

Fallstricke beim Thema Aberration

von

P.Brosche and D.-E.Liebscher

Version vom 12.3.98

Zusammenfassung

Die Aberration scheint eines der einfachsten Phänomene astronomischer Beobachtung zu sein und hat dennoch eine lange Geschichte der Fehlinterpretationen und des Mißverständnisses. In der Entstehungszeit der Relativitätstheorie werden die Aberration und die Mitführung des Äthers (wie sie im Michelson-Versuch festgestellt wird) immer als Gegensatz gesehen. Noch in den zwanziger Jahren glauben einige Autoren, die erwarteten Eigenschaften der Aberration als Argument gegen die Relativitätstheorie anführen zu können. Die Geschichte ist über sie zu Recht hinweggegangen, aber eine Aufklärung ihrer Irrtümer ist nirgends zu finden. So sollte es nützlich sein, die historischen Schwierigkeiten noch einmal im Zusammenhang darzustellen und ihnen eine endgültige, d.h. geometrische Form zu geben. Es ist unsere Überzeugung, daß man dabei Vieles über die Geometrie von Raum und Zeit lernen kann.

1. Einleitung

Ziel unseres Aufsatzes ist *nicht* die Darlegung eines neuen, bisher unbekanntes Sachverhalts. Vielmehr sollen die Schwierigkeiten analysiert werden, die einmal bei der Entwicklung der Vorstellungen über die Aberration aufgetreten sind und an manchen Stellen bis heute überdauert haben. Weil auch bei wissenschaftlichen Erkenntnissen die Ontogenese eine verkürzte Phylogenese ist, sollte diese Analyse sowohl lehrreich für die Wissenschaftsgeschichte als auch nützlich für die Didaktik des Themas sein.

Die Aberration des Sternenlichts wurde 1729 von Bradley [2] gefunden, der eigentlich die Parallaxe suchte. Die erwarteten Ellipsenbahnen – Projektionen der Erdbahn auf die Himmelskugel – konnte er tatsächlich nachweisen. Die Überraschung war, daß sie nicht phasengleich mit der *Position* der Erde durchlaufen wurden, sondern um drei Monate verschoben, d.h. phasengleich mit der *Geschwindigkeit* der Erde. Außerdem war ihre Hauptachse für alle Sterne gleich groß, unabhängig von den vermuteten Unterschieden ihrer Entfernung. Also mußten diese scheinbaren Bahnen als Projektion der Bahngeschwindigkeit der Erde gedeutet werden. Was Bradley gefunden hatte, war nicht die Parallaxe, sondern eine Aberration. Zu dieser Zeit glaubte man an die Teilchennatur des Lichts, und die Erklärung der Aberration als Zusammensetzung der Geschwindigkeiten von Teilchen und Beobachter lag auf der Hand. Diese Interpretation ist korrekt, aber erst die Relativitätstheorie erreicht die Eindeutigkeit dieser Interpretation, und dies in einer für sie charakteristischen Weise. In der Zeit zwischen der Entdeckung der Wellennatur des Lichts bis zur Aufgabe der Äthervorstellung lagen 100 Jahre Diskussion, deren Nachklang noch heute vernehmbar ist [143, 150].

Unsere Besprechung ist in vier Abschnitte gegliedert. Zunächst sollen als Bezug die Erklärungen dargestellt werden, die meist ohne tiefere Begründung in den Lehrbüchern gegeben werden. Dann zeigen wir, welche drei Probleme bei diesen Begründungen entstehen, eine Art irreguläre Zeitgleichung in der vorrelativistischen ballistischen Theorie, das Auseinanderfallen von Wellenfront und Strahl in der vorrelativistischen Wellentheorie und die Verführung zur Annahme einer Relativität der Bewegung von Quelle und Beobachter. In Abschnitt 4 wird die Geschichte der drei Probleme dargestellt bis schließlich in Abschnitt 5 die endgültige geometrische Darstellung erreicht ist.

Links ist der Beobachter in Bewegung. Ist das Photon noch bei S , ist er noch bei A . Die Beobachtung, d.h. das Zusammentreffen beider, findet bei O statt. Rechts sind alle Positionen auf die des Beobachters bezogen, wir befinden uns im Ruhssystem des Beobachters. Für den Beobachter hat das Teilchen die Flugrichtung SA . In einer Funkenkammer ließe sich das unmittelbar nachvollziehen. Der Winkel zwischen OS und AS ($\angle SOC$ in Abbildung 3) ist die stellare Aberration, die der bewegte Beobachter abziehen muß um auf die Richtung zu kommen, die ein bei O ruhender Beobachter feststellt. Wir können hier mit Wegen argumentieren, weil wir geradlinig gleichförmige Bewegung angesetzt haben. Bewegt sich der Beobachter irgendwie, dann gibt der letzte Moment vor der Beobachtung den Ausschlag. Das zeigt, daß hier tatsächlich Geschwindigkeiten zusammengesetzt werden.

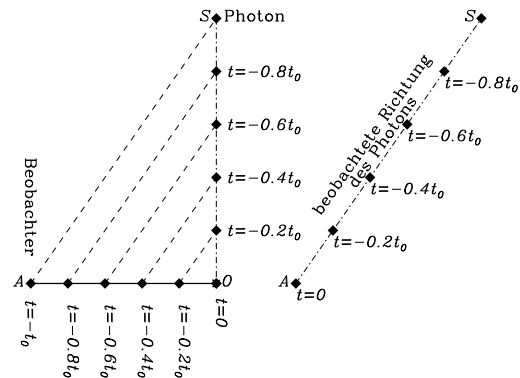


Abbildung 1: Aberration als Zusammensetzung der Geschwindigkeiten

2. Worauf wir uns beziehen

In den ersten beiden Abschnitten werden wir uns ganz auf die Vorstellung der klassischen Mechanik berufen. Die Bewegungen werden als Ablauf in einer Zeit beschrieben, die fraglos unveränderlich fließt und deren Messung unabhängig von anderer Physik nicht besonders diskutiert werden muß. Im dritten Abschnitt werden wir dann das Argument der Relativitätstheorie zitieren, daß sich Geschwindigkeiten nicht mehr additiv zusammensetzen. Das hat dann Auswirkungen auf die Definition der Zeit, diese spielen aber erst im Abschnitt 4.3 eine Rolle.

2.1. Die Zusammensetzung der Geschwindigkeiten

Bradley interpretierte die Beobachtung als Einfang von Teilchen, die vom Stern kommen und die gegen das Sonnensystem eine bestimmte Richtung und Geschwindigkeit haben. Beobachtet man von der wechselnd bewegten Erde aus, muß diese Geschwindigkeit mit der momentanen Geschwindigkeit der Erde zusammengesetzt werden, damit die auf der Erde beobachtete Geschwindigkeit ermittelt werden kann. Dies ist genau in dem Sinne, in dem Galilei und Huygens bereits argumentierten, wenn sie auf die Beschreibung der Naturvorgänge von zueinander bewegten Beobachtern zu sprechen kamen. Es ist dabei zunächst unerheblich, wie die Geschwindigkeit der Teilchen selbst zustandekommt. Abbildung 1 zeigt eine solche Zusammensetzung. Der Winkel zwischen den Richtungen OS und AS ist die *stellare* Aberration. *Für den Vergleich der von verschiedenen Beobachtern festgestellten Richtungen ist nur Weg und Geschwindigkeit des Teilchens, nicht aber die Geschwindigkeit der Quelle von Belang.* Von der Herkunft des Teilchens müssen wir nichts wissen, wenn sein Weg zu uns einmal gegeben ist. Das schließt nicht aus, daß die Lage des Ereignisses S durch das Ereignis O und die Geschichte (Weltlinie) der Quelle bestimmt ist, so wie gegebenenfalls auch eine geeignete Strahlrichtung an der Quelle vorausgesetzt werden muß, damit uns das Teilchen überhaupt erreicht. Aber wenn wir es einmal beobachten, hatte eben alles seine Richtigkeit.

Der Verlauf der Geschwindigkeit der Erde auf ihrer Bahn um die Sonne zeichnet sich als Aberrationsellipse auf die scheinbare Himmelskugel. Die Aberrationsellipse zeigt die Geschwindigkeitsverhältnisse. Sie ist unabhängig von der Entfernung der Sterne. Abbildung 2 vergleicht die Phasenlage von Aberration und Parallaxe.

Wenn man Entfernung und Geschwindigkeit der beobachteten Lichtquelle selbst kennt (wie das in gewissem Maße bei den Planeten der Fall ist), dann kann man auf die Position B der Quelle schließen, die diese zum Zeitpunkt der Beobachtung einnimmt (Abbildung 3). Die Richtung zu diesem hypothetischen Ort kann

Sirius steht südlich der Ekliptik und hat im Sommer die gleiche ekliptikale Länge wie die Sonne. Im Herbst steht er auf Grund der Parallaxe östlich seiner mittleren Position, im Frühjahr westlich. Im Sommer scheint er ein wenig näher der Ekliptik als im Winter, die Korrektur ist aber nicht ganz so groß, da nun der Sinus der ekliptikalen Breite einght. Die stellare Aberration dagegen ist am größten gerade im Sommer und im Winter, da dann die Geschwindigkeit der Erde quer zur Sichtichtung verläuft. Die Aberration verändert dabei die ekliptikale Länge. Im Frühjahr und im Herbst geht wieder der Sinus ein, die Aberration verändert die ekliptikale Breite. In der Abbildung sind beide Ellipsen gegen den Abstand von der Ekliptik ($\approx 40^\circ$) stark vergrößert, die Halbachse der Aberrationsellipse ist $20.51''$, die der Parallaxenellipse sogar nur $0.377''$. Während aber die Aberrationswinkel absolut gemessen werden müssen, kann man die Parallaxe relativ zu den Sternen der Umgebung bestimmen.

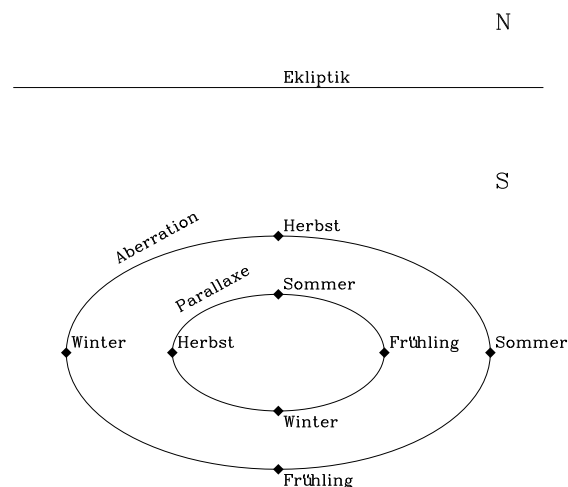


Abbildung 2: Die Phasenlage von Aberration und Parallaxe für Sirius

Dies ist eine um die Bewegung der Quelle erweiterte Darstellung des Bradleyschen Arguments [65]. Wie auch in Abb. 1 bewegt sich das Signal von S nach O . Der Stern befindet sich zur Zeit $t = -t_0$ bei S und bewegt sich dann nach B . Der Beobachter empfängt das Signal bei O . Zum Zeitpunkt der Emission befindet er sich noch bei A . Der bewegte Beobachter stellt die Richtung $AS = OC$ fest. OS ist die Richtung, die ein in unserer Ebene bei O ruhender Beobachter sieht.

Kennen wir die Retardierung t_0 und die Geschwindigkeit und den Abstand der Quelle, können wir auf die Richtung OB zur Position B der Quelle zum Zeitpunkt der Beobachtung schließen. Der Winkel $\angle BOS$ heißt *planetare* Aberration. Stellare und planetare Aberration kompensieren sich (d.h. $\angle B^*OC = 0$), wenn der Stern bei $t = 0$ eine Position B^* auf der Verbindungslinie OC erreicht hat. Dann ist die Bewegung der Quelle im Bezugssystem des Beobachters radial, d.h. in der Vergangenheit findet sich ein Punkt Q , wo sich (bei gleichförmiger Bewegung) Beobachter und Quelle getroffen haben.

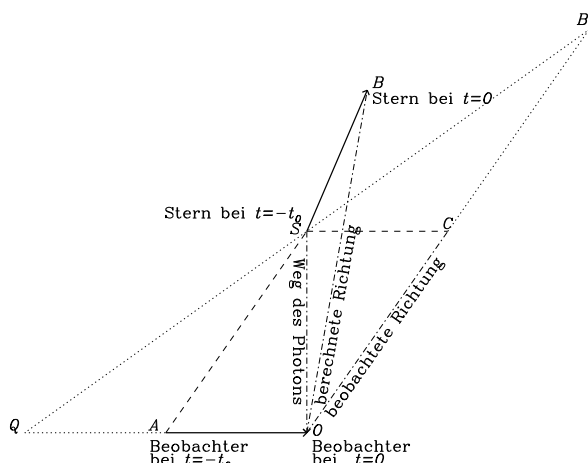


Abbildung 3: Stellare und planetare Aberration

mit der beobachteten Richtung (zu dem Ort S , den die Quelle zur Zeit der Emission des Lichts einnimmt) verglichen werden. In Abbildung 3 ist dies der Winkel $\angle BOS$. Er heißt aus den erwähnten Gründen *planetare* Aberration. Er ist für die Bahnbestimmungen wichtig und spielt bei der späteren Behandlung der Relativität von Quelle und Beobachter eine Rolle.

Die Zusammensetzung beider Aberrationen führt auf die Abweichung der beobachteten von der berechneten Richtung, den Winkel $\angle BOC = \angle BOS + \angle SOC$ (die Vorzeichen der Winkel sind zu beachten). Ihn nennen wir *zusammengesetzte* Aberration.

2.2. Wellenfronten

Wir zeigen links eine Kugelwelle mit isotroper Ausbreitung. Auf der Wellenfront ist der Ort einer Struktur (Wellengruppe, Photon, Signal) markiert. Rechts ist der Ausbreitung die Ortsveränderung eines bewegten Beobachters überlagert. Die Orientierung der Wellenfront zum Zeitpunkt der Beobachtung zeigt keine Aberration, wohl aber die Bewegungsrichtung des Photons.

