

ANNALEN DER PHYSIK

Gegründet 1799 durch F. A. C. Gren und fortgeführt durch L. W. Gilbert, J. C. Poggendorff, G. und E. Wiedemann, P. Drude, W. Wien

5. Folge, Band 7
Der ganzen Reihe 399. Band

Kuratorium:

F. Paschen M. Planck R. Pohl
A. Sommerfeld M. Wien E. Warburg

Unter Mitwirkung
der Deutschen Physikalischen Gesellschaft
herausgegeben von

E. GRÜNEISEN, Marburg/L.
M. PLANCK, Berlin



I 9 3 0

LEIPZIG / VERLAG VON JOHANN AMBROSIVS BARTH

Reprinted with permission of Johann Ambrosius Barth

JOHNSON REPRINT CORPORATION JOHNSON REPRINT COMPANY LIMITED

ANNALEN DER PHYSIK

5. FOLGE, 1930, BAND 7, HEFT 4

Die Jenaer Wiederholung des Michelsonversuchs Von Georg Joos

Mit 11 Figuren

1. Einleitung

Bald nachdem D. Miller¹⁾ seine aufsehenerregenden Mitteilungen über einen positiven Ätherwindeneffekt beim Michelsonversuch gemacht hatte, wurde wie an anderen Orten²⁾, so auch in Jena eine Nachprüfung in Angriff genommen. Das gesteckte Ziel war, bei einem Lichtweg, der etwa von der Größe des Millerschen sein sollte, fortlaufende Registrierungen zu gewinnen, welche als von jedermann nachprüfbar dokumentarisch eine eindeutige Entscheidung liefern sollten. Die Firma Carl Zeiß stellte in großzügigster Weise ihre großen Hilfsmittel zur Verfügung, insbesondere wurden die schwierigen technischen Konstruktionen des Rotationsapparates vom Konstruktionsbureau „Astro“ (Oberingenieur D. Fr. Meyer und Dipl.-Ing. Büchele sowie Ing. Köppen) durchgearbeitet. Für den Aufbau des Apparates und die Aufnahmen selbst standen dem Verf. Herr Ing. Köppen und Herr Mechaniker Ziege zur Seite. Ihnen allen herzlichst zu danken, ist selbstverständliche Pflicht.

2. Beschreibung des Apparates

a) Der Träger der Optik (Fig. 1)

Für die erreichbare Genauigkeit kommt natürlich alles auf eine störungsfreie Montierung der Optik an. Schon die

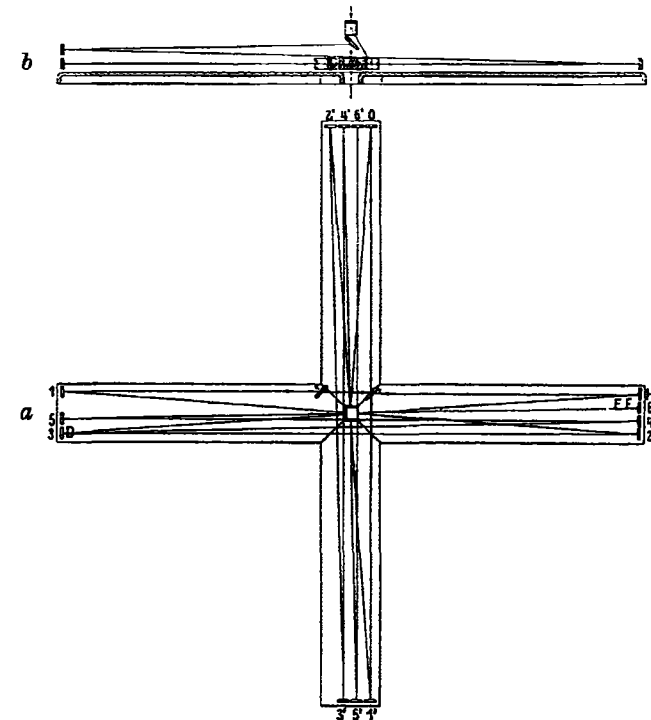
1) D. C. Miller, Proc. Nat. Ac. Wash. 11. S. 306, 1925, weitere Angaben von Miller in der Diskussion des Michelson-Versuchs. Astrophys. Journ. 68. S. 341. 1928.

2) R. I. Kennedy, Proc. Nat. Ac. Wash. 12. S. 621. 1926; A. Piccard und E. Stahel, Naturw. 14. S. 935. 1926; 16. S. 25. 1928; A. A. Michelson, F. G. Pease und F. Pearson, Nature 123. S. 88. 1929; Journ. Opt. Soc. Amer. 18. S. 181. 1929; K. K. Illingworth, Phys. Rev. 30. S. 692. 1927.

Materialfrage erforderte eingehende Vorversuche, die vom Verf. im Physikalischen Institut der Universität Jena ausgeführt wurden. Zunächst wurde an Invar gedacht, aber eine Überschlagsrechnung zeigte, daß die Magnetostraktion im Erdfeld bereits Effekte von der Größenordnung der erwarteten, und zwar ebenfalls mit doppelter Periode hervorrufen kann. Das geeignetste Material wäre natürlich Quarzglas gewesen, das aber bei den geplanten Dimensionen des Apparates (Armlängen von 2 m!) nicht in Frage kam. Nun stellt neuerdings die Firma Schott und Gen. nach dem Verfahren von Pfannenschmidt Quarzglas in fast beliebig großen Dimensionen her. Trotzdem die Trübung zeigt, daß das Material nicht homogen ist, sondern zahlreiche kleine Lufteinschlüsse enthält, ist sein thermischer Ausdehnungskoeffizient von dem des klaren Quarzglases nicht wesentlich verschieden. Für unsere Zwecke kam es vor allem aber darauf an, zu wissen, ob das Material „arbeitet“, d. h. ob spontane kleine Längenänderungen auftreten. Zu diesem Zweck waren zwei 1 m lange Platten nebeneinander gestellt und interferometrisch auf etwaige relative Längenänderungen kontrolliert. Es ergab sich, daß mindestens in den für eine Umdrehung des Apparates in Frage kommenden Zeiten (einige Minuten bis 1 Stunde) keinerlei Längenänderungen vorkamen. (Ob allerdings im Laufe von Jahren keine Änderungen vorkommen, wurde nicht untersucht!).

Aus diesem Material fertigte nun die Firma Schott eine größere Anzahl Platten an, wofür ich ihr und besonders dem Leiter dieser Abteilung, Herrn Ing. Pfannenschmidt, tiefsten Dank schulde. Die zuletzt gewählte Form ist die eines an einer Seite unter 45° zugespitzten Rechtecks der Größe 193×41 cm. Aus vier solchen Platten konnte dann ein Kreuz (Fig. 1) zusammengesetzt werden. Die Platten haben eine Dicke von 2 cm und sind zur Versteifung mit einem umgebogenen Rand von 8 cm Höhe versehen (vgl. Fig. 1 b). Die Zusammensetzung erfolgte dadurch, daß die Seitenflächen an den 45° -Enden sauber abgeschliffen und ohne jede Zwischenlage durch je zwei kräftige Klemmschrauben aufeinandergepreßt wurden. Von einer plastischen Zwischenschicht wurde abgesehen, da sie bei stärkerer Pressung dauernde Längenänderungen ergab. Im Mittelpunkt des so entstehenden Kreuzes blieb durch ge-

eignete Formgebung eine quadratische Öffnung von 10 cm Seitenlänge frei, welche zum Durchtritt des Strahlengangs diente. Die Platten erhielten an den für die Spiegel und Glasplatten



