{v}{c}}$
f	a_0	$a_0 \left(\frac{1 - \frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c}} \right)$	t_0	$t_0 \left(\frac{1 - \frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c}} \right)$	$n_0 \left(1 + \frac{v}{c} \right)$	$n_0 \left(1 - \frac{v}{c} \right)$
g	$a_0 \frac{1}{1 - \frac{v}{c}}$	$a_0 \frac{1}{1 + \frac{v}{c}}$	$t_0 \frac{1}{1 - \frac{v}{c}}$	$t_0 \frac{1}{1 + \frac{v}{c}}$	$n_0 \left(\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}} \right)$	$n_0 \left(\frac{1 - \frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c}} \right)$

Abb. 8.1b: Signalaustausch zwischen Beobachtern A und B und Analyse der dabei auftretenden Frequenzen und der Schwingungsdauer.

8. Konstanz der Phasengeschwindigkeit des Lichts

Für die Versuchsteilnehmer ist es aufgrund einer Frequenzanalyse nicht feststellbar, ob sie sich im System a), d), g) oder b), c) bzw. e), f) befinden. Betrachtet man hingegen die Anzahl der Schwingungen zwischen den Teilnehmern, so müssten A und B wegen des Identitätsprinzips (vgl. Kap. 1.6) sowohl für die Fälle a, d und g bei Hin- und Rückweg (Situation 2 und 3) die gleiche Anzahl messen. Das gleiche gilt für b) und c) sowie e) und f).

In der Tabelle sind für alle Fälle die Ergebnisse für die Frequenzen zusammengestellt, die sich für einen ruhenden Beobachter ergeben. Dabei ist berücksichtigt, dass die erzeugten Frequenzen in einem bewegten System für einen ruhenden Beobachter um den Faktor γ verringert erscheinen. Im zweiten Teil der Tabelle sind auch die Werte für den Abstand a , die beim Signalaustausch verstreichende Zeit t sowie für die Anzahl der Schwingungen n zusammengefasst. Dabei ergibt sich die Anzahl der Schwingungen aus der Beziehung

$$n = f \cdot t \quad (8.02)$$

Lässt man die Lichtstrahlen miteinander wechselwirken, so müssen aus Sicht des ruhenden Beobachters Interferenzerscheinungen in Form von Schwebungen auftreten. Wird das System um 90° zur Bewegungsrichtung gedreht, so verschwinden diese wieder.

Offensichtlich lassen sich die Ergebnisse aus dem ruhenden und dem bewegten System auf diese Weise nicht zur Übereinstimmung bringen. Nach den hier dargestellten Diagrammen ist das Ergebnis völlig unterschiedlich. Aufgrund der zuvor angestellten generellen Überlegungen müsste es sich demnach hier um eine Verletzung des Relativitätsprinzips handeln.

Dies ist jedoch nicht der Fall. Die Erklärung ist darin zu suchen, dass es sich bei den aus Sicht des ruhenden Beobachters ergebenden Messeffekten nicht um objektive Größen handelt. Da die ausgesandten Wellen naturgemäß abhängig von Zeit und Raum sind, so wird ein Beobachter in einem beliebigen Referenzsystem andere Effekte messen als ein zu ihm relativ bewegter. Es müssen an dieser Stelle die Phasengeschwindigkeiten betrachtet werden, die sich für alle Beobachter stets mit Lichtgeschwindigkeit bewegen.

Werden die Phasengeschwindigkeiten herangezogen, so ergibt sich zwanglos eine Übereinstimmung zwischen den Messungen der Schwingungszahl zwischen den Beobachtern. Insbesondere sind die Ergebnisse zwischen den Fällen a, d und g in diesen Fällen gleich. Eine ausführliche Ableitung dieses Effekts ist im nachfolgenden Kapitel dargestellt.

