

**Hans Marko  
Johannes Marko**

**Schwankungen der Lichtgeschwindigkeit  
auf der Erdoberfläche**

**Messungen mit einem Mach-Zehnder-Interferometer**

# **Schwankungen der Lichtgeschwindigkeit auf der Erdoberfläche – Messungen mit einem Mach-Zehnder-Interferometer**

Hans und Johannes Marko

## **Zusammenfassung**

Die Verfasser haben in den Jahren 2008 und 2009 Messungen mit einem Mach-Zehnder-Interferometer nach ihrer Konzeption (MZIM) durchgeführt und hierbei zeitlich schnelle Schwankungen der Lichtgeschwindigkeit in der relativen Größe von  $10^{-6}$  gemessen. Diese Schwankungen waren isotrop, d.h. unabhängig von der Richtung der Lichtausbreitung. Sie traten jedoch nur im Freien auf und verschwanden, wenn der Lichtstrahl in einem von Licht abgeschirmten Raum (Käfig) geführt wurde. Das MZIM ist um etwa den Faktor 1000 empfindlicher als das bekannte Michelson-Morley-Interferometer. Für seine Funktion muss die sogenannte „Käfighypothese“ gelten, die auf dem Abschirmeffekt für elektromagnetische Wellen durch ein die Lichtausbreitung verhinderndes oder schwächendes Medium beruht (entsprechend dem Faraday-Käfig). Durch das Ergebnis der Messungen wurde diese Hypothese bestätigt.

# 1. Einleitung

Als „Äther“ bezeichnet man das Medium in dem sich elektromagnetische Schwingungen und insbesondere das Licht ausbreiten. Die Lichtausbreitung wird mathematisch durch die Maxwell'schen Gleichungen beschrieben. Diese verknüpfen das elektrische Feld mit dem magnetischen Feld in der Weise, dass eine zeitliche Veränderung des elektrischen Feldes ein magnetisches Feld erzeugt und eine zeitliche Veränderung des magnetischen Feldes ein elektrisches Feld erzeugt. Dies ermöglicht eine Welle, die sich mit der Geschwindigkeit

$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon \cdot \mu}}$  fortpflanzt, wobei die Elektrizitätskonstante  $\varepsilon$  dem elek-

trischen Feld und die Permeabilitätskonstante  $\mu$  dem magnetischen Feld zugeordnet ist. Diese beiden Konstanten kennzeichnen somit den Äther. Bei Abwesenheit von Materie, also im Vakuum, bezeichnet man ihren Wert mit  $\varepsilon_0$  und  $\mu_0$ . Die damit bestimmte Lichtgeschwindigkeit des Vakuums hat den Wert von ungefähr 300.000 km/s (ihr genauer Wert ist: 299.792,458 km/s). Für die Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit aufgrund der Maxwell'schen Gleichungen wurde angenommen, dass die Lichtquelle (Sender) im Äther ruht. Ebenso wurde der Empfänger, der zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit notwendig ist, als ruhend im Äther angenommen. Wenn diese Voraussetzungen nicht zutreffen, muss es nach der klassischen Theorie eine Modifikation der Lichtausbreitung geben. In der Schrift: „[Signalübertragung bei bewegtem Sender und Empfänger](https://mediatum.ub.tum.de/doc/1071280/1071280.pdf)“ ( Link: <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1071280/1071280.pdf> )

haben die Verfasser die Verhältnisse bei einer Bewegung von Sender und Empfänger gegenüber dem Äther mathematisch beschrieben und unter anderem eine Veränderung der Lichtgeschwindigkeit bei solchen Bewegungen festgestellt. Dies ist in Übereinstimmung mit der klassischen Theorie, steht aber im Gegensatz zu Einsteins Postulat der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit auch bei Bewegung.

Daraus entstand der Wunsch, solche möglichen Veränderungen der Lichtgeschwindigkeit genau zu messen. Zwar wurden in der Vergangenheit bereits zahlreiche Messungen mit dem sog. Michelson-Morley-Interferometer durchgeführt. Diese Messungen erbrachten alle ein Nullergebnis, schienen also Einsteins Postulat der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit zu bestätigen. Im Folgenden wird gezeigt werden, warum dieses Nullergebnis zustande kommen musste.

Mit einem dagegen um mehr als den Faktor 1000 empfindlicheren Messinstrument, einem Mach-Zehnder-Interferometer nach der Konzeption der Verfasser (MZIM), haben die Verfasser in den Jahren 2008 und 2009 zahlreiche Messungen durchgeführt und dabei folgendes gefunden:

1. Ein konstanter „Ätherwind“, der durch die Bewegung der Erde im Weltraum zustande kommen müsste, wurde nicht gefunden. Insoweit konnte das Ergebnis der Michelson-Morley Experimente bestätigt werden.