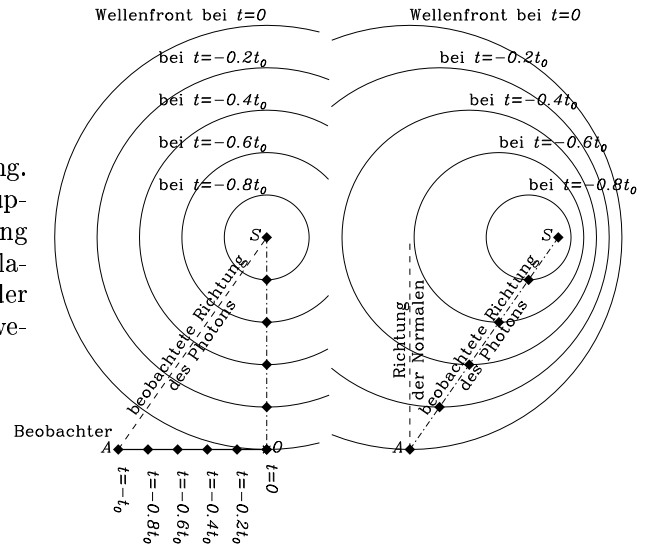


Abbildung 4: Die Kugelwelle für einen Beobachter in Bewegung

Bewegt sich ein strukturloses Teilchen, dann ist die Geschwindigkeit die einzige Orientierung, an der eine Richtung auszumachen ist, und die Richtung zeigt wie eben besprochen Aberration. Geht es dagegen um Wellenausbreitung, ändert sich das Bild. Ein an einem gegebenen Ort zu einem gegebenen Zeitpunkt emittiertes Signal pflanzt sich dann im einfachsten Fall als kugelförmige Wellenfront mit richtungsunabhängiger Geschwindigkeit durch den Raum fort. Vom Standpunkt eines sich gegen diese Wellenfront bewegendes Beobachters wird der Ausbreitung die Ortsveränderung des Beobachters überlagert. Zu jedem Zeitpunkt ist die Wellenfront eine Kugel. Ihr Radius wächst gleichförmig mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle. Der Mittelpunkt aber bewegt sich nun relativ zum Beobachter (Abb. 4). Die Richtung der Wellenfront zu einem gegebenen Zeitpunkt ist geometrisch eine Orientierung im Raum *zu einem festen Zeitpunkt* und *keine* Geschwindigkeit. Sie kann sich deshalb auch nicht mit anderen Geschwindigkeiten zusammensetzen. Die Geschwindigkeit eines Beobachters kann keine Rolle spielen, solange die Bedingung *zu einem Zeitpunkt* für alle Geschwindigkeiten dasselbe bedeutet: Für die Wellenfront gibt es keine Aberration.

Es gibt aber die Möglichkeit, daß auf der Wellenfront eine besondere räumlich begrenzte Struktur unterschieden und damit gemessen werden kann. Solch eine begrenzte Struktur (Signal, Photon) ist ein teilchenartiges Gebilde. Es hat eine richtige Geschwindigkeit und zeigt dann auch Aberration.

In direktem Zusammenhang zur Unterscheidung zwischen Signalrichtung und Phasenflächennormalen steht die Aberration des scheinbaren Ortes der Sonne gegen die Richtung der Schwerkraft. Die letztere wird durch die in der Zeit unveränderten Äquipotentialflächen des solaren Schwerfeldes gegeben und zeigt keine Aberration [159].

2.3. Relativitätstheorie

Die Relativitätstheorie gestaltet die geometrischen Relationen von Raum und Zeit in Übereinstimmung mit der Beobachtung, daß die Lichtausbreitung für jeden Beobachter¹ richtungsunabhängig ist [60]. Die Lichtgeschwindigkeit setzt sich daher nicht mehr additiv mit anderen Geschwindigkeiten zusammen. Vielmehr leitet man aus der universellen Isotropie der Lichtausbreitung das Einsteinsche Additionstheorem der Geschwindigkeiten ab. Für den praktischen Fall der Bradleyschen Aberration ergeben sich dabei nur sehr kleine Korrekturen.

Was sich ändert, ist das Verhalten der Wellenfronten. Die Normalen der Wellenfronten zeigen nun die gleiche Aberration wie Teilchen oder Wellengruppen. Die Relativität der Gleichzeitigkeit – Korollar zur Ein-

¹d.h. in jedem inertial und nichtrotierend bewegten Bezugssystem

steinschen Zusammensetzung der Geschwindigkeiten wie auch zur universellen Richtungsunabhängigkeit der Lichtausbreitung – erreicht, daß man alle Probleme der Ausbreitung vergessen und das Bradleysche Bild akzeptieren kann [137]. Das werden wir im Folgenden noch geometrisch verdeutlichen.

3. Drei Probleme, drei Fallen

Wir kommen nun zu den Fragen, die die vorgestellten Veranschaulichungen der Aberration offen lassen, und zur Geschichte ihrer Mißverständnisse. Zunächst war man sicher froh, die Aberration in einem Bild strömender Teilchen erklären zu können, so wie es Bradley auch tat. Wenn das Licht aber aus Teilchen (nennen wir sie Photonen, auch wenn das hier anachronistisch ist) besteht, die vom Stern emittiert werden, dann ist es natürlich, eine feste Geschwindigkeit dieser Teilchen *relativ zum Stern* anzunehmen. Die Geschwindigkeit, die die Partikel im Sonnensystem haben, wird dann von der Relativgeschwindigkeit zwischen Sonne und Stern abhängen, allerdings auf nicht ganz einfache Weise, weil der Emissionszeitpunkt von der am Stern vorzuhaltenden Richtung und Geschwindigkeit selbst abhängt (Abb. 5) und ebenfalls die Bewegungsrichtung der Photonen im Sonnensystem beeinflusst. Beobachten wir den Begleiter eines Sterns, dessen Bahn stark gegen die Sichtlinie geneigt ist, dann wechselt Entfernung und Annäherung an den Beobachter miteinander ab. Photonen der Annäherungsphase sind aber auf dem Wege zu uns schneller als die Photonen aus der Entfernungsphase und können diese u.U. einholen und überholen (Abb. 6). Es sollte also Fälle geben, bei denen wir einen solchen Begleiter zu verschiedenen Emissionszeiten (und -orten) gleichzeitig sehen [68]. In der Abbildung 7 sind vier Fälle einer gleichförmigen Kreisbewegung dargestellt, wie sie von einem entfernten Beobachter in der Ebene dieser Kreisbahn gesehen werden, wenn die Strahlung aus Teilchen besteht, die von der Quelle in deren Ruhssystem isotrop abgestrahlt werden. Bei Elongation nach rechts bewege sich der Stern auf uns zu, seine Strahlung kommt dann hier etwas früher an, bei Elongation links bewegt er sich von uns weg, die Strahlung verspätet sich. Wir müssen also Korrekturen an dem einfachen Bild erwarten. Sie sind nicht zu sehen: ist deshalb die ballistische Theorie falsch? Erst die Relativitätstheorie sagt, sie ist unerheblich. Bleiben wir aber befangen in der vorrelativistischen Teilchenmechanik, ist sie falsch.

Geben wir aber die ballistische Theorie auf, gähnt ein neues Loch. Vergleichen wir nämlich das Licht mit dem Schall, dann fällt als erstes auf, daß Wellenfronten keine Aberration zeigen. In einer Physik mit absoluter Gleichzeitigkeit gibt es generell keine Aberration der Phasenflächennormalen. Hätte man Phasenflächennormalen zur Zeit Fresnels durch Beobachtung bestimmen können, wäre das Ergebnis – eine tatsächliche Aberration, wie sie die Relativitätstheorie auch für Phasenflächennormalen begründet – ein direktes Argument gegen die Wellentheorie gewesen, die ja eine solche Aberration noch nicht kannte. Erst die Relativitätstheorie richtet dieses Problem.

Nun hat die Relativitätstheorie eins wieder deutlich ins Bewußtsein gerückt: Nur Relativgeschwindigkeiten können beobachtbare Folgen haben. Das gilt auch schon in der *vor-relativistisch* genannten Newtonschen Mechanik. Dort aber taucht eben in der Wellentheorie der unfaßbare Äther auf und scheint einen physikalisch wesentlichen, universellen Bezug bereitzustellen. Das heißt, nicht nur die Relativgeschwindigkeiten der realen Objekte sind von Bedeutung, sondern auch ihre Geschwindigkeiten in Bezug auf diesen Äther. Die Relativitätstheorie zeigt gerade, wieso das eine Chimäre ist und der Bezug auf einen Äther aus aller Physik herausfällt. Das ist der eigentliche Sinn der Aussage, daß nur Relativgeschwindigkeiten auftreten können.

Assoziiert man jedoch diese globale Aussage ohne weitere Vorsicht mit der Aberration, sollte man erwarten, daß die Aberration eine Folge der Relativgeschwindigkeit von Quelle und Beobachter ist. Dann sollte es aber auch eine Komponente der Aberration geben, die von der Bewegung der Quelle herrührt und gewöhnlich *aktive* Aberration genannt wird. Dieser Schluß ist die dritte Falle, die auch die Relativitätstheorie nicht beiseitigt. Gäbe jedoch es diese Art Relativität, könnte man Doppelsternbahnen auch noch in den entferntesten Galaxien sehen. Das geht so. Argumentieren wir mit einer Relativität von Quelle und Beobachter, müßte sich auch die Geschwindigkeit von Doppelsternen um ihren gemeinsamen Schwerpunkt als Aberrationsellipse zeigen (*aktive* Aberration) und der irdischen überlagern. Auch diese aktive Aberration wäre unabhängig von der Entfernung. Der von Hulse und Taylor entdeckte Doppelpulsar PRS 1914+16 hat eine Bahngeschwindigkeit von etwa 160 km/s. Er müßte eine Aberrationsellipse von 100" an den Himmel zeichnen und diese alle acht Stunden einmal durchlaufen! Befände er sich im Andromeda-Nebel, würde das nichts ändern. Die Erwartungen sind also gewaltig, es ist aber nichts zu sehen.

Zum Zeitpunkt $t[S]$ sendet die Quelle ein Signal, das zum Zeitpunkt $t[O]$ empfangen wird. Für ballistische Signale zählt die Emissionsgeschwindigkeit $c = (x[Q] - x[P]) / (t[P] - t[S])$. Wenn nur das Beobachtungsereignis O , die Emissionsgeschwindigkeit c und die Weltlinie der Quelle gegeben ist, kann die Bestimmung von S kompliziert und auch nicht eindeutig werden. Ist S einmal gefunden, verliert der Rest der Weltlinie der Quelle seine Bedeutung. Er hat im allgemeinen auch nichts mit dem Punkt B zu tun, der die Position der Quelle anzeigt, die man erwarten könnte, wenn sich die Quelle geradlinig und gleichförmig bewegte.

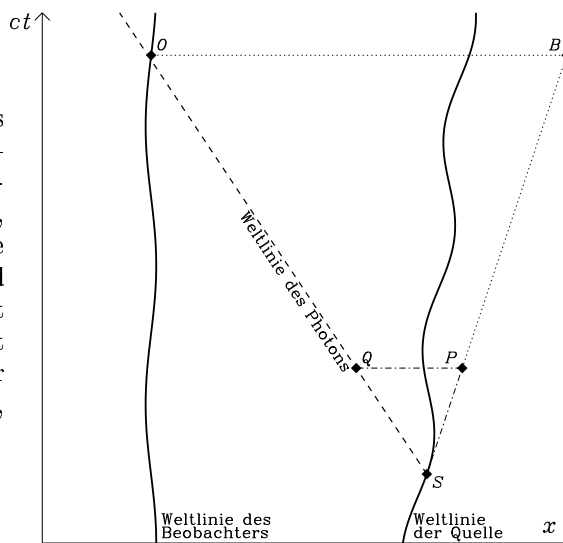


Abbildung 5: Die Bestimmung des Emissionsereignisses.

4. Die Entwicklung der Problemsicht

4.1. Ballistische Theorie

Ist das Licht ein ballistischer Teilchenstrom, dann müssen wir erwarten, daß die Geschwindigkeit einerseits relativ zum Stern zählt und andererseits von den physikalischen Bedingungen auf der Sternoberfläche abhängt. Schließlich muß die Farbe des Lichts modelliert werden. Es liegt nahe, diese mit der Geschwindigkeit korreliert zu sehen, wenn man an den Doppler-Effekt denkt, der eine Rotverschiebung liefert, wenn sich Quelle und Beobachter voneinander entfernen.

Michell hat als erster ins Auge gefaßt, daß die Emissionsgeschwindigkeit der Licht-Partikel vom Schwerfeld des Sterns abhängen könnte [6, 173]. Soldner [14] schreibt explizit: *Strömt das Licht von verschiedenen Sternen nicht mit verschiedener Geschwindigkeit aus; und haben diese daher nicht verschiedene Aberrationen?* Die Bradleyschen Aberrationsellipsen sollten verschiedene Größe haben, weil die Geschwindigkeit, auf die die Bewegung des Beobachters bezogen werden muß, vom Schwerfeld des Sterns abhängig sein soll. Diese Verschiedenheit indiziert nun nicht unterschiedliche Entfernung, sondern unterschiedliches Gravitationsfeld. Die Aberrationsellipse wäre in jedem Falle wegen der Phasenlage noch als Geschwindigkeitsellipse erkennbar (Abb. 2).

Effekte der Relativbewegung auf Intensität und Farbe des Sternenlichts wurden bereits von F.v.Hahn [161] und Doppler [21] vermutet. Sie sind in jedem Fall nur von der Ordnung v/c und damit viel kleiner als die Phasenverschiebungen des Bahn, wo der kleine Faktor v^2/c^2 durch das Verhältnis d/r vergrößert wird (Abschnitt 5.1.).

Am deutlichsten wird der ballistische Charakter, wenn man die Teilchengeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Bewegung des Sterns ansieht und sich die daraus entstehenden Unterschiede der Ankunftszeit auf der Erde ansieht (Abb. 5-7). Für Olaf Römer waren das noch kleine Korrekturen gegen die Zeit, die das Licht zum Durchqueren der Erdbahn brauchte. Zitieren wir aber wieder das Beispiel des Doppelpulsars PRS 1914+16, so müßte er zuzeiten mehrfach zu sehen sein. Schon 1792 schlug Schröter [12] vor, die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit durch genauere Beobachtung der Jupitermonde und ihren Vergleich mit den Saturnmonden zu entscheiden. Die zeitlichen Verschiebungen in der scheinbaren Bahn wurden gelegentlich auch als Verletzungen des Keplerschen Flächensatzes interpretiert.