8.2 Auflösung des Widerspruchs durch Betrachtung der Phasengeschwindigkeit

Bei einem Signalaustausch zwischen zwei Beobachtern, der üblicherweise mit Lichtimpulsen vorgenommen wird, liegen normalerweise harmonische Schwingungen vor. Diese können nicht direkt in ein Raum-Zeit-Schaubild (z. B. in ein Minkowski-Diagramm) eingetragen werden. Kurz zusammengefasst wird eine Welle üblicherweise so dargestellt, dass eine Variable (z. B. die Zeit) konstant gehalten wird, während die andere (in diesem Beispiel der Weg) variiert. Am simplen Beispiel einer durch einen in Wasser geworfenen Stein verursachten Welle könnte die Auswertung durch ein Foto erfolgen, bei dem aus den Abständen der Wellenberge die Wellenlänge ermittelt wird. Wird dagegen der Weg konstant gehalten

8.2 Auflösung des Widerspruchs durch Betrachtung der Phasengeschwindigkeit

und z. B. die Bewegung eines auf dem Wasser schwimmenden Korkens betrachtet, so ergibt sich die Frequenz der Welle über eine Messung des zeitlichen Abstands von 2 definierten Punkten, z. B. der Maxima. Aus der Kombination beider Messungen lässt sich dann die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle, bezeichnet als Phasengeschwindigkeit, bestimmen. Es gibt jedoch auch die Möglichkeit, die sich bewegenden Maxima einer Welle in Abhängigkeit von Weg und Zeit direkt, z. B. mit einer Videoaufnahme zu dokumentieren.

Bei der allgemeinen Betrachtung einer Welle liegt folgende Situation vor: Die Oszillation ist abhängig von Raum (x) und Zeit (t) und wird mit folgendem Ansatz beschrieben [46a]

$$w(x, t) = A_0 \cos \left(\frac{2\pi}{T} t - \frac{2\pi}{\lambda} x - \alpha \right) \quad (8.10)$$

Hierbei sind A_0 die Amplitude, T die Schwingungsdauer (bei ortsfester Betrachtung), λ die Schwingungslänge (bei Betrachtung mit konstanter Zeit) sowie α der Ausgangswinkel.

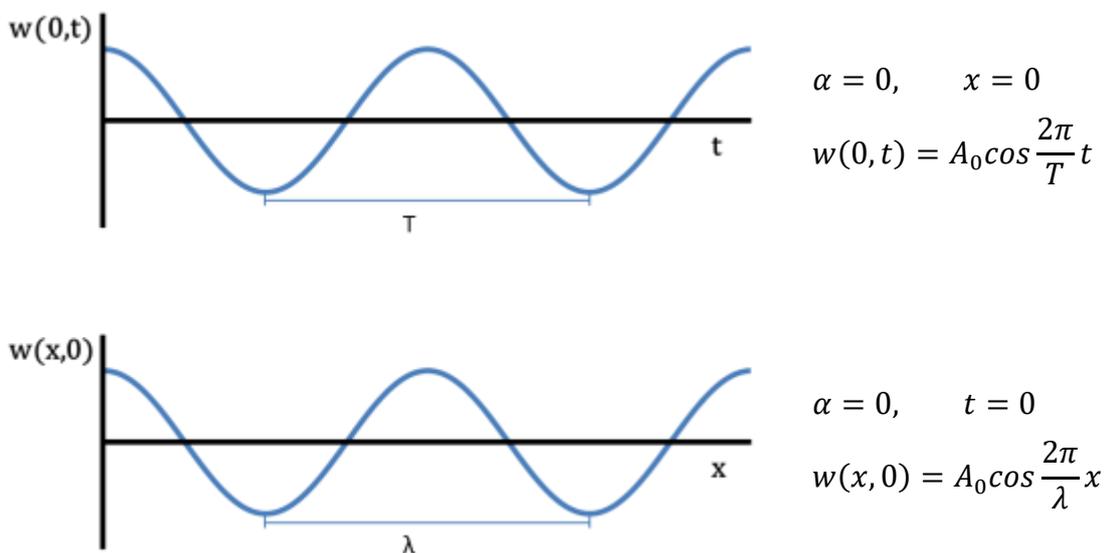


Abb. 8.2: Wellenbild bei festem Ort ($x = 0$) und fester Zeit ($t = 0$) mit $\alpha = 0$

Eine starke Vereinfachung kann erzielt werden, wenn man die zeitliche und räumliche Veränderung eines bestimmten Punktes dieser Welle (z. B. ein Maximum) zusammen betrachtet (vgl. Abb. 8.3). In diesem Fall bleibt der Kosinus unverändert und es gilt

$$\frac{2\pi}{T} t - \frac{2\pi}{\lambda} x - \alpha = \text{const.} \quad (8.11)$$

