HEINRICH-HERTZ-INSTITUT FÜR SCHWINGUNGSFORSCHUNG
BERLIN-CHARLOTTENBURG

Technischer Bericht Nr. 24

Ein optisch-photoelektronisches Verfahren zur Messung mechanischer Schwingungen

Dipl.-Ing. R. HARTWIG

1 9 5 9

Technischer Bericht Nr. 24

Ein optisch-photoelektronisches Verfahren zur Messung mechanischer Schwingungen

Zusammenfassung

Basierend auf dem Verfahren der Autokollimationsmessung wird ein neuartiges Verfahren der Schwingungsmessung beschrieben, welches es gestattet, kleine Schwingungen bis zu 0,000 1 oder 0,000 05 mm Amplitude zu messen. Als Geber wird ein kleines Spiegelsystem verwendet, welches an dem zu untersuchenden Gegenstand befestigt wird. Das Gewicht des Gebers kann sehr klein gehalten werden (20 g bis ca. 5 g wenn erforderlich). Es ist keinerlei Zuführung (Kabel o. ä.) zu dem Geber nötig. Die Aufnahme der Werte erfolgt über ein Fernrohr, welches gleichzeitig wie eine Lampe den Geber bestrahlt. Die Empfindlichkeit des Verfahrens ist durch die Wahl der Optik noch weiter zu steigern.

Es ist auf diese Weise möglich, Messungen der A m p l i t u d e , der F r e q u e n z und der S c h w i n g u n g s f o r m vorzunehmen und zu registrieren. Besonders vorteilhaft ist an diesem Verfahren, dass kleinste Schwingungen gemessen werden können, unabhängig davon, dass das Messfernrohr durch Raumunruhe erschüttert wird.

Das Verfahren ist zum Patent angemeldet.

Heinrich-Hertz-Institut für Schwingungsforschung

Der Bearbeiter

gez: R. Hartwig

(Dipl.-Ing. R. Hartwig)

Der Abteilungsleiter

gez: P. Matthieu

(Prof. Dr. phil. P. Matthieu)

Der Institutsdirektor

gez: Gundlach

(Prof. Dr.-Ing. F.W. Gundlach)

Berlin-Charlottenburg, den 11. März 1959

Inhaltsverzeichnis

A. Einleitung

B. Das verwendete Grundprinzip

C. Der Geber
   1. Die bisher übliche Einspiegelmethode
   2. Die Zweispiegelmethode
   3. Die Dreispiegelmethode
   4. Die Anwendung auf dynamische Messungen

D. Der Aufnehmer

E. Die praktische Ausführung

A. Einleitung

Es sollen Möglichkeiten beschrieben werden, mechanische Schwingungen kombiniert optisch-photoelektronisch zu messen und zu registrieren. Ein wesentlicher Vorteil, den diese Art der Schwingungsmessung bietet, ist die drahtlose Uebertragung der zu messenden Grössen von dem Geber zu dem Empfänger. Es fällt das Kabel weg, das bei den elektrischen Messungen von dem Aufnehmer zu dem eigentlichen Messgerät führt. Die Verbindung zwischen Geber und Messgerät wird hier nur durch Lichtstrahlen hergestellt. Um nun aber diese Lichtstrahl-Verbindung möglichst universell zu gestalten und die Messung bequem durchführen zu können, müssen optische Anordnungen verwendet werden, die einfach zu handhaben sind und andererseits trotz ihrer Einfachheit Uebertragungsfehler möglichst ausschliessen. Diesen Forderungen entsprechend zeigen sich besondere Spiegelsysteme als Geber in Verbindung mit Autokollimationseinrichtungen als Empfänger besonders geeignet.

B. Das verwendete Grundprinzip

Die verschiedenen Möglichkeiten basieren auf der Autokollimationsanordnung. Eim optisches - als Punkt dargestelltes - Bild (Skala, Lichtmarke) befindet sich in der Brennebene der Objektivlinse L. Abb. 1. Die von dem Bild B auf die