2. Es wurde jedoch bei allen Messungen eine unregelmäßige schnelle Schwankung der Lichtgeschwindigkeit in der relativen Größe von  $10^{-6}$  festgestellt. (Die absolute Schwankungsgröße ist damit etwa 300 m/s, entspricht also der Schallgeschwindigkeit bzw. einem Mach.)

Diese Schwankung war unabhängig von der Richtung der Lichtausbreitung, trat aber immer nur im freien Raum auf und verschwand, wenn der Lichtweg in einem abgeschlossenen Raum (Käfig) geführt wurde.

Die Ursache dieser Schwankung ist unbekannt. Es konnte jedoch ausgeschlossen werden, dass sie durch Luftbewegung (Wind), durch Schall oder durch Temperaturänderung zustande kam. Somit ist es naheliegend, sie als zeitliche Schwankung des Äthers im freien Raum anzusehen.

## 2. Eigenschaften des Übertragungsmediums (Äther)

### *Negative Definition:*

Der Äther ist **nicht** vergleichbar mit einem feinen Gas. das alles, leeren Raum wie auch Materie, gleichmäßig durchdringt..

### *Positive Definition:*

Der Äther ist eine **Eigenschaft** des Raumes. Diese Eigenschaft ist durch die Dielektrizitätskonstante und durch die Permeabilitätskonstante gegeben und bestimmt die Wellengeschwindigkeit und den Wellenwiderstand des Raumes. Diese Eigenschaft kann sich ändern, je nachdem ob der Raum mit Materie erfüllt oder materiefrei ist.( z.B. ist die Lichtgeschwindigkeit in Glas oder Wasser kleiner als im Vakuum.) Außerdem kann diese Eigenschaft von der Frequenz bzw. der Wellenlänge abhängig sein.

### **Käfighypothese**

Ein Raumsegment kann gegenüber dem umgebenden Raum durch eine Umhüllende (Käfig) für Wellen der Frequenz isoliert werden, die die Umhüllende nicht durchdringen können.( Ein bekanntes Beispiel ist der Faradaykäfig , der für Wellen mit erheblich größerer Wellenlänge als der Gitterabstand isoliert, für Wellen mit erheblich kleinerer Wellenlänge, z. B. Licht, jedoch durchlässig ist.)

Das Innere des Käfigs kann elektromagnetisch für die betreffende Frequenz (Frequenzbereich) als ein abgeschlossenes System betrachtet werden, das mit dem äußeren Raum nicht in Wechselwirkung treten kann. Beispielsweise hat eine Bewegung des Käfigs im äußeren Raum keinen Einfluss auf elektromagnetische Wellen der betreffenden Frequenz im Inneren des Käfigs. Der Äther im Inneren des Käfigs muss daher bezüglich der Umhüllenden als ruhend betrachtet werden. D.h. auch wenn der Käfig sich bewegt, gibt es im Inneren des Käfigs keinen „Ätherwind“.

### **Folgerung**

Bei Gültigkeit der Käfighypothese ist die Wellenausbreitung im Inneren des Käfigs *isotrop* und unabhängig von einer Bewegung des Käfigs im äußeren Raum. Daher *mussten* das Michelson-Morley-Experiment und ähnliche Interferenzexperimente ein *Nullergebnis* liefern, soweit diese in durch Licht nicht durchdringbaren Räumen (Labors) durchgeführt wurden. Interferenzexperimente können nur ein Ergebnis bringen, wenn sie im freien Raum (also nicht in geschlossenen Gebäuden) durchgeführt werden.

### 3. Das Mach-Zehnder Interferometer gemäß Konzeption der Verfasser (MZIM).

Das Prinzip ist die Phasendifferenz zweier parallel verlaufender Lichtstrahlen zu messen. Die vorgeschlagene Anordnung zeigen Bild 1 und Bild 2.