Nach Differentiation der Gleichung mit

$$\frac{\Delta t}{T} - \frac{\Delta x}{\lambda} = 0 \quad (8.12)$$

folgt dann für die Phasengeschwindigkeit u dieser Welle

$$u = \lim_{\Delta \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{\lambda}{T} \quad (8.13)$$

8. Konstanz der Phasengeschwindigkeit des Lichts

Liegt keine Dispersion durch ein Medium vor (wie z. B. im Vakuum der Fall) so ergibt sich

$$u = \frac{\lambda}{T} = c \quad (8.14)$$

Diese Ableitung mit Nutzung des mathematischen Konzepts von Differenzialquotienten und Limesbildung beschreibt die Situation besonders anschaulich [46a], es sind aber auch komplexere Formulierungen mit Vierervektor und Gradientenbildung möglich, die natürlich zum gleichen Ergebnis kommen [27].

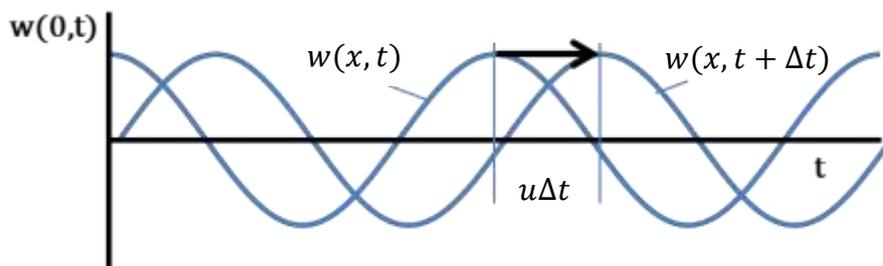


Abb.8.3: Phasengeschwindigkeit u als Fortpflanzungsgeschwindigkeit gleicher Punkte auf der Oszillationskurve (z. B. der Maxima)

Das wesentliche Ergebnis ist also, dass die gemessene Phasengeschwindigkeit einer elektromagnetischen Welle **exakt der Lichtgeschwindigkeit** entspricht [46a]. In Abb. 8.4 ist die Phasengeschwindigkeit als Funktion von Ort und Zeit eingetragen. Da es sich um eine lineare Abhängigkeit handelt ergibt sich eine Gerade mit dem Ursprung Null und nach Normierung ein Winkel zur Abszisse von 45° . Im rechten Teildiagramm sind zusätzlich die sich ergebenden Verläufe für die Geschwindigkeiten eines sich bewegenden Beobachters von $v = 0.2c$; $0.5c$; $0.8c$ aufgeführt.

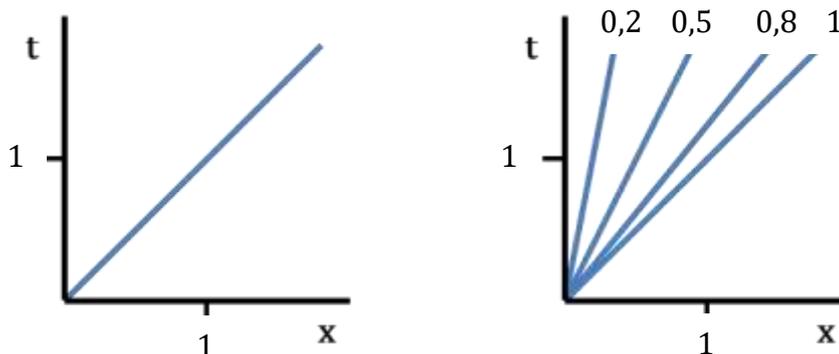


Abb. 8.4: Links: Phasengeschwindigkeit als Funktion von Zeit und Ort (normiert)
Rechts: Geschwindigkeiten eines bewegten Beobachters hinzugefügt

Hier wird klar erkennbar, dass diese Darstellung genau der Eintragung in einem Minkowski-Diagramm entspricht. Dies bedeutet, dass eine Fortpflanzung gleicher Phase (z. B. das Maximum einer Welle) auch als kurzer Lichtimpuls aufgefasst und in ein solches Diagramm eingetragen werden kann.