Der Strahlengang

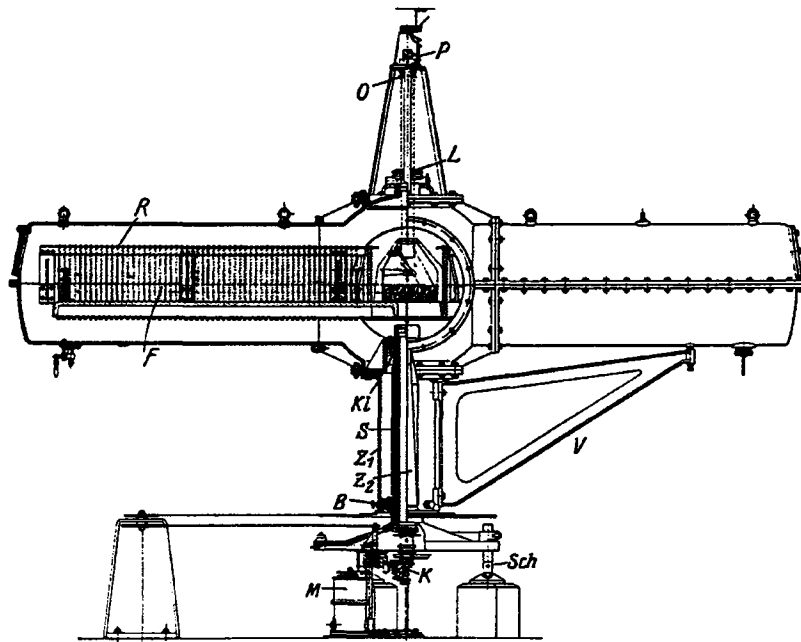
Fig. 1

bestimmten Stellen Bohrungen, die ohne Gefahr des Springens ausgeführt werden konnten.

b) Der Rotationsapparat (Fig. 2)

War so eine befriedigende Aufstellung der Optik geschaffen, so kam die zweite Frage: eine erschütterungsfreie drehbare Lagerung dieses Kreuzes. Diese Frage wurde in einer Weise gelöst, die von den bisherigen Konstruktionen völlig abwich. Statt wie bisher den Träger der Optik auf Quecksilber schwimmen zu lassen, haben wir das Quarzkreuz an einer sehr großen Anzahl von Federn F aufgehängt in der Weise, daß an dem Rahmen R zunächst die Federn befestigt

sind, welche Querstangen tragen, auf denen das Kreuz ruht. Jede Einzellast des Kreuzes, wie Spiegel, Teilungsplatte u. a. ist zur Vermeidung von Deformationen durch Zusatzfedern entlastet, welche an dem Ort der Last an den dort liegenden Querstangen angebracht sind. Der Rahmen ist mit dem beweglichen Teil des Apparates verbunden. Dieser besteht in der Hauptsache aus einem kugelförmigen Mittelstück mit vier



Schnitt durch den Gesamtapparat

Fig. 2

horizontalen Ansatzrohren und zwei vertikalen nach unten gehenden konzentrischen Zylindern. Die horizontalen Ansatzrohre umschließen das Kreuz luftdicht. Zur Dämpfung der Schwingungen des aufgehängten Kreuzes sind an allen vier Enden an der Unterseite Bürsten aus weichen Haaren angebracht, denen ebensolche an den Rohrwänden verstellbar befestigte gegenüberstehen. Durch Annäherung dieser Bürsten kann die Dämpfung verstärkt werden. Bei starker Dämpfung klingen zwar die Anlaufstörungen sehr schnell ab, andererseits werden auch wieder Erschütterungen übertragen, so daß bei

den endgültigen Aufnahmen die Dämpfung ganz ausgeschaltet wurde. Kugel und Ansatzrohre sind aus Lantal-Metall (einer Aluminiumlegierung) gegossen. Zur Montage mußten Kugel und Ansatzrohre aus zwei Hälften mit horizontaler Trennungsfäche hergestellt werden, die luftdicht aufeinandergedreßt werden können. (Es war von vornherein die Möglichkeit der Evakuierung offen gelassen, falls die Störungen durch die eingeschlossene Luft zu groß würden. Es wurde indes davon kein Gebrauch gemacht, da diese Störungen sich auf ein Minimum reduzieren ließen, während andererseits eine völlige Gasfreiheit — Undichtigkeiten, durch die kontinuierlich etwas Luft eindringt, stören natürlich in hohem Maße — sehr schwer zu erreichen ist.) Der äußere vertikale Zylinder Z_1 trägt die Antriebsriemenscheibe und vier die horizontalen Arme mittragende Versteifungen V . Der bewegliche Teil des Apparates läuft auf einem Kugellager KL , das auf das obere Ende der festen Hohl säule S aufgesetzt ist. Der Fuß dieser Hohl säule kann durch drei auf Betonsockeln ruhende Stellschrauben Sch justiert werden. Im Innern der festen Hohl säule läuft mit einem kleinen Zwischenraum der zweite mit dem beweglichen Teil fest verbundene Zylinder Z_2 , der die Kamera K trägt. Die Fixierung der Drehachse war anfangs in der Weise versucht worden, daß zwischen der festen Säule und dem äußeren Zylinder Z_1 im Abstand von etwa 1 m zwei Kugellager zur Führung angebracht waren. Diese Konstruktion ergab einen spielend leichten Gang, hatte aber den Nachteil, daß in Wirklichkeit zwei nicht ganz zusammenfallende Drehachsen vorhanden waren, einmal die Senkrechte auf der Ebene des Traglagers KL , das andere Mal die Verbindungslinie der Mittelpunkte der beiden Führungslager. Die unvermeidlichen Ungenauigkeiten ließen dabei die durch das Verhalten einer aufgesetzten Libelle L kontrollierbare Richtung der Achse nur auf etwa 20" genau fixieren. Da sich diese Genauigkeit als zu gering erwies, wurden die beiden Führungslager ganz entfernt und statt dessen an die feste Säule eine Kugel angedreht, auf denen vier justierbare, Teile einer Kugelfläche darstellende Backen B schleifen. Das Traglager wurde dann so ausgebildet, daß es gleichzeitig die seitliche Führung am oberen Ende übernimmt. Durch die Verstellung der Backen kann erreicht werden, daß die Drehachse um weniger als 1"

von der Vertikalen abweicht. Dieser Vorteil hebt den Nachteil eines etwas schwereren Gangs weit auf. Der Antrieb erfolgt durch einen mit einem astatischen Zeiß-Regulator Modell III nach Meyer gekoppelten Elektromotor M mittels einer Schnurriementübertragung. Diese Antriebsübertragung erwies sich andern Versuchen, wie einem Schneckenantrieb, hinsichtlich der Erschütterungsfreiheit überlegen. Die Übersetzungen sind so gewählt, daß eine Umdrehung des Apparates in 10 Minuten erfolgt.

c) Der Strahlengang (Fig. 1 u. 2)

Bei der ersten Versuchsreihe wurde als Lichtquelle eine Quarzglasquecksilberlampe mit Monochromatfilter für 5461 außerhalb des Versuchsraums aufgestellt und das durch eine Öffnung horizontal in den Versuchsraum einfallende Lichtbündel mittels eines Spiegels in die Richtung der Achse geworfen. Bei dieser Anordnung zeigte sich aber eine rätselhafte Erscheinung: ein einfach periodisch leichtes Wandern des Interferenzstreifenbildes *samt den Nullmarken*. Da sich bei unserer Anordnung die Nullmarken am Ort der Interferenzen befinden (vgl. unten), konnten durch diese Erscheinung keine Trugschlüsse entstehen. Die Erklärung ist ziemlich überraschend: Die Abbildung der Interferenzstreifen erfolgt (vgl. unten und Fig. 1a) durch die beiden unter 45° in den Strahlengang eingestellten Glasplatten hindurch. Wenn nun durch mangelhafte Zentrierung des Lichtbündels während einer Rotation diese Platten von etwas verschiedenen geneigten Strahlen durchsetzt werden, muß eine Verschiebung des Bildes eintreten. Da es sich zeigte, daß eine hinreichend genaue Justierung des eintretenden Bündels kaum zu erreichen war (bei jeder Zündung wurde ja die Richtung etwas geändert und Apparatchse und Mittelstrahl durften nur etwa 10" von einander abweichen!), wurde der Nachteil einer Wärmeentwicklung im Beobachtungsraum durch die Lichtquelle in Kauf genommen und ein Heraeusches Punktquecksilberlämpchen P (Fig. 2) von nur 25 Watt Leistungsverbrauch auf einem Gestell hoch über dem Apparat selbst angebracht und mitrotieren gelassen. Die Stromzuführung erfolgt von der Decke her mit zwei Schleifringen. Durch ein totalreflektierendes Prisma wird das von

