

Übungen finden Donnerstags um 13 Uhr in Seminarraum 3 statt

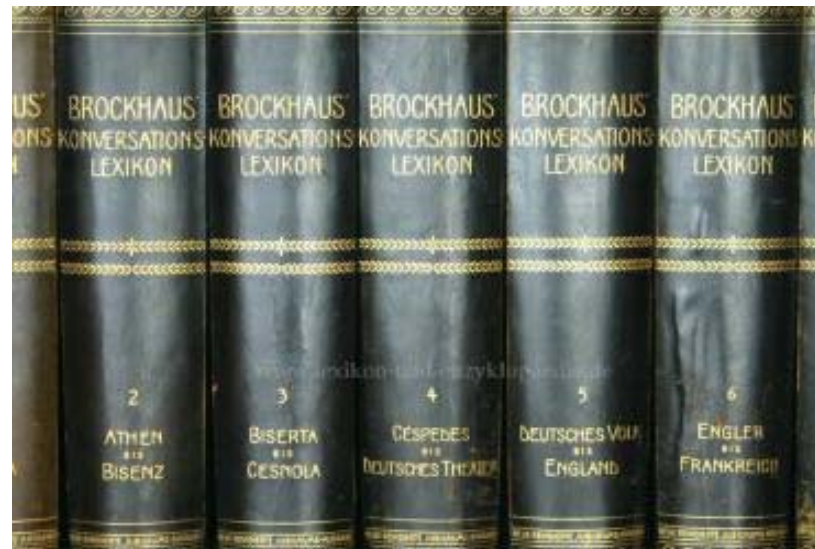
# Äther

- Einstein Postulate
- Sternparallaxe
- Fizeau Experiment
- Michelson-Morley Experiment

# Brockhaus Konversationslexikon 1901

## Äther

**Äther, Lichtäther, nach allgemeiner Annahme der neueren Physik ein äußerst feiner und höchst elastischer Stoff, der nicht nur im ganzen Weltraume ausgebreitet ist, sondern auch die Zwischenräume ausfüllt, durch welche die kleinsten Teilchen der Körper voneinander getrennt sind. Der Ä. ist das Mittel, durch das sich die Licht- und Wärmestrahlen fortpflanzen. Als solches müssen ihm, da derselbe Querschwingungen fortleitet, gewisse Eigenschaften eines starren Körpers zugeschrieben werden, während er andererseits wieder Eigenschaften einer Flüssigkeit zeigen soll. Im Ä. pflanzen sich auch die elektrischen und magnetischen Zustände fort, die zu den Vorgängen des Lichts in engster Beziehung stehen. Früher galt der Ä. als Imponderabilie, d.h. als ein gewichtsloser Stoff. Aus der Energie der Lichtwellen hat man gefunden, daß der Ä. etwa 15 trillionenmal leichter ist als atmosphärische Luft.**



# Thema Äther

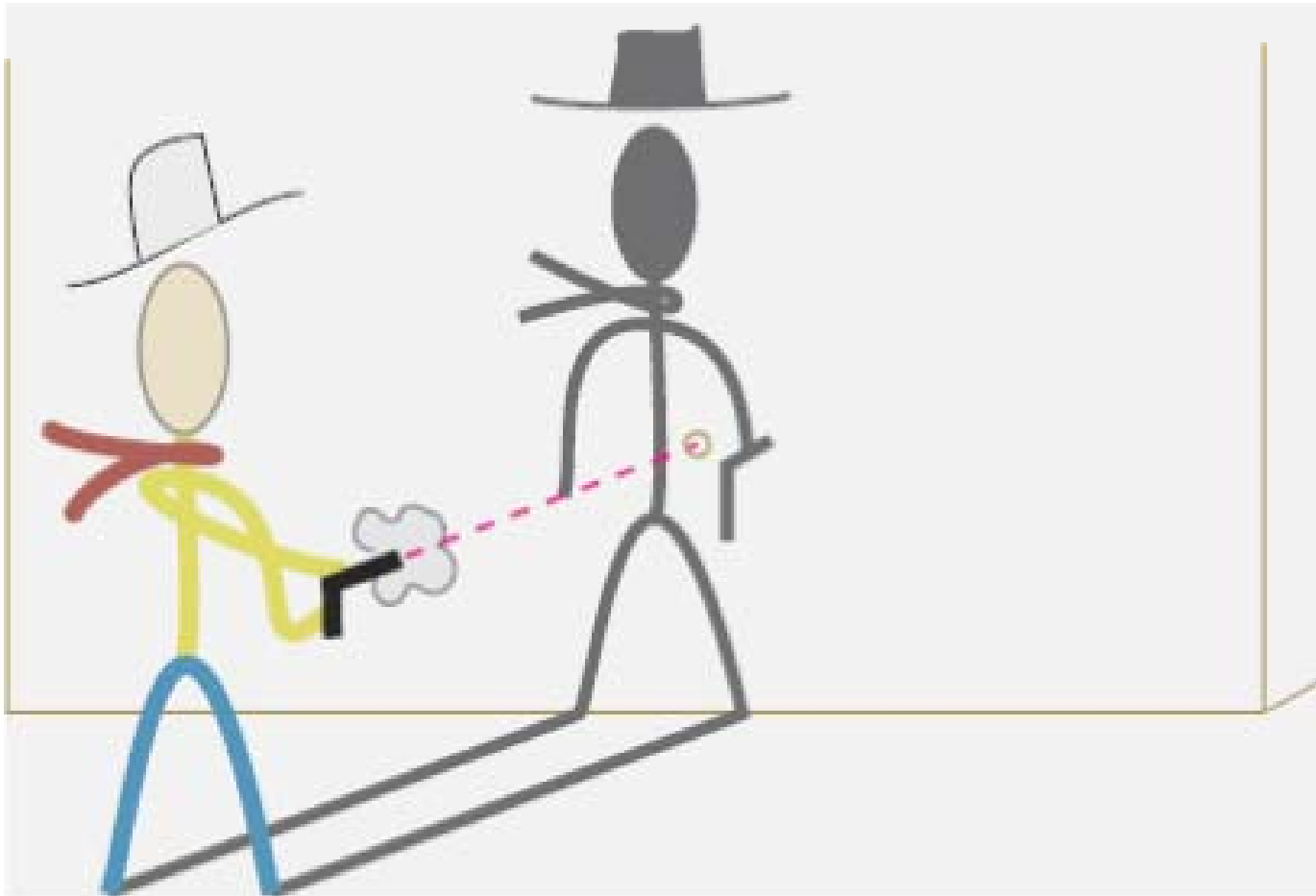
## Einstein Postulate





# Der Mann, der schneller schießt als sein Schatten

## Lucky Luke



### Diagnose

Um das Revolverduell mit seinem eigenen Schatten zu gewinnen, muss die Kugel aus dem Revolver sich schneller bewegen als das Licht

# Spezielle Relativitätstheorie

## Postulate

### Relativitätsprinzip

Gesetze der Physik gelten in allen Inertialsystemen und kein Bezugssystem ist ausgezeichnet

#### Galilei

Gesetze der MECHANIK gelten in allen Bezugssystemen (Newton 1)

#### Einstein

- Gesetze der PHYSIK gelten in allen Bezugssystemen
- dies gilt also auch für Optik und Elektrodynamik
- Messwerte können für Beobachter unterschiedlich ausfallen

### Prinzip der Konstanz der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Licht

Die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum hat denselben Wert unabhängig von Richtung und Bezugssystem des Beobachters

- nichts was Energie oder Information trägt, kann diese Geschwindigkeit überschreiten
- kein massebehaftetes Teilchen kann die Lichtgeschwindigkeit erreichen

Das Maß aller Dinge ist die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$$





Common sense is that layer of prejudices laid down in the mind prior to the age of eighteen

## Konsequenzen

**Erstes Postulat der speziellen Relativitätstheorie**

- zwei Personen, die sich mit konstanter Geschwindigkeit zueinander bewegen, können **NICHT** unterscheiden, wer ruht und wer sich bewegt
- die physikalischen Gesetze gelten in **ALLEN** Bezugssystemen und beziehen sich nicht auf ein absolutes Bezugssystem
- deshalb können die Beobachter **NUR** ihre relative Geschwindigkeit zueinander bestimmen



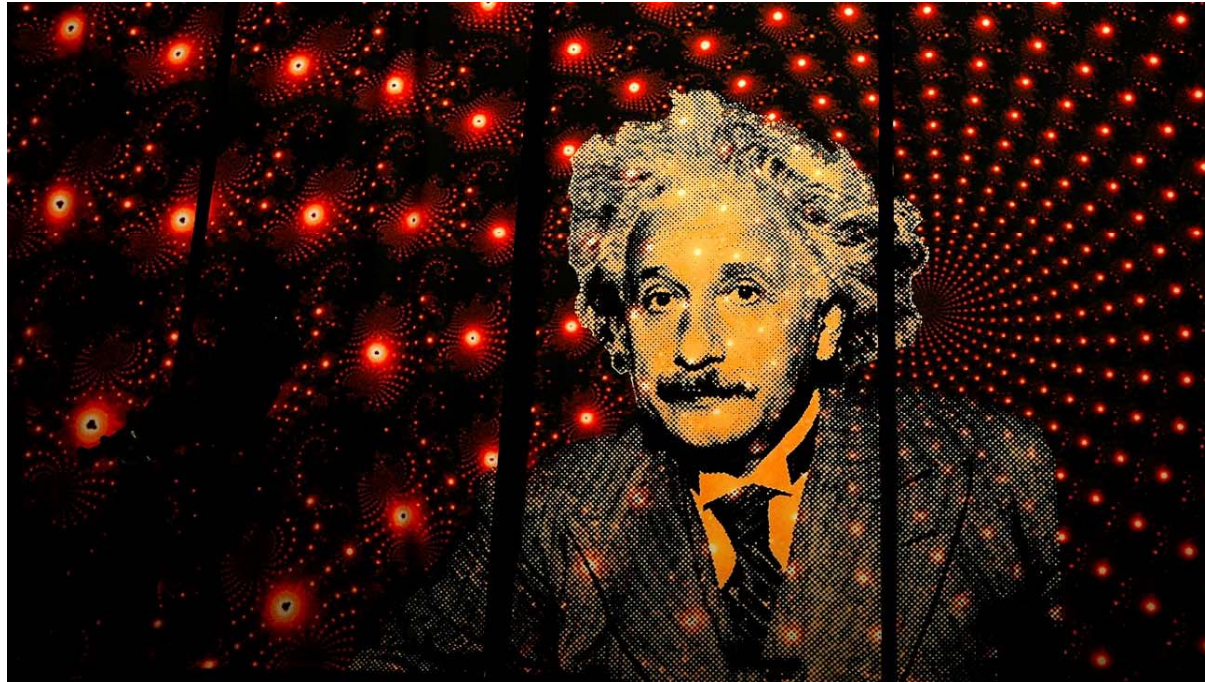
**Zweites Postulat der speziellen Relativitätstheorie**

- Licht ist grundsätzlich unterschiedlich zu **ALLEN** anderen Wellen, wie beispielsweise Schall
- Beobachter wird Erhöhung der Frequenz feststellen, wenn sich Schallquelle auf ihn zu bewegt
- für Licht ist das **NICHT** der Fall

1905

# Einsteins Zeitpostulat

***Befinden sich in A zwei synchrone Uhren und bewegt man die eine derselben auf einer geschlossenen Kurve mit konstanter Geschwindigkeit, bis sie wieder nach A zurückkehrt, was  $t$  Sek. dauern möge, so geht die letztere Uhr bei ihrer Ankunft in A gegenüber der unbewegt gebliebenen um  $1/2 \cdot t \cdot (v/c)$  Sekunden nach.***



***Man schließt daraus, daß eine am Erdäquator befindliche Unruheuhr um einen sehr kleinen Betrag ( $10^{-7}$ s pro Umlauf) langsamer laufen muss als eine genau gleich beschaffene, sonst gleichen Bedingungen unterworfenen, an einem Erdpole befindliche Uhr***

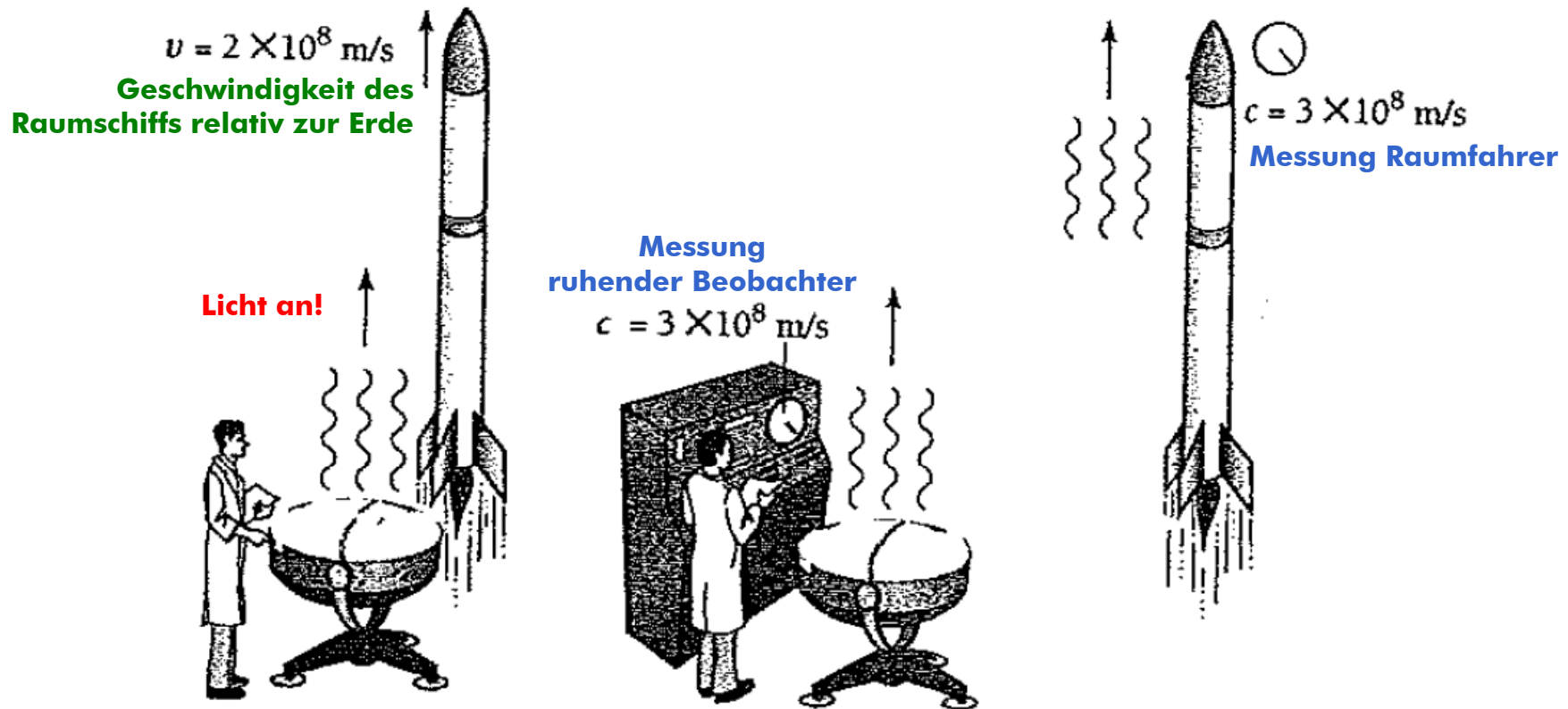


# Raketenphysik

## Ultimate Speed Limit

### Symptome

- Suchscheinwerfer wird eingeschaltet, wenn gerade ein schnelle Raumschiff vorbei fliegt
- ruhender Beobachter und Raumfahrer messen Lichtgeschwindigkeit mit gleichen Instrumenten



### Diagnose

- ruhender Beobachter bestimmt Lichtgeschwindigkeit mit  $3 \times 10^8 \text{ m/s}$
- Raumfahrer stellt NICHT fest, dass Licht sich mit  $(3-2) \times 10^8 \text{ m/s} = 1 \times 10^8 \text{ m/s}$  fortbewegt
- obwohl er sich parallel zum Lichtstrahl bewegt, bestimmt er Lichtgeschwindigkeit mit  $3 \times 10^8 \text{ m/s}$

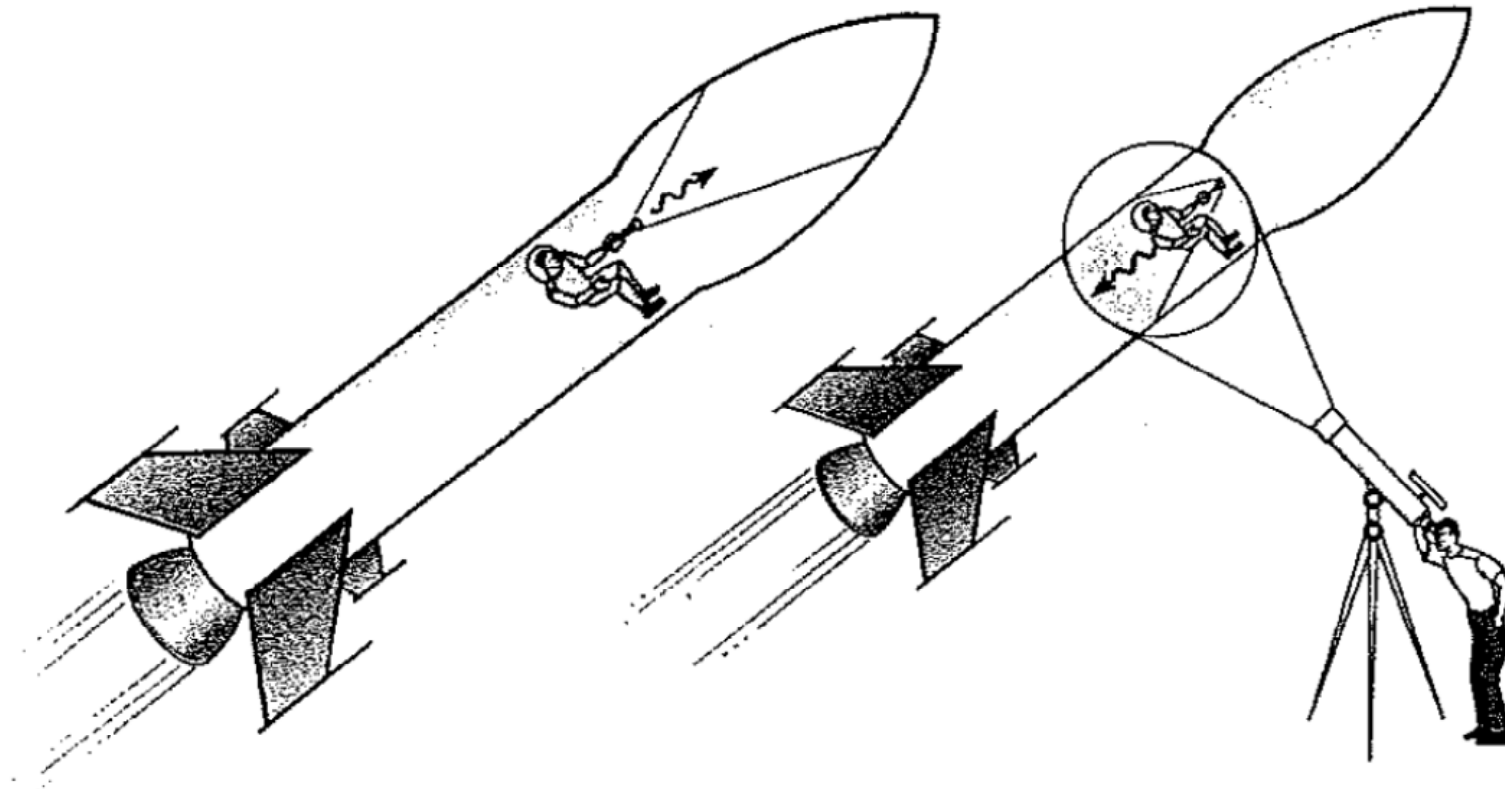


# Raketenphysik

## Ultimate Speed Limit

### Symptome

- Raumfahrer in einem Raumschiff schaltet seine Taschenlampe an
- im Vergleich zu Beobachter auf der Erde bewegt sich Raumschiff mit Überlichtgeschwindigkeit



