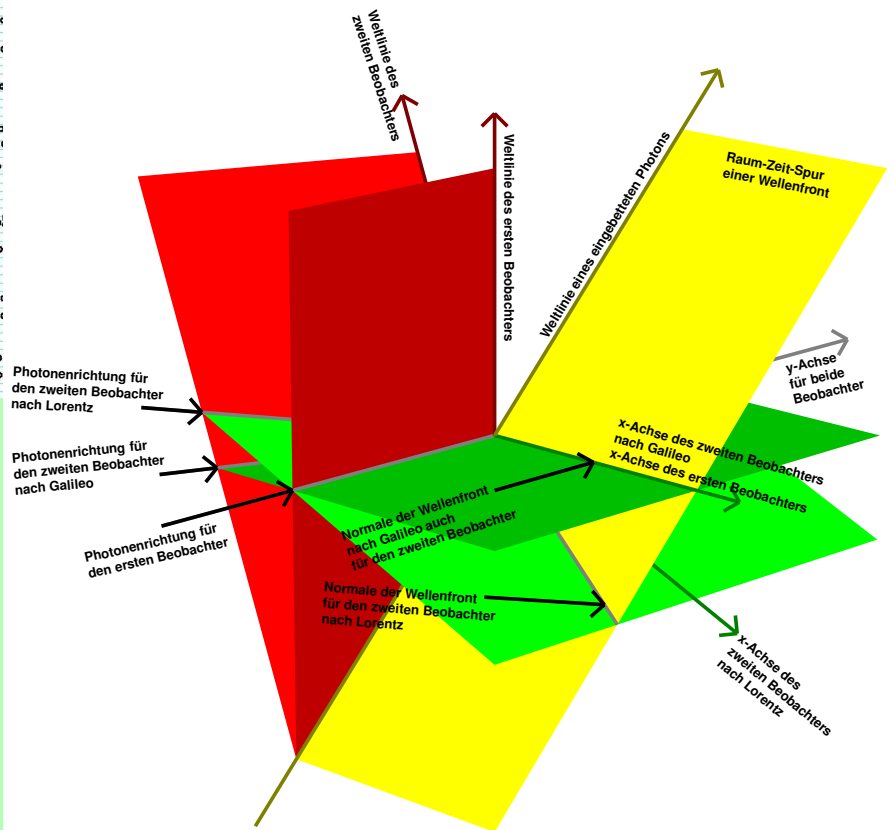


Wenn wir uns in Bewegung setzen, scheint sich der Himmel in Bewegungsrichtung zusammenzuziehen. Das ist die Aberration. Bei der Geschwindigkeit der Erde um die Sonne ( $0.0001c$ ) sind das maximal 29 Bogenminuten, aber sie zeigen, dass sich die Erde wirklich um die Sonne bewegt, und sie scheinen zu bestätigen, dass es sich beim Licht um einen Teilchenregen handelt. Wir kennen den Effekt beim Lauf durch den Regen, der immer stärker von vorn zu kommen scheint, je schneller wir uns bewegen (s.o.).

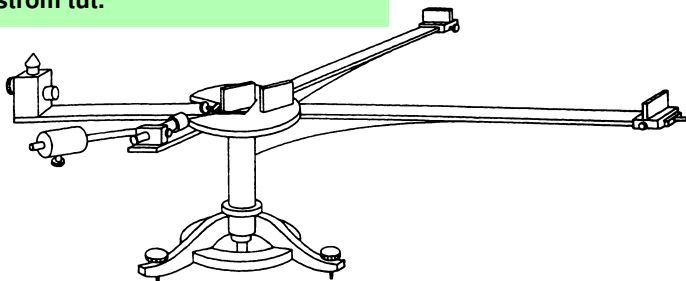


# DAS FRESNELSCHE PARADOXON

## Aberration und Relativität

Das Licht ist jedoch eine Welle, deren Fronten keine Aberration zeigen, wenn gleichzeitige Beobachtungen ein für alle Mal gleichzeitig sind. Fresnels Paradoxon ist die Tatsache, dass Wellennormalen keine Aberration zeigen, während es ein Teilchenstrom tut.

1. Fresnel schließt, dass die Aberration entsteht, weil das Objektiv eines Teleskops aus der Wellenfront ein Stück ausschneidet, das sich wie ein Teilchen benimmt. Das klappt allerdings nur, wenn die Lichtwelle wie der Schall von einem Medium, dem Äther, getragen wird, das seinerseits frei durch alle andere Materie fließt, speziell die Teleskopwände und die Erde.