8.2 Auflösung des Widerspruchs durch Betrachtung der Phasengeschwindigkeit

In Abb. 8.5 ist diese Situation beispielhaft dargestellt. Die Gestaltung des Diagramms erscheint zunächst unüblich. Bei genauer Durchsicht sind aber einige wichtige Erkenntnisse hieraus abzuleiten, so dass die Details dieses Minkowski-Diagramm im Folgenden im Einzelnen diskutiert werden sollen. Da aus diesem Diagramm weitere wesentliche Folgerungen abzuleiten sind, die Übersicht aber mit der Fülle an Informationen leiden würde, sind in den Abbildungen 8.6 und 8.7 bei Nutzung der gleichen grundlegenden Grafik zusätzliche Angaben eingetragen worden, wobei dafür andere weggelassen wurden.

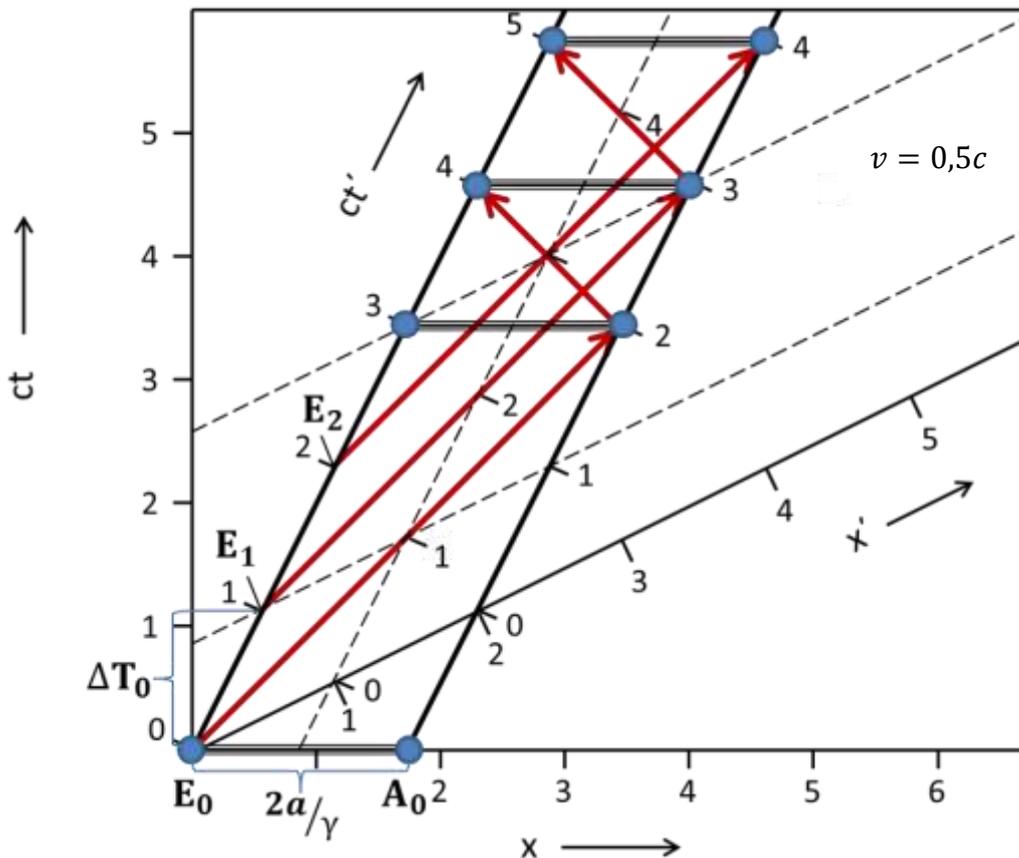


Abb. 8.5: Minkowski Diagramm zum Signalaustausch innerhalb eines bewegten Systems

Zunächst wird der Versuchsaufbau für dieses Beispiel dargestellt. Ein Labor mit der Länge $2a$ bewegt sich im Vergleich zu einem ruhenden Beobachter mit der Geschwindigkeit $v = 0,5 c$. Das Diagramm ist zur Vereinfachung der Darstellung bezüglich des Wegs und der Zeit auf 1 normiert (d. h. es gilt $a = 1$ für ein ruhendes Labor). Zum Zeitpunkt 0 beginnt der Versuchsteilnehmer am Punkt E_0 mit der Sendung einer harmonischen Schwingung von 1Hz und beginnt mit einem Maximum. Diese Schwingung wird beim Erreichen des Punktes A reflektiert und an E zurückgeschickt.