Vermutet man etwa wie Lichtenberg 1792 [189] eine farbabhängige Abstrahlgeschwindigkeit, muß man für jede Farbe eine andere Kurve erwarten. Der Stern kann dann nicht als Punkt auf seiner Bahn erscheinen,

Ist der Beobachtungsort und die Beobachtungszeit gegeben, dann kann die Bestimmung des Emissionsereignisses bei ballistischen Signalen mehrdeutig sein. In unserer Zeichnung hat die Quelle eine periodische Bewegung mit radialer Komponente (nur diese ist gezeichnet). Im Bereich zwischen A und B sieht der Beobachter die Quelle zu drei verschiedenen Emissionszeiten und an drei Orten gleichzeitig.

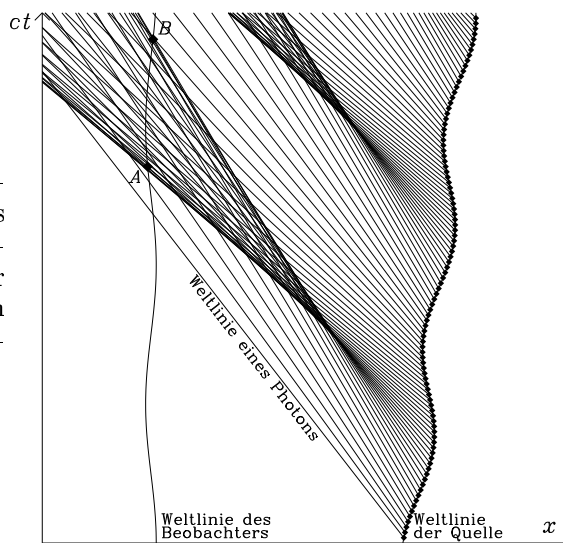


Abbildung 6: Mehrfachbilder bei ballistischer Teilchenstrahlung

Die scheinbare Bewegung wird in einer Art graphischen Fahrplan dargestellt, wie er u.a. in astronomischen Kalendern für die Jupitermonde benutzt wird.

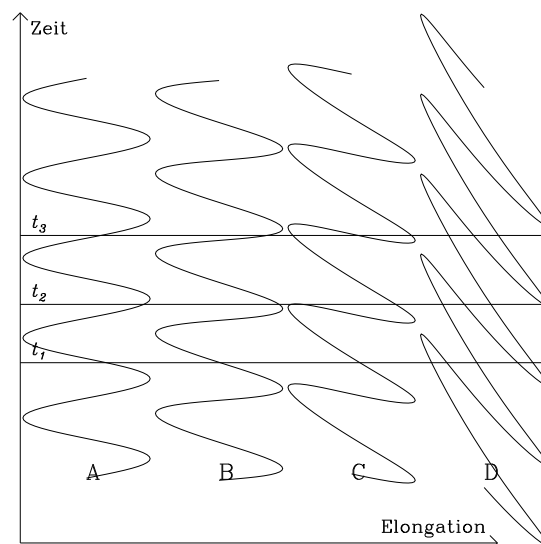


Abbildung 7: Die scheinbare Bewegung eines Sterns auf einer Kreisbahn.

sondern als zeitlich variables Spektrum, das sich über die gesamte scheinbare Bahn erstrecken kann.

Schon um 1800 gab es alle notwendigen astronomischen Beobachtungen, um eine ballistische Theorie astronomisch auszuschließen: Man kannte Doppelsterne, auch enge, hatte eine Abschätzung für die Entfernung der Sterne seit Huygens [164], damit auch eine Abschätzung der Bahngeschwindigkeit über das dritte Keplersche Gesetz. Das Fehlen der so extremen Zeitgleichung hätte schon bemerkt werden können.

Das Ausbleiben all dieser Beobachtungen [68, 79, 83, 160] war das stärkste astronomische Argument gegen die ballistische Lichttheorie [80, 86], obwohl man es auch wenden kann: Aberration entsteht durch Zusammensetzung der Geschwindigkeiten. Wenn also die Aberration immer gleiche Größe hat und wir an der ballistischen Theorie festhalten wollen, muß die Zusammensetzung der Geschwindigkeiten geändert werden².

²Mohorovičić [120] fehlt nur ein Schritt zur Feststellung, daß ballistische Theorie plus feste Aberration auf die Einsteinsche Zusammensetzung der Geschwindigkeiten schließen läßt. Aber er ist eben befangen in Vorbehalten gegen die Relativitätstheorie.

Setzen wir für den eindimensionalen Fall

$$c \oplus v = (c + v) \cdot f[c, v] = c$$

an, finden wir [190]

$$c \oplus v = \frac{c + v}{1 + v/c}.$$

Das ist aber schon fast die Einsteinsche Zusammensetzung der Geschwindigkeiten.

4.2. Undulationstheorie

Young [15, 17] und Fresnel [20] hatten am Anfang des 19. Jahrhunderts entscheidende Argumente gefunden, daß das Licht eine Wellenerscheinung ist, die sich analog zum Schall ausbreitet. Der eben besprochene Effekt der ballistischen Asymmetrie der maximalen Elongation wird dann sofort gegenstandslos, weil die Geschwindigkeit des Signals nicht mehr von dem der Quelle abhängt. Nun gilt für so eine Ausbreitung ebenfalls eine Zusammensetzung der Geschwindigkeiten. Wenn ein Beobachter eine richtungsunabhängige Ausbreitungsgeschwindigkeit feststellt, wird ein anderer in relativer Bewegung feststellen, daß die ihm entgegenkommenden Wellen schneller und die ihn überholenden langsamer sind. Setzen wir Geschwindigkeiten additiv zusammen, dann gibt es nur einen Bezug, für den die Ausbreitung richtungsunabhängig sein kann. Für den Schall ist dies das Ruhssystem des Mediums (der Luft, des Wassers, des festen Körpers). Deshalb hat man versucht, sich das Bezugssystem richtungsunabhängiger Lichtausbreitung ebenfalls als Medium vorzustellen. Dieses Medium nannte man Äther. Es ist zunächst fiktiv, nur als Analogon gedacht. Hat es materielle Eigenschaften wie Gewicht, Zähigkeit, Volumenverdrängung? Das waren viel diskutierte Fragen, auf die wir hier nicht eingehen wollen. Wir müssen ihm nur eine Geschwindigkeit zuschreiben, sonst nichts [94].

Die Unterscheidung von Phase und Wellengruppe (Signal, Quasiteilchen) ist wichtig³. Das hat bereits Fresnel gesehen. Zunächst ist er wohl ob der fehlenden Aberration der Phasenflächen ratlos. In einem Brief an seinen Bruder [18] schreibt er: *La plus forte preuve en faveur de l'opinion de Newton est, je crois, l'aberration des étoiles. Je conçois vaguement comment on pourrait expliquer la réfraction et surtout les accès de facile réflexion et de facile transmission dans l'hypothèse des vibrations, mais je ne vois pas comment on expliquerait l'aberration.* Doch dann findet Fresnel eine Interferenzbetrachtung, die - wie wir es heute nennen würden - die Wellengruppe ins Spiel bringt. Die Wellenfront, die ohne Aberration auf das Objektiv fällt, interferiert in einem Punkt, der durch die Bewegung des Äthers aus dem Ruhefocus herausgeschoben wird (Abb. 8). Die Abweichung ist die bekannte stellare Aberration. Das Objektiv schneidet aus der Wellenfront eine Struktur heraus, die sich selbst quasi wie ein Teilchen bewegt.

Bei dieser Ableitung muß eine *universelle* Geschwindigkeit des Äthers angenommen werden. Man könnte nun den Äther einfach als immaterielles Bezugssystem ansehen und das zunächst für problemlos halten. Allerdings erlaubt es die Existenz eines besonderen Bezugssystems mit richtungsunabhängiger Lichtausbreitung, eine Geschwindigkeit gegen diesen Bezug zu messen. Sieht man das Relativitätsprinzip als Forderung an, daß nur Relativgeschwindigkeiten zwischen materiellen Objekten meßbare Folgen haben dürfen, muß diesem Bezugssystem auch ein materieller Körper entsprechen. Nicht zuletzt aus diesem Grunde war es damals unmöglich, sich von stofflicher Vorstellung zu lösen. Die Folgerung aber, daß der Äther unbehindert und frei durch die festesten Körper (Linse, Teleskop, Erde) strömt, war ein Skandal. Diese Diskussion ist heute erledigt, was bleibt, ist die Erkenntnis, daß es in einer Wellentheorie - wenn die universelle Gleichzeitigkeit außer Frage steht - keine Aberration der Normalen der Wellenflächen gibt. Die Interferenz im Teleskop erst mißt die additive Zusammensetzung der Geschwindigkeiten, wie wir sie aus dem Teilchenbild kennen. Könnten wir den tatsächlichen zeitlichen Verlauf der Erregung an den verschiedenen Punkten des Objektivs messen, wie das etwa bei der VLBI vollbracht wird, sähen wir den Unterschied sofort. Verschieden konstruierte Teleskope sehen unter Umständen verschiedene stellare Aberration. Das liegt einfach daran, daß der Konstrukteur verschiedene Kombinationen der Messung von Strahl und Phasenflächen bewußt oder unbewußt konzipieren kann. Gleiche scheinbare Sternpositionen gibt es dann nur für Beobachter, die im Äther ruhen.

³O.Lodge versucht sogar, die Aberration als Unterschied der Richtung von Signal und Phasenflächennormale zu definieren [74]. Das geht so aber nicht. Wie wir noch sehen werden, zeigt die Relativitätstheorie, daß diese Aberration für Licht nicht existiert.

In der linken Hälfte der Abbildung ist die Wellenausbreitung isotrop, in der rechten Hälfte weht der Äther mit einer bestimmten Geschwindigkeit von rechts heran. Wir sehen die nach Huygens konstruierte Bewegung einer Wellenfront, die bei ihrer Bewegung nach unten durch das Objektiv verzögert wird und dadurch einen Brennpunkt F erreicht. In der linken Hälfte ist die Bewegung wegen der Isotropie der Lichtausbreitung symmetrisch, wir finden die erwartete Lage des Brennpunkts. In der rechten Hälfte werden die Wellenfronten mit fortschreitender Zeit immer mehr nach links verschoben, der Brennpunkt findet sich in einer Lage, die sich aus der auch im Teilchenbild verwendeten Zusammensetzung der Geschwindigkeiten ergibt.

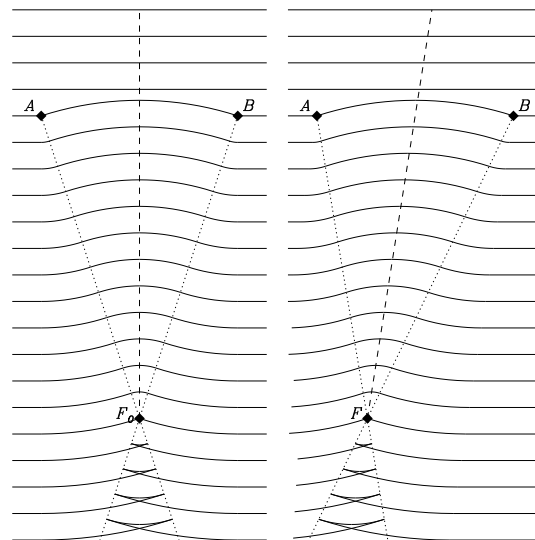


Abbildung 8: Aberration im Wellenbild.

Beschränkt man sich auf die Beobachtung von Wellengruppen, hat man ein Teilchenbild. Wellengruppen sind räumlich begrenzt, und ihre Geschwindigkeit setzt wie die Geschwindigkeit gewöhnlicher Teilchen mit anderen Geschwindigkeiten zusammen. Das tut die Phasengeschwindigkeit auch, aber Wellenfronten werden zu einem gegebenen Zeitpunkt und nicht in ihrer Bewegung beobachtet (Abb. 4). Wellengruppen dagegen werden durch zwei Positionen (etwa Objektiv und Brennpunkt) markiert, die nacheinander durchlaufen werden. An Wellengruppen beobachten wir also die bekannte Aberration ohne Abstriche. Der Unterschied zur ballistischen Theorie ist nur, daß die Geschwindigkeit der Wellengruppen vom Äther diktiert wird, nicht vom Ruhssystem der emittierenden Quelle. Das hat seine Auswirkung auf die Bestimmung des beobachteten Emissionszeitpunkts. Mehrfachbilder in einem Doppelsternsystem – wie aus Abbildung 7 ersichtlich – hat man nicht mehr zu erwarten.

Fresnels Vorstellung vom Zustandekommen der Aberration war nicht unumstritten. Zu fremd erschien die Voraussetzung eines alles durchdringenden, unbehindert strömenden Äthers. Darüber hinaus sollte sich die Lage des verschobenen Brennpunkts noch einmal ändern, wenn das Teleskop mit einem brechenden Medium gefüllt wird. Dann wird ja die Phasengeschwindigkeit herabgesetzt, was eine Vergrößerung des Aberrationswinkels zur Folge haben sollte. Airy führte das Experiment einem alten Vorschlag von Boscovich entsprechend mit einem wassergefüllten Teleskop durch. Sein Ergebnis war negativ. Wieder war man zu einer Entschuldigung gezwungen. In Medien mit Brechungsindex ungleich 1 werde der Äther teilweise mitgeführt. Diese Mitführung konnte nun von Fizeau in direkter Geschwindigkeitsmessung bestätigt werden, aber man war dennoch in der Klemme. Wie soll nun die freie Strömung durch den Erdkörper und die Teleskopwände funktionieren? Ja wenn der Äther ein kompressibles Gas wäre, das eben dichter ist, wo es langsamer strömt, aber gerade Kompressionsschwingungen (longitudinal polarisiertes Licht) gab es nicht.