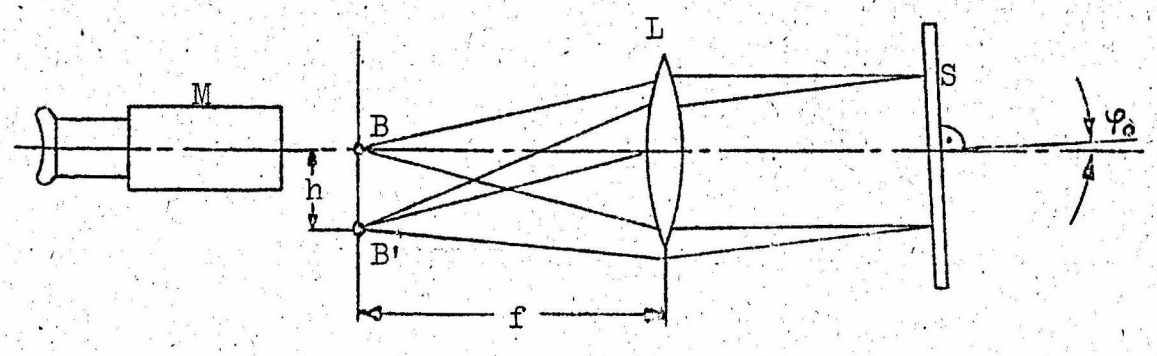


Abb. 1

Linse L fallenden Strahlen treffen als parallele Lichtbündel auf den Spiegel S und werden von dort wieder durch L zurückgeworfen. In der Bildebene entsteht das Bild B' in gleicher Grösse wie das Bild B. Der Abstand h der Bilder B und B' voneinander ergibt sich nach der folgenden Beziehung

$$h = f \operatorname{tg} 2\varphi_0 \qquad (1)$$

wobei φ_0 der Winkel zwischen der Spiegelnormalen und der optischen Achse ist und f die Brennweite der Objektivlinse L bedeutet. Die Grösse h ist also ein Mass für die Verdrehung des Spiegels S gegenüber der Fernrohrachse. Sie kann mit Hilfe eines Messmikroskopes M sehr genau abgelesen werden. Die Verschiebung h ist ausser von der Konstanten f nur von der Verdrehung des Spiegels abhängig. Die Entfernung des Spiegels von der Linse L ist auf h ohne Einfluss. Die Empfindlichkeit einer solchen Messanordnung hängt nur von der Objektivbrennweite f ab.

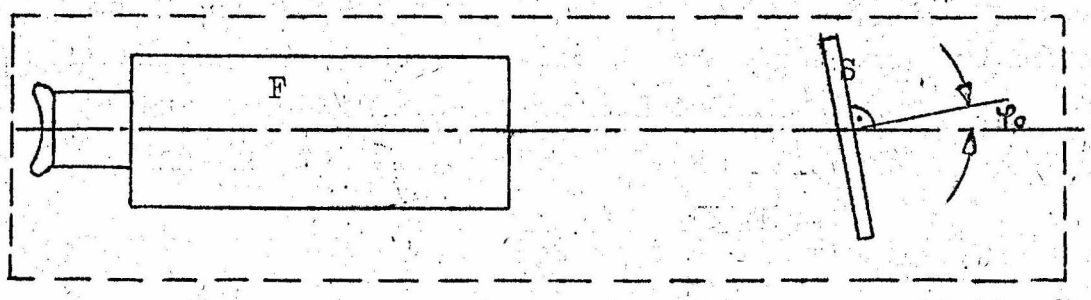
Dieses Messprinzip ist in der hier beschriebenen Weise als Autokollimationsfernrohr bekannt und wird für die statische Messung kleinster Winkel benutzt. Es bildet die Grundlage für die im folgenden beschriebenen Einrichtungen.

C. Der Geber

Die gesamte Messanordnung besteht aus dem Geber (Spiegelsystem) und dem Fernrohr. Als Fernrohr wird die zu einer Einheit zusammengefasste Anordnung von Messmikroskop M, Lichtquelle (zur Beleuchtung der Lichtmarke B), Objektivlinse L (siehe Abb. 1) und dem später beschriebenen photoelektronischen Aufnehmer bezeichnet.

C1. Die bisher übliche Einspiegelmethode

In der bisher üblichen Autokollimations-Winkelmessung entsprechend Abb. 1 wird der Winkel φ_0 gemessen, der durch Spiegelnormale und Fernrohrachse gebildet wird. Abb. 2 . Es handelt sich also um eine Relativmessung (Verdrehung des



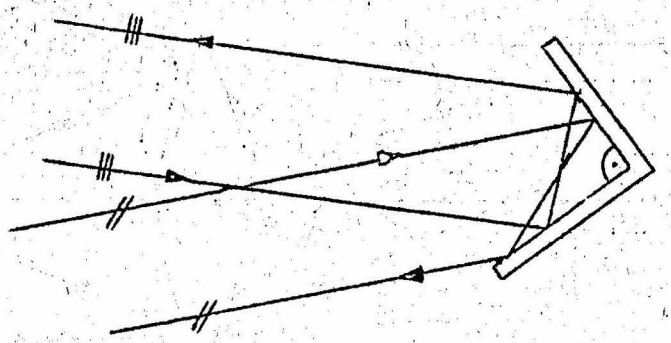
Begrenzung des Messystems
Abb. 2

Spiegels relativ zur Fernrohrachse). Das Messystem umfasst hierbei also Spiegel und Fernrohr. Das bedeutet, dass unbeabsichtigte Verdrehungen des Fernrohres (Erschütterungen), die um senkrecht zur Fernrohrachse liegende Achsen erfolgen, Anzeigen hervorrufen, die fälschlicherweise als Spiegeldrehungen gedeutet werden könnten. Diese Fehlerquelle soll ausgeschaltet werden, weil bei praktischen Messungen an Maschinen Erschütterungen des Fernrohres nicht zu vermeiden sind und die dadurch entstehenden Fehler weit grösser sind als die Messwerte der Schwingungen, die gemessen werden sollen.

