

HEINRICH-HERTZ-INSTITUT FÜR SCHWINGUNGSFORSCHUNG
BERLIN-CHARLOTTENBURG

Technischer Bericht Nr. 20

Ein photoelektronisches Verfahren
zur Messung mechanischer Schwingungen
unter Anwendung von Polarisationsfiltern

Prof. Dr. phil. P. MATTHIEU

Dipl.-Ing. R. HARTWIG

1 9 5 8

Technischer Bericht Nr. 20

Ein photoelektronisches Verfahren zur Messung mechanischer Schwingungen unter Anwendung von Polarisationsfiltern

Zusammenfassung

In dem vorliegenden Bericht wird ein neuartiges photoelektronisches Verfahren beschrieben, welches es gestattet, unter Anwendung von Polarisationsfiltern mechanische Schwingungen zu messen.

Wegen seiner guten Eignung zur Messung von Drehschwingungen ist dieses Verfahren zum Patent angemeldet worden.

Es wird zunächst die Theorie aufgestellt, nach der die Modulation des Lichtstromes durch die zu messende mechanische Schwingung erfolgt. Die anschließend mitgeteilten Ergebnisse der Laborversuche an Polarisationsfiltern und Filterkombinationen zeigen, daß in allen Fällen Kennlinien vorliegen, die über sehr große Bereiche als linear zu betrachten sind und daß daher eine exakte Messung bis zu sehr großen Verdrehwinkeln möglich ist. In den Untersuchungen über die Anpassung von Lichtquelle, Polarisationsfilter und Photoempfänger wird gezeigt, welche Anordnungen zu wählen sind, um für die gebräuchlichen Photoempfänger die jeweils günstigsten meßtechnischen Voraussetzungen zu schaffen.

Abschließend wird die konstruktive Durchführung von derartigen Meßgeräten beschrieben und in Abbildungen dargestellt.

Heinrich-Hertz-Institut für Schwingungsforschung

Die Bearbeiter

gez. P. Matthieu gez. R. Hartwig

(Prof. Dr. phil. P. Matthieu)

(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 10. Juli 1958

Inhaltsverzeichnis

1. Allgemeines
2. Das Messprinzip
3. Das Lichtmodulationsgesetz
 - a) Verwendung von zwei Filtern
 - b) Verwendung von mehreren Filtern
4. Ergebnisse der Laborversuche an Filtern
 - a) Untersuchung an 2 Filtern
 - b) Untersuchung an mehreren Filtern
 - α) Untersuchung an 4 Filtern
 - β) Untersuchung an 5 Filtern
 - γ) Untersuchung an Filtern bei Veränderung der Filterzahl mit sonst gleich-bleibender Versuchsanordnung
5. Zusammenstellung und Diskussion der Ergebnisse
6. Anpassung von Lichtquelle, Filter und photoelektronischem Bauelement aneinander
 - a) Die photoelektronischen Bauelemente
 - b) Die Polarisationsfilter
 - c) Die Lichtquellen
 - d) Die gegenseitige Anpassung
 - α) Die Anpassung für den sichtbaren Wellenbereich
 - β) Die Anpassung für den ultraroten Wellenbereich
7. Der konstruktive Aufbau der Messgeräte
 - a) Die Messung von Drehschwingungen
 - b) Die Messung von Translationsschwingungen

Bezeichnungen

- Ph.-B. = Abk. f. Photoelektronisches Bauelement
(Photodiode, Phototransistor, Photowiderstand u.ä.)
- ϕ_n = hindurchtretender Lichtstrom bei n Filtern
- ϕ_0 = vor den Filtern herrschender Lichtstrom
- α = Verdrehwinkel der Filter gegeneinander
- α_0 = Winkelstellung von Filtersystemen, bei denen die maximale Lichtänderung je Winkeländerung eintritt.
- n = Zahl der Filter
- $d\phi/d\alpha$ = Lichtänderung je Winkeländerung
- Δn = Zunahme der Lichtänderung je Winkeländerung bei der Verwendung von n + 1 statt n Filter
- k = Lichtschwächungsfaktor