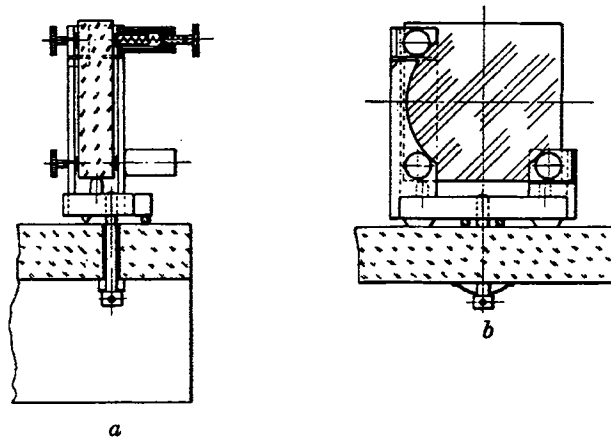
ihm zunächst horizontal austretende Licht in die Richtung der Achse geworfen. Durch ein im Abstand der Brennweite von der Lichtquelle entferntes Objektiv O wird das Licht parallel gemacht. Auf dem Objektiv befindet sich auch das Monochromatfilter. Ein über der Mitte des Quarkreuzes angebrachter, unter 45° geneigter Spiegel wirft das Licht zunächst nach einem am Ende des einen Arms sitzenden weiteren Planspiegel O (vgl. Fig. 1a). Von hier aus gelangt es zur Teilungsplatte. Jeder der beiden Teilstrahlen wird nun dreimal in der Ebene des Kreuzes hin- und hergeworfen. Die so entstehende Länge der beiden zur Interferenz gelangenden Lichtwege beträgt 20,99 m. Nach der Wiedervereinigung der beiden Büschel trifft das Licht den die Interferenzen abbildenden Hohlspiegel, der das Bündel zunächst auf einen etwas höher gelegenen Spiegel am gegenüberliegenden Ende des Kreuzes und von da auf einen in der Mitte angebrachten, unter 45° geneigten Planspiegel wirft. Dieser bringt die Strahlen in die Achse des Apparates nach unten zur Kamera. Vor demjenigen Spiegel, an dessen Ort die Interferenzen liegen — das ist derjenige an dem das durch die Teilplatte durchgehende Bündel in sich zurückgeworfen wird — sind zur Erzeugung von Nullmarken in einem Rähmchen drei dünne Drähte gespannt. Es erwies sich als notwendig, mehrere Nullmarken anzubringen, da sehr oft eine Marke so ungünstig zu den Interferenzstreifen lag, daß die Ausmeßgenauigkeit unzureichend wurde. Andererseits wurde auch mitunter ein Streifen dadurch zur Ausmessung unbrauchbar, daß gerade am Maximum eine Marke lag.

Die Markierung einer bestimmten Stellung des Apparates erfolgt dadurch, daß ein an der Decke des Versuchsraums befestigter schmaler Blechstreifen während der Rotation einmal den Strahlengang kurz hinter dem Punktlämpchen bedeckt. Der den elektromagnetisch beweglichen Spiegel tragende Arm bildet in dieser Stellung mit der Nordrichtung einen Winkel von 20° nach Westen zu. Auf den in Fig. 9 reproduzierten Aufnahmen sieht man, daß diese dort vertikal erscheinenden Marken nicht genau senkrecht auf den Interferenzstreifen stehen. Dies kommt nicht etwa daher, daß die Streifen nicht ganz senkrecht zu dem am Bildort angebrachten Spalt

lagen. Vielmehr liegt die Ursache darin, daß der die Marke erzeugende Blechstreifen zunächst die eine Hälfte des stark divergierenden Bündels, welcher die eine Plattenhälfte entspricht, auslöscht, und daß bis zur Auslöschung der andern Hälfte die Platte bereits wieder ein Stück weitertransportiert wird.

d) Einzelheiten der Optik (Fig. 3 u. 4)

Die Spiegel sind quadratische oberflächenversilberte Glasplatten der Größe 7×7 cm, die halbversilberte Teilungs- und die Kompensationsplatten haben eine Größe von 7×11 cm.



Montierung der Spiegel

Fig. 3

Zur Vermeidung überzähliger Reflexe sind diese beiden Platten etwas keilförmig geschliffen und so aufgestellt, daß sie zusammen wieder als Planplatte wirken. Die Montage der Spiegel zeigt Fig. 3. Die Grobeinstellung erfolgt durch drei einfache Schrauben, die Feineinstellung durch Änderung der Feder-spannung in den Gegenlagern vermöge dreier weiterer Schrauben. Die Halter sind ihrerseits durch eine Schraube auf den Quarzplatten befestigt, wobei zwei Schneiden und eine Kugel als Auflage dienen.¹⁾

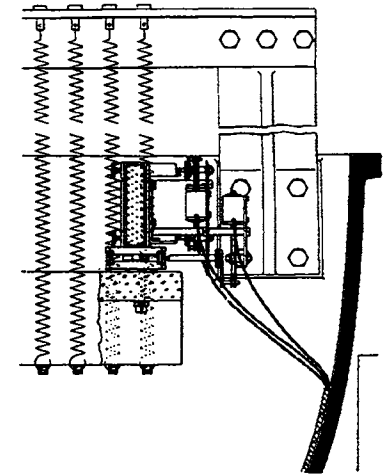
Es zeigte sich, daß bei manueller Justierung der Spiegel durch eines der in die Rohrwände eingelassenen, durch Platten

1) In der in Fig. 3 b reproduzierten Werkzeichnung sind 2 Kugeln angegeben, was aber bei der Ausführung geändert ist.

verschließbaren Handlöcher solche thermische Störungen entstanden, daß es Stunden dauerte, bis sich die Interferenzstreifen wieder beruhigt hatten, wobei die Stellung durchaus nicht immer die gewünschte war. Aus diesem Grund und zur Justierung bei evakuiertem Apparat war an einem Spiegel eine elektromagnetische Feinbewegung angebracht (Fig. 4). Drei

Stellschrauben — eine für eine Parallelverschiebung des ganzen Spiegels, zwei für die Neigung — sind je mit zwei Zahnrädern verbunden, welche bei Kontaktgabe durch je einen Elektromagneten um einen Zahn vor- oder zurückbewegt werden. An einem an der Wand des Versuchsraums angebrachten Schaltbrett sind neben dem zur okularen Beobachtung dienenden Fernrohr sechs Kontaktknöpfe für diese drei Schrauben — je einer für Vorwärts-, je einer für Rückwärtsbewegung — montiert.

Die Leitungen sind im Innern des Apparates zu einem in der Rohrwand sitzenden Steckkontakt geführt, in welchen bei der Justierung die von den Kontakten herkommenden Leitungen eingesteckt werden. Nach der Justierung müssen natürlich für die Rotation diese Kabel wieder entfernt werden.