### Diagnose

- Beobachter auf der Erde beobachtet, dass sich der Lichtstrahl nach hinten ausbreitet
- Relativitätsprinzips ist verletzt
- Raumschiff bewegt sich im Vergleich zur Erde nicht mit einer Geschwindigkeit größer Licht
- diese Analyse gilt für ALLE Bezugssysteme

# ultimate speed of particles

## Bertozzi-Experiment 1964

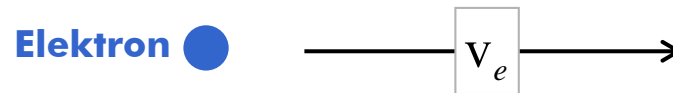
### ANALYSE

- Geschwindigkeit der Elektronen bestimmt über Flugzeit
- kinetische Energie der Elektronen gemessen über Kalimetrie

### Aluminiumplatte

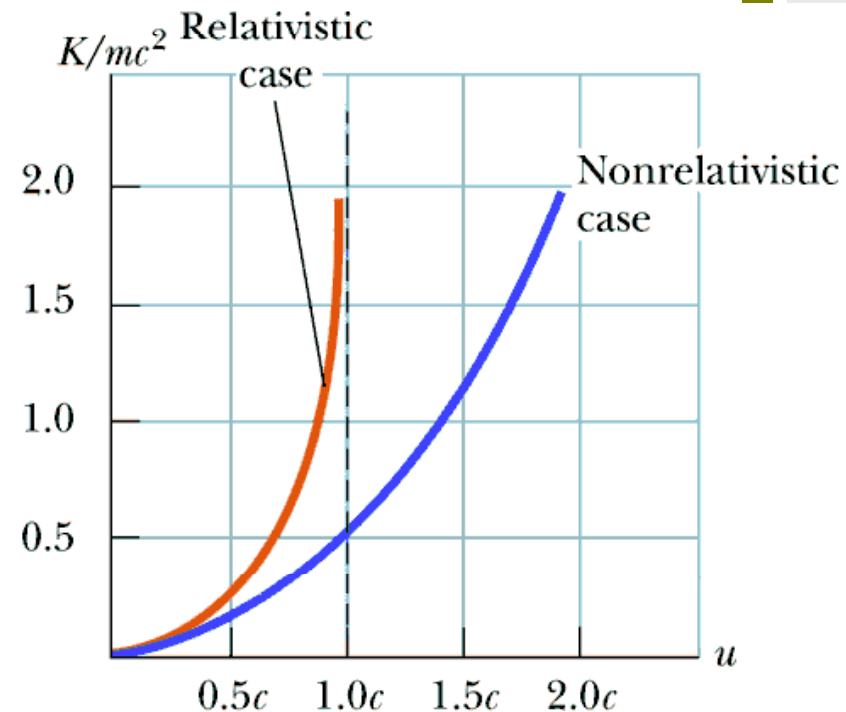
kinetische Energie wird in Wärme umgewandelt

$$Q_{th} = mc_{th} \Delta T_K$$



$$E_{kin} = eU_e = \frac{1}{2} m_e v_e^2$$

$$v_e = \sqrt{\frac{2eU_e}{m_e}}$$

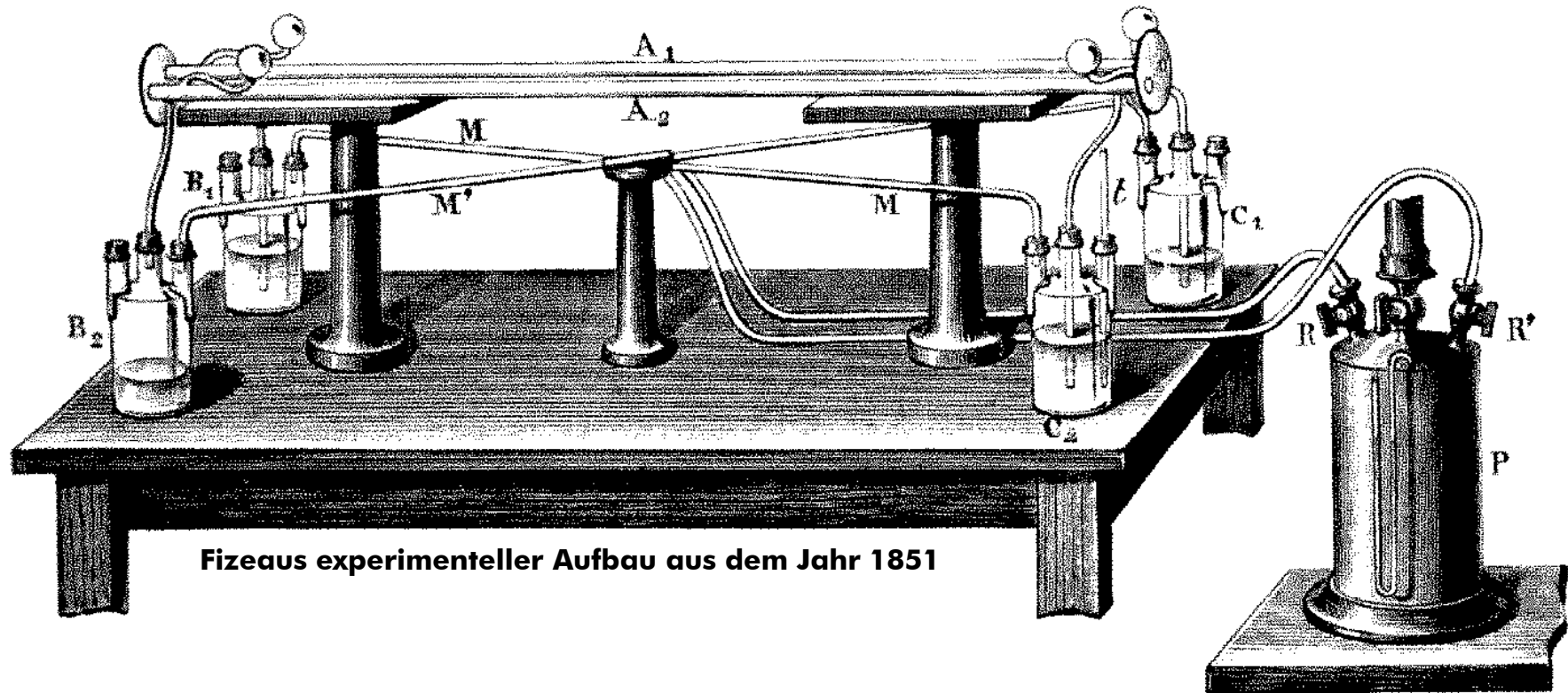


### Diagnose

- für massebehaftete Teilchen gibt es eine Grenzggeschwindigkeit
- gut Übereinstimmung der Messungen mit Vorhersagen spezieller Relativitätstheorie

# Thema Äther

## Fizeau Experiment





# Wo Newton irrte

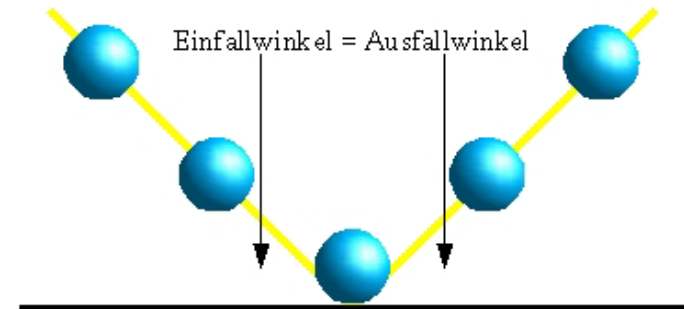
## Symptome

- nach Newtons Korpuskeltheorie besteht Licht aus Teilchen, die sich wie Gummibälle verhalten
- Theorie falsch, aber optische Phänomene werden richtig beschrieben



Newton's Korpuskeltheorie

$$c_{\text{medium}} = c \cdot n_{\text{medium}}$$



Huygens Wellentheorie

$$c_{\text{medium}} = \frac{c}{n_{\text{medium}}}$$

## Diagnose

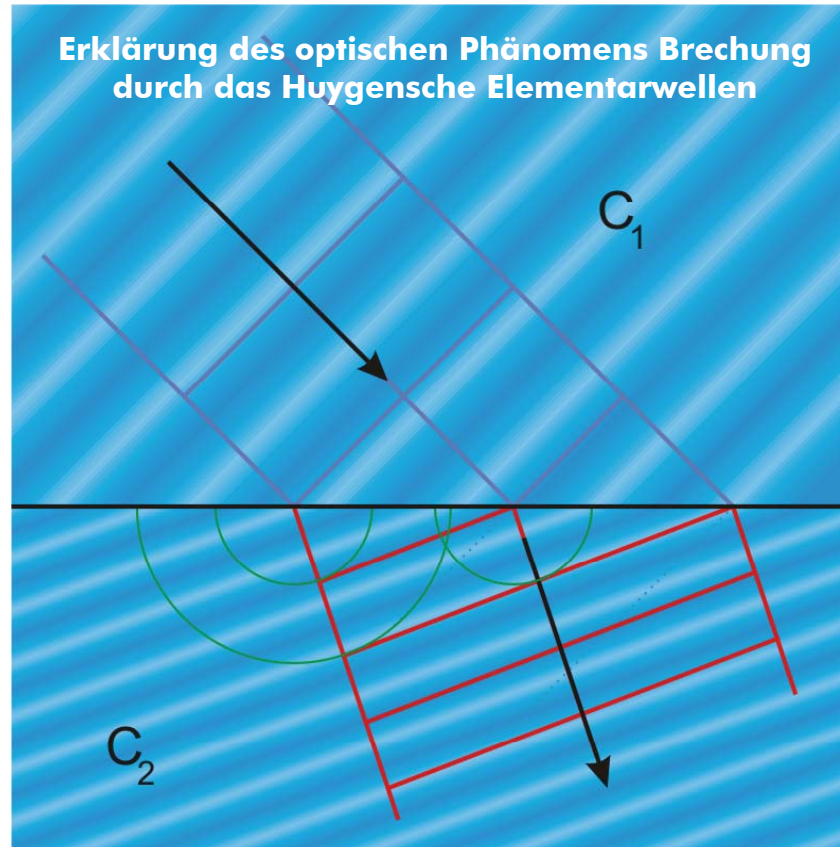
- jeder Punkt einer Wellenfront als Ausgangspunkt einer neuen Welle (Elementarwelle).
- Lage der Wellenfront ergibt sich durch Superposition aller Elementarwellen
- wichtig in diesem Zusammenhang ist Vorhersage der Ausbreitungsgeschwindigkeit im Medium



# Lichtgeschwindigkeit

## Symptome

Die Geschwindigkeit des Licht ist mit 299 792 458 m/s im Vakuum konstant



Lichtgeschwindigkeit  
in Medium



## Diagnose

- dieser Wert gilt allerdings **NUR** im Vakuum
- in einem Medium verringert sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit
- als Konsequenz ergibt sich beispielsweise das **Snelliussche Brechungsgesetz**

# Historie Lichtgeschwindigkeit

1672 Ole Römer

Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit aus Mondbewegung um Jupiter

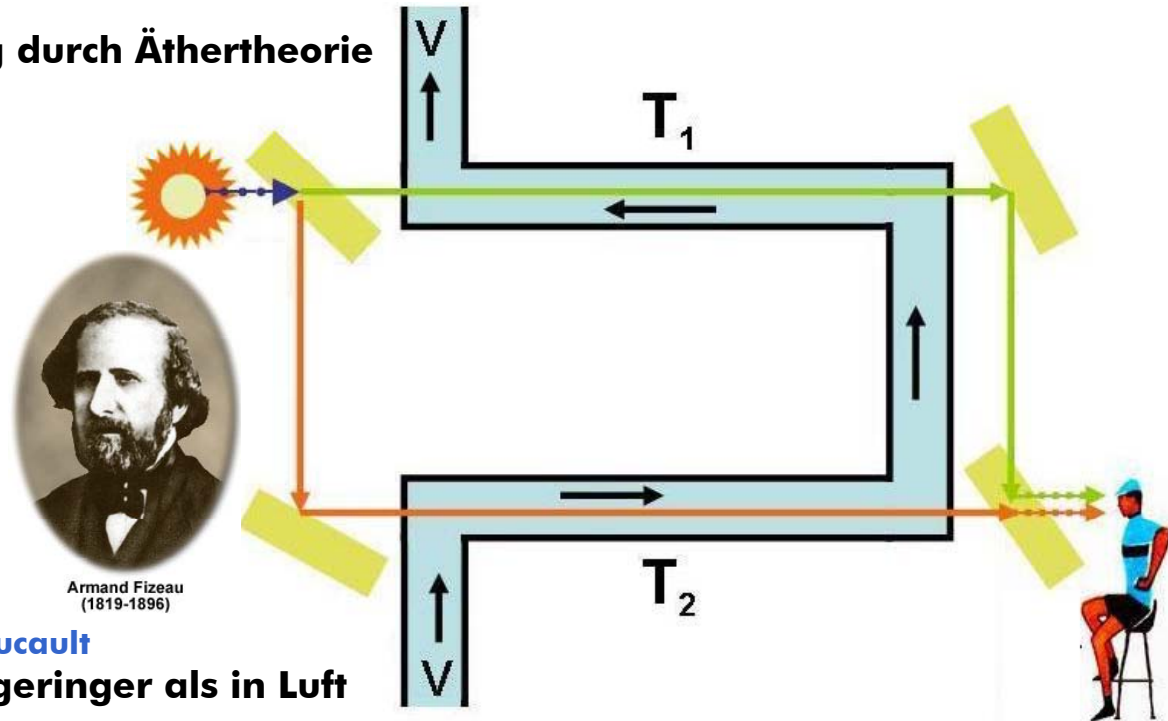
1810 Francois Arago

Ablenkung des Strahls eines entfernten Sterns durch ein Prisma

Abbremsung oder Beschleunigung des Lichtstrahls durch die Erdbewegung: NULL Resultat

1818 Augustin Fresnel

Fresnel erklärt Aragos Beobachtung durch Äthertheorie



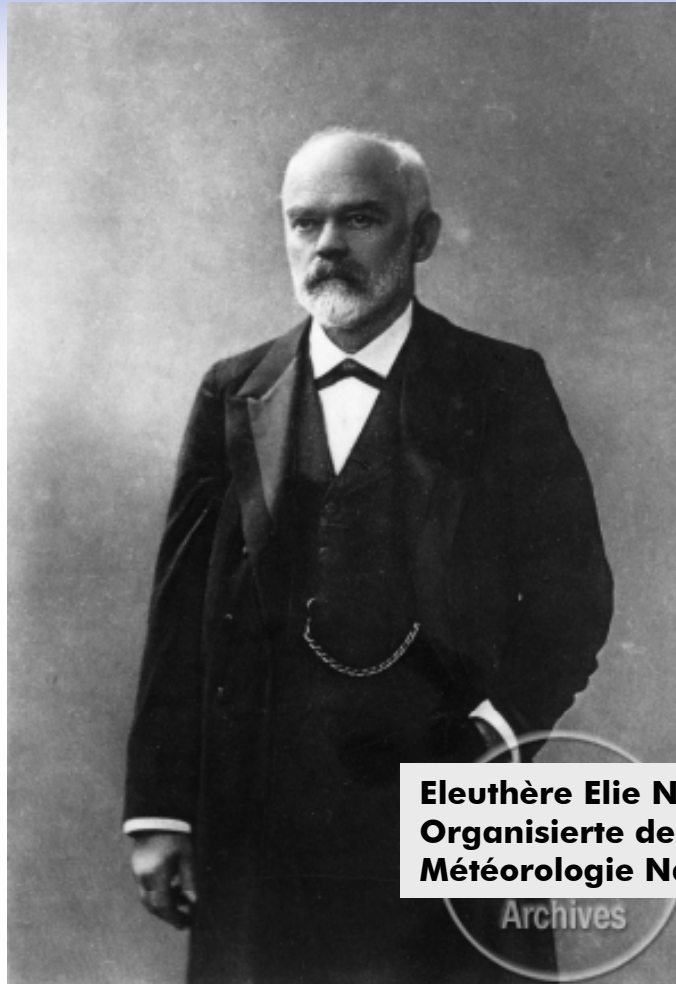
1849 Armand Fizeau und später Leon Foucault

Lichtgeschwindigkeit in Wasser ist geringer als in Luft

1851 Armand Fizeau

Messung der Ätherreibung in bewegtem Medium über differentielles Interferometer

# Eleuthere Mascart 1874



Eleuthère Elie Nicolas Mascart (1837-1908)  
Organisierte den französischen Wetterdienst  
Météorologie Nationale Française

***The general conclusion of this memoir would be ... that the translation motion of the earth is of no appreciable consequence on optical phenomena produced with terrestrial sources or solar light, that those phenomena do not allow to appreciate the ABSOLUTE motion of a body and that only RELATIVE motions can be attained.***