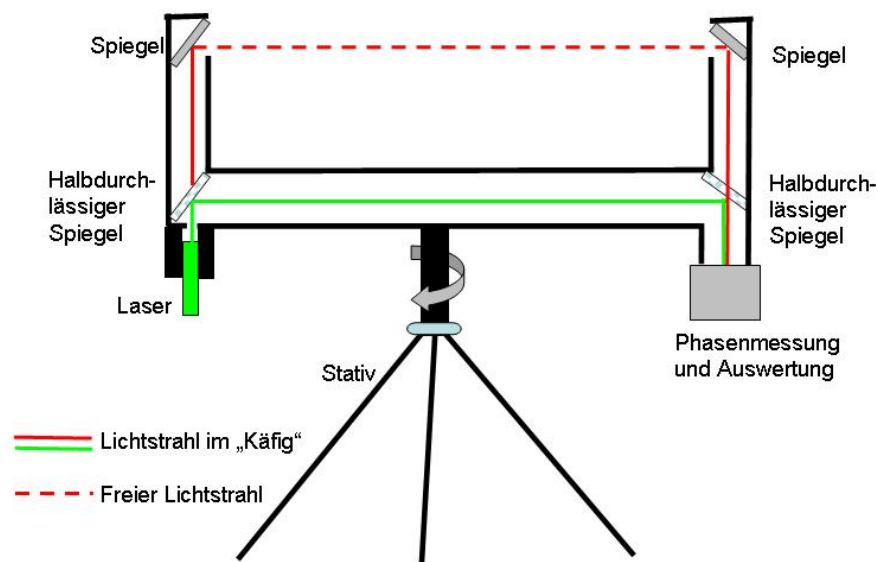


Bild 1: MZIM mit Auswertung der Phasendifferenz

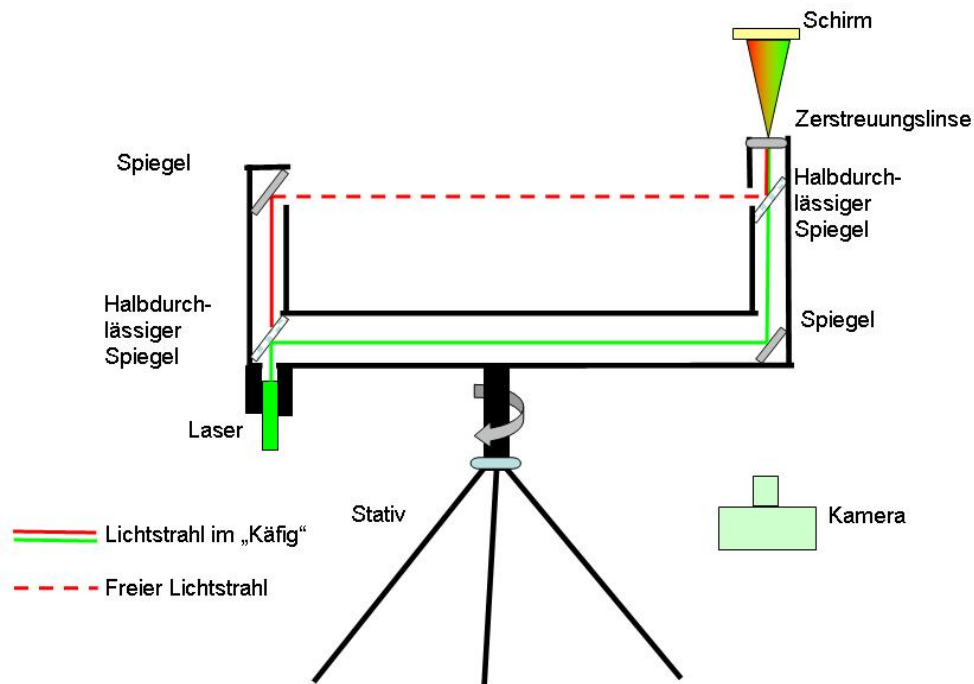


Bild 2: MZIM mit Fotografie des Interferenzmusters

Die Verfasser haben einen kleinen Diodenlaser für grünes Licht (Wellenlänge 560nm) sowie justierbare Spiegel und halbdurchlässige Spiegel (Strahlteiler) der Fa. *Edmund Optics* verwendet. Gemäß Bild 2 wurde ein Interferenzmuster erzeugt und dieses fotografiert. Hierbei wurde eine Digitalkamera *Casio Exilim Z3* verwendet, mit der Filme (video clips) von 30 Sekunden Dauer aufgenommen wurden. Es wurde ein Photostativ verwendet, das einen leichten Transport und Aufstellung des Gerätes im Freien ermöglichte. (Das Gerät nach Bild 2 wurde im Lehrstuhl für Nachrichtentechnik der Technischen Universität München von Herrn *Jürgens* gebaut.) :



Die Messgröße ist die Phasendifferenz der beiden Lichtstrahlen.  
Diese berechnet sich gemäß dem *Anhang* zu:

$$\Delta\varphi = 2\pi \cdot \frac{L}{\lambda} \cdot a \cdot \cos(\alpha)$$

Hierbei ist: L: Länge der Lichtstrahlen (Armlänge)  
 $\lambda$ : Lichtwellenlänge  
 $a = v/c$  Verhältnis der Geschwindigkeit  $v$  des Ätherwindes zur Lichtgeschwindigkeit  $c$ .  
 $\alpha$ : Winkel zwischen Richtung des Lichtstrahles und Richtung des Ätherwindes.