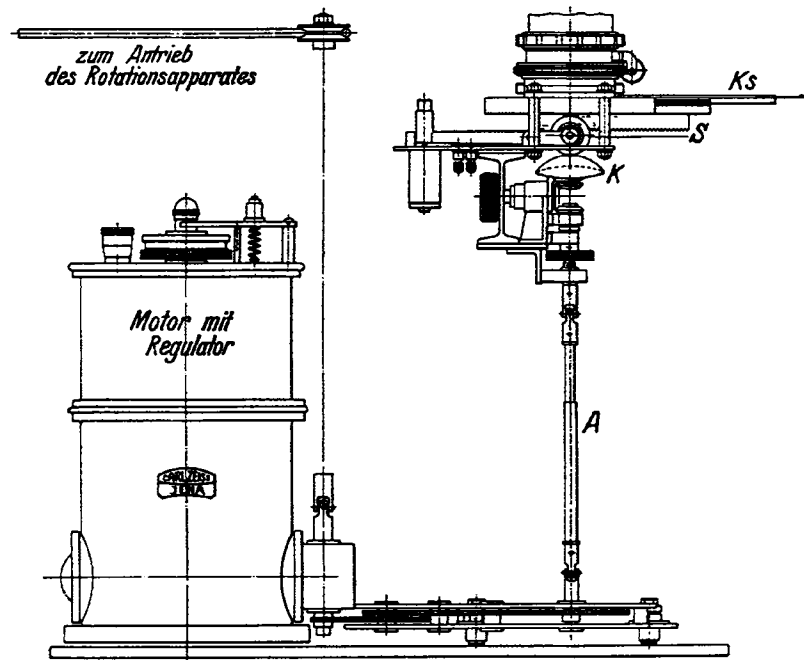
Die elektromagnetische Feinbewegung

Fig. 4

e) Die bewegte Kamera. (Fig. 5)

Am unteren Ende des inneren sich mitdrehenden Zylinders Z_2 in Fig. 2 sitzt der Kameraansatz, der mittels einer Schnecke in die richtige Entfernung gebracht werden kann. Vor einem 0,2 mm breiten Spalt, der ein kleines Stück des Interferenzbildes senkrecht zu den Streifen ausschneidet, läuft die Kassette während der Rotation langsam vorbei. Um jede gewünschte Transportgeschwindigkeit zu erreichen, wurde folgende Einrichtung getroffen: die Bewegung der Kassette Ks

erfolgt durch ein Zahnrad, das in eine mit der Kassette verbundene Zahnstange eingreift. Das Zahnrad selbst sitzt auf gleicher Achse mit einem Schleifrad *S*, das auf einer neigbaren Kugelkalotte *K* schleift, die vom Motor mitgedreht wird. Je nach der Zone, an der das Schleifrad aufsitzt, kann eine größere oder kleinere Transportgeschwindigkeit eingestellt werden. Die zur Drehung der Kalotte dienende Antriebsachse *A* besteht



Die Kamera und der Antrieb

Fig. 5

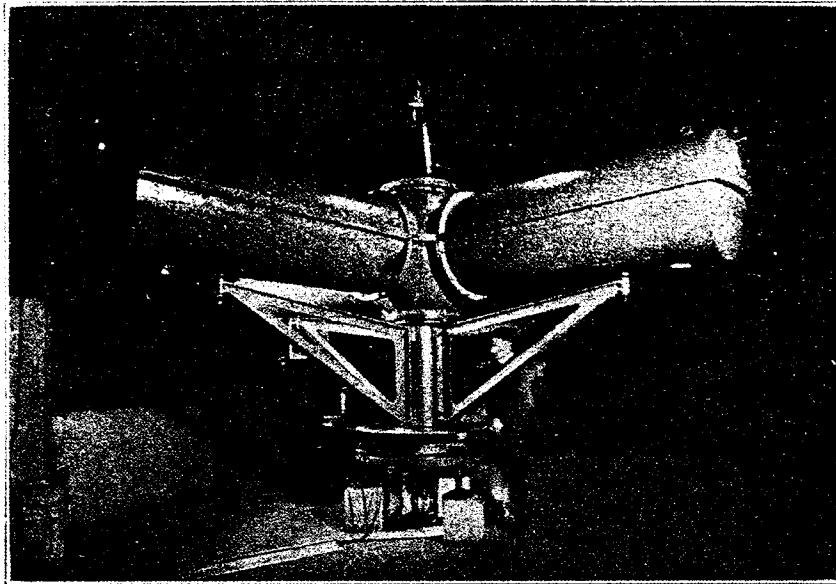
aus zwei teleskopartig ineinander verschiebbaren Vierkantrohren. Dies ist deshalb notwendig, damit man bei der Fokussierung der Kamera die Länge der Antriebsachse stetig variieren kann. Die Übertragung vom Antriebsmotor her erfolgt durch ein Zahnradwerk. Zur elastischeren Verbindung ist die Achse sowohl am Antriebsrad, wie an der Kalotte mit einem Kardangelenk befestigt. Das benützte Plattenformat ist 3×12 cm. Zur okularen Beobachtung kann in die Kassette ein Prisma eingesetzt werden, welches nach Entfernung der Spaltblende

eine Beobachtung des ganzen Interferenzbildes vermöge eines seitlich aufgestellten Fernrohrs ermöglicht. Natürlich geht dies nur in einer bestimmten Stellung des Apparates; während der Rotation ist eine okulare Beobachtung nicht möglich.

3. Montierung und Justierung des Apparates

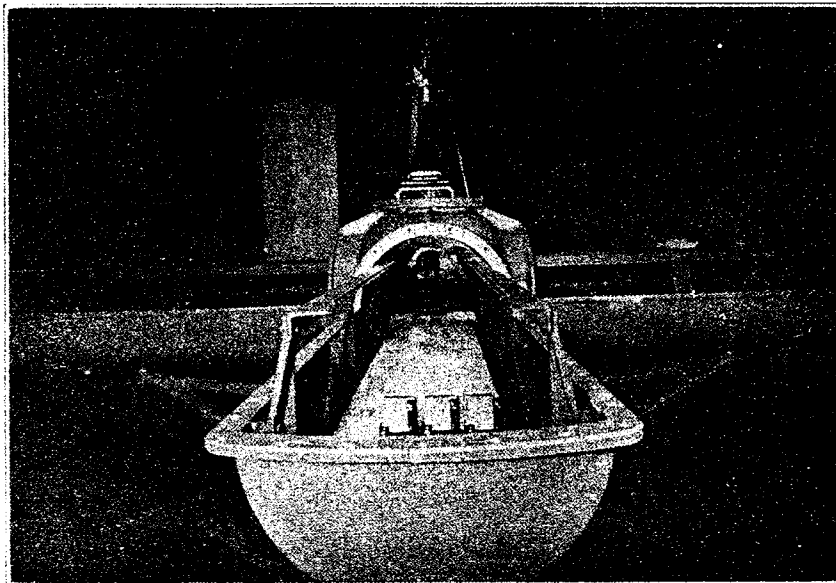
In einem Kellerraum des Zeisswerks wurde die Apparatur aufgebaut. Zunächst wurden die unteren Teile des Rotationsapparates zusammengesetzt und die unteren Hälften der Rohre mit den das Kreuz tragenden Rahmen angeschraubt. Dann wurde das Quarzkreuz selbst zunächst an einem Flaschenzug oberhalb des Apparates schwebend zusammengesetzt und schließlich in seine federnde Lagerung gesenkt, worauf die Befestigung der Spiegel erfolgte. Die rohe Ausgleiche der Lichtwege erfolgte mittels Präzisionsmaßstäben, die eine Länge der interferierenden Lichtstrahlen von 20,99 m ergaben.