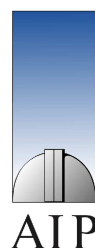


Das ist Michelsons Interferometer, wie er es im Keller unter der Ostkuppel des Astrophysikalischen Observatoriums Potsdam verwendet hat. Michelson fand keinen Effekt zur Beruhigung aller, die eine Mitnahme des Äthers selbstverständlich fanden und zur Beunruhigung aller, denen Fresnels Paradoxon noch geläufig war.

2. Michelson versucht, diese Ätherströmung mit einem Interferometer zu messen, findet aber nichts. Er schließt, dass Fresnels Äther von der Erde mitgenommen wird und Fresnels Ausrede zusammenbricht.

3. Lorentz zeigt: Eine prinzipielle Lösung setzt voraus, dass die Bestimmung der Wellennormalen auf eine bewegungsabhängige Gleichzeitigkeit zurückgreift (oben rechts: Nur wenn für den zweiten Beobachter der Raum gleichzeitiger Ereignisse gekippt ist, rollt die Wellenfront in die von der Aberration eines Photons angezeigte Richtung).

4. Einstein erkennt, dass alle Schwierigkeiten gelöst werden, wenn man von einer Konstanz (Unveränderlichkeit bei Zusammensetzung mit anderen Geschwindigkeiten) der Lichtgeschwindigkeit ausgeht. Die bewegungsabhängige Gleichzeitigkeit bestimmt dann die einzig mögliche Zeit und impliziert eine Abhängigkeit der Masse von der Geschwindigkeit.



## Das Fresnelsche Paradoxon

Die Relativitätstheorie Einsteins ist Ergebnis einer langen Entwicklung, an deren Anfang die Entdeckung der Aberration stand. Bradley fand sie 1729 auf der Suche nach der viel kleineren Parallaxe der Fixsterne. Beginnt man sich in einer Strömung zu bewegen, scheint sich die Richtung, aus der die Strömung kommt, der Bewegungsrichtung zu nähern. Bei genügend schneller Bewegung kommt sie immer genauer aus der Richtung, in die man sich bewegt. Wir kennen das vom Regen. Wenn wir stehen (und kein Wind ist), kommt er direkt von oben. Setzen wir uns in Bewegung, müssen wir den Schirm nach vorn neigen, um trocken zu bleiben.

Im Laufe des Jahres ändert die Erde ihre Geschwindigkeit gegen die umgebenden Sterne. Mit 30 km/s bewegt sie sich Ende März in Richtung des Sternbilds Schütze, Ende Juni in Richtung des Sternbilds Fische, Ende September in Richtung Zwillinge und Ende Dezember in Richtung Jungfrau. Man beobachtet, dass die Sterne in Bewegungsrichtung zusammenzurücken scheinen, wenig, ganze 30 Bogenminuten.

Bradleys Entdeckung wurde aus zwei Gründen gefeiert: Erstens bestätigte sie die seit Copernicus wieder unterstellte Bewegung der Erde um die Sonne, und zweitens bestätigte sie die Vorstellung Newtons, das Licht sei eine Art Emanation, eine Art Teilchenströmung, die von der Quelle ausgeht. Der Wert bestätigte auch Römers Wert für die Lichtgeschwindigkeit.

Nun fanden Young und Fresnel, dass für die geometrische Optik ein Wellenbild des Lichts der Emanationshypothese völlig gleichwertig ist: Die Richtung eines Lichtstrahls ist einfach senkrecht zu den Wellenfronten, und Brechung und Reflexion erklären sich mit der bekannten Huygensschen Konstruktion. Darüber hinaus kann das Wellenbild auch Interferenzerscheinungen erfolgreich erklären und voraussagen. Damit ist es dem Teilchenbild überlegen, das gerade an dieser Stelle völlig versagt.

Fresnel fiel nun auf, dass es höchst merkwürdig ist, dass Wellenfronten keine Aberration zeigen. Wenn wir den Teilchenregen der Abbildung links oben durch Wellenfronten ersetzen, ist deren Richtung ganz unabhängig von der Bewegung des Beobachters. Allerdings kann man sich helfen, wenn man das Objektiv eines Teleskops als Aperturblende ansieht, die einen begrenzten Teil der Wellenfront ausschneidet. Dieser Teil kann dann als Teilchen behandelt werden, allerdings nur, wenn man ein Trägermedium unterstellt, das die merkwürdige Eigenschaft hat, frei und ungehindert durch die Teleskopwände, die Wände des Observatoriums und die Erde selbst zu strömen. Wenn sich die Erde durch diesen Äther bewegt, schiebt sie ihn nicht zur Seite und er bleibt auch nicht in den Unebenheiten hängen. Methoden, den Ätherwind zu messen, hatte man nicht zur Verfügung, und langsam gewöhnten sich alle an diese Vorstellung, schließlich spielte sie außer bei dem winzigen Effekt der Aberration noch keine Rolle.