Für  $L = 40 \text{ cm}$  und  $\lambda = 560 \text{ nm}$  (grünes Licht) folgt:

$$\Delta\varphi = \pi \cdot 1,43 \cdot 10^6 \cdot a \cdot \cos(\alpha)$$

Daraus folgt eine maximale Streifenverschiebung von  $\pi$  ( das ist der Abstand zweier Maxima ) für  $\alpha = 0$  beim Ätherwind von:

$$\underline{v_\pi = 210 \text{ m/s..}}$$

Diese Ätherwindgeschwindigkeit, die eine Streifenverschiebung um  $\pi$  bewirkt, wird im Folgenden als Messbereich  $v_\pi$  bezeichnet. Ihre Berechnung wird ausführlicher im *Anhang* dargestellt, wobei auch zum Vergleich das Michelson-Morley-Interferometer betrachtet wird. Dessen Messbereich ist bei gleichen Abmessungen allerdings um mehr als den Faktor 1000 größer (bzw. die Empfindlichkeit entsprechend kleiner) als bei unserem Instrument. Er beträgt:

$$\underline{v_\pi = 355 \text{ km/s}}$$

In der Tabelle des Anhangs ist auch der Ätherwind angegeben, der zu einer (schwer feststellbaren) Streifenverschiebung von  $\pi/10$  führt. Dies ist gewissermaßen die untere Grenze des Messbereichs. Sie entspricht einem Ätherwind von 21 m/s bei dem MZI und von 112 km/s bei dem MMI bei der Armlänge von  $L = 40 \text{ cm}$  der Interferometer.

Bei der Konstruktion des Gerätes wurde die Möglichkeit vorgesehen, sowohl ein Metallrohr als auch ein Glasrohr auf den ansonsten frei verlaufenden Lichtstrahl einzuklappen. Damit waren für Vergleichszwecke 3 Möglichkeiten realisierbar:

- Lichtstrahl frei (f)
- Lichtstrahl im Metallkäfig (m)
- Lichtstrahl im Glaskäfig (g)

#### 4. Die Messungen.



**Bild 3 MZIM im Stadtpark**

Bild 3 zeigt einen der Verfasser (Johannes Marko) im Lochhamer Teil des Pasinger Stadtparks mit dem MZIM gemäß Bild 2. Man sieht, dass das Gerät drehbar angeordnet ist. Der Laser im linken Teil und die Kamera im rechten Teil sind ebenfalls zu sehen. Zur Abschirmung des Außenlichts wurde vor der Kamera eine Verkleidung angebracht. Hierbei wurde ein kleines Zusatzlicht installiert, um das Koordinatenkreuz auf dem Bildschirm zur Bestimmung der Lage des Interferenzmusters sichtbar zu machen.

In den Jahren 2008 und 2009 wurden mehr als 200 Filme bei verschiedenen Bedingungen erstellt Sie zeigten übereinstimmend den folgenden Befund:

- Bei Messungen im Freien (f) z.B. im Garten, im Park oder auf der freien Plattform des Fernsehturms von München traten statistische Schwankungen in der rel. Größe von  $10^{-6}$  der Lichtgeschwindigkeit auf. Die absolute Größe liegt hierbei bei ca.300m/s, was der Schallgeschwindigkeit (1 Mach) entspricht. Die Schnelligkeit dieser Schwankungen liegt bei einigen Hertz, möglicherweise auch bis in den Bereich von einigen kHz. Hierbei ist zu sagen, dass wegen der Aufnahmefrequenz der Kamera von 10 Hz (10 Bilder pro Sekunde) schnellere Schwankungen des Musters als Sprünge erscheinen, was auch festgestellt wurde.
  
- Die Schwankungen verschwanden oder traten mit wesentlich kleinerer Amplitude auf, wenn:
  1. das Metallrohr eingeklappt wird (m)
  2. das Glasrohr eingeklappt wird (g)
  3. die Messungen in einem Raum, (z.B. Wohnzimmer oder Garage) stattfanden.