Aus dem Werbetext

**Dauerhaft glatte Haut in Lichtgeschwindigkeit  
Philips präsentiert den Lumea Precision Plus**



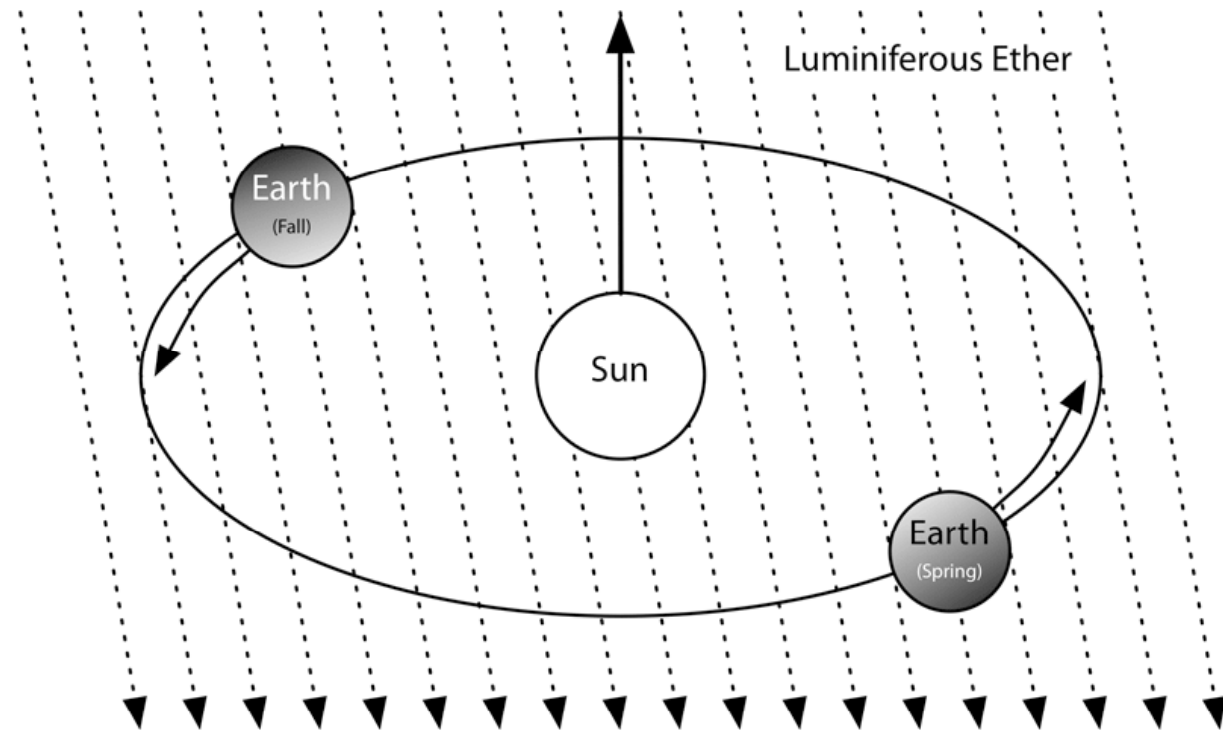
***Ich fliege in einem Raumschiff mit Lichtgeschwindigkeit und möchte mich im Spiegel rasieren. Doch wie kann das Licht von meiner Kinnschuppe den Spiegel überhaupt erreichen, wenn der Spiegel ihm doch mit Lichtgeschwindigkeit davoneilt?***

# Physik des 18. Jahrhunderts

## Ein Medium für Licht

### Symptome

- Äther ist eine Substanz, die als Medium für Ausbreitung von Licht postuliert wurde
- Idee ist, dass Licht sich wie eine Schallwelle in Wasser ausbreitet



Bahngeschwindigkeit der Erde

$$v_{\text{earth}} = 3 \cdot 10^4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

### Diagnose

- Lichtgeschwindigkeit **UNTERSCHIEDLICH** in unterschiedlichen Bezugssystemen
- Licht hat Welleneigenschaften und verhält sich wie andere Wellen, wie beispielsweise Schall
- der Äther legt ein **ABSOLUTES** Bezugssystem fest
- der Äther ist ein festes, masseloses Objekt **OHNE** Einfluss auf die Planetenbewegung
- bis ins 19. Jahrhundert konnte **KEIN** Experiment die Existenz des Äthers bestätigen



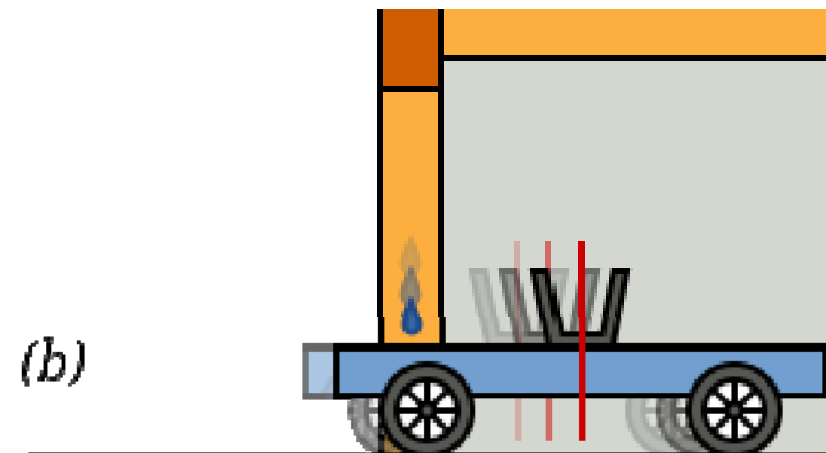
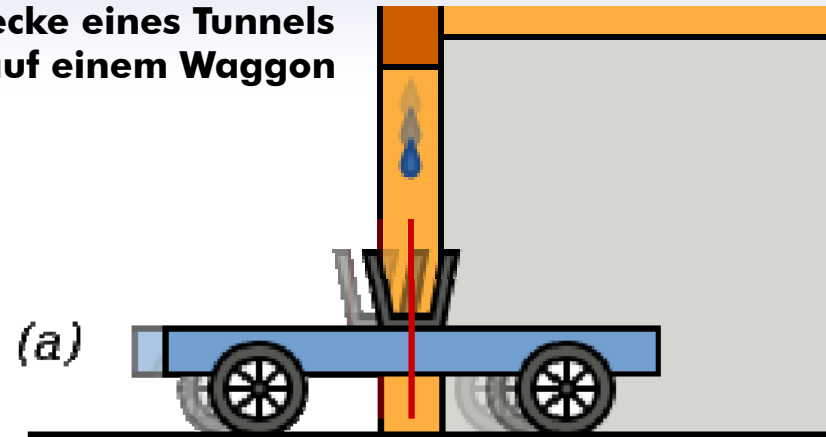
# Die Lichtgeschwindigkeit ist endlich

## Tropfenexperiment



### Symptome

- Wasser tropft von der Decke eines Tunnels
- ein Eimer befindet sich auf einem Waggon



### Ball in Papierkorb



### Diagnose

- beim ruhenden Zug fällt Tropfen in die Mitte des Gefäßes
- beim fahrenden Zug trifft der Wassertropfen NICHT die Mitte des Eimers

# Und sie bewegt sich doch Sternenlicht

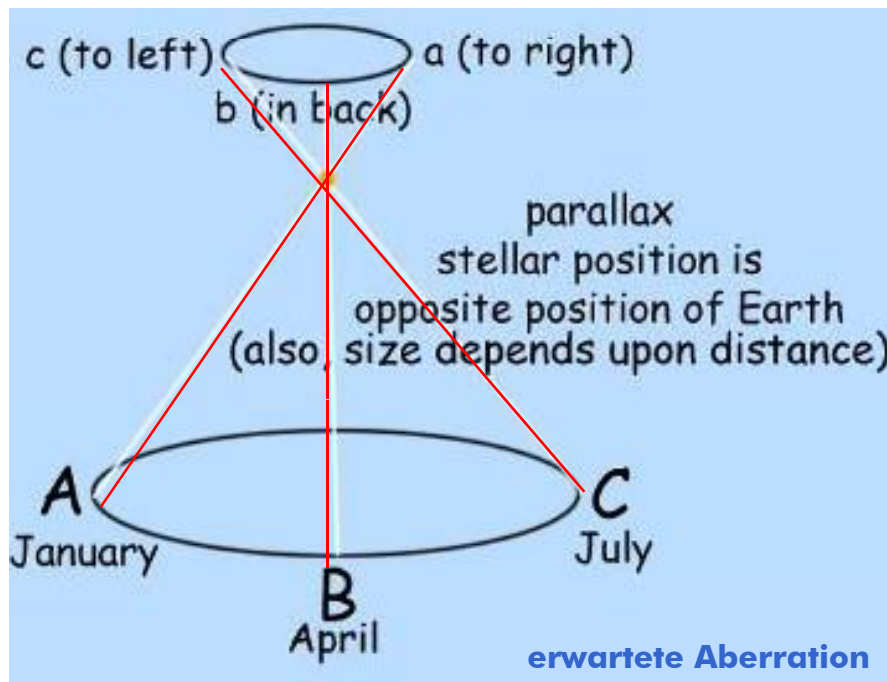
James Bradley  
1693-1762



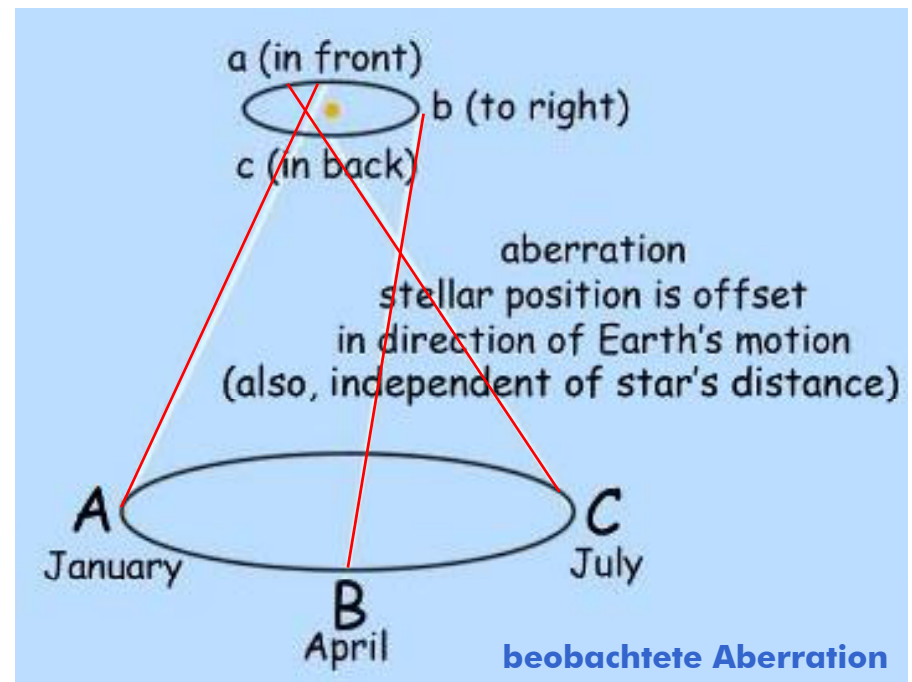
## Symptome

- stellare Aberration als Beweis der Erdbewegung bis ins 18. Jahrhundert nicht messbar
- beobachtete Parallaxe  $\gamma$ -Draconius stimmt im Jahresverlauf nicht mit Rechnung überein

## erwartete Sternposition heliozentrisches Weltbild



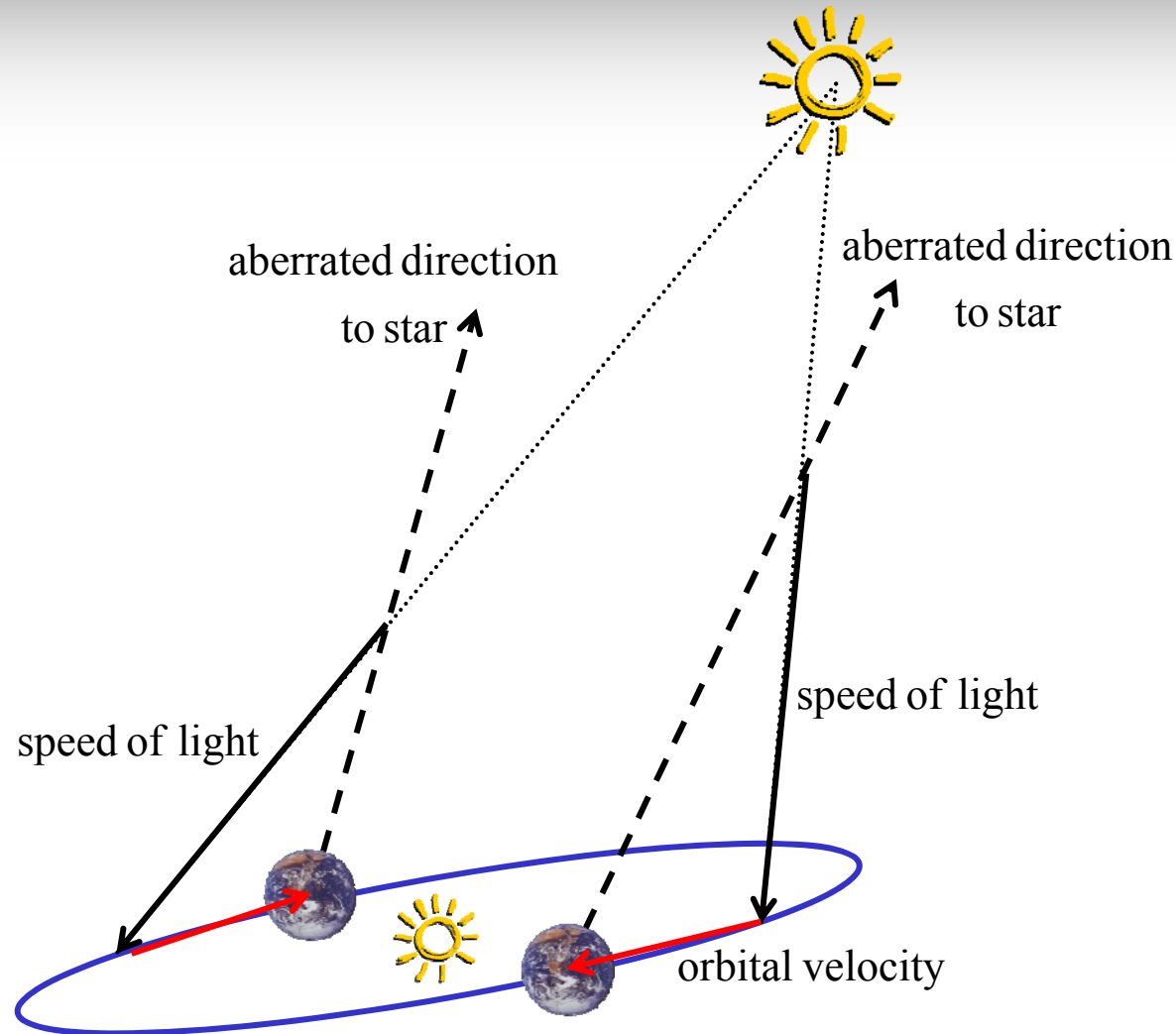
## tatsächliche Sternposition



## Diagnose

- Beobachtung ist mit Bewegung der Sterne um Sonne als Zentrum nicht vereinbar
- Erde bewegt sich auf einer Keplerbahn mit einer gewissen Geschwindigkeit
- entgültiger Beweis für Kopernikanisches Weltbild

# Und sie bewegt sich doch Sternenlicht



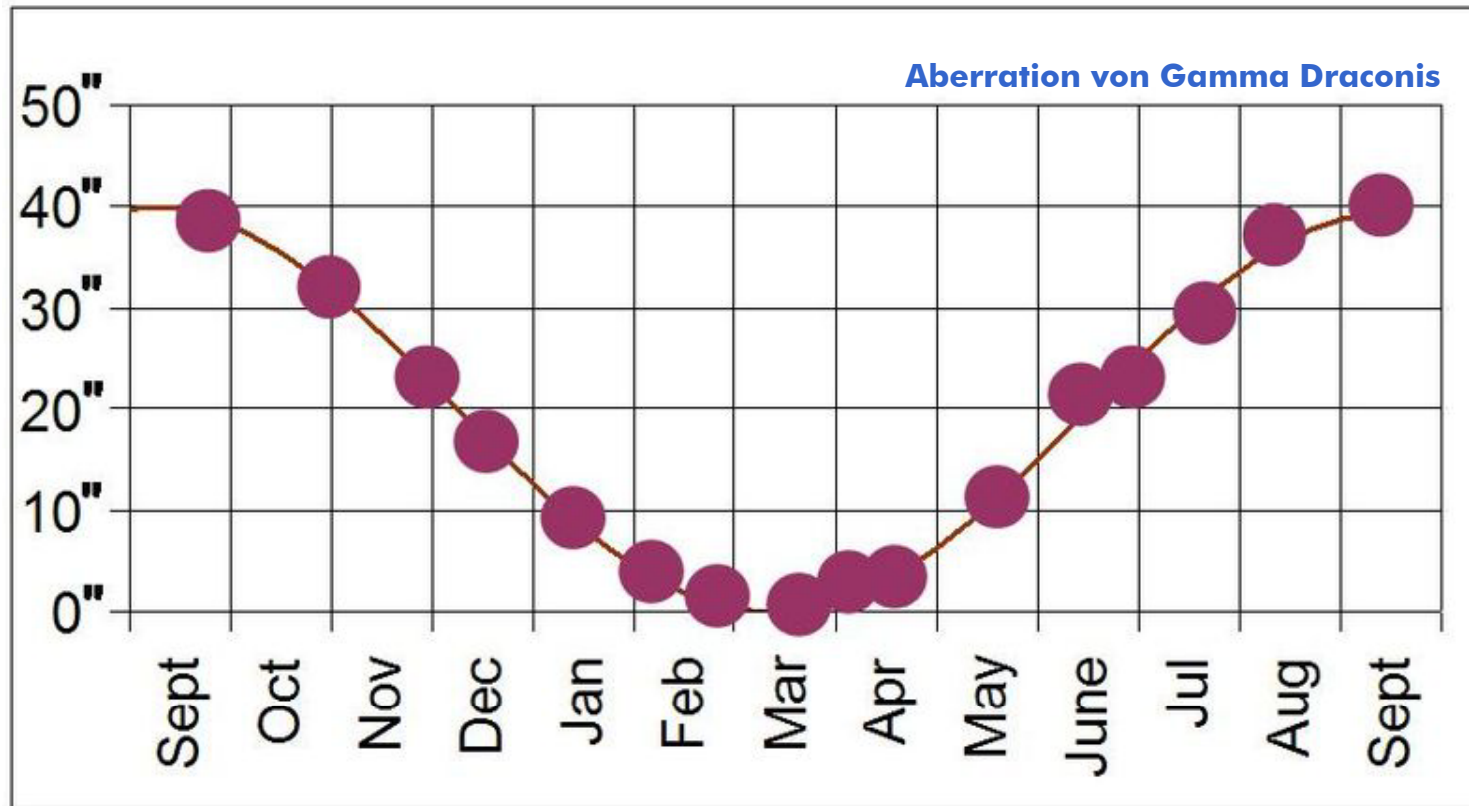
**wenn zur Fortpflanzung des Lichts Zeit erforderlich ist, die scheinbare Lage eines ortsfesten Gegenstandes eine verschiedene sein muss, je nachdem ob sich das Auge [das Teleskop] in Ruhe befindet oder aber sich in irgendeine Richtung bewegt**  
**Bradly in einem Bericht an die Royal Astronomical Society**