Doppler [25] rückt das Problem der fehlenden Aberration der Phasenflächennormalen wieder deutlich ins Licht. G.G.Stokes [26, 47] versucht, eine Aberration der Phasenflächennormalen selbst zu konstruieren. In seiner Erklärung wird der Äther von der Erde mitgeführt, er strömt also nicht durch die Erde hindurch, sondern mehr oder weniger weit um die Erde herum. Die stellare Aberration ist dann nicht ein Effekt des bewegten Beobachters, sondern ein Effekt des lokal mitbewegten Äthers. Beim Übergang des Lichts aus einem Gebiet ruhenden Äthers in ein Gebiet, wo sich der Äther bewegt, findet eine Art Brechung statt. Die Aberration ist hier also eine Art geschwindigkeitsabhängige anomale Refraktion der Ätherhülle der Erde, die sich mit der Erde durch den weiter ruhenden Äther des tiefen Raumes bewegt. Das Brechungsgesetz läßt sich einfach bestimmen (Abb. 9), und es ist ziemlich merkwürdig: Es läßt sich nicht mit einem einheitlichen Brechungsindex beschreiben. Man könnte sagen, daß der Brechungsindex vom Einfallswinkel abhängt. Bei senkrechtem Einfall ist er immer Eins. Soll diese Brechung etwas zur Aberration beitragen, müssen die Grenzschichten,

Oberhalb der horizontalen Diskontinuität entlang der Linie AB sei der Äther in Ruhe, unterhalb der Linie bewege er sich nach links mit der konstanten Geschwindigkeit v . Eine Wellenfront läuft mit dem Einfallswinkel α von oben gegen diese Linie. In der durch $ct = CB$ gegebenen Zeit t haben wir einen Halbkreis gleichen Radius um A zu zeichnen und ihn darauf um $AE = vt$ nach links zu verschieben. Huygens' Konstruktion ergibt also das Brechungsgesetz

$$\sin \beta = \frac{EF}{EB} = \frac{ct}{vt + ct/\sin \alpha} = \frac{\sin \alpha}{1 + \frac{v}{c} \sin \alpha}.$$

Das relative Vorzeichen von α und v ist dabei wichtig [99].

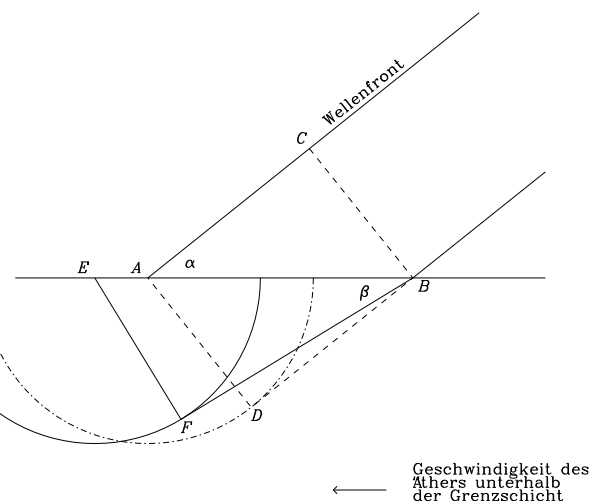


Abbildung 9: Stokessches Brechungsgesetz.

die das Licht durchdringt, schief zum Einfall liegen. Stokes erreichte das, indem er eine Potentialströmung voraussetzte (in diesem Fall ist die integrierte stellare Aberration unabhängig von den Einzelheiten der Strömung⁴). Die Wirbelfreiheit erzwingt ein Strömungsbild, das tatsächlich Aberration als Refraktionseffekt liefert. O.Lodge, ein besonders hartnäckiger Vertreter der Theorie eines materiellen Äthers, feiert das Genie Stokes' in seinen Aufsätzen [74]. Auch Michelson, der sein berühmtes Experiment als Nachweis vollständiger Mitführung verstanden wissen wollte, sah in Stokes' Ansatz die Lösung des Aberrationsproblems, ebenso wie Lorentz es beschrieb [118].

Man nimmt aber nicht nur irgendeine hypothetische Theorie der Ätherströmung in Kauf, sondern einen *kompressiblen* Äther. Ein inkompressibler Äther erlaubt nämlich *keine* rotationsfreie inhomogene Strömung. Lassen wir aber Wirbel in der Ätherströmung zu, um an der Inkompressibilität festhalten zu können, entfällt jene Kopplung zwischen den Geschwindigkeitskomponenten, die erst für eine definierte Aberration sorgt. Stokes [47] selbst schreibt sogar: *Was die Aberration anbetrifft, so ist die korpuskulare Theorie in entscheidendem Vorteil, denn auf sie gestützt ist die Erklärung des Phänomens vollkommen einfach, während Alles, was wir zu Gunsten der Wellentheorie sagen können, darin besteht, daß es durch sie nicht unerklärbar ist.* Lenard schlägt in seiner persönlich und politisch motivierten Verblendung sogar eine diskontinuierliche Strömung vor, um die Aberration bei Mitführung zu retten [97].

Am Ende bleiben im vorrelativistischen Wellenbild zwei Ansichten. Die eine erklärt die Aberration als Ergebnis der Funktion des Teleskops, das trotz der unveränderten Phasenflächennormalen immer auf eine Wellengruppe (die Interferenzfigur) abstellt und *deren* Bewegungsrichtung bestimmt. Nach dieser Ansicht strömt der Äther ungehindert. Die Aberration erscheint als Korrektur zwischen den verschiedenen Projektionen der Bewegung auf das Bezugssystem der Beobachter. Die Ausbreitung des Lichts selbst wird nicht berührt. Die meisten Autoren sprechen die Divergenz zwischen Phasenflächennormalen und Strahlrichtung überhaupt nicht an. Wer es aber tut, wundert sich darüber [20, 25, 31, 38, 59, 74, 87, 128, 145, 151, 180]. Ketteler interpretiert sie als Analogon zur Doppelbrechung [33].

Die andere Ansicht hält an den Phasenflächennormalen fest und erklärt die Aberration als physikalische Refraktion in einer Ätherströmung, die eine Mitnahme des Äthers durch die Erde voraussetzt. Hier ist die Aberration also eine reale Veränderung der Lichtausbreitung, während der erdgebundene Beobachter sich zum unmittelbar umgebenden Äther immer in Ruhe befindet.

In einem strömenden Äther fallen die Phasenflächennormalen und die Richtung eines Strahls oder einer

⁴Ist die Wellenfront parallel zur Ebene $z = 0$, wird die Normale durch laterale Gradienten des Geschwindigkeitsfeldes des Äthers beeinflusst: $d\mathbf{n} = [-\frac{\partial v_x}{\partial x}, -\frac{\partial v_y}{\partial y}, 0] dt$. In einer Potentialströmung kann das in $d\mathbf{n} = \frac{1}{c}[-\frac{\partial v_x}{\partial z}, -\frac{\partial v_y}{\partial z}, 0] dz$ umgeformt und dann zu $\Delta\mathbf{n} = -\frac{1}{c}[\Delta v_x, \Delta v_y, 0]$ integriert werden.

Wellengruppe nicht zusammen. Hätte man im vorigen Jahrhundert so etwas wie eine adaptive Optik oder VLBI gehabt, hätte man gesehen, daß sowohl Phasenflächen als auch Wellengruppen Aberration zeigen, das Fresnelsche Bild also so einfach nicht zutreffen kann. Der Michelson-Versuch wurde ja auch zunächst als Hinweis auf vollständige Mitnahme des Äthers gedeutet, obwohl die Schwierigkeiten des Stokesschen Bildes bekannt waren.

Das alte Problem wird mit der Relativitätstheorie nicht nur gelöst, es verschwindet. In der Folgezeit wird es vergessen. Pickering erinnert noch einmal daran in einem ansonsten kuriosen Artikel [96], obwohl Borns Buch [87] hier schon eine endgültige Darstellung bietet. In den Lehrbüchern für Sphärische Astronomie wird es nicht berührt. Entweder wird die Aberration einfach mit Bradleys Argument [131, 134, 140, 149, 179] veranschaulicht oder direkt die Lorentz-Transformation [76, 165, 180] oder die Einsteinsche Zusammensetzung der Geschwindigkeiten [61, 62, 142, 148, 171] verwendet. Andere Bücher übergehen die Frage überhaupt [130, 154, 172] (das haben auch Kirchhoff [49], Poincaré [50] und Helmholtz [54] getan, sie allerdings hielten die Frage für Vorlesungen noch zu unausgegoren). Nur gelegentlich schimmert die Unsicherheit der nichtrelativistischen Argumentation durch [180].

4.3. Relativität

In der *stellaren* Aberration findet sich *keine* Relativität von Quelle und Beobachter, obwohl es so nahe zu liegen scheint, mit der Relativbewegung von Quelle und Beobachter zu assoziieren. In manchem Lehrbuch und Lexikon kann man auch lesen (oder mangels deutlicher Aussagen verführt werden zu glauben), daß die Aberration eine Folge dieser Relativbewegung sei [39, 178]. Nun ist aber die Relativgeschwindigkeit, von der die stellare Aberration abhängt, die zwischen Beobachtern und *nicht* die zwischen Beobachter und Lichtquelle. Die veröffentlichte Wissenschaft zeigt, daß dies besonders viele Mißverständnisse hervorgerufen hat. Schließlich sind die Beobachter auf den einzelnen Orten der Erdbahn zwar verschieden bewegt, aber dennoch individuell immer dieselben. Deshalb wird leicht übersehen, daß es sich im Sinne des behaupteten Effekts um *verschiedene* Beobachter handelt.

Immer wieder wurde deshalb vermutet, bei Doppelsternen müßte eine Komponente der Aberration zu sehen sein, die auf ihre eigene Bewegung zurückzuführen ist (aktive Aberration). Die unterschiedliche Bewegung der Quellen muß ja an Doppelsternen am deutlichsten zu sehen sein, je *enger*, desto deutlicher – wegen der höheren Bahngeschwindigkeiten. Bei ihnen sind wir in der Lage, im Laufe der Zeit wechselnde Geschwindigkeiten bei effektiv unverändertem Ort zu beobachten und die Ergebnisse zu vergleichen. Die Diskussion des Erscheinungsbildes der Doppelsterne ist daher für die verschiedenen Vorstellungen von ersterangiger Bedeutung. In seiner kritischen Diskussion der Sternbegleiter, die von Christian Mayer 1778 als Planeten vermutet wurden [7], dachte Fuß an eine Ermüdung des Lichts [8], die die Lichtgeschwindigkeit reduziert und bei ferneren Sternen größerer Entfernung kleinere Aberrationen bewirkt. Bode zitiert einen Brief von Zach, in dem eine mögliche Abhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit von der Intensität und damit auch von der Entfernung angesprochen wird [11]. Direkt auf die Bewegung der Quelle geht wohl erstmal Camerer 1795 ein, wenn er schreibt: *Der andere Theil der Aberration, der von der Bewegung des Gestirns selbst herrührt, kann ohne Zweifel beträchtlich werden, besonders bey Planeten, deren Geschwindigkeit in keinem so ganz kleinen Verhältniss zu der Geschwindigkeit des Lichts steht.* [13].

Das Fehlen der aktiven Aberration war eigentlich schon um 1800 manifest. Doppelsterne waren bekannt, Algol als periodischer Bedeckungsveränderlicher interpretiert [9], die Entfernungen mit Huygens' Argument abgeschätzt [164], auch Eigenbewegungen gefunden [16, 177]. 1822 gelingt die erste Bahnbestimmung durch Savary an ξ Ursae maioris [22]. Aktive Aberration wurde nie bemerkt. Nur daß man gar keine erwarten kann, wird in der Literatur nicht deutlich. Erst als Houzeau 1844 versucht, Fehler in der Parallaxe von 61 Cygni (dem Besselschen Stern) als aktive Aberration zu deuten [23], antwortet ihm J.F.W.Herschel, der Sohn des Uranus-Entdeckers, ärgerlich und eigentlich endgültig [24]. Das hält spätere Autoren nicht davon ab, die aktive Aberration immer wieder in die Diskussion zu bringen [39, 41, 65, 89, 101] oder einfach nur festzustellen, daß die Aberration (nur) von der Relativgeschwindigkeit zwischen Quelle und Beobachter abhängt [119, 158, 178]. Höffler [53] begründet noch einmal, weshalb keine aktive Aberration erwartet werden darf. Um die Jahrhundertwende wird das beobachtete Fehlen der aktiven Aberration immer wieder geprüft [42, 46, 65]. In der Zeit der Auseinandersetzung mit der Relativitätstheorie wird das von Einsteins Gegnern

als Argument gegen die Relativitätstheorie angesehen, wenn auch mit teilweise merkwürdiger Logik und nur Teilen der Wahrheit [88, 89, 90, 101, 107, 109, 106, 110, 114, 120]. Aber auch Protagonisten der Relativitätstheorien flüchten sich in unklare Entschuldigungen⁵. Schuld daran sind nicht zuletzt Formulierungen der Meister selbst [113]⁶, die zu großzügig und deshalb nicht ganz einwandfrei sind. Genauer, aber natürlich ohne unsere Fehlerdiskussion formulieren Stephenson und Kilmister [135] oder Fock [138]. Richtig deutlich wurde noch einmal Emden [113]. Er schreibt: *Zwischen signalisierender Lichtquelle und Beobachter gibt es niemals Relativbewegung weil die Signalgeschwindigkeit invariant ist.* Leider unterläßt er dabei, signalisierende Lichtquelle und Beobachter auf die Ereignisse von Emission und Beobachtung zu reduzieren. Unter Signalquelle muß man hier den Burst und nicht den Burster, unter Beobachter die Beobachtung verstehen (d.h. die jeweiligen Ereignisse). *Wie wird die Richtung des einfallenden Strahls durch die momentane Bewegung der Erde und die Bewegung des Sterns beeinflusst? Gar nicht.* Emission und Beobachtung sind die Endpunkte eines Intervalls der Raum-Zeit, das unzweideutig festgelegt ist (die Strecke SO in Abb. 5). *Die Aberration kommt aber nicht zustande durch die Relativbewegung der Erde gegen die Sterne, sondern durch die Relativbewegung der Erde gegen sich selbst.* Emden schreibt aber in Hinblick auf das unzweideutig gegebene Raum-Zeit-Intervall zu dramatisch: *Nach der speziellen Relativitätstheorie gibt es keine Aberration.* Wenn das richtig sein soll, muß man Aberration als Divergenz von Phasenflächennormale und Strahl definieren. Das ist aber nicht die Definition stellarer Aberration und entzog sich auch damals noch der Beobachtung.

5. Der Rätsel Lösung

5.1. Ballistik und Zeitgleichung

Für die Bewegungsrichtung eines Photons in einem ebenen Bezugssystem ist am Ende einzig wichtig, wo der Stern zum Zeitpunkt der Emission gestanden hat. Unabhängig davon, wie das Signal am Stern vorgehalten werden muß⁷, kommt es aus der Richtung des Emissionsortes⁸. Seine Lage ist der entscheidende Punkt. Liegt der Emissionsort fest, ist die Bewegung des Sterns unerheblich, das Signal bewegt sich vom Emissionsort zum Beobachtungsort geradlinig und in festgesetzter Zeit (Abb. 5).