Hierbei bedeutet „wesentlich kleinere Amplitude“, dass die Schwankungen kleiner als 20% des Messbereichs, also kleiner als 40 m/s sind.

- Um *Fehleinflüsse*, die das empfindliche Messinstrument beeinflussen könnten, auszuschließen, wurden folgende Untersuchungen vorgenommen:
  1. *Wind*. Die Messungen im Freien wurden bei Windstille durchgeführt. Windstille bedeutet, dass die Windstärke wesentlich kleiner als 0,4 m/s ist. Andererseits treten bei 0,4 m/s nur Verschiebungen des Interferenzmusters von kleiner als 20% des Messbereichs auf. Aufgrund von Berechnungen wären sie vernachlässigbar klein.
  2. *Schall*. Bei Beschallung mit der Lautstärke von ca. 80 dB und tiefen Frequenzen (Orgeltöne) traten keine merklichen Verschiebungen des Interferenzmusters auf.
  3. *Temperatur*. Nach Berechnung würde ein Temperaturunterschied von 1°C eine Verschiebung von 0,75 des Messbereiches bewirken. Es ist aber nicht anzunehmen, dass in der kurzen Messzeit von 30 Sekunden wesentliche Temperaturänderungen auftreten. Diese kamen offensichtlich nicht vor, wenn der Lichtstrahl im Metallrohr (m) oder im Glasrohr (g) geführt wurde.

- Als typische *Messergebnisse* werden folgende Filme vorgestellt, die alle am 21.11. 09 um ca. 18.00 MEZ im Garten des Hauses An der Dornwiese 2 in Gräfelfing aufgenommen wurden. Hierbei würde eine Verschiebung des Interferenzmusters nach unten einer Vergrößerung der Lichtgeschwindigkeit entsprechen.

Eine Verschiebung des Interferenzmusters um eine Periode entspricht einer Veränderung der Lichtgeschwindigkeit um 210 m/s.

### Filme

5203: Ausrichtung nach W, zuerst frei (f), danach Metallrohr (m)

[http://home.arcor.de/johannes\\_marko/flv/CIMG5203.flv](http://home.arcor.de/johannes_marko/flv/CIMG5203.flv)

5204: Drehung WNOS....., Metallrohr (m)

[http://home.arcor.de/johannes\\_marko/flv/CIMG5204.flv](http://home.arcor.de/johannes_marko/flv/CIMG5204.flv)

5205: Drehung WNOS... , frei (f)

[http://home.arcor.de/johannes\\_marko/flv/CIMG5205.flv](http://home.arcor.de/johannes_marko/flv/CIMG5205.flv)

5206: Ausrichtung nach W, frei (f)

[http://home.arcor.de/johannes\\_marko/flv/CIMG5206.flv](http://home.arcor.de/johannes_marko/flv/CIMG5206.flv)

5207: Drehung WNOS..., frei (f)

[http://home.arcor.de/johannes\\_marko/flv/CIMG5207.flv](http://home.arcor.de/johannes_marko/flv/CIMG5207.flv)

5208: Ausrichtung S und O, frei (f)

[http://home.arcor.de/johannes\\_marko/flv/CIMG5208.flv](http://home.arcor.de/johannes_marko/flv/CIMG5208.flv)

5209: Drehung NOSW..., Glasrohr (g)

[http://home.arcor.de/johannes\\_marko/flv/CIMG5209.flv](http://home.arcor.de/johannes_marko/flv/CIMG5209.flv)

Weiterhin werden folgende Filme vorgestellt, die am 6.4.09 um ca. 18.00 MEZ im Garten des Hauses An der Dornwiese 2 in Gräfelfing aufgenommen wurden. Hier würde eine Verschiebung des Interferenzmusters nach links einer Vergrößerung der Lichtgeschwindigkeit entsprechen.

### Filme

5097: Ausrichtung nach W, frei (f)

[http://home.arcor.de/johannes\\_marko/flv/CIMG5097.flv](http://home.arcor.de/johannes_marko/flv/CIMG5097.flv)

5098: Ausrichtung nach W, Metallrohr (m)

[http://home.arcor.de/johannes\\_marko/flv/CIMG5098.flv](http://home.arcor.de/johannes_marko/flv/CIMG5098.flv)

5099: Ausrichtung nach W, erst frei (f) dann Tüte

[http://home.arcor.de/johannes\\_marko/flv/CIMG5099.flv](http://home.arcor.de/johannes_marko/flv/CIMG5099.flv)

Alle diese Filme zeigen eine deutliche Schwankung der Lichtgeschwindigkeit, wenn das Gerät im Freien aufgestellt ist und der Lichtstrahl auch frei ist (f). Wenn der Lichtstrahl dagegen in einem Metallrohr (m) oder Glasrohr (g) verläuft verschwinden diese Schwankungen. Dieser Befund ist unabhängig von der Richtung des Lichtstrahles (isotrop).