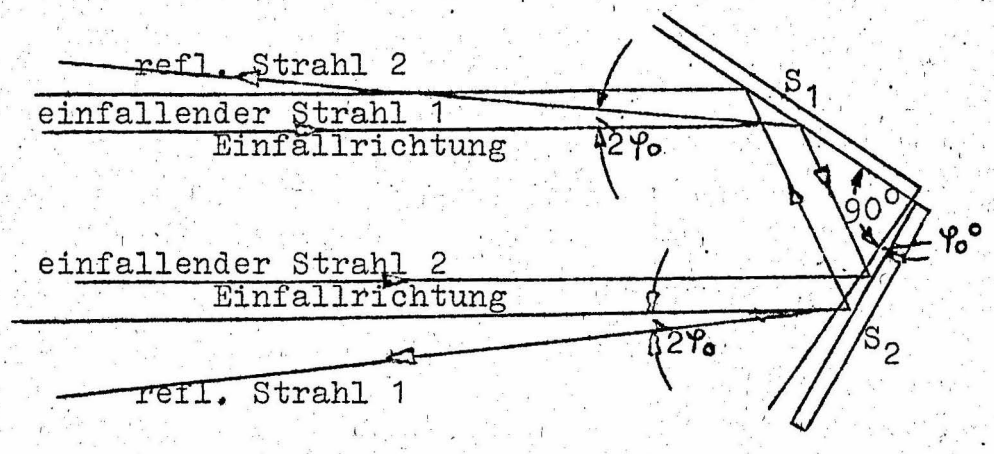
C 2. Die Zweispiegelmethode

Für ebene Probleme (bei denen Verdrehungen nur um solche Achsen zugelassen sind, die senkrecht zur Papierebene liegen) führt die Anwendung eines Doppelspiegelsystems zur Ausschaltung des unter C 1 genannten Fehlers.

Ein Doppelspiegelsystem, bestehend aus zwei Spiegeln S_1 und S_2 (Abb. 3), die rechtwinklig zueinander stehen, wirft jeden Lichtstrahl nach zweimaliger Reflektion in genau die Richtung zurück, aus der er in das Spiegelsystem gelangt ist. Bilden die Spiegel dagegen einen Winkel, der vom 90° abweicht ($90^o + \varphi_o$), so werden die Strahlen in Richtung zurückgeworfen, die um $2\varphi_o$ von der Richtung abweichen, aus der sie eingetroffen sind. (Abb.4). Die Seite, nach der der reflektierte Strahl (um $2\varphi_o$) von der Einfallrichtung abweicht,

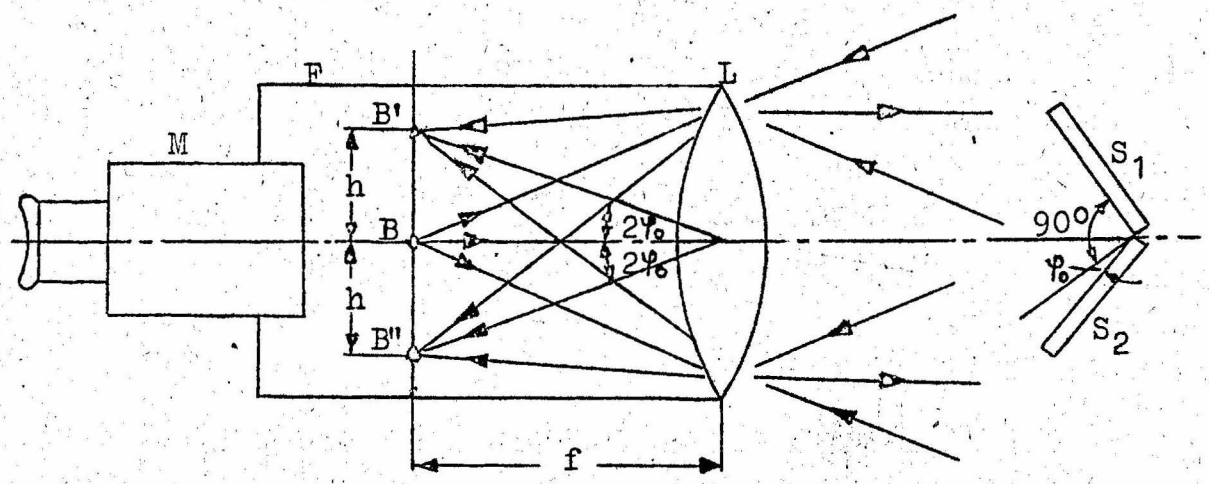


Reflektion zweier Strahlen in einem Doppelspiegel.
Winkel zwischen den Spiegeln 90°.
Abb. 3