Michelson war der erste, der versuchen konnte, den Ätherwind zu messen. Er beherrschte als erster die interferometrischen Techniken, die auch heute noch die genauesten Messungen gestatten. Er fand aber nichts. Der Äther macht keinen Wind, er bewegt sich offensichtlich immer mit der Erde mit, wie man das von jedem anständigen Medium in Analogie zur Luft (dem Träger des Schalls) auch erwartet. Allerdings ist nun das Fresnelsche Paradoxon wieder da. Es gab zwar die Vorstellung, die Aberration könne eine Art Refraktion an einer Geschwindigkeitsschichtung des Äthers sein, aber diese Vorstellung lieferte nicht ohne weiteres die richtigen Winkel. Michelson versuchte noch lange, diese Geschwindigkeitsschichtung zu finden.

Lorentz war der erste, der das Paradoxon so lösen wollte, wie es nötig ist: ein geometrisches Paradoxon muss eine geometrische Lösung finden. Man braucht eine bewegungsabhängige Gleichzeitigkeit. Die Abbildung rechts oben zeigt das Argument. Vertikal ist die Zeit aufgetragen, die beiden horizontalen Richtungen sind in Perspektive gezeichnet und zeigen zwei räumliche Richtungen. In y-Richtung bewegt sich eine Wellenfront. Ihre Punkte haben gleiche Koordinate y, die sich im Laufe der Zeit nach größeren Werten verschiebt (gelbe Fläche). Der Schnitt dieser Fläche mit der Fläche gleichzeitiger Ereignisse (hier die dunkelgrüne) zeigt die Wellenfront zu Zeit  $t=0$ . Ihre Normale zeigt in y-Richtung. Der linke Rand der gelben Fläche zeigt die Weltlinie eines Photons. Die Richtung des Photons im Raum ist die Projektion dieser Linie aus der Bewegungsrichtung des Beobachters (der Zeitachse). Wir suchen die von der Photonenweltlinie und der Zeitachse aufgespannte (dunkelrote) Fläche und deren Schnitt mit der (dunkelgrünen) Ebene gleichzeitiger Ereignisse. Für den ersten Beobachter (vertikale Zeitachse) ist die Photonenrichtung mit der Wellennormalen identisch. Für den zweiten, bewegten Beobachter ist die Zeitachse geneigt (hier bewegt sich der zweite Beobachter für den ersten in Richtung dessen negativer x-Werte). Die neue (hellrote) Ebene schneidet die dunkelgrüne Ebene  $t = 0$  in einer anderen Richtung: das ist die Bradleysche Aberration. Der Schnitt mit der gelben Ebene hat sich nicht geändert: Wellenfronten zeigen keine Aberration (Fresnelsches Paradoxon). Die Wellennormale kann für den zweiten Beobachter nur Aberration zeigen, wenn dessen Ebene gleichzeitiger Ereignisse ( $t_2 = 0$ , hellgrün) nicht mehr mit der des ersten Beobachters ( $t_1 = 0$ , dunkelgrün) identisch ist. Die Neigung der hellgrünen Fläche, für die Wellenfrontenaberration und Photonenaberration gleich werden, hängt von der Neigung der zugehörigen Zeitachse ab. Mit der Forderung nach Zusammensetzbarkeit der Koordinatensubstitutionen findet man die Lorentz-Transformationen. Gleichzeitigkeit wird relativ. Gegeneinander bewegte Beobachter beurteilen sie verschieden.

Lorentz war vorsichtig und nannte die neue Zeit *lokal*. Einsteins Prinzip der Konstanz (d.h. Unveränderlichkeit bei Zusammensetzungen) der Lichtgeschwindigkeit ergab diese Relativität der Gleichzeitigkeit so zwanglos und universell, dass Lorentz' lokale Zeit zur einzig möglichen Konstruktion avancierte. Damit war das Fresnelsche Paradoxon endgültig gelöst und die Grundlage der Relativitätstheorie gelegt.

LORENTZ, H.A.: Simplified theory of electromagnetic and optic phenomena in moving systems, *KNAWPr* 1 (1899), 427.

MICHELSON, A.A.: Die Relativbewegung der Erde gegen den Lichtäther, Deutsche Übersetzung mit einem Vorwort von A.H.Compton und einem Nachwort von M.v.Laue *Die Naturwissenschaften* 19 (1931), 777-784.