Bradley 1725

# Aberration des Sternenlichts

## Symptome

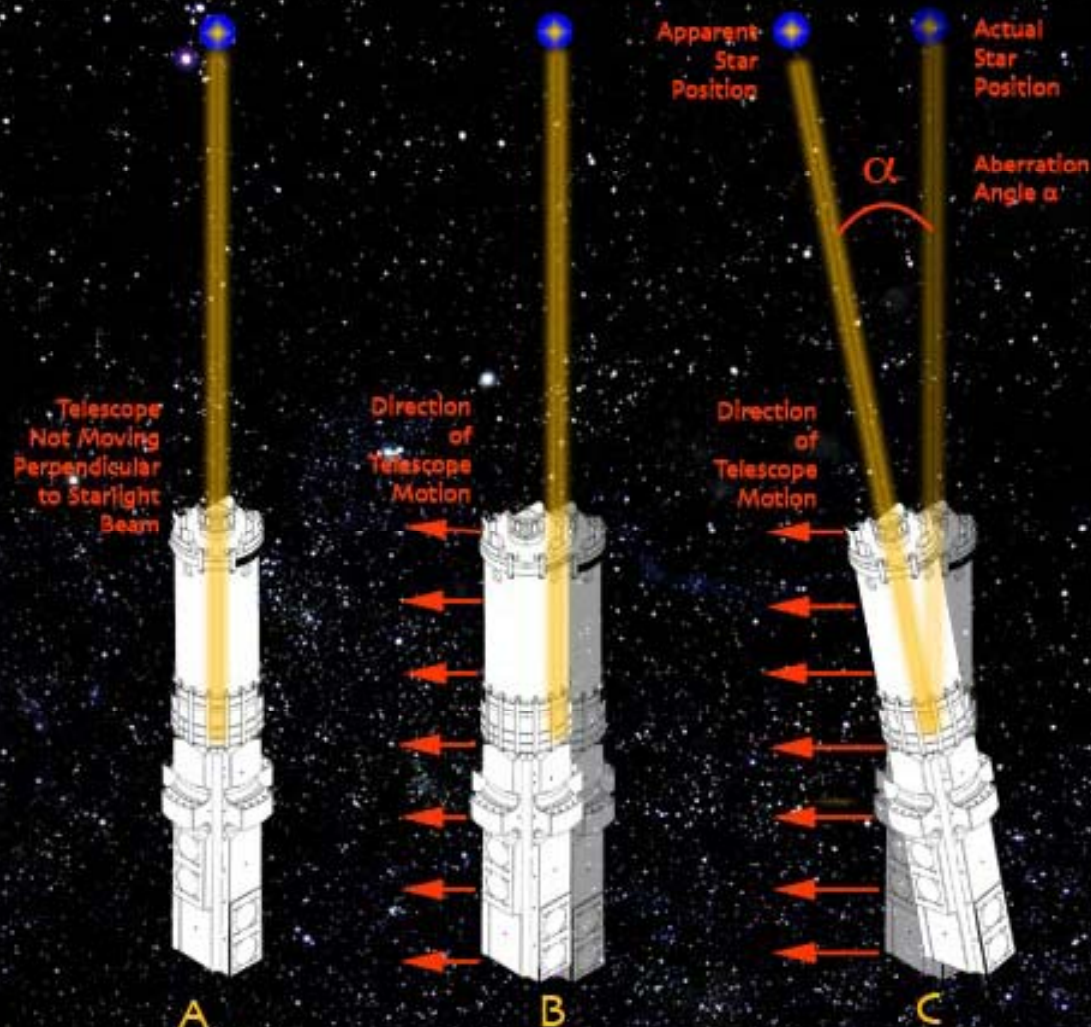
- Richtung zu den Sternen ändert sich mit Amplitude von 20 Bogensekunden ( $0.0056^\circ$ )
- scheinbare Ortsveränderung Gestirne hervorgerufen durch Endlichkeit Lichtgeschwindigkeit



## Diagnose

- erster experimenteller Nachweis der Bewegung der Erde um die Sonne
- scheinbare Bewegung Stern Gamma Draconis erster Beweis für heliozentrisches Weltbild
- Meilenstein auf Weg zur speziellen Relativitätstheorie

# Aberration of Starlight



A  
In a telescope that is not moving perpendicular to the incoming starlight, the beam shines directly on the center of the focal plane.

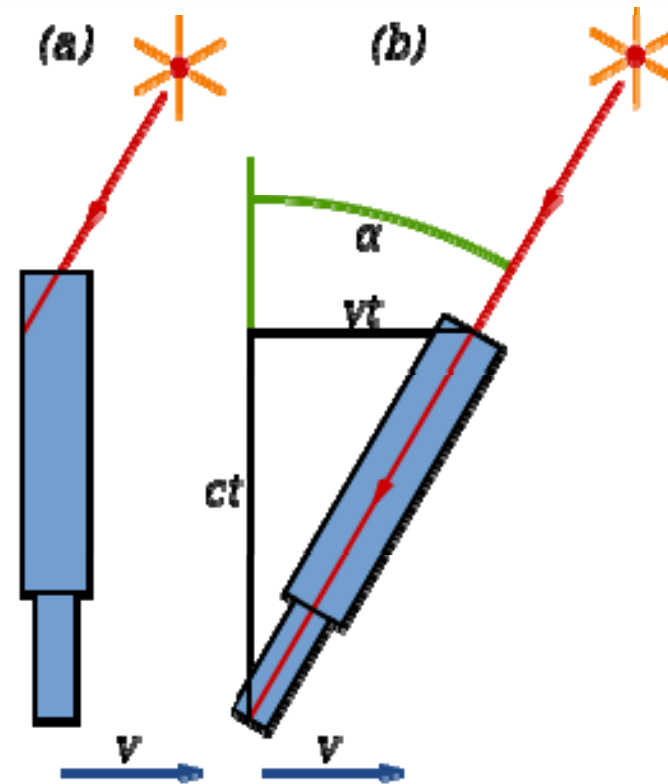
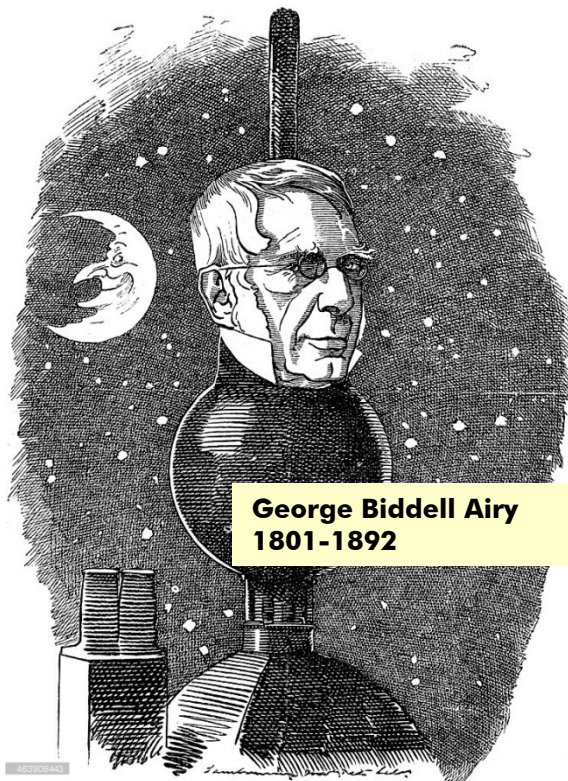
B  
If the telescope is moving perpendicular to the starlight, the beam is displaced off-center by the time it reaches the focal plane.

C  
Tilting the telescope by the aberration angle  $\alpha$ , towards the apparent position of the star, compensates for the telescope's motion and keeps the beam centered.

# Stellare Aberration

## Symptome

**Bewegtes Teleskop kann Sternenlicht nur beobachten, wenn Licht Tubus nicht streift**



## Diagnose

- Airy demonstriert, dass auch Wasser gefülltes Teleskop diesen Effekt zeigt
- Hypothese: Licht bewegt sich in Äther, der sich mit Geschwindigkeit Teleskop bewegt

*On the Supposed Alteration in the Amount of Astronomical Aberration of Light,  
produced by the Passage of the Light through a Considerable Thickness of Refracting Medium*  
G.B. Airy, Proceedings of the Royal Society of London 20: 35 (1871)

# Luftgefüllte Teleskope

Bradley 1725

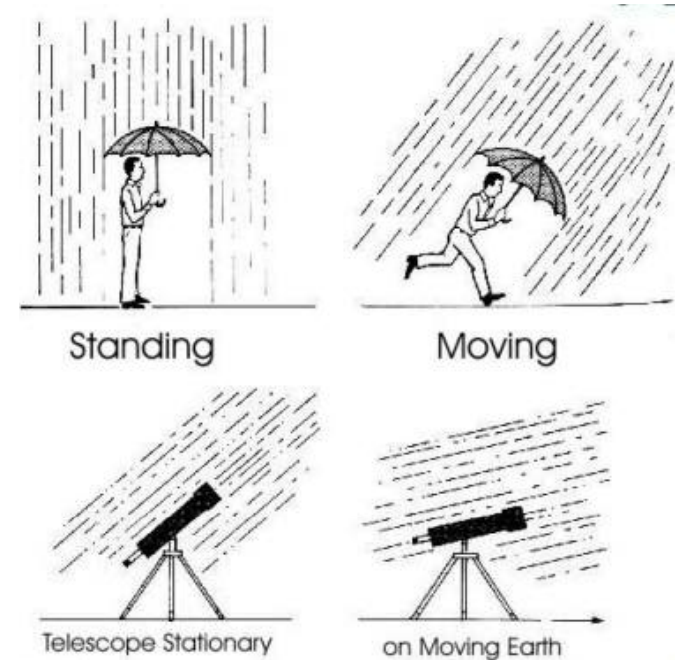
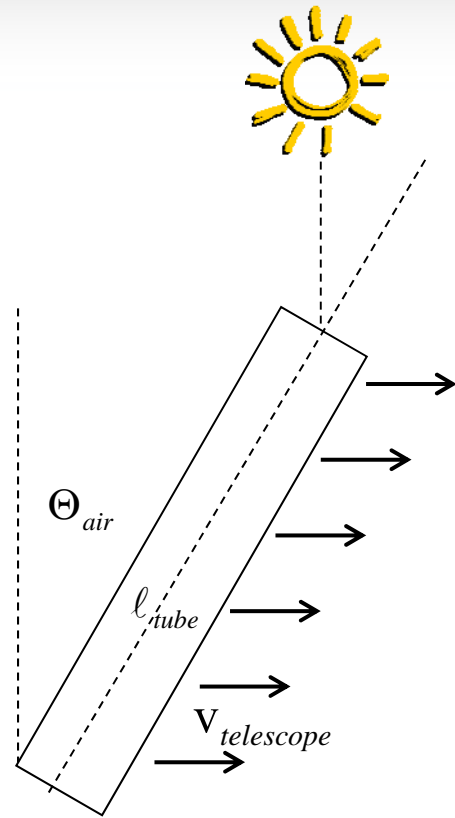
Lichtweg durch Tubus in Luft

$$t_{air}^{vertical} = \frac{l_{air}}{c} = \frac{l_{tube} \cos \Theta_{air}}{c}$$

$$t_{air}^{horizontal} = \frac{l_{air}}{V_{telescope}} = \frac{l_{tube} \sin \Theta_{air}}{V_{telescope}}$$

$$\tan \Theta_{air} = \frac{V_{telescope}}{c}$$

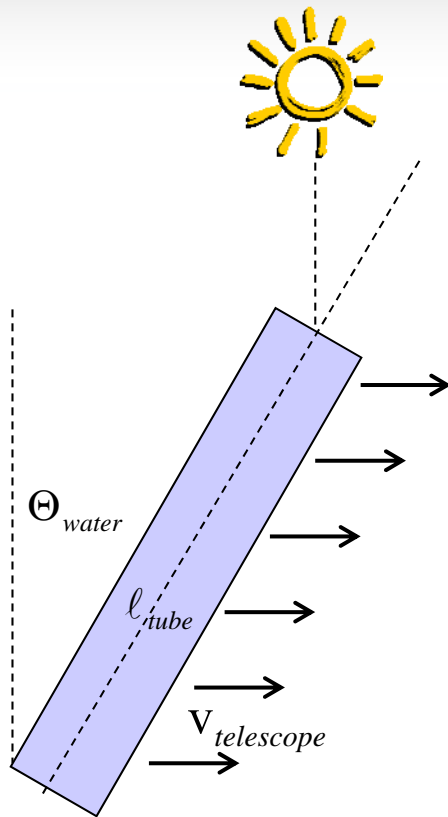
Winkel unter dem Lichtstrahl Okular erreicht



## Diagnose

- Lichtgeschwindigkeit ist endlich
- Geschwindigkeit des Teleskops beeinflusst Aberrationswinkel

# Wassergefüllte Teleskope



Boscovich 1766

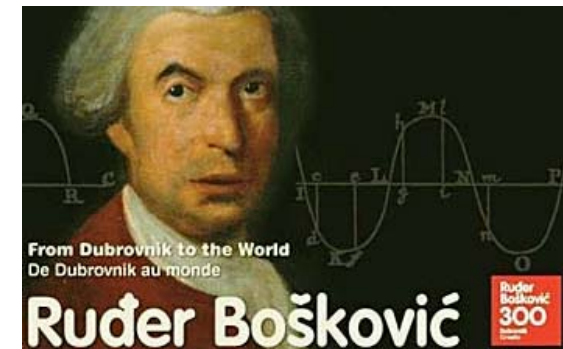
Lichtweg durch Tubus in Wasser

$$t_{air}^{vertical} = \frac{l}{c} = \frac{l_{tube} \cos \Theta_{water}}{c_{water}}$$

$$t_{air}^{horizontal} = \frac{l}{V_{telescope}} = \frac{l_{tube} \sin \Theta_{water}}{V_{telescope}}$$

$$\tan \Theta_{water} = \frac{V_{telescope}}{c_{water}} < \frac{V_{telescope}}{c_{air}}$$

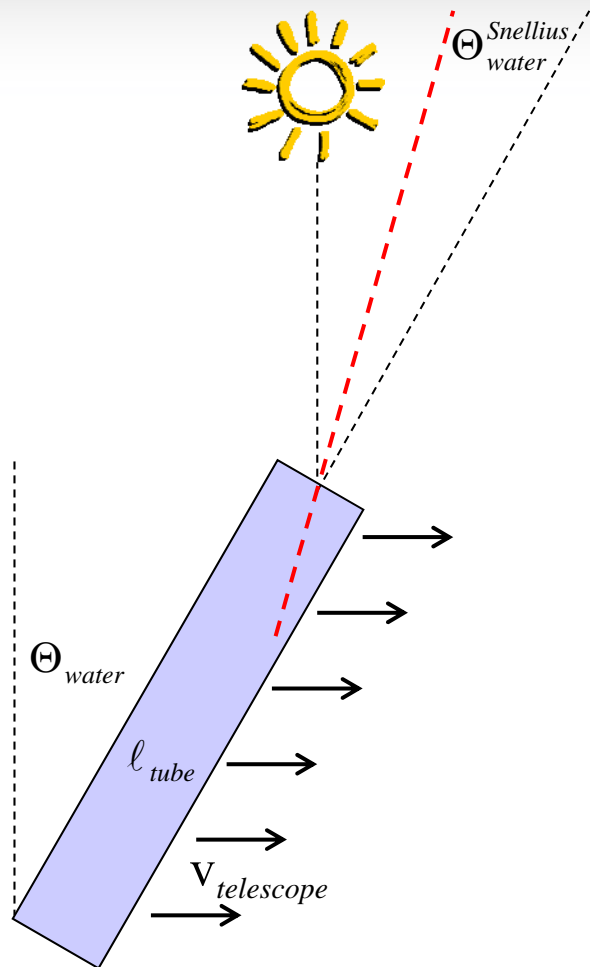
Winkel unter dem Lichtstrahl Okular erreicht verringert sich



## Diagnose

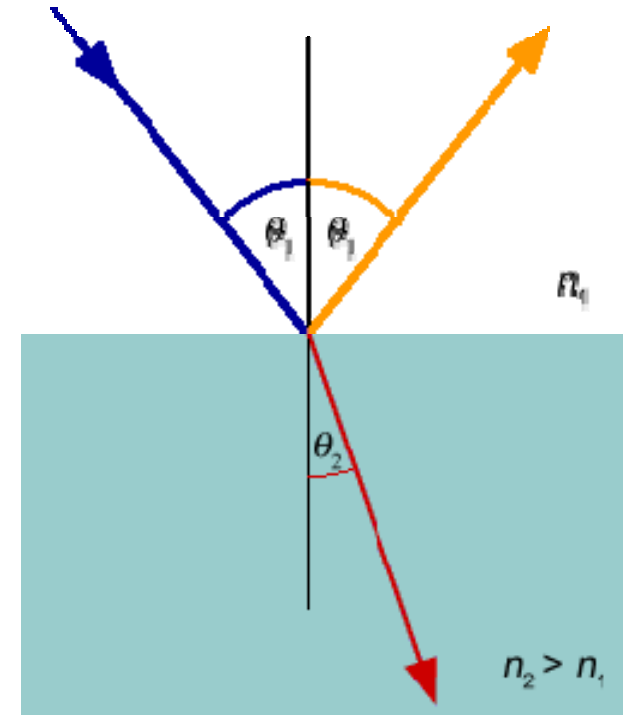
- Wasser im Tubus ändert nicht Geometrie aber Ausbreitungsgeschwindigkeit
- Aberrationswinkel sollte geringer ausfallen