Reflektion zweier Strahlen in einem Doppelspiegel.
Winkel zwischen den Spiegeln $90^\circ + \varphi_0$.
Abb. 4

hängt davon ab, ob der Strahl zuerst auf den Spiegel S_1 oder zuerst auf den Spiegel S_2 trifft. Dementsprechend entstehen bei der Verwendung eines Autokollimationssystems in Verbindung mit einem Doppelspiegelsystem zwei Bilder B' und B" (Abb. 5) gegenüber nur einem Bild B' bei Verwendung nur eines Spiegels (vergl. Abb. 1). Die Bilder B' und B" sind entgegengesetzt gleich weit von B entfernt. Ihre Entfernung von B ist h nach (1) genau wie bei der Verwendung eines Einzelspiegels.



Autokollimationsanordnung mit Doppspiegelsystem
Abb. 5

Durch diese Anordnung ist es möglich, den Verdrehwinkel φ_0 der beiden Spiegel gegeneinander absolut zu messen, ohne dass die Richtung der optischen Achse des Autokollimationssystems in Bezug auf das Spiegelsystem einen Einfluss hat. Wenn $\varphi_0 = 0$ ist, werden unabhängig von der Stellung des Fernrohres die Bilder B' und B'' gemeinsam in B abgebildet.

Das Fernrohr darf also in der Ebene beliebig bewegt (verdreht und verschoben) werden, ohne dass sich die dem Winkel φ_0 entsprechende Grösse h ändert. (Abb. 6). Man erkennt den Vorteil

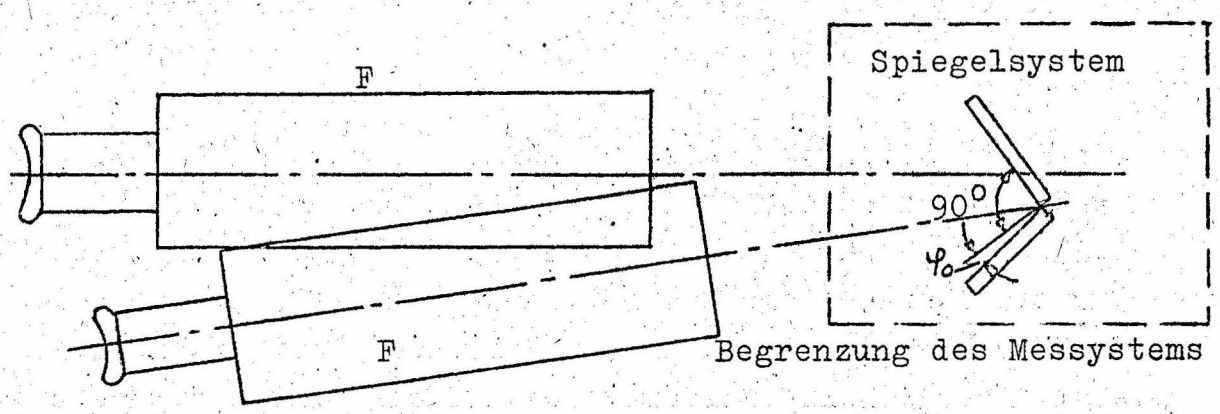


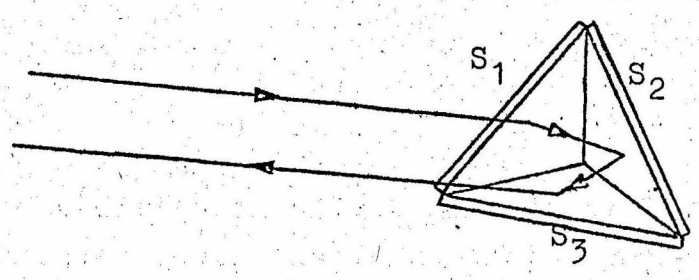
Abb. 6

gegenüber der Einspiegelmessung, der darin liegt, dass die Ablesegrösse h hierbei wie an der Ableseskala im Messmikroskop angeheftet erscheint, unabhängig davon, welche Eigenbewegungen (Erschütterungen) das Fernrohr gegenüber dem Spiegelsystem vollführt. Im Gegensatz zur Einspiegelmethode besteht jetzt das Messystem nur noch aus dem Spiegelsystem und schließt nicht mehr das Fernrohr mit ein. (Vergl. Abb. 2).

C 3. Die Dreispiegelmethode

Es wird jetzt ein Spiegelsystem beschrieben, das nicht nur beliebige Stellung in der Ebene, sondern auch beliebige Fernrohrstellung im Raume zulässt.