Ist die Teilchengeschwindigkeit relativ zum Stern fest, gibt es eine Abweichung in den Ankunftszeiten des Lichts von den einzelnen Punkten einer Doppelsternbahn. Der Grad dieser Zeitgleichung hängt von der Entfernung, der Bahngeschwindigkeit und der Lichtgeschwindigkeit relativ zur Quelle ab. Ist d die Entfernung zum Stern, r der Radius der Kreisbahn, c die Teilchengeschwindigkeit und v die Bahngeschwindigkeit, dann sehen wir die rechte Elongation sehen wir zu einem Zeitpunkt $t_{\text{rechts}} = t_{0\text{rechts}} + d/(c + v)$, die linke zur Zeit $t_{\text{links}} = t_{0\text{links}} + d/(c - v)$ Vor der rechten zur linken Elongation vergeht die Zeit t_{rl} , umgekehrt t_{lr} , mit

$$t_{\text{rl}} = \pi \frac{r}{v} + \frac{d}{c - v} - \frac{d}{c + v} = \pi \frac{r}{v} + \frac{2vd}{c^2 - v^2}, \quad t_{\text{lr}} = \pi \frac{r}{v} - \frac{d}{c - v} + \frac{d}{c + v} = \pi \frac{r}{v} - \frac{2vd}{c^2 - v^2},$$

⁵Thirring [104] versucht zunächst, das Doppelsternproblem mit planetarer Aberration aufzurechnen, das geht aber nicht, weil die planetare Aberration bei Doppelsternen ohnehin nur eine Rechengröße ist, die nicht geprüft werden kann. In einer späteren Arbeit [108] meint er, daß Doppelsterne aus der Relativitätstheorie herausfallen, weil diese für beschleunigte Bewegungen nicht anwendbar sei: Das ist so auch nicht richtig, weil die Bewegung der Doppelsterne eben nicht in den Sichtwinkel eingeht. Es ist aber typisch, daß für Probleme der richtigen Interpretation der Speziellen Relativitätstheorie die Ausrede der Beschleunigung erhalten muß. Allerdings wird er von Freiesleben als Hinweis verstanden, daß das Emissionsereignis und nicht der Emitter in Bewegung beobachtet wird.

⁶Einstein schreibt in [84]: *Ich erwähne hier als besonders wichtig, daß die Relativitätstheorie in überaus einfacher Weise in Übereinstimmung mit der Erfahrung die Einflüsse abzuleiten gestattet, welche das von den Fixsternen zu uns gesandte Licht durch die Relativbewegung der Erde gegen jene Fixsterne erfährt. Es ist dies die jährliche Wanderung des scheinbaren Ortes der Fixsterne infolge der Erdbewegung um die Sonne (Aberration) und der Einfluß der Radialkomponente der Relativbewegungen der Fixsterne gegen die Erde auf die Farbe des zu uns gelangenden Lichtes.* (Paragraph 16). Pauli schreibt in [95] auf S.114: *Die Relativitätstheorie bringt hier insofern eine prinzipielle Vereinfachung, als die Fälle bewegte Lichtquelle – ruhender Beobachter und ruhende Lichtquelle – bewegter Beobachter völlig identisch werden.*

⁷Vom Stern aus gesehen, darf das Licht selbstverständlich nicht in die Richtung geschickt werden, in der etwa der Beobachter zu sehen ist, oder in der er sich zum Zeitpunkt der Emission befindet, sondern in die Richtung, wo er sich befinden wird, wenn der Lichtstrahl ankommt. Ein gewöhnlicher Stern dagegen strahlt nun in alle Richtungen. Das Problem tritt eventuell bei einem Pulsar auf, den wir sehen, wenn alles stimmt, und sonst eben nicht.

⁸LaRosa [100] schreibt: *Das Fehlen eines von der Bewegung der Lichtquelle abhängigen Aberrationseffektes ist eine natürliche und notwendige Folge des Gesetzes über die gradlinige Fortpflanzung des Lichtes.*

Die Zeit t_{lr} kann also auch negativ werden, und das geschieht in den Fällen C und D der Abbildung 7. Dann treten die Mehrfachbilder auf, im Fall C Dreifachbilder (etwa zur Zeit t_3), im Fall D Fünffachbilder (etwa zur Zeit t_1). Regelmäßig tauchen neue Doppelbilder mit rechter Elongation auf (Fall D bei t_2), deren Komponenten sich mit verschiedener Geschwindigkeit nach links bewegen und dort zusammen mit anderen Bildern verschwinden (Fall C bei t_2). Das Phasenverhältnis ist

$$\frac{t_{r1} - t_{lr}}{t_{r1} + t_{lr}} = \frac{2v^2 d}{\pi r (c^2 - v^2)} \approx \frac{2 v^2 d}{\pi c^2 r} .$$

Der letzte Faktor macht aus dem kleinen Wert von v/c einen großen Effekt. Weil es ihn offensichtlich nicht gibt, ist die einfache Ballistik unzutreffend. Nach der Relativitätstheorie bleibt der Betrag der Lichtgeschwindigkeit auch bei Zusammensetzungen unverändert, der Effekt verschwindet dann ohnehin. Eine relativistische Ballistik ist nicht ausgeschlossen, vielmehr ist ihr Ergebnis gleich dem der relativistischen Wellentheorie.

5.2. Wellenfronten und Gleichzeitigkeit

Wellenfronten muß man durch eine gleichzeitige Messung an mehreren Orten bestimmen. Setzen wir in die Phase $\exp(i(\mathbf{k}\mathbf{r} - \omega t))$ einer ebenen Welle die Galilei-Transformation

$$t^* = t , \quad x^* = x - vt$$

ein, finden wir

$$\omega^* = \omega - vk_x , \quad \mathbf{k}^* = \mathbf{k} . \quad (1)$$

Die Richtung der Wellenfronten zeigt keine Aberration⁹, $\mathbf{k}^* = \mathbf{k}$, wohl aber die Gruppengeschwindigkeit

$$\mathbf{v}_{\text{Gruppe}}^* = \frac{\partial \omega^*}{\partial \mathbf{k}^*} = \frac{\partial \omega}{\partial \mathbf{k}} - \mathbf{v} = \mathbf{v}_{\text{Gruppe}} - \mathbf{v} .$$

Diese Unterscheidung von Phase und Wellengruppe ist bei Galilei-Transformationen wichtig¹⁰.

Die Relativitätstheorie löst das Rätsel auf die ihr eigene Weise, genauer durch die Relativität der Gleichzeitigkeit (Abb. 10-12). Abbildung 12 findet sich ähnlich schon bei Freiesleben [114], der an dieser Stelle der Wahrheit ganz nahe kommt, ihr aber wegen des Relativitätsarguments doch nicht traut. Gewöhnlich wird mit der Lorentz-Transformation der Phase $\exp(i(\mathbf{k}\mathbf{r} - \omega t))$ argumentiert. Wie auch im Fall der Galilei-Transformationen kann sich die Phase bei Transformationen nicht ändern, deshalb folgt aus der Lorentz-Transformation der Koordinaten

$$ct^* = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} (ct - \frac{v}{c}x) , \quad x^* = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} (x - \frac{v}{c}ct) , \quad y^* = y , \quad z^* = z$$

für Frequenz und Wellenzahl

$$\frac{\omega^*}{c} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} (\frac{\omega}{c} - \frac{v}{c}k_x) , \quad k_x^* = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} (k_x - \frac{v}{c} \frac{\omega}{c}) , \quad k_y^* = k_y , \quad k_z^* = k_z . \quad (2)$$

Im Gegensatz zu den Galilei-Transformationen, bei denen der Wellenzahlvektor (und damit die Normale einer Phasenfläche) fest bleibt, wird hier der Wellenzahlvektor verändert. Die Formeln sagen, daß dies direkt mit der Transformation der Zeitkoordinate zusammenhängt, mit der Relativität der Gleichzeitigkeit [87, 137, 151]. Aus $t_1 = t_2$ folgt nicht mehr $t_1^* = t_2^*$, wenn es sich um Ereignisse an verschiedenen Punkten des Raums handelt.

⁹Einer der Autoren bedauert den Fehler in einer früheren Darstellung [155].

¹⁰O.Lodge versucht sogar, die Aberration als Unterschied der Richtung von Signal und Phasenflächennormale zu definieren [74]. Das geht so aber nicht. Wie wir noch sehen werden, zeigt die Relativitätstheorie, daß diese Aberration für Licht nicht existiert.

Die Weltlinien der zu einem gegebenen Ereignis O eintreffenden Signale bilden einen Kegel in der Raum-Zeit (Die Abbildung findet man ähnlich schon in [114]). Der Schnitt dieses Kegels mit einer Ebene gleichzeitiger Ereignisse markiert die momentane Position einer auf dieses Ereignis einlaufenden Wellenfront. Ihre Richtung ist die Normale der Kreislinie. Bei absoluter Gleichzeitigkeit ist sie unabhängig von der Bewegung eines Beobachters. Wellenfronten zeigen eben keine Aberration. Die Richtung eines Photons wird dagegen durch die eventuell verschobene Position des Beobachters gegeben. Sie entspricht dem Teilchenbild und hängt tatsächlich von der Bewegung des Beobachters (der Lage des Punktes B) ab. Der Winkel $\angle EBD$ ist die stellare Aberration der Richtung BD (gesehen von dem Beobachter mit der Weltlinie BO) gegen die Richtung AE (gesehen von dem Beobachter mit der Weltlinie AO).

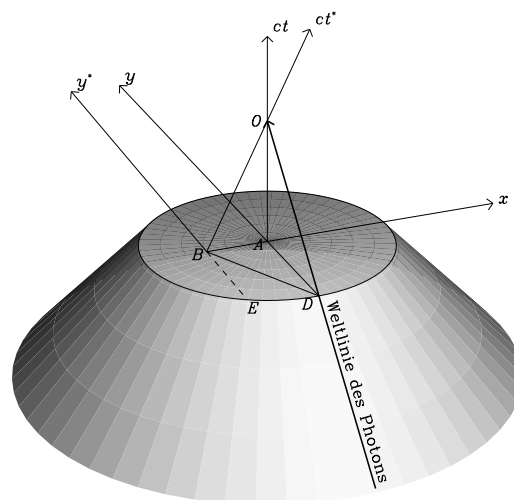


Abbildung 10: Die zwei Richtungen von Signal und Wellenfront.

Wir zeigen eine Wellenfront, die sich in Richtung des y -Achse bewegt. Sie wird durch eine Ebene in der (hier (2+1)-dimensionalen) Raum-Zeit dargestellt. Ihre Lage zu einem gegebenen Zeitpunkt (hier $t = 0$) ist der Schnitt mit der entsprechenden Ebene gleichzeitiger Ereignisse. Ist die Gleichzeitigkeit absolut, d.h., ist diese Ebene die gleiche für alle Beobachter, kann es keine Aberration der Normalen geben. Eine solche Aberration erfordert die Relativität der Gleichzeitigkeit. In dieser Abbildung bewegt sich der zweite Beobachter auf der durch die ct^* -Achse gegebenen Weltlinie. In der Minkowski-Welt bilden die für ihn gleichzeitigen Ereignisse nun eine entsprechend geneigte Ebene. Diese schneidet die Wellenfront in einer anderen Geraden, die Wellenfront zeigt nun die richtige Aberration. Umgekehrt erzwingt die Forderung, Wellenfronten und Strahlen sollen die gleiche Aberration zeigen, genau die Form der Gleichzeitigkeit, wie sie von der speziellen Relativitätstheorie bereitgestellt wird.

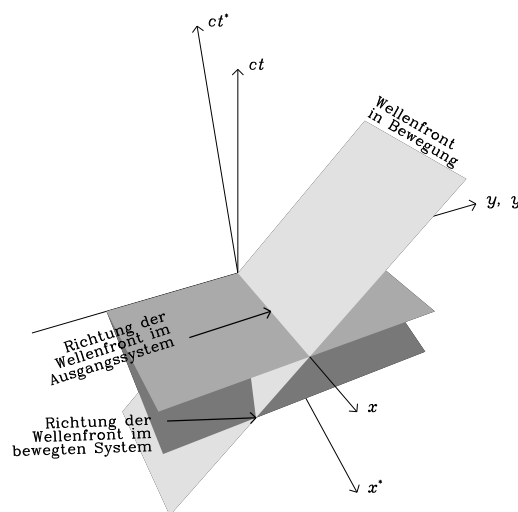


Abbildung 11: Aberration einer ebenen Welle.

Die Bedeutung der Relativität der Gleichzeitigkeit wurde implizit schon von Lorentz [55] und Drude [57] gefunden. Die Richtung einer Phasenflächennormalen wird durch *gleichzeitige* Messung an *verschiedenen* Punkten festgestellt. Mit der Definition der Gleichzeitigkeit ändert sich auch die gemessene Lage der Phasenflächennormalen. Dies ist formelseitig bereits in Gleichung (2) enthalten. Die Lorentz-Transformation ist für die Bewegungsrichtung eines Teilchens und für den Wellenzahlvektor identisch. Deshalb gibt es nun auch keinen Unterschied mehr zwischen Teilchen und Wellenbild des Lichts¹¹.

Wenn wir uns noch einmal Abbildung 11 ansehen, können wir das Argument auch wenden. Aberration der Phasenflächennormalen kann nur stattfinden, wenn die Gleichzeitigkeit relativ ist. Die Forderung allein,

¹¹An dieser Stelle muß auch darauf hingewiesen werden, daß Joos' Argument [134], ein Effekt 1. Ordnung in v/c in der Relativitätstheorie müsse auch in der vorrelativistischen Theorie vorhanden sein, *nicht* richtig ist. Die Aberration der Phasenflächennormalen ist ein Gegenbeispiel. Auch die Zusammensetzung der Lichtgeschwindigkeit mit Geschwindigkeiten gleicher Richtung läßt sich in erster Ordnung bestimmen [141]. Hier gibt es einen Effekt erster Ordnung nach der vorrelativistischen Theorie, nicht aber nach der Relativitätstheorie.

Wir wiederholen Abbildung 10 für den Fall relativer Gleichzeitigkeit, um zu zeigen, wie Wellennormalen und Strahlrichtungen nun immer zusammenfallen. Nach der Relativitätstheorie sieht der Beobachter auf der Weltlinie AO die horizontale Ebene als gleichzeitig an. Die Ebene gleichzeitiger Ereignisse für den sich gemäß BO bewegenden Beobachters ist wieder geneigt. Die Strahlrichtung BC fällt nun mit der Normalen bei C zusammen. Strahlen und Wellenfronten zeigen die gleiche Aberration. Diese Zeichnung ist analog der Figur 7 in [114].