# Lichtbrechung berücksichtigt Wassergefüllte Teleskope



Snellius Brechungsgesetz

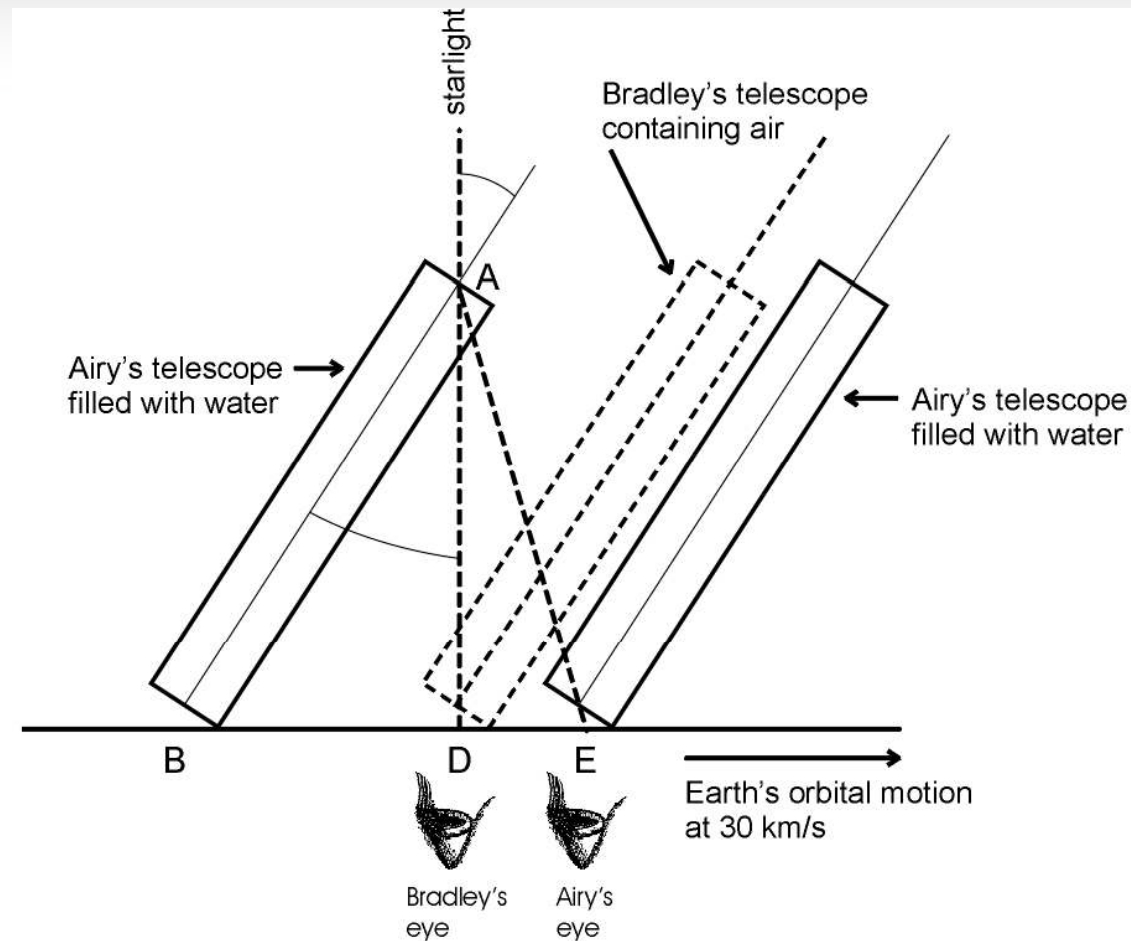
$$\frac{\sin \Theta_{air}}{\sin \Theta_{water}} = \frac{n_{water}}{n_{air}}$$



## Diagnose

- Wasser reduziert die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts
- Brechung des Lichts zum Lot hin muss berücksichtigt werden
- Analyse zeigt, dass Aberrationswinkel unbeeinflusst von Medium im Teleskop

# Wassergefüllte Teleskope



## Diagnose

**Aufgrund Lichtbrechung erscheint Stern in wassergefülltem Teleskop (Airy) an anderer Position im Vergleich zu luftgefülltem Instrument (Bradley)**

# Beobachtungen an Licht

---

Light can move through vacuum.

Light transports energy.

Light has momentum: it can hit bodies.

Light has angular momentum: it can rotate bodies.

Light moves across other light undisturbed.

Light in vacuum always moves faster than any material body does.

The speed of light, its true signal speed, is the forerunner speed.

In vacuum its value is  $299\,792\,458$  m/s.

The proper speed of light is infinite.

Shadows can move without any speed limit.

Light moves in a straight line when far from matter.

High-intensity light is a wave.

Light beams are approximations when the wavelength is neglected.

In matter, both the forerunner speed and the energy speed of light are lower than in vacuum.

In matter, the group velocity of light pulses can be zero, positive, negative or infinite.

---

# Fizeau 1849

## Ätherreibung

Ausbreitungsgeschwindigkeit

$$c_{medium} = \frac{c_{vacuum}}{n_{medium}}$$

### Symptome

- Licht breitet sich im Vergleich zum Vakuum in Medium LANGSAMER aus
- wie ändert sich Ausbreitungsgeschwindigkeit in einem STRÖMENDEN Medium?

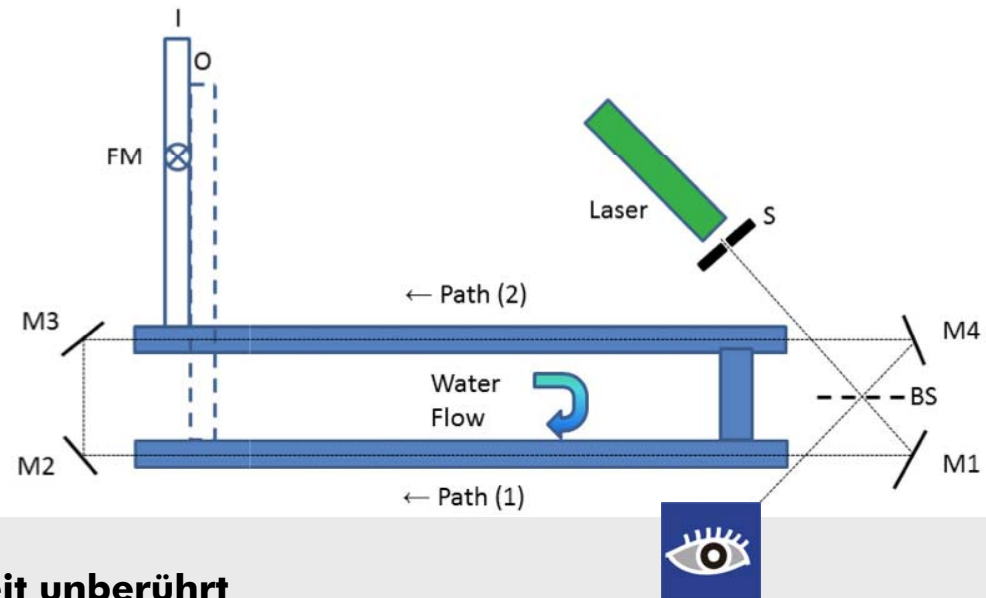
sogenannte Lorentztransformation liefert Ausdruck für relativistische Addition von Geschwindigkeiten

$$c_{ruhend} = \frac{c_{medium} \pm v_{medium}}{1 + \frac{c_{medium} v_{medium}}{c^2}}$$

der Ätherreibung zugeschriebener Beitrag

$$c_{ruhend} = \frac{c_{vacuum}}{n_{medium}} \pm v_{medium} \left( 1 - \frac{1}{n_{medium}^2} \right)$$

Resultat experimentell 1851 von Fizeau gefunden



### Hypothese 1

- Äther bleibt von Bewegung der Flüssigkeit unberührt
- Konsequenz wäre, dass Lichtgeschwindigkeit UNVERÄNDERT bleibt

### Hypothese 2

- Äther wird von Bewegung Flüssigkeit mitgenommen
- Konsequenz wäre, dass Strömungsgeschwindigkeit sich zu Lichtgeschwindigkeit z.B. ADDIERT

Ausbreitungsgeschwindigkeit im Äther

$$c_{medium}^{\text{Äther}} = \frac{c_{vacuum}}{n_{medium}} + v_{\text{Äther}}$$

### Diagnose

- KEINE der beiden Hypothesen wird vom Fizeaus Experiment bestätigt
- kein Konflikt zur Äthertheorie, wenn Äther nur mit Bruchteil  $v \cdot (1 - 1/n^2)$  mitgeführt wird

Näherungen für  $|\alpha| \ll 1$

$$(1 + \alpha)^2 \approx 1 + 2\alpha$$

$$(1 + \alpha)^n \approx 1 + n\alpha$$

$$(1 - \alpha)^2 \approx 1 - 2\alpha$$

$$\frac{1}{1 + \alpha} \approx 1 - \alpha$$

$$\frac{1}{1 - \alpha} \approx 1 + \alpha$$

$$\sqrt{1 - \alpha} \approx 1 - \frac{\alpha}{2}$$

$$\frac{1}{\sqrt{1 - \alpha}} \approx 1 + \frac{\alpha}{2}$$

weitere Näherungen für  $|\alpha| \ll 1$

$$\exp(\alpha) \approx 1 + \alpha$$

$$\ln(1 + \alpha) \approx \alpha$$

$$\sin(\alpha) \approx \alpha$$

$$\cos(\alpha) \approx 1 - \frac{1}{2}\alpha$$

# Theoretische Herleitung Fizeau-Resultat

$$u_{\text{ruhend}} = \frac{c_{\text{medium}} + v_{\text{medium}}}{1 + \frac{c_{\text{medium}} v_{\text{medium}}}{c^2}}$$

$$u_{\text{ruhend}} = \frac{\frac{c_{\text{vacuum}}}{n_{\text{medium}}} + v_{\text{medium}}}{1 + \frac{v_{\text{medium}}}{n_{\text{medium}} c_{\text{vacuum}}}}$$

Potenzreihenentwicklung für geringe Geschwindigkeiten

$$u_{\text{ruhend}} = \left( \frac{c_{\text{vacuum}}}{n_{\text{medium}}} + v_{\text{medium}} \right) \left( 1 - \frac{v_{\text{medium}}}{n_{\text{medium}} c_{\text{vacuum}}} \right)$$

$$u_{\text{ruhend}} = \frac{c_{\text{vacuum}}}{n_{\text{medium}}} + v_{\text{medium}} - \frac{c_{\text{vacuum}}}{n_{\text{medium}}} \frac{v_{\text{medium}}}{n_{\text{medium}} c_{\text{vacuum}}} - v_{\text{medium}} \frac{v_{\text{medium}}}{n_{\text{medium}} c_{\text{vacuum}}}$$

$$u_{\text{ruhend}} = \frac{c_{\text{vacuum}}}{n_{\text{medium}}} + v_{\text{medium}} - \frac{v_{\text{medium}}}{n_{\text{medium}}^2} - \frac{\cancel{v_{\text{medium}}^2}}{\cancel{n_{\text{medium}} c_{\text{vacuum}}}}$$

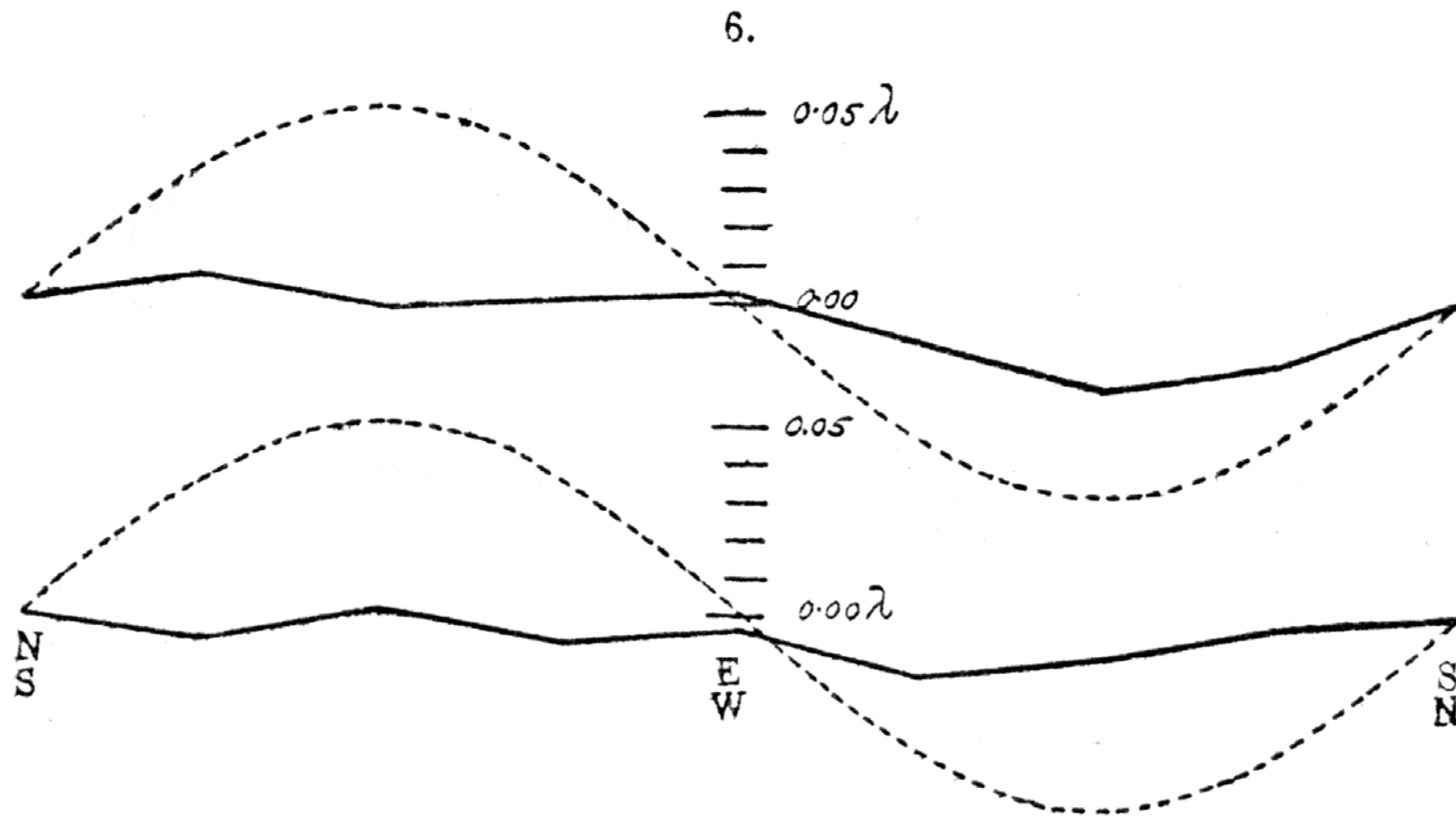
$$u_{\text{ruhend}} = \frac{c_{\text{vacuum}}}{n_{\text{medium}}} + v_{\text{medium}} \left( 1 - \frac{1}{n_{\text{medium}}^2} \right)$$

Potenzreihenentwicklung für  $\alpha \ll 1$

$$\frac{1}{1 + \alpha} \approx 1 - \alpha$$

# Thema Äther

## Michelson-Morley



# Michelson-Morley Experiment liefert negatives Resultat

## Mögliche Erklärungen

### Hypothese 1

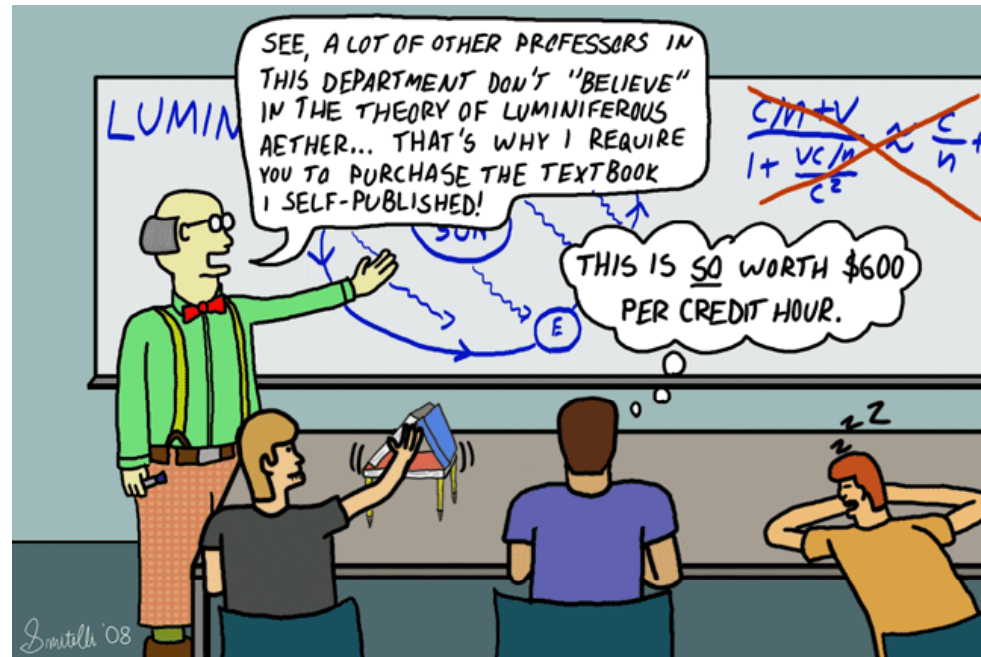
- die Erde fest verbunden mit dem Äther

Diese Hypothese wirft mehr Fragen als Antworten auf

### Hypothese 2 (Lorentz 1892 und Fitzgerald 1897)

- feste Körper kontrahieren und Uhren gehen langsamer bei Bewegung in Äther

Diese Hypothese liefert keine neuen Vorhersagen und ist nicht überprüfbar



### Hypothese 3 (Einstein 1905)

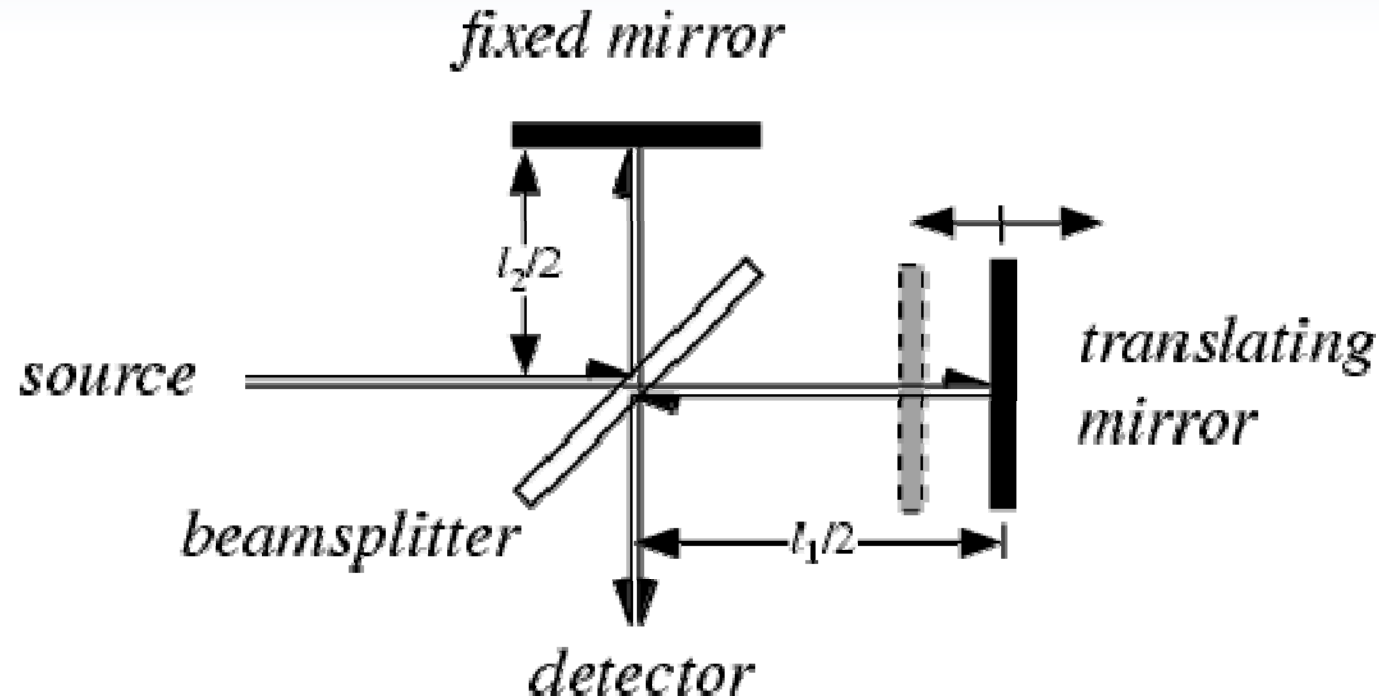
- es existiert kein Medium Äther
- Annahme einer absoluten Zeit und Gleichzeitigkeit ist nicht haltbar
- die Lichtgeschwindigkeit ist keine Eigenschaft eines Mediums
- vielmehr ist die Lichtgeschwindigkeit in Vakuum eine fundamentale Naturkonstante