Die gegenseitige Neigung der Spiegel wurde dadurch zunächst justiert, daß durch eine Lochblende am Ort der Teilungsplatte ein feines Bündel ausgeblendet wurde und dieses immer auf die jeweilige Spiegelmitte gelenkt wurde. Eine feinere Justierung wurde dann noch dadurch erreicht, daß das Beobachtungsfernrohr auf die Bilder einer vor die Teilungsplatte gehaltenen Nadel eingestellt wurde und diese zum Zusammenfallen gebracht wurden. Nach Aufsetzen der Deckel konnte man bereits im Fernrohr Interferenzen erkennen. Die genauere Abgleichung der Lichtwege erfolgte dann mittels der im nicht gefilterten Hg-Licht erscheinenden Farben. Eine auf Lichtwellenlänge genaue Gleichheit ist übrigens ja nicht erforderlich. Die letzte Einstellung erfolgte bei ganz geschlossenem Apparat mittels der elektromagnetischen Feinbewegung des einen Spiegels. Die Hauptschwierigkeit lag darin, die Streifen auf längere Zeit senkrecht zum Kameraspalt einzustellen, da natürlich nur dann durch die Bewegung der Platte ein auseinandergezogenes Bild der Interferenzstreifen mit etwaigen periodischen Verschiebungen zustande kommen kann. Es zeigte sich, daß es am besten war, dem die Kurven gleicher Dicke erzeugenden Keil eine wagrechte Kante zu geben, weil dann eine Änderung der Temperaturschichtung der eingeschlossenen Luft nur ein Wandern, nicht aber eine viel



Totalansicht des Interferometers

Fig. 6



Die Lagerung der Optik

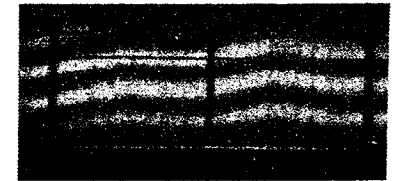
Fig. 7

störendere Drehung der Interferenzstreifen hervorrufen konnte. Mittels der am Fuß angebrachten Stellschraube und einer auf den Apparat aufgesetzten Libelle wurde dann die Drehachse auf 1" genau vertikal gestellt. Fig. 6 gibt den fertig montierten Apparat, Fig. 7 das durch Abnahme der oberen Rohrhälften sichtbar gemachte Quarzkreuz mit der Optik wieder.

4. Gang der Aufnahmen

Sowohl mit der ersten Ausführung, bei welcher die Lichtquelle außerhalb des Versuchsraums feststand, als mit der endgültigen, bei welcher die Lichtquelle mitrotierte, wurden zahlreiche Aufnahmen gemacht, um den Einfluß der Achsenstellung, der Temperatur und anderer Fehlerquellen zu studieren. Eine Andeutung von einer einem Ätherwindeffekt entsprechenden,

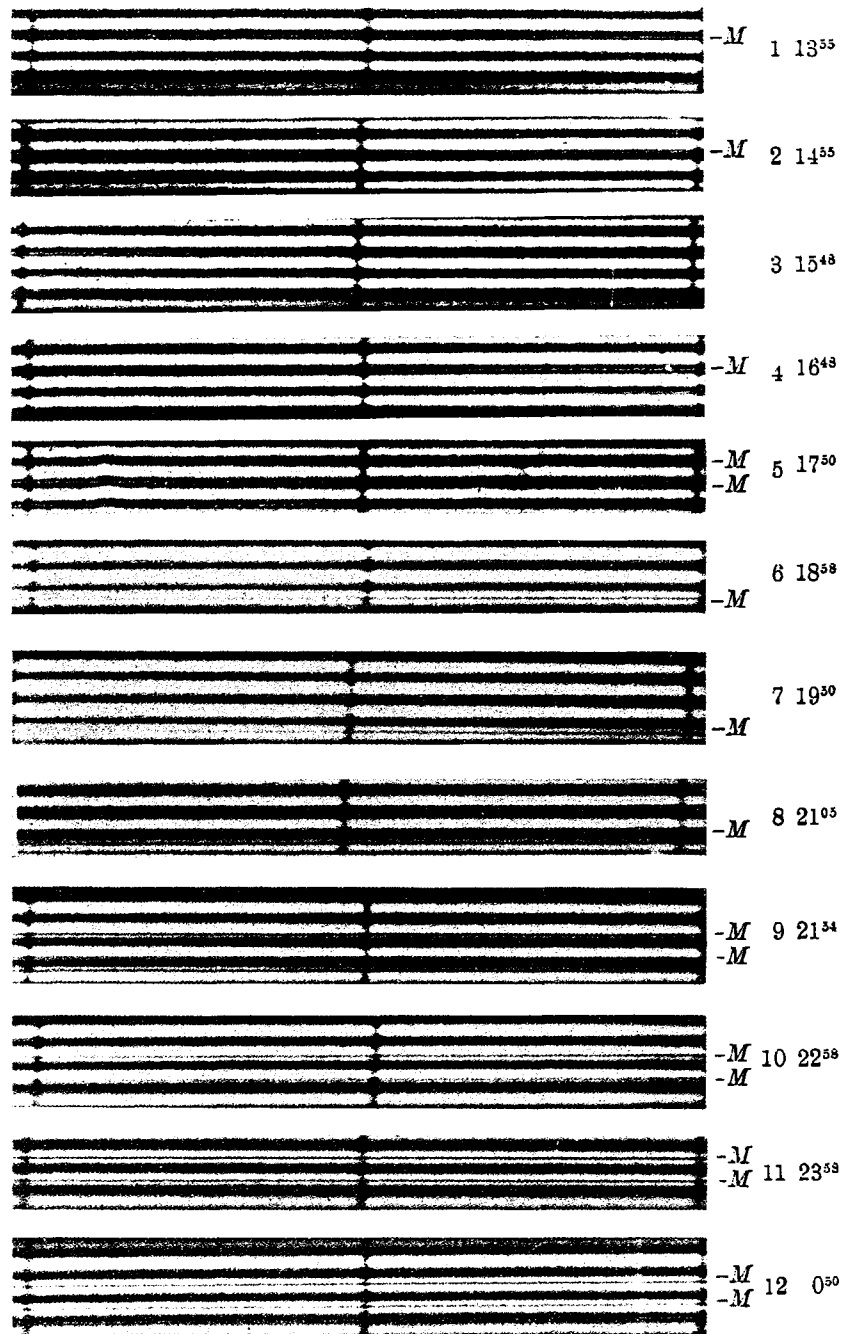
mit der halben Umdrehung periodischen Verschiebung konnte nur dann erhalten werden, wenn bei extremer Schiefstellung der Achse (Neigung von annähernd 1') das Kreuz durch Aufsitzen auf die Dämpfungsf lächen periodisch deformiert wurde. Dagegen kamen photometrisch nachweisbare, mit der vollen