Aus Sicht des ruhenden Beobachters hat der Körper die Länge $2a/\gamma$. Da die Zeit im bewegten System langsamer abläuft, ist die Schwingung aus seiner Sicht erst bei $\Delta T_0 = \gamma$ beendet (Punkt E_1). Die nächsten Maxima starten demnach bei E_1 , E_2 usw. und können damit ebenfalls als gesonderte Impulse interpretiert werden, die in das Diagramm eingetragen wurden.

8. Konstanz der Phasengeschwindigkeit des Lichts

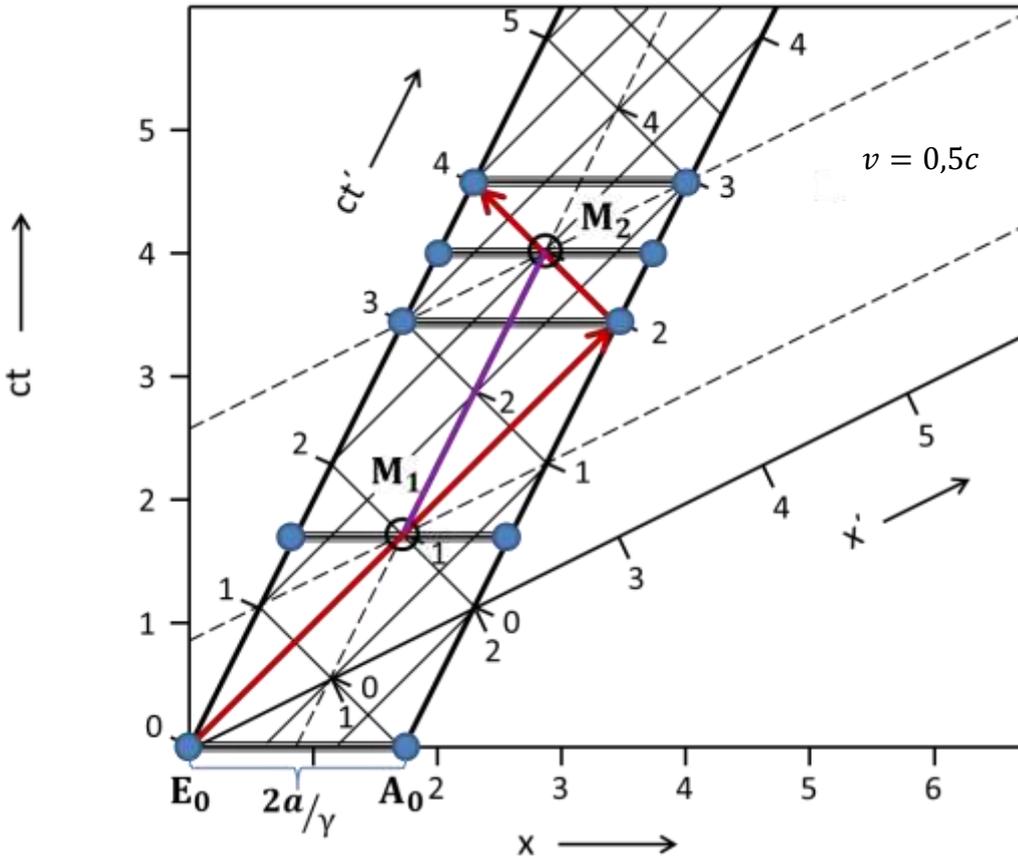


Abb. 8.6: Minkowski Diagramm zum Signalaustausch innerhalb eines bewegten Systems (Mittbereich), Variante von Abb. 8.5