# Michelson Interferometer

Symptome

Experimenteller Aufbau zur Beobachtung von Interferenz von Lichtwellen

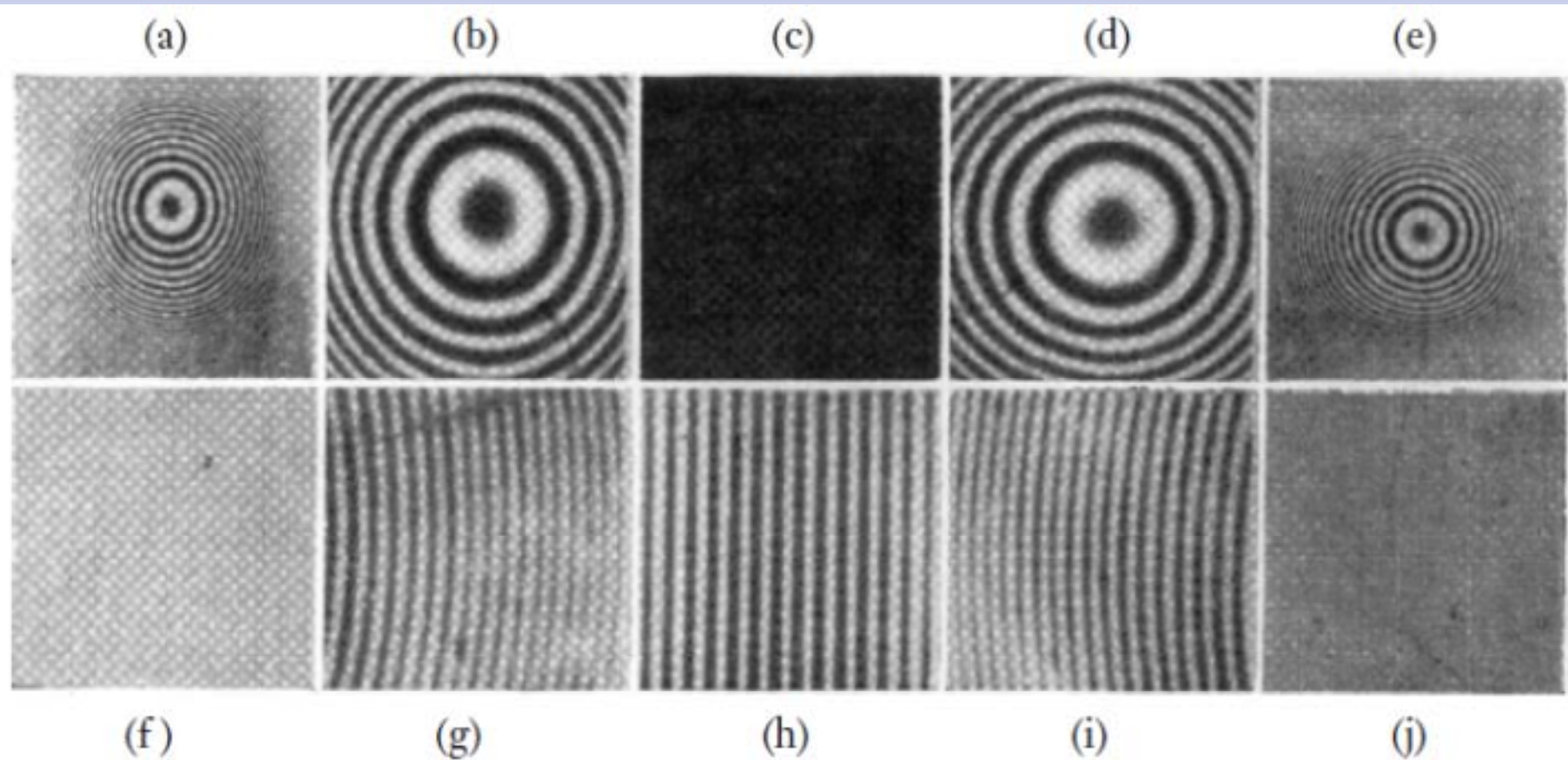


Diagnose

Instrumente, wie das von Michelson werden technologisch eingesetzt für

- Wellenlängenkontrolle von Laserquellen
- Bestimmung der Kohärenzeigenschaften von Lichtquellen
- Längenmessung (thermische Materialausdehnung, Oberflächenverformung)
- interferometrische Prüfung von Oberflächen
- Methode Infrarotspektroskopie: Fourier-Transform-Infrarot-Spektrometer (FTIR)
- kürzlicher erfolgter DIREKTERNachweis von Gravitationswellen

# Interferometrie



## Diagnose

(a) Entfernung vom Strahlteiler zu M1 geringer als zu M2

(b) Entfernung nahezu gleich wobei sich durch den Strahlteiler ein  $180^\circ$  Phasensprung ergibt

(c) Abstände identisch

(d) Entfernung nahezu gleich wobei M1 aber größer als zu M2

(e) Entfernung vom Strahlteiler M1 größer als zu M2

(f)-(j) wie (a)-(e) allerdings sind Spiegelflächen nicht parallel sondern zueinander leicht geneigt



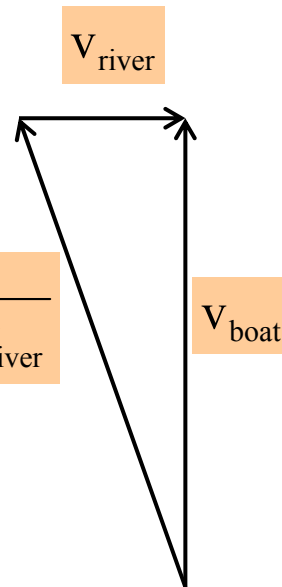
# Analogie Flüssigkeitsströmung Übersetzen

## Symptome

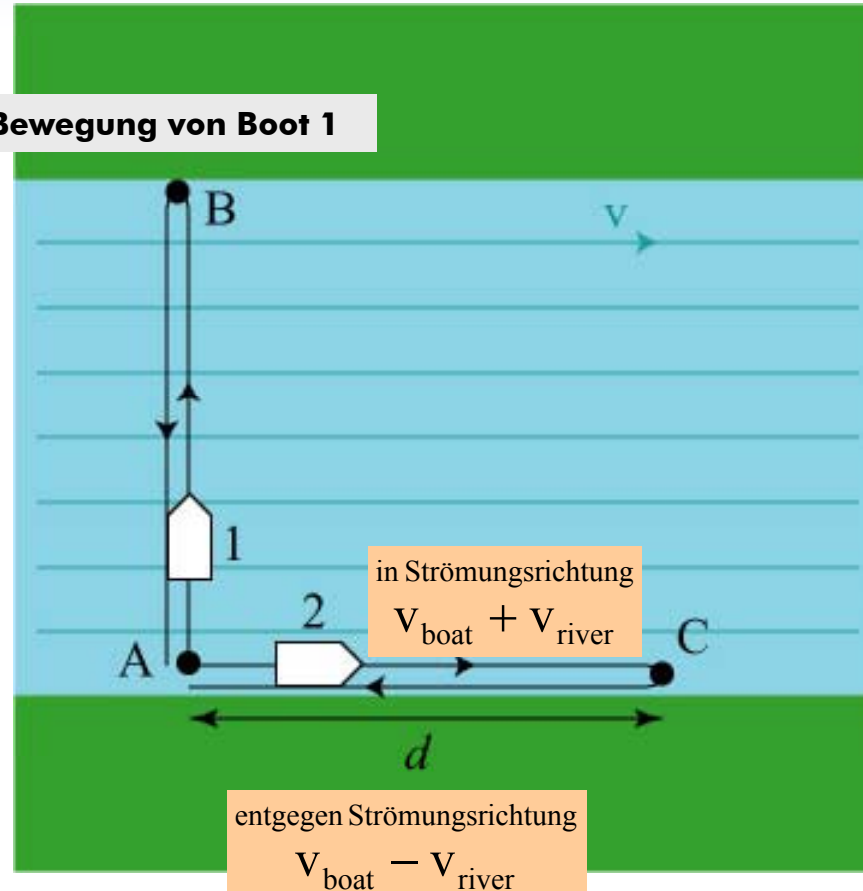
Boote bewegen sich horizontal und vertikal über Fluss und kehren an Ausgangspunkt zurück

Satz von Pythagoras

$$V_{\text{drift}} = \sqrt{V_{\text{boat}}^2 + V_{\text{river}}^2}$$



### Bewegung von Boot 1



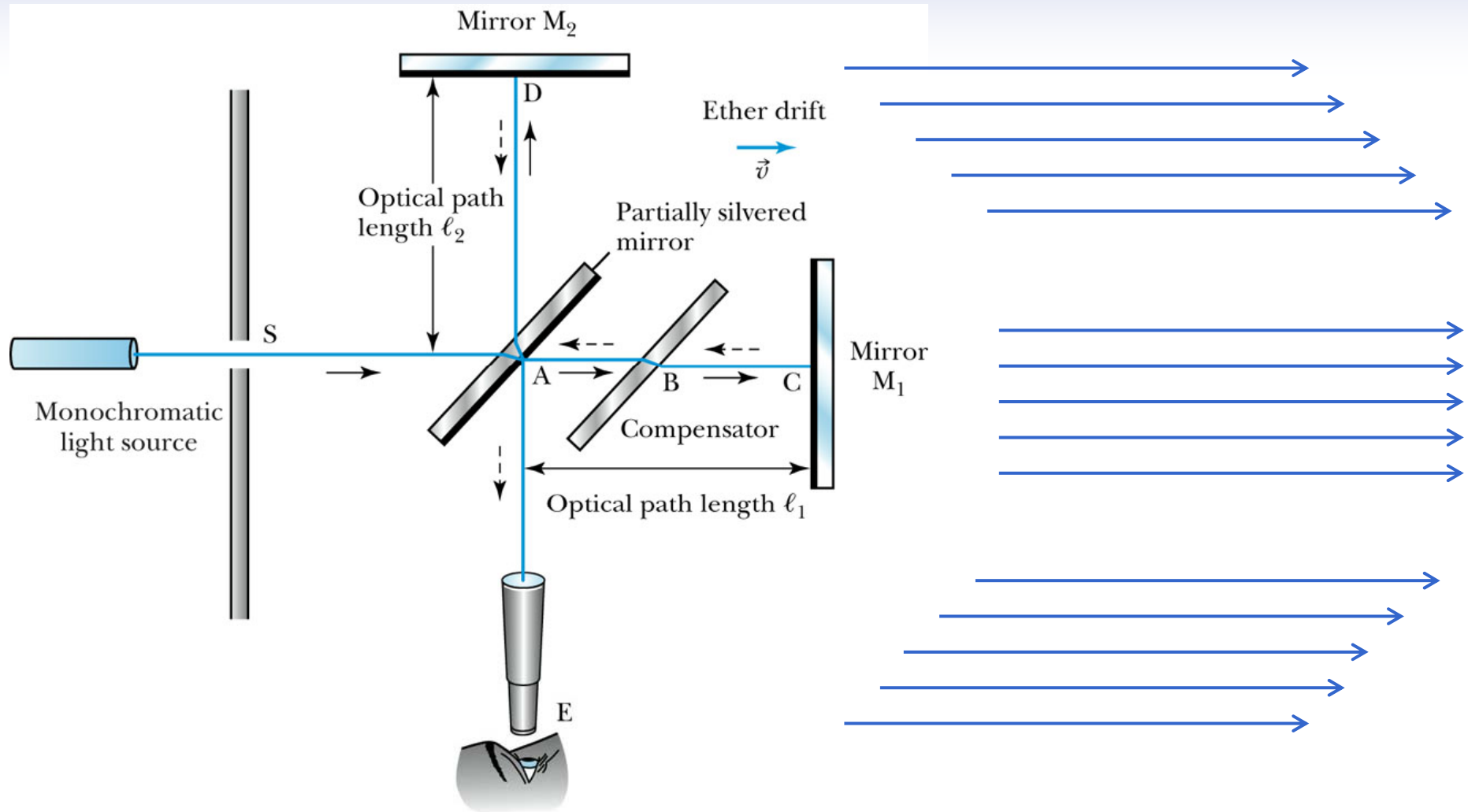
in Strömungsrichtung  
 $V_{\text{boat}} + V_{\text{river}}$

entgegen Strömungsrichtung  
 $V_{\text{boat}} - V_{\text{river}}$

### Bewegung von Boot 2

**Diagnose**  
Geschwindigkeiten der Boote hängen von deren Bewegung in Bezug auf Strömung ab

experimentum crucis  
**Michelson-Morley 1887**



**Diagnose**

**Ätherströmung sollte Einfluss auf Lichtausbreitung in Armen Interferometer haben**



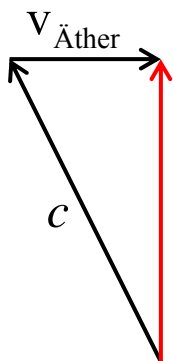
# Weltäther-Drift Versuch Michelson-Morley

2

Zeitspanne, die Strahl 2 unterwegs ist

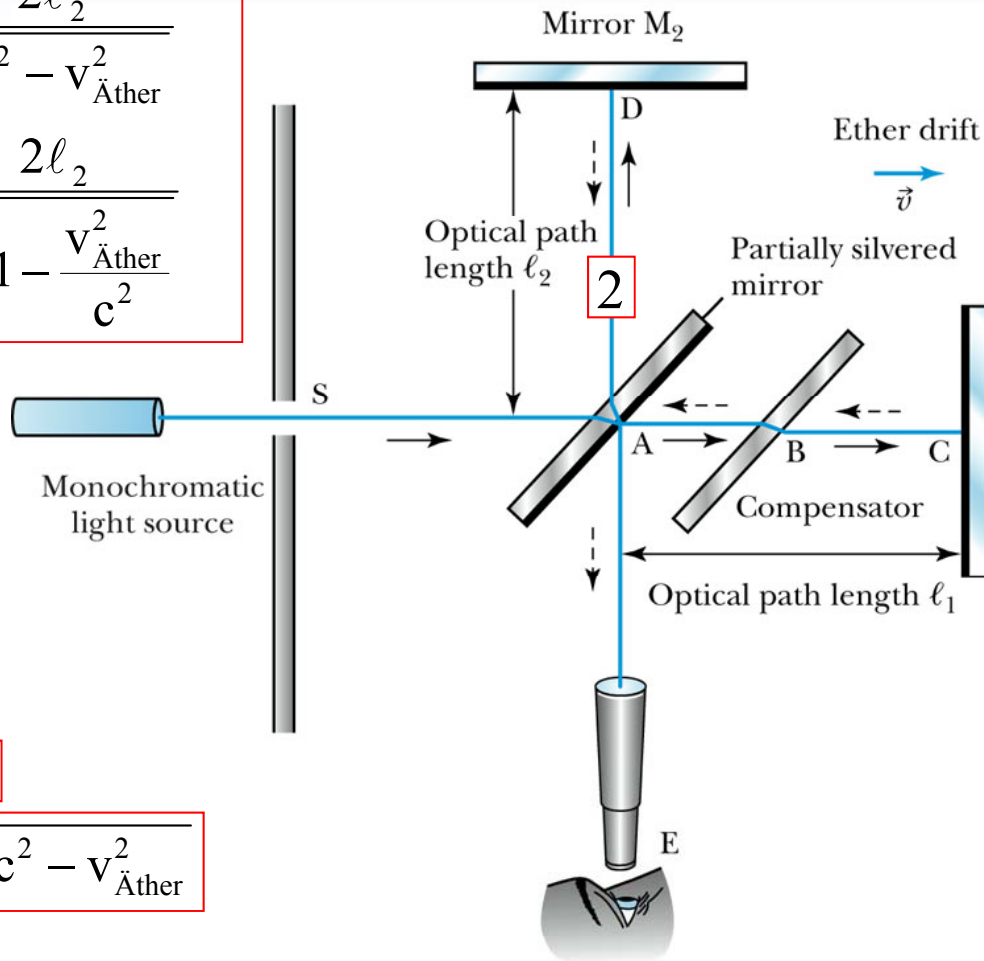
$$t_2 = \frac{2l_2}{\sqrt{c^2 - v_{\text{Äther}}^2}}$$