Zur besseren Auswertung kann ein Bildverarbeitungsprogramm, z.B. *virtual dub*, verwendet werden. Hierbei können auch die Einzelbilder des Films sukzessive angezeigt werden.

## 5. Diskussion

Wenn man (klassisch) annimmt, dass der Äther homogen den Weltraum erfüllt, müsste durch die Bewegung der Erde im Weltraum ein Ätherwind entstehen, der die Lichtausbreitung beeinflusst. Die Messungen zeigen, dass dies nicht der Fall ist, woraus man folgern kann, dass der Äther offenbar (vielleicht durch den Einfluss der Gravitation) an die Himmelskörper gebunden ist. Dies würde für einen inhomogen im Raum vorhandenen Äther sprechen. Die Inhomogenität könnte durch eine „Mitführung“ des Äthers durch die Himmelskörper entstehen. *Sollten die festgestellten Schwankungen noch Reste dieser Mitführung sein?*

Andererseits: Da eine Temperaturänderung der Luft einen rel. großen Einfluss hat: *Könnte durch die Brown'sche Bewegung der Luftmoleküle die Schwankung der Lichtgeschwindigkeit bewirkt werden?* Hierbei müsste dann allerdings geklärt werden, warum dieser Effekt im Metallrohr oder Glasrohr nicht auftrat.

Das benutzte Messinstrument (MZIM) ist rel. einfach nachzubauen. Es wäre wünschenswert, wenn die hier beschriebenen Messungen noch von anderer Seite wiederholt werden könnten.

Für zahlreiche Ratschläge und Durchsicht des Manuskripts danken die Verfasser Herrn *Norbert Feist*.

Gräfelfing, den 30.1.2010

### Verfasser

Prof. Dr.-Ing., Dr.-Ing. E.h. Hans Marko  
An der Dornwiese 2  
82166 Gräfelfing  
Tel. 089/852424  
Fax: 089/85837725  
email: [marko@mytum.de](mailto:marko@mytum.de)

Johannes Marko  
An der Dornwiese 2A  
82166 Gräfelfing  
Tel. 089/8577379  
Fax: 089/89839814  
email: [johannes\\_marko@yahoo.de](mailto:johannes_marko@yahoo.de)

## Anhang

### Die Empfindlichkeit zweier Meßinstrumente zur Messung des Ätherwindes.

#### 1. Mach-Zehnder-Interferometer

*Voraussetzung:* Es gilt die „Käfighypothese“ d.h. ein in einem Faraday-Käfig (Lichtabschirmung) verlaufender Lichtstrahl hat die Geschwindigkeit  $c$  in Bezug auf den Käfig, unabhängig von einer Bewegung des Käfigs im Raum.

*Prinzip:* Es wird ein im Käfig und ein außerhalb des Käfigs ( im Raum ) verlaufender Lichtstrahl gleicher Länge und Richtung zur Interferenz gebracht.

*Rechnung:* Die Einweg-Wellengeschwindigkeit  $c'$  außerhalb des Käfigs ist gem. [1] S. 16 letzte Formel und bei der Vernachlässigung  $a^2 \ll 1$

$$\frac{c'}{c} = 1 - a \cdot \cos(\alpha) = \frac{1}{1 + a \cdot \cos(\alpha)}$$

Hierbei ist  $a = v/c$  (mit  $v$ : Ätherwindgeschwindigkeit und  $c$ : Lichtgeschwindigkeit) und  $\alpha$  ist der Einfallswinkel des Ätherwindes.

Im Käfig gilt  $c' = c$ , unabhängig von  $a$  und  $\alpha$ .

Bei einer Länge  $L$  des Interferometers sind die Laufzeiten  $t_1$  außerhalb und  $t_2$  innerhalb des Käfigs:

$$t_1 = \frac{L}{c'} = \frac{L}{c} \cdot (1 + a \cdot \cos(\alpha))$$
$$t_2 = \frac{L}{c}$$

Die Laufzeitdifferenz  $\Delta t = t_1 - t_2$  ist

$$\Delta t = \frac{L}{c} a \cdot \cos(\alpha)$$

Damit ist der Interferenzwinkel:

$\Delta\varphi = 2\pi f \Delta t$ , und mit  $f = c/\lambda$  ( mit  $\lambda$  Lichtwellenlänge ), gegeben durch:

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{L}{\lambda} \cdot a \cdot \cos(\alpha)$$

Als „Messbereich“  $v_\pi$  werde nun eine Ätherwindgeschwindigkeit bezeichnet, die eine maximale Streifenverschiebung von  $\pi$  bei  $\alpha = 0^\circ$  bewirkt. Diese Größe ist umgekehrt proportional zur „Empfindlichkeit“, d.h. ein kleinerer Messbereich entspricht einer größeren Empfindlichkeit.