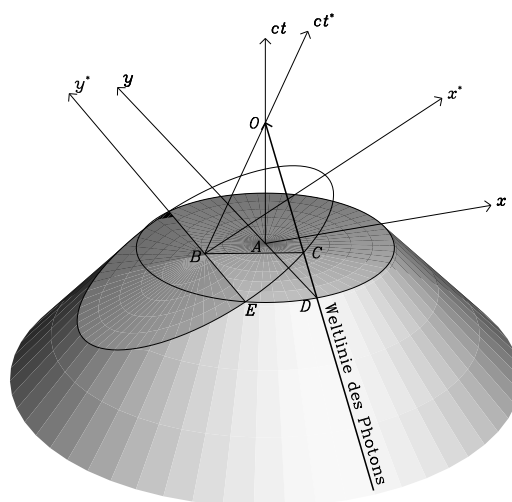


Abbildung 12: Aberration und Relativität der Gleichzeitigkeit.

In einem Raum-Zeitdiagramm zeichnen wir zu einem Beobachtungsereignis B die Weltlinien aller Signale, die bei B eintreffen. Sind die Signalgeschwindigkeiten nicht von der Quelle abhängig, bilden diese Weltlinien einen Kegel. Die Weltlinie eines Doppelsterns, dessen mittlerer Ort fest sein soll, verläuft auf einem Zylinder, dessen Achse parallel zur Zeitachse ist. Die scheinbare Ausdehnung der Bahn ist die scheinbare Ausdehnung dieses Zylinders. Der Beobachter findet sie durch Bewertung des markierten Winkels auf dem Kegel. Dieser Winkel hängt nicht davon ab, wie schnell der Doppelstern seine Bahn durchläuft: Es gibt keine aktive Aberration.

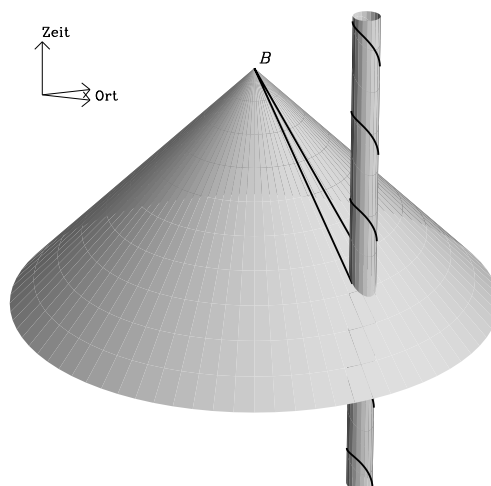


Abbildung 13: Die scheinbare Ausdehnung der Bahn eines Doppelsterns.

daß die Aberration von Strahl und Phasenflächennormale gleich ist, begründet die Minkowski-Welt und in der Folge die Relativitätstheorie. In diesem Sinne war Fresnels Konstruktion der erste Hinweis auf die Notwendigkeit einer neuen Raum-Zeit-Geometrie [156].

5.3. Die Relativität von Quelle und Beobachter

Die Relativitätstheorie lehrt uns, räumliche Konfiguration und zeitliche Entwicklung gemeinsam zu betrachten. Wir tun dies für den Fall einer Doppelsternbahn. Abbildung 13 zeigt, daß der scheinbare Durchmesser der Doppelsternbahn nur von deren absolutem Durchmesser und der Entfernung, nicht aber von der Bahngeschwindigkeit abhängen kann. Es gibt also keine aktive Aberration, keine Relativität der vermuteten Art zwischen Beobachter und Quelle.

Die Unabhängigkeit der stellaren Aberration von der Bewegung der Quelle ist nur dann eine Überras-

schung, wenn man sich die Aberration als absoluten Effekt vorstellt¹², der nur *einen einzelnen* Beobachter und die Quelle betrifft und deshalb nur von *deren* Relativgeschwindigkeit abhängen sollte. Die (stellare) Aberration ist aber eine Umrechnungsregel zwischen den Ergebnissen *zweier* Beobachter bzw. Bewegungszustände, und die Relativgeschwindigkeit, die hier eingeht, ist die zwischen den beiden Beobachtern.

$$n_2 = \mathcal{A}_{v_{21}} [n_2] \quad \text{oder} \quad \begin{array}{l} \text{Richtung} \\ \text{bezüglich} \\ \text{Beobachter } B_1 \end{array} = \begin{array}{l} \text{Aberration} \\ \text{entsprechend} \\ \text{Relativ-} \\ \text{geschwindigkeit} \\ B_1 \text{ gegen } B_2 \end{array} \left[\begin{array}{l} \text{Richtung} \\ \text{bezüglich} \\ \text{Beobachter } B_2 \end{array} \right]$$

In der Relativitätstheorie ist diese Geschwindigkeit die einzig reale, da keine Geschwindigkeit gegen die Lichtausbreitung existiert¹³. In einer Äthertheorie dagegen gibt es noch die verschiedenen Geschwindigkeiten der Beobachter und der Quelle gegen den Äther, und alles wird komplizierter und damit auch undurchsichtiger und offener.

Zur Bestimmung der stellaren Aberration reicht es aus, ein einzelnes Ereignis, das der Emission, zu beobachten. Das Ereignis hat Ort und Zeitpunkt, aber keine Geschwindigkeit. Die Bestimmung einer Geschwindigkeit bedarf der Wiederholung, hier also der Beobachtung zweier Ereignisse¹⁴. Schon aus diesem Grunde kann eine Geschwindigkeit der Quelle keine Rolle spielen¹⁵. Das Ereignis hat aber auch keinen absoluten Ort. Die Ortskoordinaten, die es bezeichnen, hängen von dem Bezugssystem ab, auf das ich sie beziehen will. Der Beobachter sieht das Ereignis an einem auf ihn und seine Bewegung bezogenen Ort. Auch die scheinbare Position auf der Himmelskugel bezieht sich immer auf einen Beobachter. Die Aberration ist deshalb die Umrechnungsregel zwischen diesen Beobachtern und hängt von *deren* Relativgeschwindigkeit ab, und wenn wir die Einsteinsche Zusammensetzung der Geschwindigkeiten verwenden, auch nur von dieser Relativgeschwindigkeit. Es geht nur um die Relativbewegung verschiedener Beobachter¹⁶ zueinander, auch wenn sich Tomaschek, der dies bemerkt, darüber lustig macht¹⁷.

Es stiftet immer eine gewisse Verwirrung, daß man aus der Position des Beobachters zur Zeit der Beobachtung und den beiden Positionen der Quelle zur Zeit der Emission und zur Zeit der Beobachtung ebenfalls einen Winkel bilden kann, und daß dieser Winkel verschwindet, wenn Quelle und Beobachter keine Relativgeschwindigkeit haben. Schnell hat man daraus geschlossen, daß dieser Winkel, die *Kombination* aus stellarer Aberration und planetarer Aberration, nur von der Relativgeschwindigkeit abhängt. Aber auch dieser Winkel hängt – bei gegebener Lage der Ereignisse Emission und Beobachtung – nicht nur von der Relativgeschwindigkeit von Sender und Empfänger ab. Erst wenn man sich darauf verständigt, daß nur solche Anordnungen miteinander verglichen werden, in denen die Lage der Emission *im Bezugssystem des Beobachters* gleich

¹²In dem sehr interessanten Buch von H.u.M.Ruder [180] steht etwa: *Auf einer sich nicht bewegenden Erde muß das Teleskop nach der wahren Höhe gerichtet werden.* Das suggeriert, daß es eine wahre (das kann doch nur heißen bezugssystemunabhängige) Höhe überhaupt gibt. Der oft gebrauchte Begriff des aberrationsfreien wahren Ortes (genauer der wahren Richtung) darf *nur* als Bezeichnung der Richtung in einem besonders bequemen Bezugssystem (etwa dem des Schwerpunkts des Sonnensystems) verstanden werden.

¹³Das hat gerade der Michelson-Versuch nachgewiesen, indem er diese Geschwindigkeit vergeblich suchte. Born ist an dieser Stelle mißverständlich [87]. Page [105] kommt der Wahrheit dort sehr nahe, wo er schreibt: *The two inertial systems to be compared are the system of the earth at the time of the first observation and that of the earth at the time of the second observation.*

¹⁴Bei der Eigenbewegung der Sterne ist das evident, aber es trifft auch für die Radialgeschwindigkeit zu, die man aus der Rotverschiebung ableitet. Die Rotverschiebung gewinnen wir aus einer Frequenzmessung, d.h. der wiederholten Bestimmung der Ankunftszeiten von Schwingungsknoten.

¹⁵Von einer gegebenenfalls vorhandenen räumliche Ausdehnung der Quelle oder zeitlichen Dauer des Emissionsvorgangs muß man durchaus absehen. Schließlich kann man die Aberration im Grunde an einzelnen Teilchen beobachten, etwa mittels einer Funkenkammer, die den Weg eines einzelnen Teilchens dokumentieren kann.

¹⁶In der Diskussion relativer Bewegungen ist der Begriff *verschiedene Beobachter* immer gleichbedeutend mit *Beobachter in verschiedenen Bewegungen*. Ansonsten sollen die Beobachter schon gleich sein, d.h. mit identischen Meßgeräten arbeiten.

¹⁷Tomaschek schreibt [106]: *Die Behauptung der Relativitätstheorie ist also, wenn man ihre Grundlagen klar analysiert, die, daß die Aberration bedingt wird durch die Relativbewegung der Erde gegen sich selbst. Das führt also zu dem Ergebnis, daß die Bewegung eines Körpers relativ zu sich selbst erkennbar ist. Dies wäre aber die absoluteste Bewegungsfeststellung, die man überhaupt nur ersinnen könnte!*

ist, hängt die kombinierte Aberration in der Relativitätstheorie nur von der Relativgeschwindigkeit ab – trivialerweise¹⁸. Die kombinierte Aberration ist in jedem Fall ein errechneter Winkel, der im allgemeinen nicht beobachtet werden kann.

Analoges gilt für den Vorhaltewinkel, den ein gerichteter Strahl vom Stern aus gegen die scheinbare Position des Beobachters haben muß, aber das ist eine noch fernere Frage als die nach zusammengesetzten Aberration, der immerhin im Sonnensystem noch eine Bedeutung zugemessen werden kann. Wir dürfen eben nicht vergessen, daß die zusammengesetzte Aberration immer nur *errechnet* wird und nur dann beobachtet werden kann, wenn sich auch die Lichtquelle im Labor auf der Erde befindet. Dann wird der Begriff *Aberration* schnell für die *zusammengesetzte* Aberration verwendet, ohne vor der Mißverständnisse provozierende Assoziation mit der *stellaren* Aberration zu warnen [87]. Der astronomischen Beobachtung ist bestenfalls die *stellare* Aberration zugänglich, und diese betrifft die Bewegung der Quelle überhaupt nicht, wie wir gesehen haben.

Wir kommen an dieser Stelle darauf zurück, daß die Betonung ausschließlicher Abhängigkeit eines Effekts von der Relativgeschwindigkeit der beteiligten realen Objekte nur meint, daß keine Geschwindigkeit gegen einen virtuellen Äther eingeht und damit beobachtbar wird. Die Effekte können weiter von der relativen Position und von der Orientierung der Relativgeschwindigkeit dazu abhängen. Auch der Doppler-Effekt, mit dem die Aberration oft in einem Atemzug genannt wird, hängt nicht nur von der Relativgeschwindigkeit ab, wie man das sehr oft geschrieben findet. Das sieht man schon am allereinfachsten Beispiel: an dem an einer Station vorbeifahrenden Zug. Die Relativgeschwindigkeit von Zug und Station bleibt beim Vorbeifahren ja völlig *unverändert*, Zug und Station werden nicht beschleunigt, dennoch ist der Effekt zuerst eine Erhöhung, dann eine Absenkung des Pfeiftons. Geändert hat sich nur die Orientierung zwischen Relativgeschwindigkeit und relativer Position. Von ihr hängt der Doppler-Effekt eben *auch* ab, wie die allgemeine Formel

$$\nu^* = \nu \frac{c - \mathbf{nv}}{\sqrt{c^2 - v^2}}$$

direkt zeigt¹⁹. Bedenken wir noch einmal die stellare Aberration. Der scheinbare Ort eines Ereignisses (das der Emission) beschreibt die Orientierung der Verbindungslinie zu diesem im gegebenen Bezugssystem, die Geschwindigkeit der Quelle geht nicht ein. Bestimmen wir eine Aberration im Vergleich zweier Bezugssysteme, ist wohl die Relativgeschwindigkeit der Bezugssysteme von Bedeutung, nicht aber die Geschwindigkeit der Quelle, die ja schon in die Bestimmung der einzelnen scheinbaren Örter nicht eingeht.

Wie im Fall des Welle-Teilchen-Problems wird auch das Relativitätsproblem in den meisten Lehrbüchern überhaupt nicht behandelt [119, 131]. Mißverständnisse finden sich aber auch noch in neueren Veröffentlichungen [65, 170, 178].

6. Zusammenfassung

Am Ende ist die Aberration ein rein geometrisches Phänomen, das mit dem Charakter des Lichts und der mikroskopischen Physik der Lichtausbreitung nichts mehr zu tun hat. Es geht ausschließlich um die richtige Zusammensetzung makroskopischer Geschwindigkeiten. Die Relativitätstheorie begründet darüber hinaus, daß kein Unterschied zwischen Teilchen- und Wellenbild des Lichts bleibt. Deshalb wird der alte Streit langsam vergessen. Das rächt sich gelegentlich, wenn Formulierungen nun ungenau werden, besonders was das Problem der Relativität der Bewegung von Quelle und Beobachter betrifft. Bemerkenswert ist aber, daß *die Forderung gleicher Aberration für Phasenflächennormalen und Teilchen (Wellengruppen) die Einsteinsche Relativität unmittelbar (geometrisch) erzwingt*.

¹⁸Toretti [168] ist also viel zu kurz angebunden, wenn er schreibt, daß im Teilchenbild die Relativgeschwindigkeit von Beobachter und Stern, im Wellenbild die von Beobachter und Medium entscheidet. Es fehlt die Unterscheidung von stellarer und zusammengesetzter Aberration, darüber hinaus wird der Eindruck erzeugt, daß andere Geschwindigkeiten keine Rolle spielen. Schließlich gibt es in der Relativitätstheorie keine Geschwindigkeit zwischen Beobachter und Medium, aber immer noch Wellen.