$$t_2 = \frac{2l_2}{c \sqrt{1 - \frac{v_{\text{Äther}}^2}{c^2}}}$$



2

$$\sqrt{c^2 - v_{\text{Äther}}^2}$$



1

mit Ätherwind

$$t_{AC} = \frac{l_1}{c + v_{\text{Äther}}}$$

entgegen Ätherwind

$$t_{CA} = \frac{l_1}{c - v_{\text{Äther}}}$$

Zeitspanne, die Strahl 1 unterwegs ist

$$t_1 = \frac{l_1}{c + v_{\text{Äther}}} + \frac{l_1}{c - v_{\text{Äther}}}$$

Weg zum Spiegel      vom Spiegel zurück

$$t_1 = \frac{2l_1}{c \left( 1 - \frac{v_{\text{Äther}}^2}{c^2} \right)}$$

**Diagnose**

**Lichtstrahlen brauchen unterschiedliche Zeiten (siehe Wurzel in  $t_2$  im Gegensatz zu  $t_1$ )**



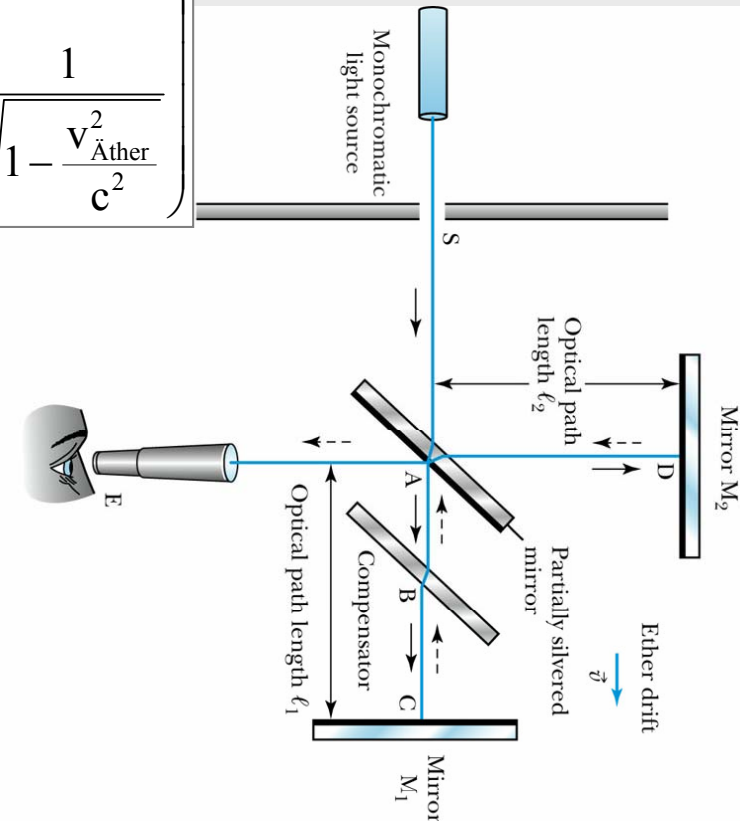
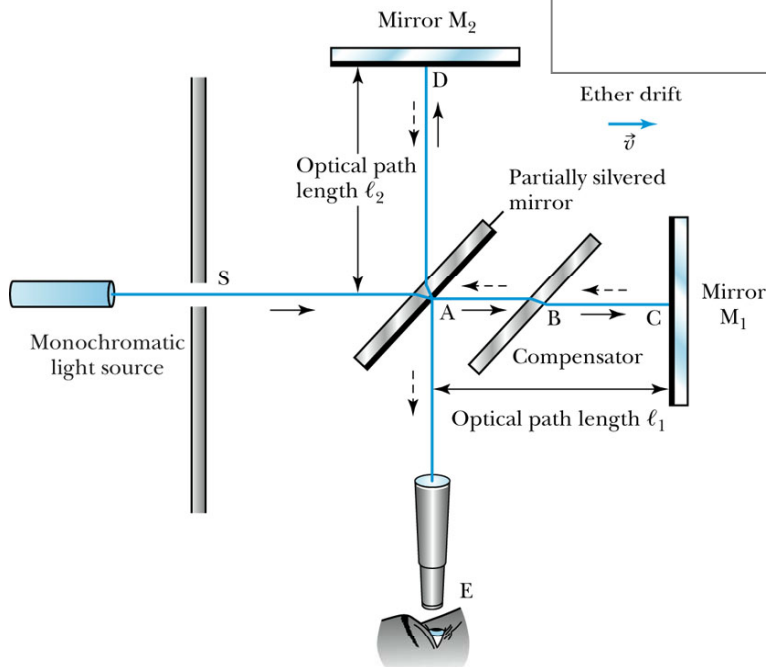
$$t_1 = \frac{2\ell_1}{c \left( 1 - \frac{v_{\text{Äther}}^2}{c^2} \right)}$$

# Michelson-Morley

$$t_2 = \frac{2\ell_2}{c \sqrt{1 - \frac{v_{\text{Äther}}^2}{c^2}}}$$

wähle gleiche Armlängen

$$\Delta t = t_1 - t_2 = \frac{2\ell}{c} \left( \frac{1}{1 - \frac{v_{\text{Äther}}^2}{c^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v_{\text{Äther}}^2}{c^2}}} \right)$$



## Diagnose

- wenn Geschwindigkeit des Äthers NULL wird Zeitunterschied auch NULL
- kein Phasenunterschied zwischen den Lichtwellen (konstruktive Interferenz)
- Drift der Erde im Äther kann allerdings nicht abgestellt werden,  
da Wegunterschied nicht unabhängig bestimmt werden kann
- bei Rotation des Experiments um 90° erwartet man Änderung im Interferenzmuster



$$t_1^{0^\circ} = \frac{2l_1}{c \left( 1 - \frac{v_{\text{Äther}}^2}{c^2} \right)}$$

$$t_1^{90^\circ} = \frac{2l_1}{c \sqrt{1 - \frac{v_{\text{Äther}}^2}{c^2}}}$$

# Michelson-Morley

$$t_2^{0^\circ} = \frac{2l_2}{c \sqrt{1 - \frac{v_{\text{Äther}}^2}{c^2}}}$$

$$t_2^{90^\circ} = \frac{2l_2}{c \left( 1 - \frac{v_{\text{Äther}}^2}{c^2} \right)}$$

## Experiment in Ausgangslage

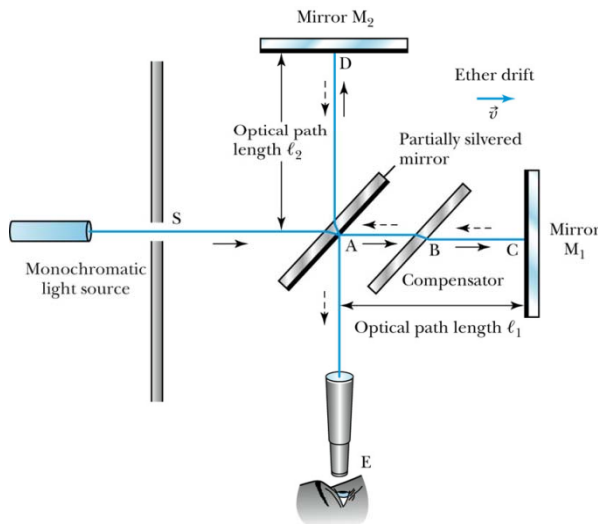
Interferometer in nicht rotierter Position

$$\Delta t^{0^\circ} = t_1^{0^\circ} - t_2^{0^\circ} = \frac{2l_1}{c \left( 1 - \frac{v_{\text{Äther}}^2}{c^2} \right)} - \frac{2l_2}{c \sqrt{1 - \frac{v_{\text{Äther}}^2}{c^2}}}$$

## Experiment gedreht

Interferometer in rotierter Position

$$\Delta t^{90^\circ} = t_1^{90^\circ} - t_2^{90^\circ} = \frac{2l_1}{c \sqrt{1 - \frac{v_{\text{Äther}}^2}{c^2}}} - \frac{2l_2}{c \left( 1 - \frac{v_{\text{Äther}}^2}{c^2} \right)}$$



Zeitunterschied im Lichtweg zwischen beiden Positionen

$$\Delta t^{0^\circ} - \Delta t^{90^\circ} = \frac{2(l_1 + l_2)}{c} \left( \frac{1}{1 - \frac{v_{\text{Äther}}^2}{c^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v_{\text{Äther}}^2}{c^2}}} \right)$$

**Diagnose**  
**Bewegung im Äther führt zu messbarem Signal im Interferometer**



# Äther bewegt sich langsam im Vergleich zu Lichtgeschwindigkeit

## Michelson-Morley

Wissenschaftsjahr 1904  
Mathematik  
Alles, was zählt

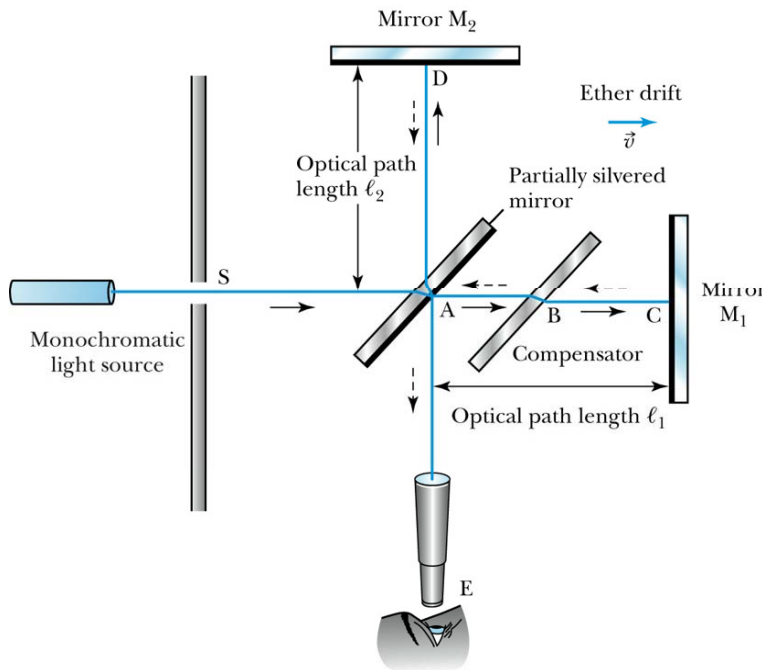
Zeitunterschied im Lichtweg zwischen beiden Positionen

$$\Delta t^{0^\circ} - \Delta t^{90^\circ} = \frac{2(\ell_1 + \ell_2)}{c} \left( \frac{1}{1 - \frac{v_{\text{Äther}}^2}{c^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v_{\text{Äther}}^2}{c^2}}} \right)$$

Potenzreihenentwicklung für  $\frac{v_{\text{Äther}}}{c} \ll 1$

$$\frac{1}{1 - \alpha^2} \approx 1 + \alpha^2$$

$$\frac{1}{\sqrt{1 - \alpha^2}} \approx 1 + \frac{1}{2} \alpha^2$$



$$\Delta t^{0^\circ} - \Delta t^{90^\circ} = \frac{2(\ell_1 + \ell_2)}{c} \left( 1 + \frac{v_{\text{Äther}}^2}{c^2} - 1 - \frac{1}{2} \frac{v_{\text{Äther}}^2}{c^2} \right)$$

$$\Delta t^{0^\circ} - \Delta t^{90^\circ} = \frac{(\ell_1 + \ell_2)}{c} \frac{v_{\text{Äther}}^2}{c^2}$$

Zeitunterschied im Lichtweg zwischen beiden Positionen

$$\Delta t^{0^\circ} - \Delta t^{90^\circ} = (\ell_1 + \ell_2) \frac{v_{\text{Äther}}^2}{c^3}$$

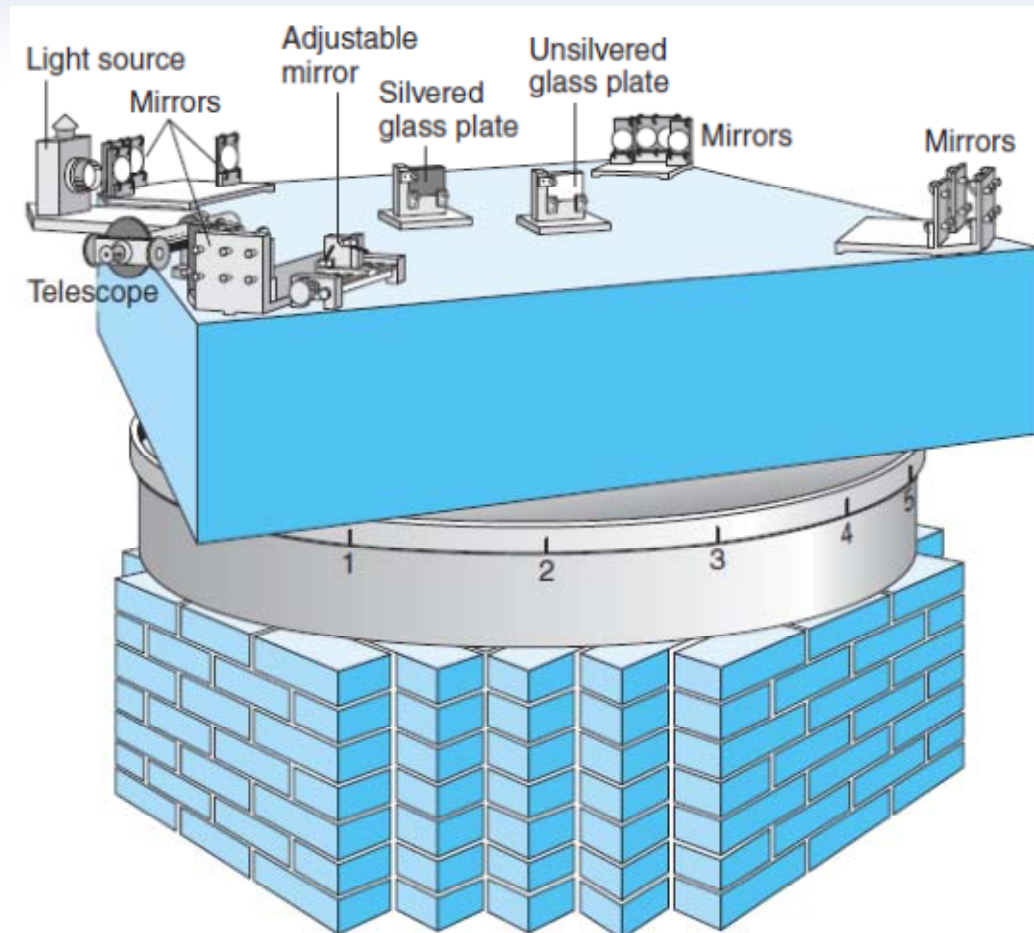
bei geringer Geschwindigkeit des Äthers

### Diagnose

**Bewegung im Äther führt zu einem experimentell messbarem Signal im Interferometer**

# Michelson-Morley 1887

## Experimenteller Aufbau

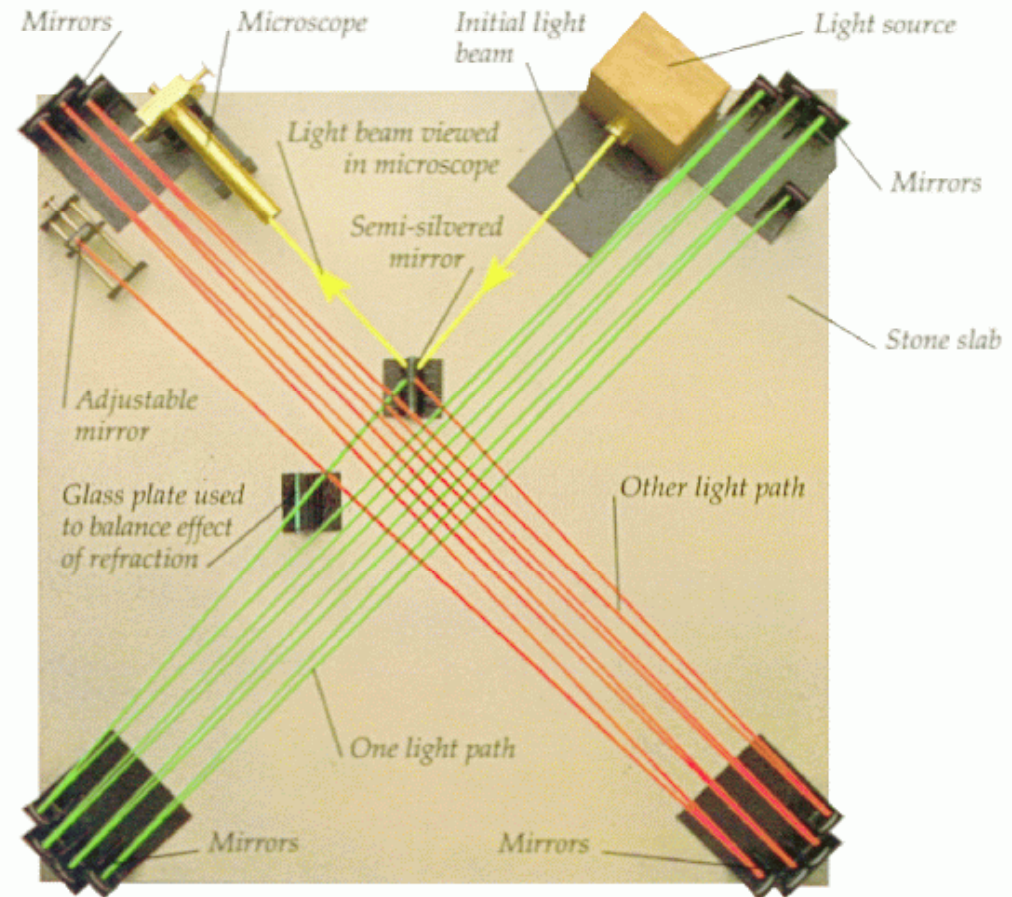


### Diagnose

- optische Komponenten aufgebaut auf 1.5 Meter durchmessenden Sandstein
- Halterung schwimmt in Hg, um Spannungen und Vibrationen bei Rotation zu minimieren
- Messungen in allen Orientierungen in horizontaler Ebene möglich

# Michelson-Morley 1887

## Experimenteller Aufbau



Eigenschaften der Lichtquelle

$$\lambda_{light} = 0.55 \mu\text{m}$$

$$\nu_{light} = \frac{c}{\lambda_{light}} = 5.5 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