Ein Tripelspiegel (eine räumliche Spiegelecke) (Abb. 7) wirft jeden aus beliebiger Richtung einfallenden Strahl nach dreimaliger Reflektion genau in die Richtung zurück, aus der er eingefallen ist.



Reflektion eines Strahles in einem Tripelspiegel
Abb. 7

Würde man also einen Tripelspiegel vor ein Autokollimationsfernrohr halten, so würde die Abbildung B' des Bildes B immer in B selbst erfolgen, unabhängig davon, wie das Fernrohr gestellt oder bewegt wird.

Wenn jetzt aber einer der Spiegel, z.B. S_3 in Abb. 7 eine kleine Verdrehung ausführt, so dass die Winkel zwischen den Spiegeln nicht mehr genau 90° sind, entstehen in der Brennebene mehrere Bilder symmetrisch um B angeordnet. Jedes Bild für sich ist eine naturgrosse Abbildung von B. Die Anzahl der Bilder ist im allgemeinen sechs. Dadurch, dass zwei der

drei Spiegel des Spiegelsystems einen Winkel von 90° miteinander bilden, fallen zwei mal zwei der sechs Bilder jederzeit aufeinander und es reduziert sich die Zahl der entstehenden Bilder damit auf vier. Man muss also den oben geschilderten Fall der Spiegelecke als Sonderfall ansehen, für den alle sechs Bilder aufeinander fallen und genau in B abgebildet werden.

Diese Gesetzmässigkeiten gelten unabhängig von der Stellung des Fernrohres zu dem Spiegelsystem.

C 4. Anwendung auf dynamische Messungen

Bisher sind Autokollimationseinrichtungen, wie schon erwähnt, nur für statische Messungen kleinster Verdrehungen verwendet worden. In dem Falle wird eine Skala als Bild B verwendet und man kann direkt die Skalenteilstriche ablesen, um die die Spiegelverdrehung die Abbildung der Skala bezüglich einer festen Marke im Messmikroskop bewegt hat. Für dynamische Untersuchungen ist dieses Verfahren natürlich nicht verwendbar, weil eine schnelle Hin-und Herbewegung der Skala keine Ablesung zulässt.

Für dynamische Messungen ist daher eine Anordnung zu verwenden, bei der eine Lichtmarke sich bewegt, während die Skala im Messmikroskop ruht.

Das als Geber verwendete Spiegelsystem wird so gebaut, dass die zu messenden Schwingungen Verdrehungen eines Spiegels (oder auch mehrerer) des Systems hervorruft, die (für kleine Amplituden) proportional der zu messenden Schwingungs-Amplitude sind. Diese Verdrehwinkel φ überlagern sich dem bisher betrachteten konstanten Winkel φ_0. Die Wirkung des Verdrehwinkels φ ist die, dass die Abbildungen in der Bildebene um ihre Ruhelage hin und her bewegt werden. Mit dem Messmikroskop wird die Grösse der Schwingung einer der Abbildungen um ihre Ruhelage dadurch gemessen, dass man die Breite des entstehenden Lichtbandes abliest. Diese ist dann ein Mass für die Amplitude der zu messenden Schwingung.

D. Der Aufnehmer

Die bisher beschriebene Anordnung von Geber (Spiegelsystem) und Fernrohr bewirkt, dass das Bild einer Lichtmarke (unabhängig von der Stellung des Fernrohres zum Geber) in der Bildebene des Fernrohres dargestellt wird, und dass sich dieses Bild proportional der Amplitude und mit gleicher Frequenz der zu messenden Schwingung hin und her bewegt.

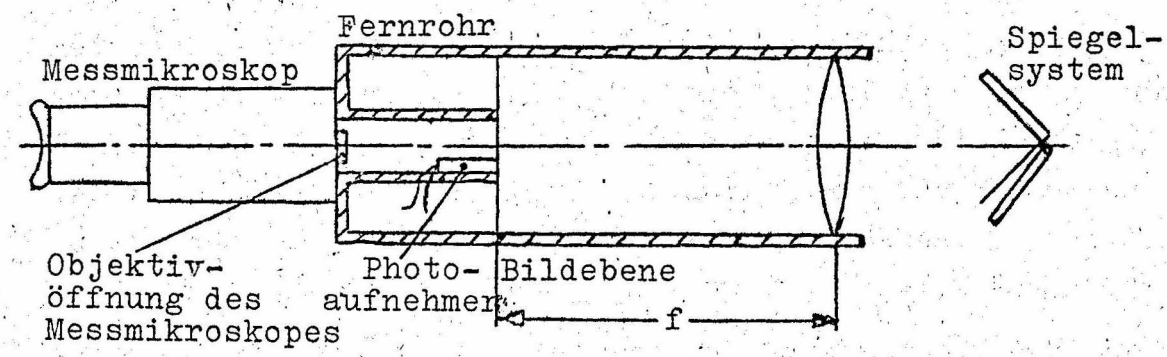
Durch die im folgenden beschriebene Anordnung ist es möglich, Amplitude, Form und Frequenz der zu messenden Schwingung zu bestimmen. Dabei wird die Amplitude direkt optisch abgelesen, während die Schwingungsform und die Frequenz photoelektronisch bestimmt werden.