Es gilt :  $\pi = 2\pi \frac{L}{\lambda} \cdot \frac{v_\pi}{c}$  und somit ist :

$$\boxed{v_\pi = \frac{1}{2} \cdot \frac{\lambda}{L} \cdot c}$$

Als „Messbereich“  $v_{\pi 0}$  unseres Instruments (für Vergleichszwecke) wird die Ätherwindgeschwindigkeit bezeichnet, die für  $L = 40 \text{ cm}$  und  $\lambda = 560 \text{ nm}$  (grünes Licht) eine Streifenverschiebung von  $\pi$  bewirkt. Diese Größe ist umgekehrt proportional der „Empfindlichkeit“, d.h. ein kleiner Messbereich entspricht einer großen Empfindlichkeit.

Nach obiger Formel berechnet sich:

$$\underline{v_{\pi 0} = 210 \text{ m/s}}$$

## 2. Michelson-Morley-Interferometer ( MMI )

*Voraussetzung.* Falls im lichtabgeschirmten Raum ( Keller ) gemessen wird, darf die Käfighypothese *nicht* gelten. Andernfalls schon.

*Prinzip:* Es wird ein reflektierter Lichtstrahl mit einem dazu um  $90^\circ$  verdrehten reflektierten Lichtstrahl zur Interferenz gebracht.

*Rechnung:* Maßgebend ist hierzu die Zweiweg-Wellengeschwindigkeit gemäß [1] S. 21 letzte Formel

$$\frac{c'_{z1}}{c} = \frac{1 - a^2}{\sqrt{1 - a^2 \cdot \sin^2(\alpha)}} \quad \text{für den ersten Schenkel}$$

und 
$$\frac{c'_{z2}}{c} = \frac{1 - a^2}{\sqrt{1 - a^2 \cdot \cos^2(\alpha)}} \quad \text{für den zweiten Schenkel,}$$
  
mit  $\sin(\alpha + 90^\circ) = \cos(\alpha)$

Mit den Laufzeiten  $t_1 = \frac{L}{c'_{z1}}$  für den ersten Schenkel und  $t_2 = \frac{L}{c'_{z2}}$  für den zweiten Schenkel

wird die Laufzeitdifferenz  $\Delta t = t_1 - t_2$ :

$$\Delta t = L \left( \frac{1}{c'_{z1}} - \frac{1}{c'_{z2}} \right)$$

Daraus folgt: 
$$\Delta t = \frac{L}{c \cdot (1 - a^2)} \cdot \left[ \sqrt{1 - a^2 \cdot \sin^2(\alpha)} - \sqrt{1 - a^2 \cdot \cos^2(\alpha)} \right]$$

Mit der Vernachlässigung  $a^4 \ll 1$  folgt daraus:

$$\Delta t = \frac{L}{c} \left[ -\frac{1}{2} a^2 \sin^2(\alpha) + \frac{1}{2} a^2 \cos^2(\alpha) \right]$$

Mit  $\cos^2(\alpha) - \sin^2(\alpha) = \cos(2\alpha)$  folgt:

$$\Delta t = \frac{L}{2c} \cdot a^2 \cdot \cos(2\alpha)$$

Damit ist der Interferenzwinkel  $\Delta\varphi$  mit  $\Delta\varphi = 2\pi f \Delta t$ , sowie  $f = c/\lambda$ ,

$$\Delta\varphi = 2\pi \cdot \frac{c}{\lambda} \cdot \frac{L}{2c} \cdot a^2 \cdot \cos(2\alpha)$$

$$\boxed{\Delta\varphi = \pi \cdot \frac{L}{\lambda} \cdot a^2 \cdot \cos(2\alpha)}$$

Für den oben definierten „Messbereich“, d.h. für die Ätherwindgeschwindigkeit  $v_\pi$  die eine Streifenverschiebung von  $\pi$  ergibt, gilt:

$$\pi = \pi \cdot \frac{L}{\lambda} \left( \frac{v_\pi}{c} \right)^2 \cdot \cos(2\alpha)$$

und für ihren Wert bei  $\alpha = 0^\circ$  (oder  $\alpha = 90^\circ$ ) erhält man:

$$\boxed{v_\pi = c \sqrt{\frac{\lambda}{L}}}$$

Für den Messbereich d.h. für  $L = 40 \text{ cm}$  und  $\lambda = 560 \text{ nm}$ , erhält man:  
:

$$\underline{v_{\pi 0} = 355 \text{ km/s.}}$$

d.h. das Michelson-Morley-Interferometer ist bei gleichen Abmessungen um mehr als den Faktor 1000 unempfindlicher als das Mach-Zehnder-Interferometer.