Periode der Lichtwelle

$$T_{light} = \frac{1}{\nu_{light}} = 1.8 \cdot 10^{-15} \text{ s}$$

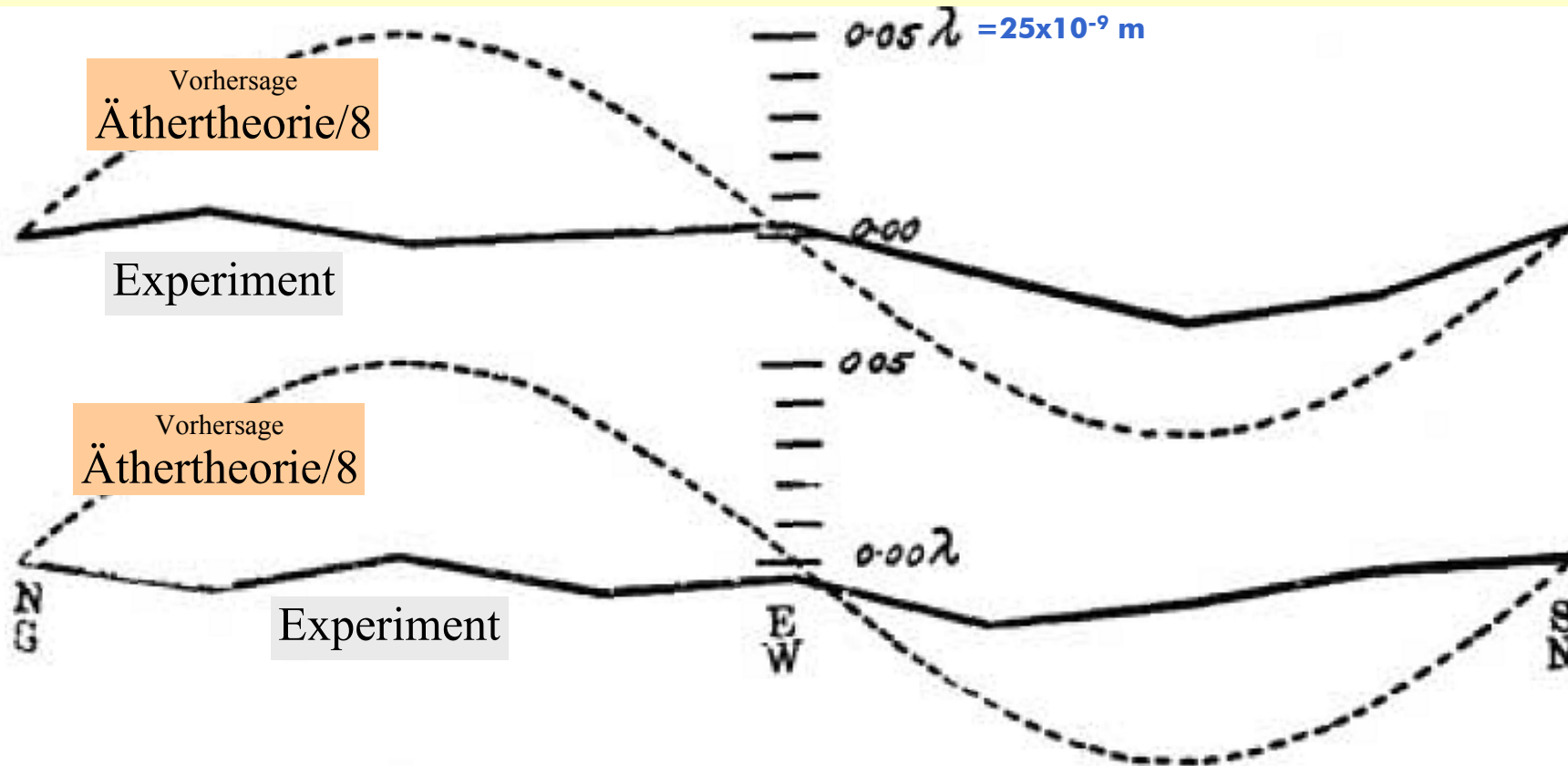
Zeitspanne für Durchgang eines Wellenzuges

### Diagnose

- Länge der Arme des Interferometer durch Vielfachreflexion etwa 11 Meter
- optischer Tisch mit Interferometer drehbar gelagert

# experimentum crucis Michelson-Morley

mittags gemessen



abends gemessen

Diagnose

- theoretische Kurven und experimentelles Resultat nicht auf gleicher Skala
- nach Äthertheorie erwartete Verschiebung **ACHTMAL** höher erwartet als gemessen

# experimentum crucis Michelson-Morley

## Symptome

**Bewegung der Erde um Sonne gibt Hinweis auf möglichen Wert der Äther-Driftgeschwindigkeit**

Bahngeschwindigkeit der Erde um die Sonne

$$v_{\text{earth}} = 3 \cdot 10^4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$



Änderung im Interferenzmuster

$$7 \cdot 10^{-16} \text{s} = 0.3 \cdot T_{\text{light}} \ll 0.01 \cdot T_{\text{light}}$$

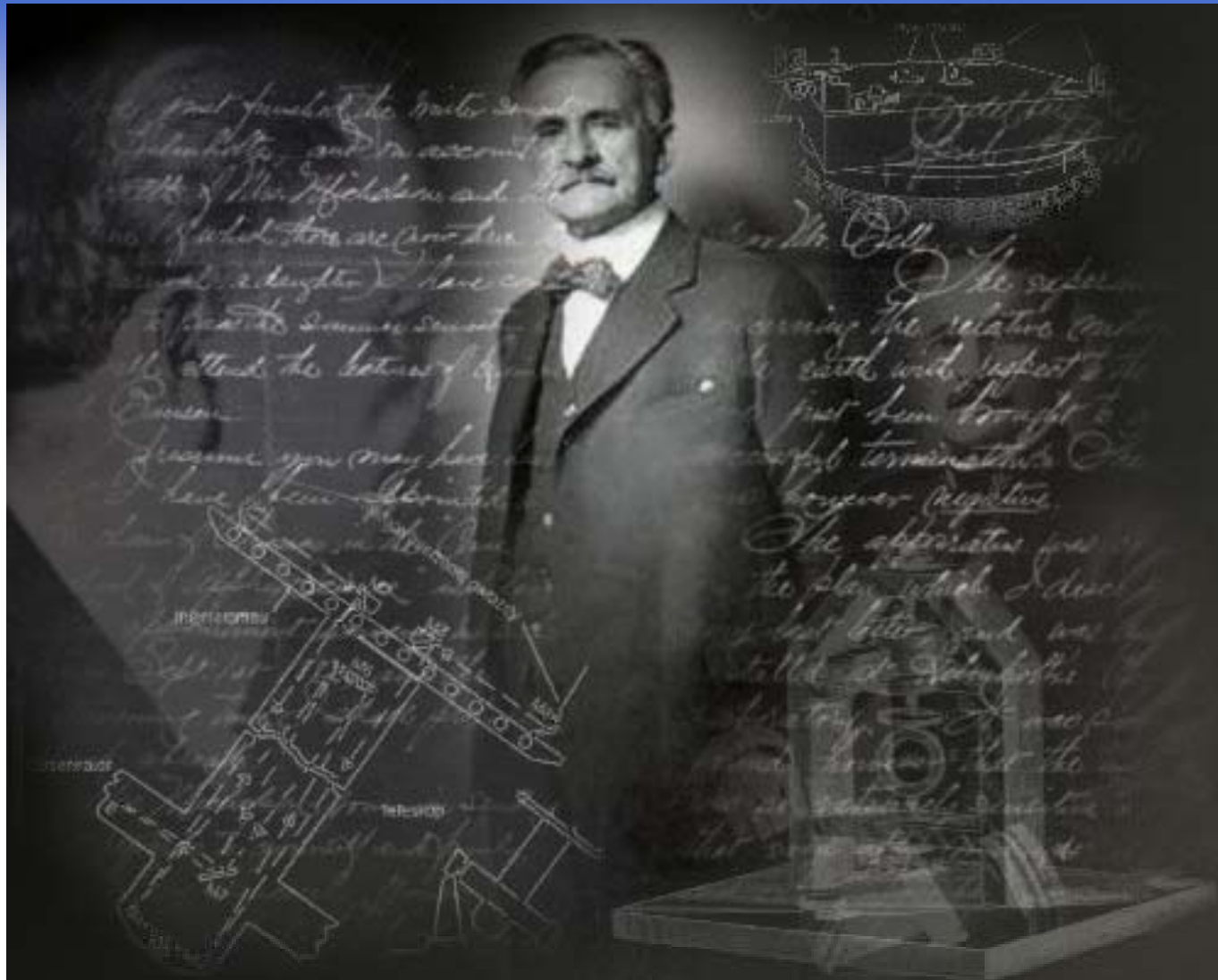
experimentelle Auflösung  
Michelson-Morley

Laufzeitdifferenzen

$$\Delta t^{0^\circ} - \Delta t^{90^\circ} = (\ell_1 + \ell_2) \frac{v_{\text{Äther}}^2}{c^3}$$
$$\Delta t^{0^\circ} - \Delta t^{90^\circ} = 22\text{m} \frac{\left(3 \cdot 10^4 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{\left(3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^3} = 7 \cdot 10^{-16} \text{s}$$

## Diagnose

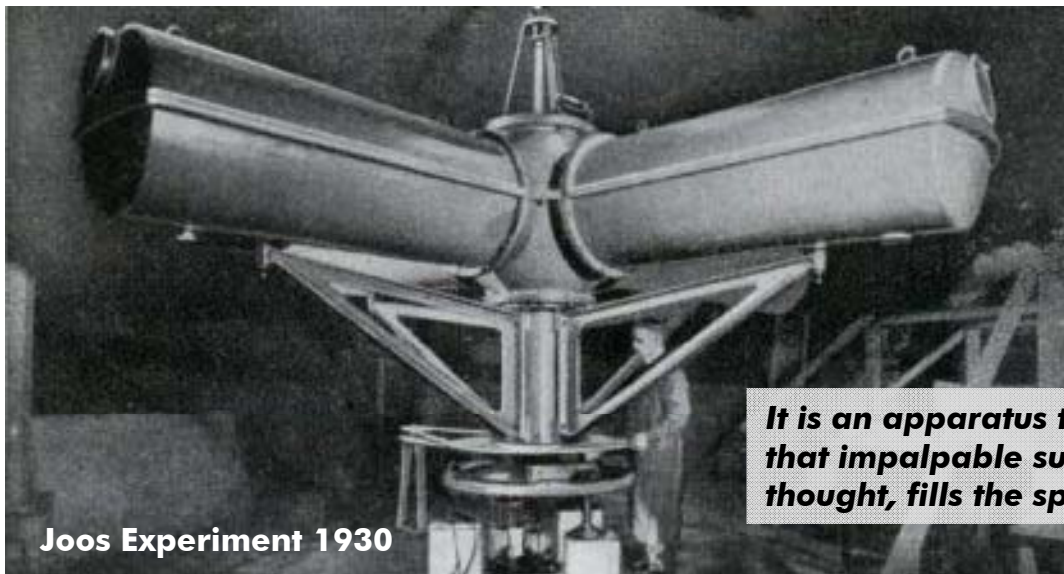
- experimentell wurde keine Änderung des Interferenzmusters festgestellt
- keine Änderung bei anderen Positionen in Bezug auf Sonne
- Michelson-Morley Experiment hätte deutlich kleinere Abweichungen feststellen können
- Ätherhypothese ist NICHT richtig und es gibt KEIN ausgezeichnetes Bezugssystem



**The Nobel Prize in Physics 1907 was awarded to Albert A. Michelson for his optical precision instruments and the spectroscopic and metrological investigations carried out with their aid**

# eine Auswahl Messungen zur Äthertheorie

Observer	Year	Place	$l$ in meters	Fringe shift predicted by ether theory	upper limit of observed fringe shift	$\frac{\text{fringe shift}_{\text{Theory}}}{\text{fringe shift}_{\text{Experiment}}}$
Michelson	1881	Potsdam	1.2	0.04	0.02	2
Michelson & Morley	1887	Cleveland	11	0.40	0.01	40
Miller	1921	Mt. Wilson	32	1.12	0.08	14
Tomaschek	1924	Heidelberg	8.6	0.3	0.02	15
Illingworth	1927	Pasadena	2.0	0.07	0.0004	175
Joos	1930	Jena	21	0.75	0.02	38

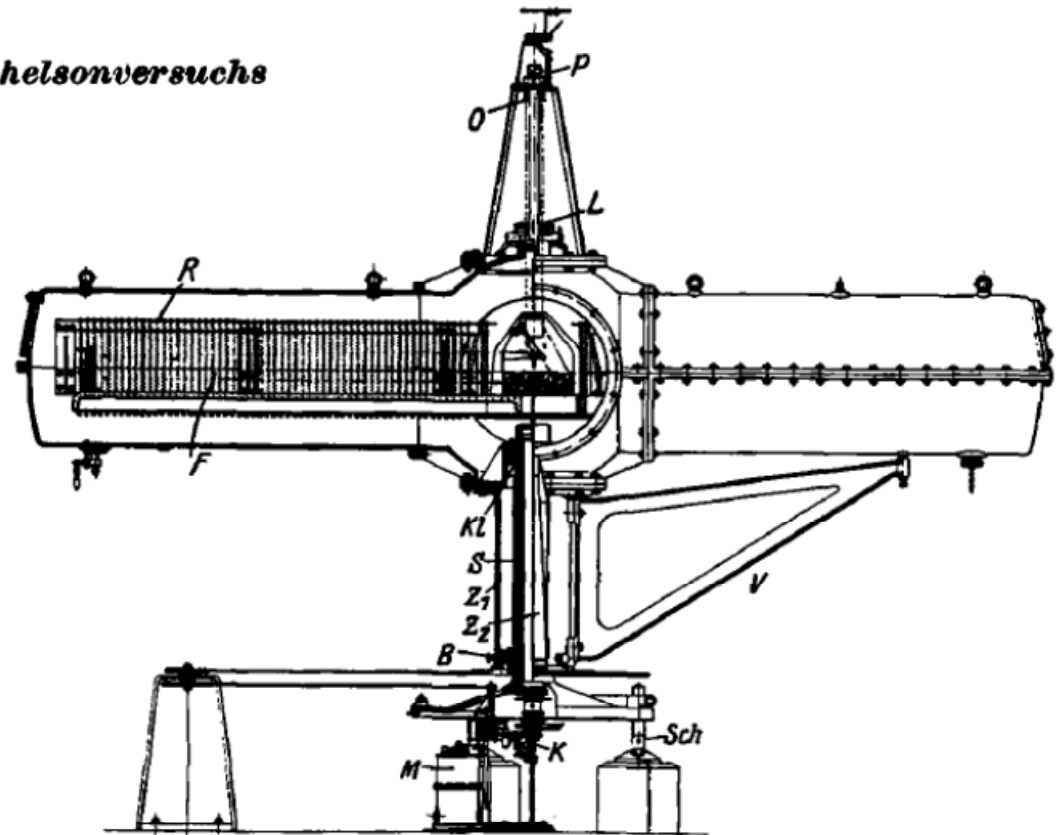


Joos Experiment 1930

*It is an apparatus to measure the drift of the ether that impalpable substance which, according to one school of thought, fills the space in which the universe swims*

*Die Jenaer Wiederholung des Michelsonversuchs*

Von Georg Joos



Zusammenfassung

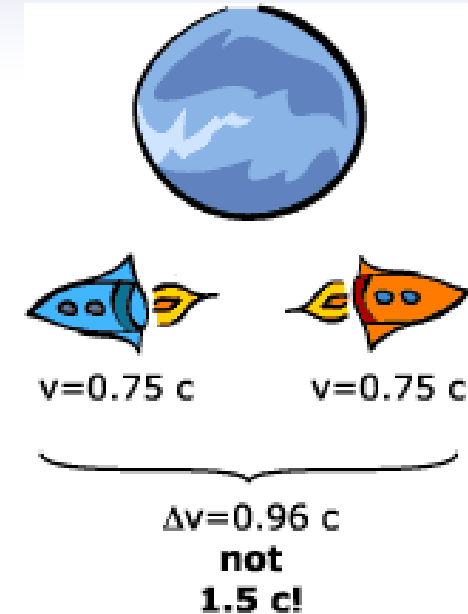
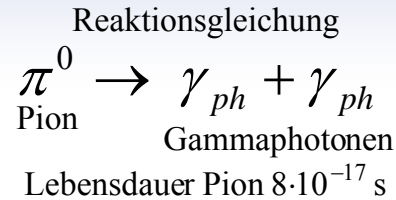
Schnitt durch den Gesamtapparat

*Es wird ein registrierendes Michelson-Interferometer von 21 m Lichtweg beschrieben. Die mikrophotometrische Ausmessung der damit gemachten Aufnahmen ergibt, daß ein etwa vorhandener Ätherwindeffekt kleiner als  $\frac{1}{1000}$  Streifenbreite, der Betrag des Ätherwinds kleiner als 1,5 km/sec sein müßte.*

# Alväger et al. 1964 at CERN Lichtgeschwindigkeit

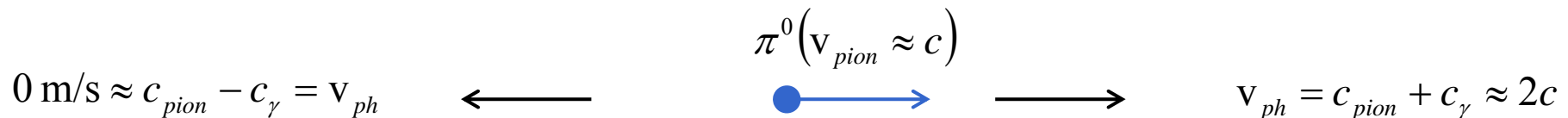


**6 GeV Pion erzeugt in Stoß schneller Protonen mit Metall  
Lichtquelle neutrales Elementarteilchen**



**Geschwindigkeit des Pions**  $v_{pion} \approx 0.99975c$

**So könnten die Geschwindigkeiten der Photonen ausfallen**



Naturkonstante Lichtgeschwindigkeit  
 $c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$

## Diagnose

- Geschwindigkeit des Objektes hat keinen Einfluss auf Ausbreitungsgeschwindigkeit
- Geschwindigkeit der ausgesandten  $\gamma$ -Photonen identisch mit ruhendem Pion
- Experiment bestätigt: Geschwindigkeit der  $\gamma$ -photonen IST die Lichtgeschwindigkeit