¹⁹Hierin ist ν die Frequenz der Quelle in ihrem Ruhssystem, ν^* die vom Beobachter in seinem Ruhssystem gemessene Frequenz. Wer es gern formal und allgemein-relativistisch hat, findet die Formeln in [136].

Wir danken H.-J.Treder und O.Schwarz für die interessierte Diskussion des Themas und viele Literaturhinweise und R.v.Berlepsch, Ch.Schumacher und W.Thänert für die Hilfe beim Heraussuchen der alten Literatur.

Literatur

- [1] HUYGENS, CH. (1690): *Traité de la lumière*, Le Hague.
- [2] BRADLEY, J. (1728): An account of a new discovered motion of fixed stars, *Phil. Trans. London* **35**, 637, 1729, reprinted in W. Magie ed., A source book of physics, Cambridge MS, Harvard 1935.
- [3] BRADLEY, J. (1728): A new apparent motion discovered in the fixed stars: the cause assigned, the velocity and equable motion of light deduced, *Proc. Roy. Soc. London* **35**, 308-321.
- [4] CLAIRAUT, A. C. (1737): *De l'aberration apparente des étoiles, causée par le mouvement progressif de la lumière*, Paris, H&M.
- [5] LAMBERT, J. H. (1761): *Cosmologische Briefe über die Einrichtung des Weltbaus*, Augsburg. 12th letter, see [164].
- [6] MICHELL, J. (1767): An Inquiry into the probable Parallax and Magnitude of the fixed Stars, from the quantity of Light which they afford us, and the particular circumstances of their situation, *Phil. Trans. London* **57**, 234.
- [7] MAYER, CH. (1778): *Vertheidigung neuer Beobachtungen von Fixsterntabanten*, Mannheim.
- [8] FUSS, N. (1782): Betrachtungen über die Fixsterntabanten, in J.E. Bodes Übersetzung *Astronomisches Jahrbuch für das Jahr 1785*, 132-150, speziell 148.
- [9] GOODRICKE, J. (1783): Observations and period of Algol, *Phil. Trans. London* **73**, 474.
- [10] BOSCOVICH, R. G. (1785): De calculanda aberratione astrorum orta e propagatione luminis successiva, *Opera* **5**, 417.
- [11] BODE, J. E. (1792): Note **, *Astronomisches Jahrbuch für das Jahr 1795*, 182-183.
- [12] SCHRÖTER, J. H. (1792): Verschiedene astronomische Beobachtungen, Nachrichten und Bemerkungen *Astronomisches Jahrbuch für das Jahr 1795*, 108-110.
- [13] CAMERER, J. W. (1797): Über die tägliche Aberration der Gestirne, *Astronomisches Jahrbuch für das Jahr 1798*, 139-142.
- [14] SOLDNER (1800): Etwas über die relative Bewegung der Fixsterne; nebst einem Anhang über die Aberration derselben, *Astronomisches Jahrbuch für das Jahr 1803*, 185-194.
- [15] YOUNG, T. Y. (1800): Outlines of experiments and inquiries respecting sound and light, *Phil. Trans.* **90**, 106-150.
- [16] HERSCHEL, W. (1803): Account of the changes that have happened during the last twenty-five years, in the relative situation of double stars, *Phil. Trans. London* **93**, 339.
- [17] YOUNG, T. Y. (1804): Experiments and calculations relative to physical optics, *Proc. Roy. Soc. London* **94**, 1-16.
- [18] FRESNEL, A. (1814): Lettre à son frère Léonor, 4. Juillet 1814, *Oeuvres complètes* **2**, 820-824, Paris, Imprimerie impériale 1868.
- [19] GAMAUF, G. (1814): *Erinnerungen aus Lichtenbergs Vorlesungen über Astronomie*, Wien und Triest, S. 596.
- [20] FRESNEL, A. (1818): Sur l'influence du mouvement de terre dans quelques phénomènes d'optique, *Oeuvres complètes* **2**, 627, Paris, Imprimerie impériale 1868.
- [21] DOPPLER, A. C. (1842): Über das farbige Licht der Doppelsterne... Versuch einer das Bradley'sche Aberrations-Theorem ... in sich schließenden allgemeineren Theorie, , Nachdruck in *Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften*, Band **161**.
- [22] GEHLER, J. S. T. (1842): *Physikalisches Wörterbuch* **10**, 1412.
- [23] HOUZEAU, J. C. (1844): D'un nouvel effet de l'aberration de la lumière particulier aux étoiles doubles qui possèdent un mouvement propre, *Astron. Nachr.* **21**, 241-248 (496), 273-278 (498).
- [24] HERSCHEL, J. F. W. (1844): Schreiben an den Herausgeber, *Astron. Nachr.* **22**, 249-254 (520).
- [25] DOPPLER, A. C. (1844): Über die bisherigen Erklärungs-Versuche des Aberrations-Phänomens, *Abh. d. Böhm. Ges. d. Wiss. (5)* **3**, Nachdruck in *Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften*, Band **161**.
- [26] STOKES, G. G. (1845): On the aberration of light, *Phil. Mag. (3)* **27**, 9-15.
- [27] STOKES, G. G. (1846): On Fresnel's theory of the aberration of light, *Phil. Mag.* **28**, 76-81.
- [28] DOPPLER, A. C. (1847): Über den Einfluss der Bewegung des Fortpflanzungsmittels auf die Erscheinungen der Aether-, Luft- und Wasserwellen, *Abh. d. Böhm. Ges. d. Wiss. (5)* **5**, Nachdruck in *Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften*, Band **161**.
- [29] VON HUMBOLDT, A. (1850): *Kosmos* **3**, Stuttgart und Augsburg. Kapitel VI. S. 289 ff..
- [30] KLINKERFUES, W. (1867): *Die Aberration der Fixsterne nach der Wellentheorie*, Leipzig, Quandt und Händel.
- [31] VELTMANN, W. (1870): Fresnel's Hypothese zur Erklärung der Aberrationserscheinungen *Astron. Nachr.* **75**, 145-160 (1786).
- [32] VELTMANN, W. (1870): Ueber die Fortpflanzung des Lichts in bewegten Medien, *Astron. Nachr.* **76**, 129-144 (1809).
- [33] KETTELER, E. (1871): Ueber den Einfluss der astronomischen Bewegungen auf die optischen Erscheinungen, *Ann. d. Physik u. Chemie* **144**, 109-127, 287-300, 363-375, 550-562.
- [34] AIRY, G. B. (1871): On a supposed alteration in the amount of Astronomical Aberration of Light, produced by the passage of the Light through a considerable thickness of Refracting Medium, *Proc. Roy. Soc. London* **20**, 35-39.

- [35] KETTELER,E. (1873): *Astronomische Undulationstheorie oder die Lehre von der Aberration des Lichts*, .
- [36] VELTMANN,W. (1873): Fortpflanzung des Lichts in bewegten Medien, *Ann.d.Physik u. Chemie* **150**, 497-535.
- [37] LLOYD (1877): *Miscellaneous Papers connected with Physical Science*, London.
- [38] BATTERMANN,H. (1881): *Beiträge zur astronomischen Aberrationslehre*, Berlin, A.W.Schade.
- [39] BRÜNNOW (1881): *Lehrbuch der sphärischen Astronomie*, III, paragraphs 22-23, 4.Aufl.Berlin.
- [40] MICHELSON,A.A. (1881): The relative motion of the earth and the luminiferous aether, *Amer.J.Science (3)* **22**, 120-129.
- [41] FOLIE,F. (1884): Un chapitre inédit d'astronomie sphérique, *Astron.Nachr.* **109**, 225-238 (2607).
- [42] SEELIGER,H. (1884): Ueber die Aberration der Fixsterne, *Astron.Nachr.* **109**, 275-280 (2610).
- [43] KETTELER,E. (1885): *Theoretische Optik*, Braunschweig, Fr.Vieweg.
- [44] MICHELSON,A.A., MORLEY,E.W. (1886): Influence of motion of the medium on the velocity of light, *Amer.J.Science (3)* **31**, 377-386.
- [45] MICHELSON,A.A., MORLEY,E.W. (1887): On the relative motion of the earth and the luminiferous ether, *Amer.J.Science (3)* **34**, 333-345.
- [46] NYRÉN,M. (1888): Zur Aberration der Fixsterne, *Bull.Acad.Imp.St.Petersburg* **32**, 402-412.
- [47] STOKES,G.G. (1888): *Das Licht. Zwölf Vorlesungen*, Leipzig, J.A.Barth.
- [48] LODGE,O. (1889): *Modern views on electricity*, London.
- [49] KIRCHHOFF,G. (1891): *Vorlesungen über Mathematische Physik, II. Mathematische Optik*, Leipzig, Teubner.
- [50] POINCARÉ,H. (1891): *Elektrizität und Optik I (Vorlesungen)*, Berlin, J.Springer.
- [51] RAYLEIGH (1892): Aberration, *Nature* **45**, 499-502 (March 24).
- [52] LODGE,O.J. (1893): Aberration problems, *Phil.Trans. A* **184**, 727-804.
- [53] HÖFFLER,F. (1895): *Untersuchungen über die Existenz der objectiven Aberration*, Dissertation Zürich.
- [54] V.HELMHOLTZ,H. (1897): *Vorlesungen über die elektromagnetische Theorie des Lichts*, Hamburg, L.Voss.
- [55] LORENTZ,H.A. (1899): Simplified theory of electromagnetic and optic phenomena in moving systems, *KNAWPr* **1**, 427.
- [56] WALKER,G.T. (1900): *Aberration und einige andere mit dem elektromagnetischen Felde verknüpfte Fragen*, Cambridge MA, University Press.
- [57] DRUDE,P. (1900): *Lehrbuch der Optik*, Leipzig, Hirzel.
- [58] LARMOR,J. (1900): *Aether and Matter*, Cambridge.
- [59] MICHELSON,A.A. (1903): *Light waves and their uses* , Chicago, University of Chicago Press.
- [60] EINSTEIN,A. (1905): Zur Elektrodynamik bewegter Körper, *Ann.d.Physik* **18**, 639-641.
- [61] LAUB,J. (1907): Zur Optik der bewegten Körper, *Ann.d.Physik* **23**, 738-744.
- [62] LAUB,J. (1908): Zur Optik der bewegten Körper, II., *Ann.d.Physik* **25**, 175-184.
- [63] RITZ (1908): *Ann.d.Physik* **13**, 145.
- [64] MINKOWSKI,H. (1908): Die Grundgleichungen für die elektromagnetischen Vorgänge in bewegten Körpern, *Nachr.d.K.Ges.d.Wiss.z.Göttingen* , .
- [65] TURNER,H.H. (1909): Some notes on aberration, *MNRAS* **69**, 403-414.
- [66] MINKOWSKI,H. (1909): Raum und Zeit, *Phys.Z.* **10**, 104.
- [67] CAMPBELL,N. (1910): The Aether, *Phil.Mag.London* **19**, 181-191.
- [68] COMSTOCK,D. (1910): A neglected type of relativity, *Phys.Rev.* **30**, 267.
- [69] COMSTOCK,D. (1910): A simple criterion for the detection of anomalies in the orbits of spectroscopic binaries, *Astrophys.J.* **31**, 364-370.
- [70] VARIČAK (1910): Anwendung der Lobachevski-Geometrie in der Relativtheorie, *Phys.Z.* **11**, 93-96.
- [71] VARIČAK (1910): Die Relativtheorie und die Lobachevski-Geometrie, *Phys.Z.* **11**, 287-294.
- [72] VARIČAK (1910): Die Reflexion an bewegten Spiegeln, *Phys.Z.* **11**, 586-587.
- [73] WHITTAKER (1910): *History of the theories of Aether and Electricity*, Dublin.
- [74] LODGE,O. (1911): *Weltäther*, Braunschweig.
- [75] KLEIN,F. (1911): Über die geometrischen Grundlagen der Lorentz-Gruppe, *Phys.Z.* **12**, 17-27.
- [76] V.LAUE,M. (1911): *Das Relativitätsprinzip*, Vieweg, Braunschweig.
- [77] STEWART,M. (1911): The second postulate of relativity and the electromagnetic emission theory of light, *Phys.Rev.* **32**, 418-428.