Die Lichtmarke wird so ausgebildet, dass ausser einer Spitze noch ein gleichmässig hell erleuchtetes Rechteck vorhanden ist. (Abb. 8).

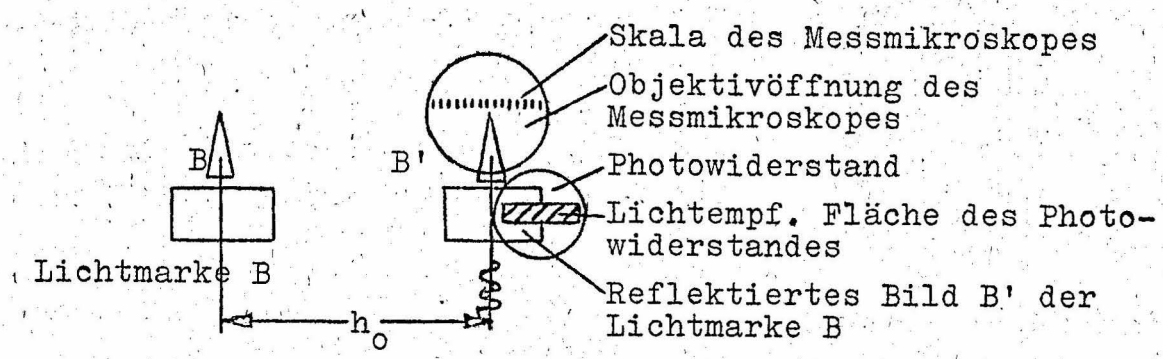
Das Messmikroskop wird mit einem fest eingebauten Photowiderstand versehen, dessen lichtempfindliche Schicht gerade in der Objektebene des Messmikroskopes (gleichzeitig Bildebene der Objektivlinse des Fernrohres) liegt. (Abb. 8).

Durch geeignete einmalige Feineinstellung wird die Lichtmarke (also das Bild B) gerade so eingestellt, dass die Spitze eines der durch die Reflektion entstehenden Bilder gerade in der Mitte der Ableseskala sichtbar ist. Gleichzeitig ist dann (durch die starre Anordnung des Photowiderstandes im Messmikroskop gewährleistet) die Kante des Rechteckbildes genau auf der Mitte des Photowiderstandes, so dass der Photowiderstand halb beleuchtet ist.

Tritt jetzt eine Schwingung in dem Spiegelsystem auf, so wird - nach dem vorher Gesagten - das Bild B' sich hin und her bewegen. Dadurch entsteht an der Skala ein breites Band der Spitze. Die Breite dieses Bandes wird in Teilstrichen am der Skala abgelesen, sie ist dadurch ein absolutes Mass für die Amplitude. In dem gleichen Masse bewegt sich die Kante des Rechteckbildes über den Photowiderstand und ändert damit den Anteil der beleuchteten Fläche der lichtempfindlichen Schicht des Photowiderstandes direkt proportional der Amplitude und



Seitenansicht der Messanordnung im Prinzip



Lichtmarke B und Bild B' in der Bildebene

Abb. 8

in der gleichen Frequenz wie die zu untersuchende Schwingung erfolgt. Ueber eine Brückenschaltung kann diese Lichtänderung auf einem Oszillografen oder einem Registriergerät sichtbar gemacht werden.