Durch einseitige Heizung erzeugte Streifenverschiebung

Fig. 8

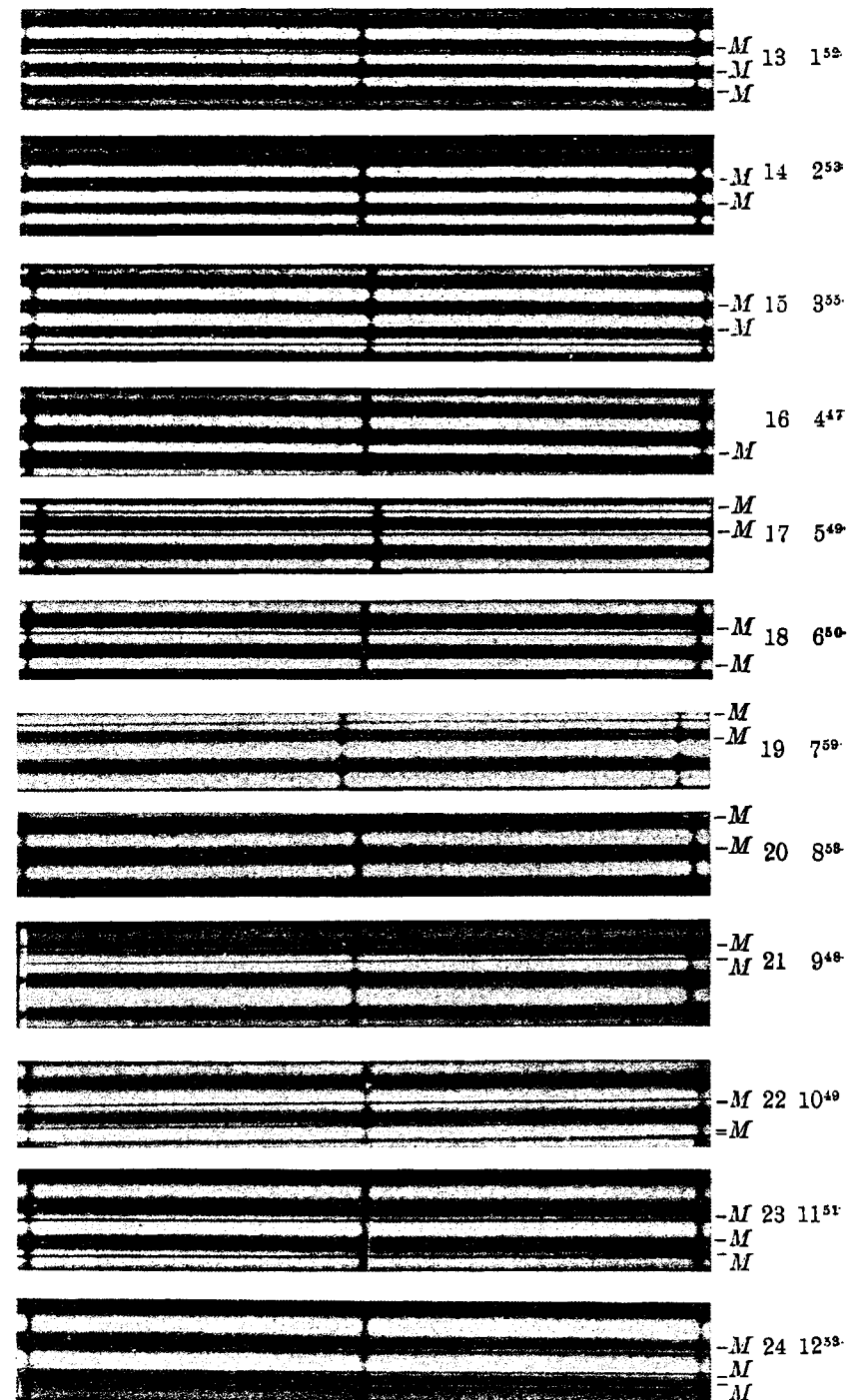
Umdrehung periodische Streifenverschiebungen schon bei verhältnismäßig kleinen räumlichen Temperaturunterschieden (bei einigen Zehntel Grad Differenz zwischen Innen- und Außenwand des Versuchsraums) vor. Zur Kontrolle, ob die Ursache wirklich in den lokalen Temperaturdifferenzen liegt, wurde die Innenseite durch einen elektrischen Ofen geheizt, wobei die in Fig. 8 wiedergegebenen Kurven resultierten. Nach Entfernung des Ofens und eingetretenem Temperatenausgleich wurden die Streifen wieder gerade. (Das zitterrige Aussehen der Streifen kommt daher, daß bei diesen Aufnahmen der Zeitersparnis wegen eine verhältnismäßig starke Dämpfung durch die Dämpfungsbürsten eingestellt war, wodurch zwar ein rasches Abklingen von groben Störungen, andererseits aber auch eine Übertragung von Erschütterungen bewirkt wurde.) Offenbar



Registrierungen am 10. 5. 30

Fig. 9a

(Da die Marken das eine der interferierenden Bündel auslöschten, erscheinen sie dunkel an den Stellen größter Helligkeit und hell an den Stellen geringster Helligkeit.)



Registrierungen am 11. 5. 30

Fig. 9b

spricht der Spiegel, der mit der elektromagnetischen Feineinstellung versehen ist, besonders leicht auf Temperaturänderung an.

Nachdem durch derartige Kontrollversuche eine gewisse Beherrschung der Störungen erreicht war, wurde an die endgültigen Aufnahmen herangegangen. Da bei genauer Ausmessung der Registrierungen schließlich doch ein wenn auch sehr kleiner Verschiebungseffekt zu erwarten ist — die Null ist ja für den Physiker ein ebenso asymptotischer Punkt wie das Unendliche für den Mathematiker — wurde von vornherein darauf ausgegangen, Serien von Aufnahmen zu erhalten, die sich über 24 Stunden erstrecken, damit aus dem Gang der Schwankungen ein Urteil gewonnen werden kann, ob es sich um einen wirklichen Ätherwindeffekt handelt oder um zufällige Streuungen. Bei den ersten derartigen Serien, bei denen ununterbrochen Aufnahmen gemacht wurden, kamen insbesondere am Anfang jeder Platte noch sehr viel kleine Erschütterungsstörungen vor. Die Ursache lag darin, daß bei dem nach zwei Umdrehungen des Apparates erforderlichen Plattenwechsel Erschütterungen auftraten, die zu Beginn der Aufnahme noch nicht ganz abgeklungen waren. (Der Plattenwechsel ist an sich etwas schwierig, so daß kleine Erschütterungen unvermeidbar sind. Es muß sich der Beobachter unter den Apparat auf den Rücken legen und während der Rotation im Dunkeln die Kassette in die Kamera einschieben. Der Plattentransport wird dann elektrisch eingeschaltet.) Bei den zur Auswertung gelangten Aufnahmen vom 10. Mai 1930 wurden nun diese Erschütterungen dadurch vermieden, daß bei einer Umdrehungsdauer von 10 Minuten in einer Stunde nur 2 Registrierungen auf eine Platte gemacht wurden. Nach dem Plattenwechsel wurde eine halbe Stunde gewartet und der Plattentransport von dem außerhalb des Versuchsraums befindlichen Beobachter elektrisch eingeschaltet. Die Rotation des Apparates wurde selbstverständlich nicht unterbrochen. Er lief vielmehr zum Temperatenausgleich zu Beginn der Aufnahmen bereits zwei Tage lang leer. Die äußeren Erschütterungen waren dadurch reduziert, daß der Aufnahmetag auf die Zeit von Sonnabendmittag bis Sonntagmittag, also auf die Zeit der Werkrube, gelegt wurde. Die Temperaturverhältnisse waren ebenfalls die best erreichbaren. Die Differenz zwischen Innen- und Außen-

wand war zu Beginn der Versuche weniger als $\frac{1}{10}^{\circ}$. Auch der Absolutwert der Temperatur, auf den es allerdings nicht so sehr ankommt, blieb auf wenige Zehntel Grad konstant (Mittel $15,5^{\circ}$ C.) Erst im Laufe der Nacht traten Differenzen von mehreren Zehntel Grad auf, infolge Abkühlung der Außenwand und Erwärmung des Raums durch die Lichtquelle. Sie sind die Ursache für das allmähliche Breiterwerden der Streifen. In Fig. 9 sind Kopien der Originalplatten wiedergegeben. Die erste Aufnahme zeigt noch eine gewisse Unruhe der Streifen, da die vom Einschalten entstandenen Störungen noch nicht ganz ausgeglichen waren. Auf der 5. Aufnahme ist eine grobe Störung enthalten, die durch das Zuschlagen einer Türe im Werk verursacht war. Überhaupt spricht der Apparat auf akustische Störungen verhältnismäßig stark an: Klatscht man im Versuchsraum mit den Händen, so erhält man einen deutlichen Zacken in den Registrierkurven. Da außerdem diese Platte 5 einige Stellen mit Reibschleier aufweist, wurde sie von der Auswertung ausgeschlossen.