### 3. Diskussion

Aus obiger Darstellung folgt, dass die "Normempfindlichkeit" des MZI und des MMI bei gleicher Größe um einen Faktor von über 1000 verschieden sind. Dies folgt daraus, dass bei der Einweglichtgeschwindigkeit die Größe  $a = v/c$  linear eingeht, dagegen bei der Zweiweglichtgeschwindigkeit im Quadrat.

Somit ist das MZI erheblich empfindlicher für eine Messung des Ätherwindes als das MMI. Allerdings erfordert das MZI, dass die „Käfighypothese“ gilt.

Bei beiden Instrumenten ist jedoch noch die Frage zu beachten wie genau und mit welcher Sicherheit eine Streifenverschiebung feststellbar ist. Dies ist streng genommen ein Problem der Bildverarbeitung bzw. der Mustererkennung, das allerdings in beiden Fällen gleichartig ist. Nach unserer Einschätzung ist:

- eine Streifenverschiebung von  $\pi$  mit Sicherheit feststellbar.
- eine Streifenverschiebung von  $\pi/10$  ist wegen auftretender Schwankungen, insbes. von thermischen Einflüssen mit freiem Auge kaum noch mit Sicherheit feststellbar.

In der folgenden Tabelle werden die feststellbaren Ätherwindgeschwindigkeiten angegeben für die beiden Interferometer MZI und MMI bei den Lichtweglängen  $L$  von 40 cm und von 4 m. Hierbei gilt die erste Zahl für eine (gut feststellbare) Streifenverschiebung von  $\pi$  und die zweite Zahl für eine (schwer feststellbare) Streifenverschiebung von  $\pi/10$ .

#### *Feststellbare Ätherwindgeschwindigkeiten*

Die erste Zahl gilt für eine Streifenverschiebung von  $\pi$  die zweite Zahl von  $\pi/10$

Instrument	L=40cm	L=4m
MZI	210 m/s – 21 m/s	21 m/s – 2,1 m/s
MMI	355 km/s – 112 km/s	112 km/s – 35 km/s

Hierbei ist anzumerken, dass Dayton Miller [2] in den Jahren 1925 und 1926 Messungen mit einem MMI durchführte und hierbei einen Ätherwind von 10 km/s festgestellt hat. Diese Messungen wurden von Einstein bezweifelt und auf thermische Schwankungen zurückgeführt. Er schrieb hierzu einem Freund: „Wenn diese Messungen zutreffen, bricht die ganze Relativitätstheorie wie ein Kartenhaus zusammen.“

Aufgrund der obigen Tabelle scheint es zumindest fraglich ob Dayton Miller mit einem MMI einen Ätherwind von 10 km/s nachweisen konnte. Bei einer Lichtweglänge von  $L = 4\text{m}$  würde bei 10km/s die Streifenverschiebung  $\pi/126$  betragen. Allerdings soll Miller ein MMI mit einer Lichtweglänge von  $L = 32\text{m}$  benutzt haben, die durch mehrfache Spiegelung zustande kam. Hierfür würde die Streifenverschiebung nach unserer Rechnung  $\pi/16$  betragen, was sicherlich feststellbar war. Allerdings wurden die Messungen Millers angezweifelt und auf thermische Schwankungen zurückgeführt.

Es bleibt aber die Hoffnung, dass mit dem wesentlich empfindlicheren MZI (falls die sog. „Käfighypothese“ zutrifft) doch ein Ätherwind feststellbar ist, auch wenn er beispielsweise durch die Gravitation oder eine Abschirmung sehr stark gedämpft sein sollte.

*Literatur :*

- [1] H. und J. Marko : Signalübertragung bei bewegtem Sender und Empfänger -  
Eine systemtheoretische Analyse. Eigenverlag
  
- [2] Dayton Miller : The Ether Drift Experiment and the Determination of the Absolute  
Motion of the Earth, Review of Modern Physics, Vol.5 July 1933  
nr. 3, S.203-242