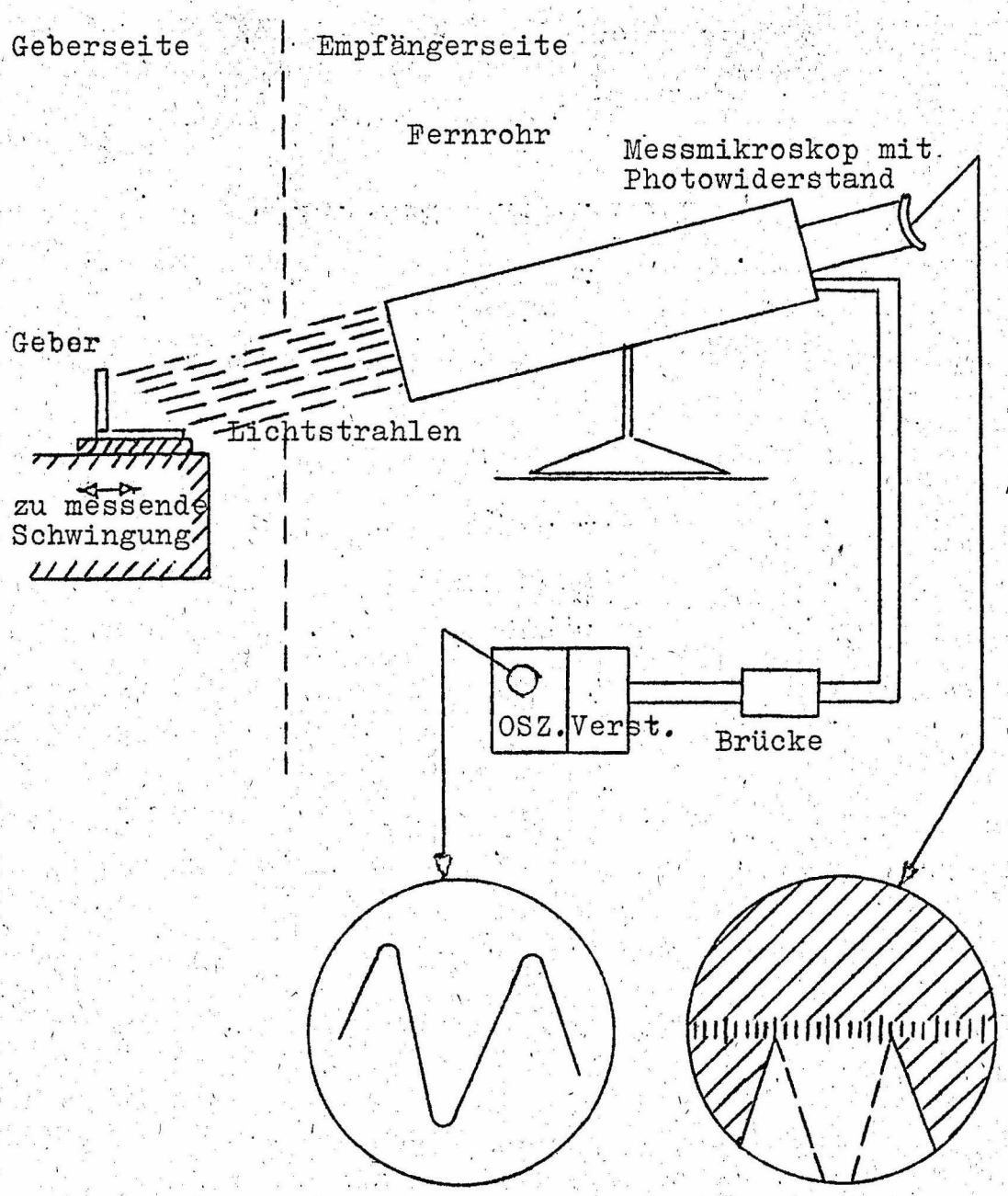
Die verschiedenen gleichzeitig vorhandenen Aufnahmemöglichkeiten gestatten also, den zu messenden Schwingungsvorgang wie folgt zu bestimmen:

<u>Bestimmung der Frequenz</u> über Oszillograf oder Registriergerät - genau.

<u>Bestimmung der Schwingungsform</u> über Oszillograf oder Registriergerät. Die Genauigkeit hängt von der Linearität des verwendeten Photoaufnehmers ab.

<u>Bestimmung der Amplitude</u> durch direkte Ablesung an der Skala des Messmikroskopes - genau.

In Abb. 9 ist das Prinzip der gesamten Messanordnung mit den einzelnen Ablesemöglichkeiten dargestellt.



Ablesung der Schwingungsform und Frequenz am Oszillografen

Ablesung der Amplitude am Messmikroskop (z.B.:20 Teilstriche ≙ 1 µ)

Prinzipdarstellung der gesamten Messanordnung

Die Verbindung Geberseite - Empfängerseite wird ausschliesslich durch Lichtstrahlen hergestellt

Abb. 9

E. Die praktische Ausführung

Es sind zwei verschiedene Fernrohre gebaut worden, die mit verschiedenen Spiegelsystemen verwendet worden sind. Die Objektivbrennweiten dieser Fernrohre sind f = 300 mm und f = 527 mm.

Als Messmikroskop wird in beiden Fällen ein solches mit einer 40-fachen Vergrösserung (Blickfeld 5 mm) und einer Skalenteilung von 1/50 mm verwendet.

Die Spiegelgeber können sehr klein gehalten werden. Die Fläche der Spiegel ist ca. 10 x 10 mm oder kleiner. An den Spiegelsystemen müssen sich geeignete Feineinstellmöglichkeiten befinden, um die erforderlichen einmaligen Nulleinstellungen vornehmen zu können. Das Gewicht der Spiegelgeber kann bequem bei ca. 20 g gehalten und wenn erforderlich, sogar auf 5 - 10 g reduziert werden.

Als Photowiderstand wird ein CdSe-Photowiderstand verwendet. Dieser hat einen Durchmesser von 6 mm und kann daher bequem in dem Messmikroskop untergebracht werden. Seine lichtempfindliche Fläche ist 5 x 2 mm gross, also in der Breitenausdehnung genau so gross wie das Blickfeld des Messmikroskops. Auf diese Weise ist es möglich sowohl optisch als auch photoelektronisch den gleichen Bereich zu erfassen.