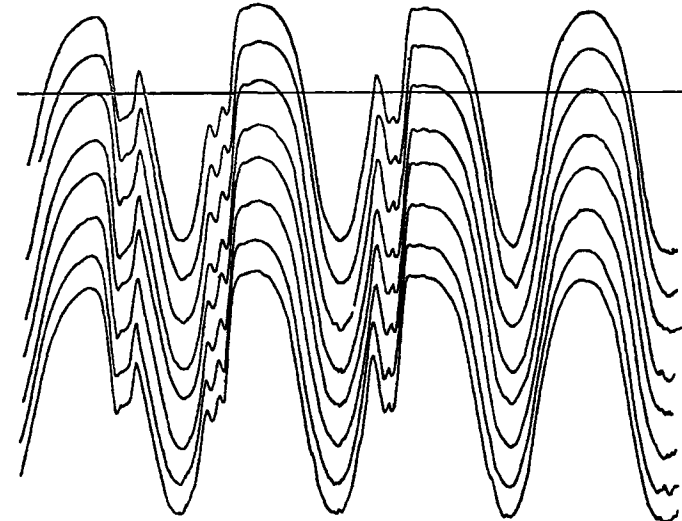
5. Auswertung der Platten

Mit dem Auge ist auf keiner der Aufnahmen eine Spur von einer periodischen Verschiebung zu erkennen. Um aber die Grenze für einen noch möglichen Effekt angeben zu können, wurde ein ziemlich umständliches Auswerteverfahren angewandt: Die Strecke, die einer Umdrehung entspricht und die bei den endgültigen Aufnahmen 4 cm lang gemacht wurde, wurde in acht gleiche Teile geteilt und jeder dieser Teile mit einem Zeisschen registrierenden Mikrophotometer nach G. Hansen senkrecht zu der Transportrichtung photometriert. Da während 24 Stunden 48 Umdrehungen des Apparates zur Aufnahme gelangten, bedeutet dies für eine Aufnahmeserie 384 Registrierungen. Bei den bisherigen Konstruktionen der Registrierphotometer wird der Schatten des Elektrometerfadens zur Abbildung gebracht und dadurch bei einmaligem Durchlaufen die ganze Registrierplatte bis auf die Kurve, die das Schattenbild beschreibt, belichtet. Es ist also in unserem Fall ein ungeheurer Plattenverbrauch nicht zu vermeiden. In der neuesten Konstruktion des Zeisschen Photometers kann aber

auch mit Dunkelfeldbeleuchtung des Elektrometerfadens gearbeitet werden. Durch eine kleine Verstellung der Optik können damit mehrere Registrierungen auf dieselbe Platte gemacht werden. Fig. 10 gibt die Registrierung der ersten Hälfte von Platte 9 wieder: Alle zu einer Umdrehung gehörenden 8 Registrierkurven finden auf einer Platte Platz. Man sieht die sinusartigen Schwärzungskurven mit den Zacken der drei Nullmarken. Maßgebend ist der Abstand der Maxima und Minima von den Nullmarken, nicht etwa, wie man beim Anblick der Figur denken könnte, von einer Senkrechten. Es konnte nämlich bei dem Weiterrücken der zu registrierenden Platte nicht *exakt* an derselben Stelle mit Photometrieren begonnen werden, so daß das annähernd senkrechte Untereinanderliegen der korrespondierenden Stellen weiter nichts zu bedeuten hat, als daß dadurch eine übersichtliche Trennung der einzelnen Kurven erreicht ist.

Die so erhaltenen Registrierplatten wurden zunächst durch eine Hilfskraft, für deren Bewilligung ich der Notgemeinschaft Deutscher Wissenschaft bestens danken möchte, ausgemessen. Die Serie vom 10. Mai 1930, die so gut wie keine Störungen enthält, wurde vom Verf. nochmals aufs genaueste nachgemessen, wobei die Differenzen zwischen beiden Messungen maximal $\frac{5}{1000}$ Streifenbreiten ergaben (die vorherigen Aufnahmen enthielten aus Gründen, die oben ausführlich erörtert sind, zu viel Erschütterungsstörungen, als daß sie diesen Aufnahmen gleichwertig erachtet werden konnten). Die Ausmessung erfolgte in der Weise, daß die Platten auf Millimeterpapier gelegt und im durchscheinenden Licht betrachtet wurden. Die durch Ausschaltung der Beleuchtung des Photometers erzeugte wagrechte Gerade in Fig. 10 diente dabei als Anlegegerade. Es wurde nun für jedes Extremum die Lage dadurch bestimmt, daß etwa 3 mm oberhalb bzw. unterhalb des Extremums an zwei bis drei Stellen die Schnittpunkte der Kurven mit horizontalen Geraden auf Zehntel Millimeter genau abgelesen wurden und das Mittel aus diesen beiden Ablesungen genommen wurde. Natürlich konnten nur solche Extrema zur Messung herangezogen werden, bei denen der symmetrische Verlauf nicht durch eine in der Nähe liegende Markenzacke gestört ist. In der Mehrzahl aller Platten konnten aber drei bis vier Extrema

zur Messung verwertet werden. In gleicher Weise wurde die genaue Lage der Nullmarken ermittelt. Zuletzt wurde für jede Registrierung die Differenz des Mittelwerts der Extrema und des Mittelwerts der Marken in Tausendstel Streifen gemessen. Bei den Aufnahmen 1—10 ergeben sich ganz unregelmäßige Schwankungen um den Mittelwert herum. Etwa von der 11. Aufnahme an ist ein deutlicher kontinuierlicher Gang von etwa $\frac{1}{100}$ Streifen pro Umdrehung zu erkennen, der durch die Verschlechterung der Temperaturverhältnisse bedingt ist. Dieser

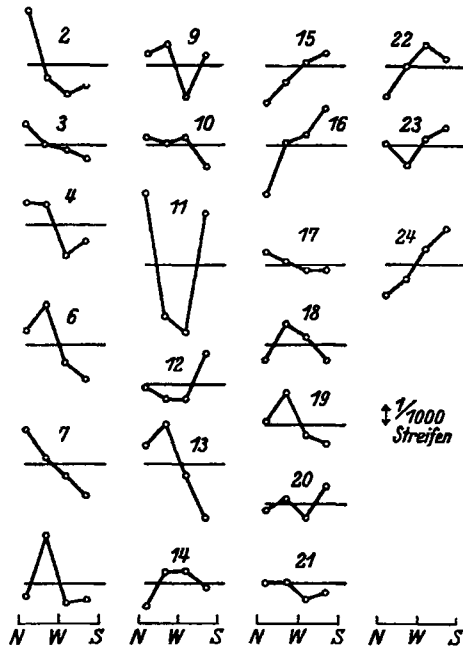


Registrierkurven der Interferenzstreifen von Platte 9

Fig. 10

Gang läßt sich aber verhältnismäßig leicht korrigieren: Es wurde die Differenz zwischen zwei aufeinanderfolgenden gleichen Stellungen des Apparates ermittelt und der achte Teil dieser Differenz jedesmal von Registrierkurve zu Registrierkurve zugefügt. Eine Beeinflussung des periodischen Anteils der Streifenverschiebung erfolgt natürlich durch diese Gangkorrektur nicht. Auch Andeutungen von einer vollperiodischen Streifenverschiebung waren bei diesen späteren Aufnahmen zu erkennen. Ihre Elimination erfolgt dadurch, daß das Mittel aus dem 1. und 5., dem 2. und 6., dem 3. und 7., dem 4. und 8. Teilstück genommen wird, wodurch die dem Ätherwindeneffekt entsprechenden

halbperiodischen Verschiebungen wiederum unbeeinflusst bleiben. Zudem wurde noch das Mittel aus den beiden Umdrehungen, die auf einer Platte enthalten sind, genommen. Nur bei der Aufnahme 1 mußte die erste Umdrehung wegen der unregelmäßigen Störungen ausgelassen werden. Ebenso fällt die Aufnahme 5 ganz aus (vgl. oben). Das Schlußergebnis zeigt Fig. 11.