- [78] EHRENFEST,P. (1913): *Zur Krise der Lichtätherhypothese*, Berlin, J.Springer.
- [79] GUTHNICK,P. (1913): Astronomische Kriterien für die Unabhängigkeit der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes von der Bewegung der Lichtquelle, *Astron.Nachr.* **195**, 265-272 (4670).
- [80] DESITTER,W. (1913): Ein astronomischer Beweis für die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit, *Phys.Z.* **14**, 429.
- [81] FREUNDLICH,E. (1913): Zur Frage der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit, *Phys.Z.* **14**, 835-838.
- [82] DESITTER,W. (1913): Über die Genauigkeit, innerhalb welcher die Unabhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit von der Bewegung der Quelle behauptet werden kann, *Phys.Z.* **14**, 1267.
- [83] ZURHELLEN,W. (1914): Zur Frage der astronomischen Kriterien für die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit, *Astron.Nachr.* **198**, 1-10 (4729).
- [84] EINSTEIN,A. (1916): *Über spezielle und allgemeine Relativitätstheorie*, Braunschweig, Vieweg.
- [85] EINSTEIN,A. (1918): Bemerkungen zu Gehrckes Notiz über den Äther, *Verh.Dt.Phys.Ges.* **20**, 261.
- [86] WIENER,O. (1919): Der Wettstreit der Newtonschen und Huygensschen Gedanken in der Optik, *Ber.Sächs.Akad.Wiss.* **71**, 249-254.
- [87] BORN,M. (1920): *Die Relativitätstheorie Einsteins*, Vieweg Verlag Braunschweig.
- [88] HAYN,A.N. (1920): Didaktisches zur Aberration, *Astron.Nachr.* **211**, 17-22 (5042).
- [89] HAYN,A.N. (1920): Berichtigung zu Didaktisches zur Aberration, *Astron.Nachr.* **211**, 191-192.
- [90] HAYN,A.N. (1920): Didaktisches zur Aberration II, *Astron.Nachr.* **212**, 81-88 (5070).
- [91] ZEHNDER,L. (1921): Aberration und Äther, *Astron.Nachr.* **212**, 377-380.
- [92] COURVOISIER,L. (1921): Zur Frage der Mitführung des Lichtäthers durch die Erde, *Astron.Nachr.* **213**, 281-288 (5106).
- [93] LEROUX,J. (1922): Relativité restreinte et géométrie des systèmes ondulatoires, *J.de Mathématiques (9)* **1**, 205-253.
- [94] VOGTHERR,K. (1922): Über Aberration und Michelsonversuch, *Astron.Nachr.* **217**, 381-396 (5203).
- [95] PAULI,W. (1921): Relativitätstheorie, *Enzyklopädie der mathematischen Wissenschaften V/2*, S. 563.
- [96] PICKERING,W.H. (1922): Aberration and relativity, *Popular Astronomy* **30**, 201-204.
- [97] LENARD,P. (1923): Über die Lichtfortpflanzung im Himmelsraum, *Ann.d.Physik* **73**, 89-104.
- [98] HAYN,A.N. (1923): Aberration und Michelsonversuch, *Astron.Nachr.* **218**, 11-12.
- [99] BRYLINSKI,E. (1924): L'entraînement de l'ether et l'aberration des étoiles, *Comptes Rendus* **179**, 1034-1036.
- [100] LAROSA,M. (1924): Das ballistische Prinzip in der Fortpflanzung des Lichtes und einige neuere Untersuchungen von Hrnn. Rudolf Tomaschek, *Ann.d.Physik* **75**, 195-200.
- [101] TOMASCHEK,R. (1924): Über Aberration und Absolutbewegung, *Ann.d.Physik* **74**, 136-145.
- [102] WOOD,R.W. (1924): *Physical optics*, Norwood Massachusetts, Norwood Press.
- [103] VOGTHERR (1924): Bemerkungen zur Lichtausbreitung im bewegten Äther, *Astron.Nachr.* **222**, 209-222 (5317).
- [104] THIRRING,H. (1924): Bemerkung zu einem Einwand gegen die spezielle Relativitätstheorie, *Z.Phys.* **30**, 63-65.
- [105] PAGE,L. (1925): On the aberration of light, *ApJ* **61**, 70-72.
- [106] TOMASCHEK,R. (1925): Über die Aberration, *Z.Physik* **32**, 397-402.
- [107] OSTEN,H. (1925): Aberration und Relativität, *Astron.Nachr.* **224**, 66-67 (Nr.5356).
- [108] THIRRING,H. (1925): Relativität und Aberration, *Die Naturwissenschaften* **13**, 445-447.
- [109] V.BRUNN,A. (1925): Bemerkungen zum Aberrationsproblem, *Astron.Nachr.* **224**, 67-68.
- [110] HAYN,A.N. (1925): Zur Aberration, *Astron.Nachr.* **224**, 287-290.
- [111] LENARD,P. (1925): Über Ätherbewegung und Aberration, *Astron.Nachr.* **224**, 345-356 (5373).
- [112] COURVOISIER,L. (1926): Bestimmung der Erdbewegung relativ zum Lichtäther, *Astron.Nachr.* **226**, 241-264 (5416).
- [113] EMDEN,R. (1926): Aberration und Relativitätstheorie, *Die Naturwissenschaften* **14**, 327-335.
- [114] FREIESLEBEN,H.-CH. (1926): *Beiträge zum Problem der astronomischen Aberration*, Weida, Thomas & Hubert.
- [115] COURVOISIER,L. (1927): Bestimmungsversuche der Erdbewegung relativ zum Lichtäther. II, *Astron.Nachr.* **230**, 425-432 (5519).
- [116] COURVOISIER,L. (1927): Über die Translationsbewegung der Erde gegen den Lichtäther, *Phys.Z.* **28**, 674-680.
- [117] COURVOISIER,L. (1928): Bestimmungsversuche der Erdbewegung relativ zum Lichtäther. III, *Astron.Nachr.* **234**, 137-144 (5599).
- [118] LORENTZ,H.A. (1928): *Aethertheorien und Aethermodelle*, Leipzig, Akademische Verlagsgesellschaft, nach der 2.holl.Aufl. ins Deutsche übertragen.

- [119] WOLFSOHN, G. (1928): Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichts, *Handbuch der Physik: Herstellung und Messung des Lichts* **19**, 895 ff., Berlin, J.Springer.
- [120] MOHOROVIČIĆ, ST. (1928): Optik bewegter Körper, in: *E.Gehrke, Handbuch der physikalischen Optik* **2**, 917 ff., Leipzig, J.A.Barth.
- [121] COURVOISIER, L. (1930): Bestimmungsversuche der Erdbewegung relativ zum Lichtäther. IV, *Astron.Nachr.* **237**, 337-352 (5684).
- [122] BECKER, W. (1930): Über eine merkwürdige Beziehung zwischen Aberrationskonstante und Spektraltypus, *AN* **238**, 317-320 (5708).
- [123] COURVOISIER, L. (1931): Bestimmung der absoluten Translation der Erde aus der säkularen Aberration, *AN* **241**, 201-212 (5772).
- [124] STRÖMBERG, G. (1931): *Publ.Astr.Soc.Pacific* **43**, 266.
- [125] VANBIESBROECK, G. (1932): Stellar aberration and red shift, *Astrophys.J.* **75**, 64-65.
- [126] COURVOISIER, L. (1933): Bestimmungsversuche der Erdbewegung relativ zum Lichtäther. V, *Astron.Nachr.* **249**, 273-288 (5968).
- [127] ULLER, K. (1935): *Das Grundgesetz der Wellenfortpflanzung aus bewegter Quelle in bewegtem Mittel*, München.
- [128] POHL, R.W. (1940): *Optik*, Berlin, J.Springer.
- [129] THÜRING, B. (1941): Untersuchungen zur Wellenkinematik und zur Aberration des Lichts, *AN* **271**, 241.
- [130] BERGMANN, P.G. (1942): *Introduction to the theory of relativity*, New York.
- [131] ZINNER, E. (1951): *Astronomie, Geschichte ihrer Probleme*, 202-212.
- [132] MOON, P., SPENCER, D.E. (1953): Binary stars and the velocity of light, *J.Opt.Soc.Amer.* **43**, 635-641.
- [133] DIECKVOSS, W. (1955): Differentielle Aberration aus photographischen Polaufnahmen, *Astron.Nachr.* **282**, 206-210.
- [134] JOOS, G. (1956): *Lehrbuch der theoretischen Physik*, Leipzig, Geest & Portig, 9.Aufl..
- [135] STEPHENSON, G., KILMISTER, C.W. (1958): *Special relativity for physicists*, London, Longmans, Green and Co..
- [136] MAST, C.D., STRATHDEE, J. (1959): On the relativistic interpretation of astronomical observations, *Proc.Roy.Soc.London A* **252**, 476-487.
- [137] SOMMERFELD, A. (1959): Aberration dargestellt als Folge des relativistischen Zeitmaßes. *Vorlesungen, IV. Optik*, 2.Aufl., Leipzig, Geest & Portig.
- [138] FOCK, V.A. (1960): *Theorie von Raum-Zeit und Gravitation*, Berlin, Akademie-Verlag.
- [139] HECKMANN, O. (1960): The aberration of extragalactic nebulae, *Ann.d'Astrophysique* **23**, 168-173.
- [140] SMITH, C.J. (1960): *Optics*, London, E.Arnold Ltd.
- [141] CHAMPENEY, D.C., ISAAK, G.R., KHAN, A.M. (1963): An aether drift experiment based on the Mössbauer effect, *Phys.Lett.* **7**, 241-243.
- [142] LANDAU, L.D., LIFSHIC, E.M. (1962): *Klassische Feldtheorie*, Berlin, Akademie-Verlag 1964.
- [143] FOX, J.G. (1962): Experimental Evidence for the Second Postulate of Special Relativity, *American Journal of Physics* **30**, 297-300.
- [144] SCHMIDT, TH. (1964): Die Aberration des Lichtes der Radioquellen 3C48 und 3C273, *Z.Astrophys.* **60**, 106-111.
- [145] BOHM, D. (1965): *The special theory of relativity*, W.A.Benjamin.
- [146] BONDI, H. (1965): *Relativity and common sense*, London, Heinemann.
- [147] FOX, J.G. (1965): Evidence against emission theories, *American Journal of Physics* **33**, 1-17.
- [148] TAYLOR, E.F., WHEELER, J.W. (1966): *Spacetime Physics*, San Francisco, W.H.Freeman.
- [149] WOOLARD, E.W., CLEMENCE, G.M. (1966): *Spherical Astronomy*, New York, Academic Press.
- [150] FOX, J.G. (1967): Constancy of the Velocity of Light, *Journal of the Optical Society* **57**, 967-968.
- [151] FÜHRT (1970): *Fundamental principles of modern theoretical physics*, London, Pergamon Press.
- [152] SCHAFFNER, K. (1972): *Nineteenth-century aether theories*, Oxford, Pergamon.
- [153] SWENSON JR., L. (1972): *The ethereal Aether*, Austin, Univ.Texas Press.
- [154] MISNER, C.W., K.S.THORNE, J.A.WHEELER (1973): *Gravitation*, Reading, MA.
- [155] LIEBSCHER, D.-E. (1973): *Theoretische Physik*, Berlin, Akademie-Verlag, S. 201, erste Formel.
- [156] ATWATER, H.A. (1974): Non-simultaneity in the aberration of starlight, *Amer.J.Phys.* **42**, 1022-1024.
- [157] EICHHORN, H. (1974): *Astronomy of star positions*, New York, F.Ungar.
- [158] MELCHER, H. (1974): *Relativitätstheorie*, Berlin, Deutscher Verlag der Wissenschaften.

- [159] LIGHTMAN,A.P., PRESS,W.H., PRICE,R.H., TEUKOLSKY,S.A. (1975): *Problem book in relativity and gravitation*, Princeton NJ, Princeton University Press.
- [160] BRECHER,K. (1977): Is the velocity of light independent of its source? *Phys.Rev.Lett.* **39**, 1051-1054.
- [161] BROSCHE,P. (1977): Ein Vorläufer Christian Dopplers, *Phys.Blätter* **33**, 124.
- [162] HERLT,E., SALIÉ,N. (1978): *Spezielle Relativitätstheorie*, Berlin, Akademie-Verlag.
- [163] THÜRING,B., SCHMEIDLER,F. (1978): Vertikalkreis-Beobachtungen der Aberration des Lichtes von Sternen verschiedenen Spektraltyps, *AN* **299**, 55-58.
- [164] JACKISCH,G. ED. (1979): *J.H.Lamberts Cosmologische Briefe*, Berlin, S.230.
- [165] SCHNEIDER,M. (1979): *Himmelsmechanik*, BI Mannheim.
- [166] MILLER,A.I. (1981): *Albert Einsteins special theory of relativity: emergence (1905) and early interpretation (1905-1911)*, Reading MA, Addison-Wesley.
- [167] BROSCHE,P. (1983): Nachträge zum Vorläufer Christian Dopplers, *Sterne und Weltraum* **22**, 334.
- [168] TORETTI,R. (1984): *Relativity and Geometry*, Oxford, Pergamon.
- [169] BARNET,C., DAVIS,R., SANDERS,W.L. (1985): The aberration constant for QSOs, *Astrophys.J.* **295**, 24-27.
- [170] TREDER,H.J. (1985): Aberration und Rotation des Kosmos, *Ann.d.Physik* **42**, 71-72.
- [171] RINDLER,W. (1986): *Essential Relativity*, Heidelberg, Springer.
- [172] SEXL,R., SCHMIDT,H.K. (1991): *Raum - Zeit - Relativitaet*, Braunschweig, Vieweg, 3.Aufl..
- [173] BROSCHE,P. (1992): Ahn-Herr der Lichtablenkung, *Lichtenberg-Jahrbuch*, 138.
- [174] DAMOUR,T.,TAYLOR,J.H. (1992): Strong-field tests of relativistic gravity and binary pulsars, *Phys.Rev. D* **45**, 1840-1868.
- [175] KISLIK,M.D. (1992): Interferometric measurements and light aberration, *Astron.Zh.* **69**, 214-218.
- [176] BROSCHE,P. (1993): Der Vorläufer, *Die Sterne* **69**, 363-365.
- [177] GONDOLATSCH,F. (1993): Das sechsfache System Kastor, *Sterne und Weltraum* **69**, 26-33.
- [178] KRAUTTER,J., SEDLMAYR,E., SCHAIFERS,K., TRAVING,G. (1994): *Meyers Handbuch Weltall*, 535, 7.Aufl. Mannheim, Meyers Lexikonverlag.
- [179] MOULD,R.A. (1994): *Basic Relativity*, New York, Springer.
- [180] RUDER,H., RUDER,M. (1994): *Die Spezielle Relativitätstheorie*, Vieweg Braunschweig.
- [181] KALELKAR,M. (1995): *Physics Concepts*, <http://www.physics.rutgers.edu/~kalelkar/132/ch42.html>.
- [182] KOVALEVSKY,J. (1995): *Modern Astrometry, Lectures notes in physics*, Springer Verlag.
- [183] LIEBERT,J. (1995): Die Aberration. Ein Gedankenexperiment zum Aberrationseffekt. *Die Sterne* **71**, 76-83.
- [184] RUSSO,F.P. (1995): Analysis of stellar aberration yields the “real” speed of light, *Specul.Sci.Technol.* **18**, 200-204.
- [185] GOENNER,H. (1996): *Einführung in die spezielle und allgemeine Relativitätstheorie*, Heidelberg, Spektrum AV.
- [186] GOY,F. (1996): Aberration and the question of equivalence of some ether theories to special relativity, *Found.Phys.Lett.* **9**, 165-174.
- [187] MARMET,P. (1996): Stellar aberration and Einstein's relativity, *Physics Essays* **9**, 96-99.
- [188] SPENCER,D.E., SHAMS,U.Y. (1996): Stellar aberration and the postulates on the velocity of light, *Physics Essays* **9**, 476-483.
- [189] ZEHE,H. (1996): in *W.Promies, U.Joost (eds.): Lichtenberg Jahrbuch 1995*, Saarbrücken, S. 197.
- [190] RÖSCH,P (1997): Relativitätstheorie – ohne Michelson! *Physik in der Schule* **35**, 199-201.
- [191] KELLER,H.-U. (1998): Astronomie für Einsteiger: Die Aberration des Sternlichtes, *Sterne und Weltraum* , .