Betrachtet man den Verlauf des Maximums der Schwingung, so bewegt sich diese mit $v = c$ fort und erreicht die Mitte bei

$$t_{M_1} = \frac{1}{\gamma \cdot \left(1 - \frac{v}{c}\right)} \quad (8.15)$$

(vgl. Abb. 8.6) Der Punkt A wird nach der doppelten Zeit erreicht. Nach Reflexion der Welle wird der Punkt M_2 bei

$$t_{M_2} = \frac{2}{\gamma \cdot \left(1 - \frac{v}{c}\right)} + \frac{1}{\gamma \cdot \left(1 + \frac{v}{c}\right)} = \gamma \cdot \left(3 + \frac{v}{c}\right) \quad (8.16)$$

erreicht. Dies entspricht exakt dem Wert, der sich für einen von E_2 ausgestrahlten Impuls (entsprechend dem Maximum einer Welle) ergibt

$$t_{M_2} = 2\gamma + \frac{1}{\gamma \cdot \left(1 - \frac{v}{c}\right)} = \gamma \cdot \left(3 + \frac{v}{c}\right) \quad (8.17)$$

Dies bedeutet, dass in der Mitte des bewegten Labors exakt die gleichen Bedingungen herrschen wie es bei einem unbewegten Beobachter der Fall wäre. Im unbewegten Zustand wird von E_0 ein Signal abgegeben, dass bei $t = 3$ nach Reflexion zur Mitte zurückgelaufen ist. Ein Signal, dass bei $t = 2$ von E_0 ausgesandt wird erreicht diesen Punkt zur gleichen

8. Konstanz der Phasengeschwindigkeit des Lichts

Als wesentliches Ergebnis hat sich hier also gezeigt, dass für Licht in jedem beliebig zueinander bewegten Inertialsystem die Phasenausbreitungsgeschwindigkeit von den aus einer Lichtquelle stammenden Lichtwellen gleich der in jedem System gemessenen Lichtgeschwindigkeit ist (dies gilt jedoch nicht analog für das zuvor gewählte einfache Beispiel der Oberflächenwelle des Wassers!). Die wichtige Erkenntnis aus den hier erarbeiteten Zusammenhängen ist demnach die Tatsache, dass beim Übergang von einem beliebigen Referenzsystem in ein relativ dazu bewegtes Inertialsystem bei der Betrachtung desselben Lichtstrahls nicht die Lichtgeschwindigkeit, sondern die Phasengeschwindigkeit des Lichts konstant bleibt. Es wurde klar herausgearbeitet, dass dies in eindeutiger Weise durch das Relativitätsprinzip gefordert wird und dass ansonsten Widersprüche auftreten.

In der Literatur wird die Darstellung der Phasengeschwindigkeit sehr unterschiedlich bewertet. Während sie in den meisten Literaturstellen und Lehrbüchern im Zusammenhang mit der Relativitätstheorie keine Rolle spielt, wird sie z. B. von R. K. Pathria [27] ausführlich behandelt. Hier wird auch ausdrücklich auf die „Invarianz der Phasengeschwindigkeit“ zwischen zueinander bewegten Systemen hingewiesen, aber es werden keine weiteren Schlussfolgerungen gezogen.

Obwohl die hier abgeleiteten Zusammenhänge bisher kaum Beachtung gefunden haben, sind sie von großer Bedeutung. Aus diesem Grunde müssen auch die klassischen Experimente, insbesondere die Versuche von Michelson und Morley sowie von Kennedy und Thorndike kritisch hinterfragt werden. Es zeigt sich hier, dass bei Verwendung der hier diskutierten Beziehungen andere Darstellungen gefunden werden müssen. Dies wird in Kapitel 9 ausführlich dargestellt.

Abschließend kann hier vor der Durchführung weiterer theoretischer Untersuchungen bereits ein mögliches Ergebnis dargestellt werden:

- Es ist möglich, dass sich das gesamte Universum als ein System absoluter Ruhe beschreiben lässt, in dem sich elektromagnetische Signale als Wellen mit der Lichtgeschwindigkeit c fortbewegen.
- Beobachter aus jedem beliebig darin bewegten Inertialsystem können bei diesen Wellen nur die Phasengeschwindigkeit bestimmen und werden dabei ebenfalls den Wert c messen.

Zunächst werden die hier gewonnenen Erkenntnisse auf die Neu-Interpretation klassischer Versuche angewendet. Nach weiterführenden Diskussionen wird dann in Kap. 13 ein Änderungsvorschlag zur klassischen SRT formuliert.