Streifenverschiebungen bei der Drehung des Apparates. (Die angeschriebenen Himmelsrichtungen beziehen sich auf die Richtung des hervorgehobenen Armes)

Fig. 11

„Ätherwinds“ zu ermitteln. Dieses Verfahren hat aber aus folgendem Grund nicht viel Sinn: Ist durch mangelhafte Gangkorrektur eine monotone Komponente der Verschiebung vorhanden, so trägt auch diese, die doch sicher nichts mit dem Ätherwind zu tun hat, zur Grundschwingung bei, weil die Fourieranalyse eine periodische Wiederholung dieses Gangs und nicht eine gleichmäßige Fortsetzung zur Voraussetzung hat. Das bedeutet, daß man je nach der mehr

Nehmen wir diese Kurven als echte Ätherwindeffekte, so bedeutet die Abweichung Null, daß der den elektromagnetisch bewegten Spiegel tragende Arm unter 45° bzw. 135° zur Richtung der Horizontalkomponente des Ätherwindes steht. Ein Maximum bedeutet, daß dieser Arm in dieser Richtung, ein Minimum, daß er senkrecht dazu steht. (Das Vorzeichen ist natürlich wegen der quadratischen Natur des Effekts nicht zu entscheiden.)

Man könnte nun daran denken, durch Fourieranalyse die Grundschwingung dieser Kurven und damit Amplitude und Richtung des

oder weniger glücklichen Korrektur des Gangs jeden Wert für die Amplitude und Phase der Grundschwingung erhalten kann. Es ist daher zweckmäßiger, durch eingehende Betrachtung der Kurven sich ein Urteil über die Realität und die untere Grenze eines möglichen Ätherwindeffekts zu bilden. Zunächst erklärt sich die große Amplitude der Aufnahme 11 dadurch, daß die Nullmarken hier so ungünstig lagen, daß kein Maximum der Schwärzung zur Messung benützt werden konnte, während die fast glasklaren Minima durch einen leichten Kalkschleier der Platte ziemlich zitterige Registrierkurven ergaben. Welcher Gang ist nun bei einem wirklichen Ätherwindeffekt zu erwarten? Da der Punkt der Himmelskugel, von welchem der Ätherwind herkommt, im Laufe eines Tages gleich einem Stern auf- und untergeht, der Michelsonversuch aber nur die horizontale Komponente des Ätherwinds mißt, sind folgende Fälle denkbar: a) der Ätherwind kommt aus Polnähe. In diesem Fall bleibt Richtung und Größe konstant, die Kurven müßten also alle gleich ausfallen und ihre Maximalausschläge in der Meridianstellung aufweisen; b) der Ätherwindpunkt liegt in der Nähe des Himmelsäquators, dann würde sich eine periodische Änderung der Amplitude und der Richtung ergeben, wobei die Richtung alle Winkel zwischen 0 und 360° durchläuft und ein Minimum der Stärke in der Kulmination bzw. Antikulmination auftreten müßte. Es müßten also auf den Aufnahmen, bei denen die maximalen Abweichungen bei der Meridianstellung des hervorgehobenen Arms auftreten, die Kurven selbst am flachsten verlaufen. Dies gilt auch für den dazwischenliegenden Fall, daß der Ätherwindpunkt eine mittlere Deklination hat, wobei das Azimut der Richtung zwischen zwei Grenzen hin und herpendelt. Man kann mit dem besten Willen nicht die in Fig. 11 wiedergegebenen Kurven unter einen dieser Fälle einordnen. Die periodischen Anteile müssen also wesentlich kleiner sein, als die hier gefundenen Schwankungen. Nach dem Maßstab der Figur wäre aber ein periodischer Anteil von $\frac{1}{1000}$ Streifen noch gut wahrnehmbar gewesen. Wir können also mit gutem Gewissen die obere Grenze für einen wirklichen, auf Grund dieser Versuche noch möglichen Ätherwindeffekt mit $\frac{1}{1000}$ Streifen angeben. Damit dürften die Angaben von Miller, nach welchen auch im Tiefland bei einem 1,5mal so großen

Lichtweg Verschiebungen bis zu $\frac{1}{10}$ Streifenbreite beobachtet wurden, auf störende Einflüsse zurückgeführt sein. Zum Vergleich, welche Genauigkeitsforderungen man stellt, wenn man $\frac{1}{1000}$ Streifen als obere Grenze setzt, sei folgendes angeführt: Bei einem Lichtweg von 21 m und einer Wellenlänge von 5461 Å.-E. bedeutet eine Änderung von $\frac{1}{1000} \lambda$ eine relative Änderung von $2,6 \cdot 10^{-11}$. Setzen wir die Entfernung Erde—Mond mit rund $3,6 \cdot 10^{10}$ cm in Rechnung, so entspricht diese relative Genauigkeit der Forderung, daß eine Änderung dieser Entfernung um 1 cm noch nachweisbar sein soll. Damit ist auch ein von Strömberg¹⁾ berechneter Effekt von $\frac{17}{1000}$ Streifenbreiten Verschiebung für 16 m Lichtweg, den Michelson erwähnt, als sicher nicht vorhanden erwiesen.

Weniger in die Augen springend ist der Fortschritt an Genauigkeit, wenn man aus der Streifenverschiebung gegen die *Mittellage* nach der bekannten Formel

$$(1) \quad \Delta Z = \frac{l}{\lambda} \left(\frac{v}{c} \right)^2$$

die Grenze der Geschwindigkeit v des Ätherwinds berechnet. Wegen des quadratischen Eingehens von v bedingt $\frac{1}{1000}$ Streifen Genauigkeit als obere Grenze für v den Betrag 1,5 km/sec.

Einen Vergleich mit einem „erwarteten Effekt“ zu ziehen, ist ziemlich müßig, da man heute weiß, daß der Hauptanteil der Erdbewegung durch die gemeinsame Geschwindigkeit des Milchstraßensystems (Größenordnung 300 km/sec) gegeben ist, die jedoch nach Richtung und Betrag noch reichlich unsicher ist. Der volle Effekt dieser Bewegung würde eine Verschiebung um rund 38 Streifen verursachen, wie man durch Einsetzen in (1) sofort sieht.

Es war nun ursprünglich geplant, den Apparat auf das Jungfraujoch zu schaffen. Herr Direktor Lichti von der Jungfraubahngesellschaft unterstützte die Vorbereitungen aufs wärmste, wofür ihm der Dank ausgesprochen sei. Inzwischen hat sich aber durch den Widerruf der ursprünglich angegebenen Höhenabhängigkeit des Effekts durch D. C. Miller die Situation

1) Erwähnt in der oben zitierten Arbeit von Michelson, Pease und Pearson. Näheres konnte darüber nicht in Erfahrung gebracht werden.

wesentlich verändert und man kann mit Recht fragen, ob angesichts dieser Änderung, ferner angesichts des völlig negativen Ausfalls aller in der Höhe unternommenen Wiederholungen des Trouton-Noble-Versuchs¹⁾ und angesichts der finanziellen Notlage der deutschen Wissenschaft die Kosten einer derartigen Expedition noch zu rechtfertigen wären.

Zusammenfassung

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.

Zum Schluß möchte ich dem Vorstand des Physikalischen Instituts der Universität Jena, Herrn Geh. Rat M. Wien noch besonders dafür danken, daß er für die zahlreichen Hilfsarbeiten (Untersuchung der Materialien, Photometrierung der Platten usw.) die Institutsmittel unbeschränkt zur Verfügung stellte.

1) R. Tomaschek, Ann. d. Phys. 78. S. 743. 1925; 80. S. 509. 1926; 84. S. 161. 1927. C. T. Chase, Phys. Rev. 30. S. 516. 1927.

Jena, September 1930.

(Eingegangen 27. September 1930.)