Für die Beleuchtung der Lichtmarke wird eine Philips-Bandlampe gewählt; deren Leuchtband wird direkt in der Marke abgebildet. Dadurch ist eine annähernd konstante Leuchtdichte der Rechteckfläche gewährleistet.

Für die hier gestellten Ansprüche kann diese Art der Kombination der Lichtmarke mit dem Photowiderstand als weitgehend linear angesehen werden. Es ergaben sich sehr gute Anzeigen am Oszillografen. Wie bereits gesagt, interessiert bei der Ablesung am Oszillografen ja nur die Schwingungsform (und Frequenz). Der absolute Betrag der Amplitude wird gleichzeitig optisch ganz genau ermittelt.

Nach dem früher Gesagten haben Erschütterungen keinerlei Einfluss auf die Messgenauigkeit und Ablesegenauigkeit.

Besonders geeignet erweist sich dieses Verfahren für die Messung von Drehschwingungen an Maschinenteilen (z.B.

Kurbelwellen) im Stand. Die Spiegel werden an dem Maschinenteil so angebracht, dass eine Drehschwingung die Verdrehung der Spiegel gegeneinander hervorruft. Es werden dabei ausschliesslich die interessierenden Drehschwingungen gemessen, während alle anderen Bewegungen (z.B. Biegeschwingungen) ohne Einfluss auf die Ergebnisse sind.

Bei Verwendung des Fernrohres mit f = 527 mm Brennweite ergab sich nach einem durchgeführten Eichversuch (bei Vergleich mit dem empfindlichen Philips-Verlagerungsaufnehmer) folgender Faktor für die Bestimmung der Amplitude:

20 Teilstriche im Messmikroskop
entsprechen
0,001 mm Ampl. der zu messenden Schwgg.

Es ist also möglich, Amplituden von 0,0001 mm zu messen und bei Ablesung einzelner Teilstriche sogar solche von 0,00005 mm Grösse. Diese Werte entsprechen genau den theoretischen Ueberlegungen.

Die Empfindlichkeit dieses Verfahrens kann noch weiter erhöht werden. Durch Wahl anderer (langbrennweitiger) Objektivlinsen lässt sich die Zahl der Teilstriche je Schwingungsamplitude direkt proportional der Brennweitenvergrösserung erhöhen. Die Empfindlichkeit der elektronischen Anzeige lässt sich dadurch erhöhen, dass man noch bessere Photoempfänger verwendet oder bei Verwendung des hier beschriebenen dadurch, dass man den Photowiderstand ca. 45° um seine Längsachse dreht. Die Lichtänderung je Verschiebung des Bildes wird dadurch vergrössert.

Beschreibung der Abbildungen

Bild 1 und Bild 2 Zweispiegelgeber und Dreispiegelgeber. Die kleinen Schrauben dienen zur einmaligen Feineinstellung der Spiegelnullage und bei dem Dreispiegelgeber zur Justierung des rechten Winkels der beiden starren Spiegel.

Bild 3 Das herausgenommene Oberteil des Fernrohres von Bild 4 von der Fernrohrobjektivseite her gesehen. Von links nach rechts: Gehäuse für die Beleuchtungseinrichtung, Sammellinse, seitlich verschiebbarer Träger der Lichtmarke, Objektivöffnung des Messmikroskopes (Mitte des Kreises), lichtempfindliche Schicht des Photowiderstandes (schwarzer Strich in der hellen Fläche).

Bild 4 und Bild 5 Die gesamte Messanordnung. Die Geber sind an dem Maschinenfundament befestigt und können in diesen Fällen für die Messung von Querschwingungen (Bild 4) und für die Messung von Längsschwingungen (Bild 5) des Fundamentes verwendet werden. Vertikalschwingungen können mit dem gleichen Aufbau gemessen werden. Es braucht nur das Spiegelsystem anders gestellt zu werden.

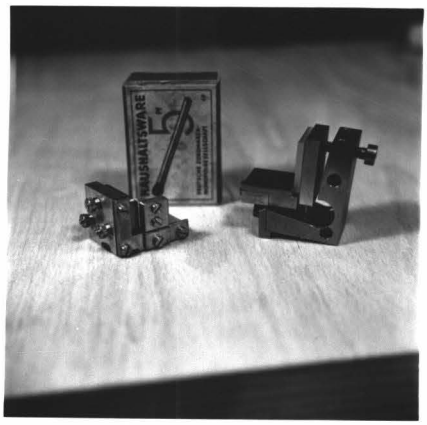


Bild 1

Bild 2

Bild 3

Beschreibung

zu den Bildern

umseitig.

Bild 4

Bild 5