1. Allgemeines

In dem vorliegenden Bericht wird ein Verfahren beschrieben, welches es ermöglicht, mechanische Schwingungen unter Verwendung von Polarisationsfiltern zu messen. In erster Linie soll der Vorteil der drahtlosen Uebertragung durch Lichtstrahlen für Drehschwingungsmessungen ausgenutzt werden. Bekanntlich liegt eine Schwierigkeit und Fehlerquelle bei Drehschwingungsmessungen an umlaufenden Wellen in der Uebertragung der Meßgrößen von dem notwendigerweise rotierenden Meßmechanismus zu dem ruhenden Anzeige- bzw. Registriersystem der Meßanordnung. Die bisher gebräuchlichen Uebertragungsmöglichkeiten sind Schleifringe oder Drehtransformatoren. Bei den Schleifringübertragungen ergeben sich gerade bei der Messung kleiner Werte Fehler durch die Uebergangswiderstände. Bei dem hier beschriebenen Meßverfahren werden derartige Uebertragungsfehler ausgeschaltet.

2. Das Meßprinzip

Das Prinzip der Meßmethode ist in Abb. 1 dargestellt. Das von einer Lichtquelle L ausgehende Licht wird durch Polarisationsfilter P_1 und P_2 (mindestens 2 Filter) gesandt und fällt auf ein photoelektronisches Bauelement Ph, im weiteren Text kurz Ph.-B. genannt. Die auf das Ph.-B. fallende Lichtmenge wird durch die nach Maßgabe der mechanischen Schwingung erfolgende Verdrehung der Filter gegeneinander moduliert. Das Ph.-B. liefert durch die

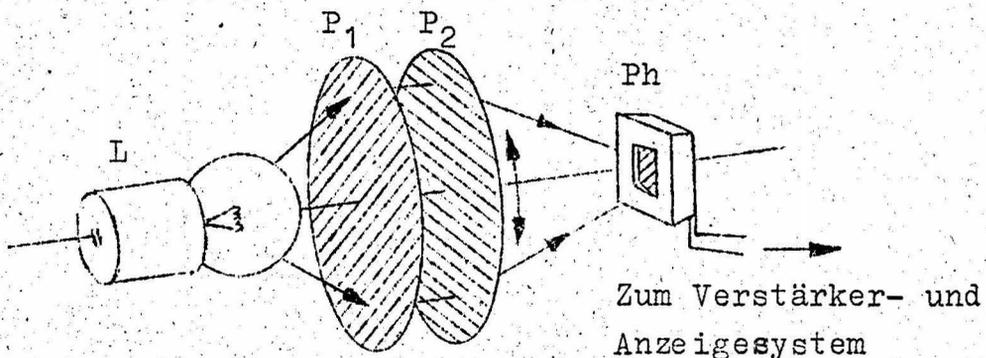


Abb. 1

Bestrahlung mit dem modulierten Licht einen modulierten Stromfluß, der unter Anwendung von Verstärkern und geeigneten Schaltungen zur Schwingungsanzeige bzw. Registrierung verwendet wird.

3. Das Lichtmodulationsgesetz

a) Verwendung von 2 Filtern

Das Gesetz, nach dem die Lichtmodulation bei der Anwendung von 2 Polarisationsfiltern vorgenommen wird, ist

$$\phi_2 = \phi_0 \cos^2 \alpha \quad (1)$$

Hierbei ist: ϕ_0 der auf den 1. Filter auftreffende Lichtstrom, α der Winkel zwischen den Schwingungsrichtungen der beiden Filter (bei $\alpha = 0^\circ$ größte Durchlässigkeit, bei $\alpha = 90^\circ$ kleinste Durchlässigkeit), ϕ_2 der durchgelassene Lichtstrom.

Durch die mechanische Schwingung, die gemessen werden soll, wird der Winkel α der beiden Filter gegeneinander geändert. Dadurch ergibt sich die Änderung des Lichtstromes mit α zu:

$$\frac{d\phi}{d\alpha} = -\phi_0 \cdot 2 \sin \alpha \cdot \cos \alpha$$

oder

$$\frac{d\phi}{d\alpha} = -\phi_0 \cdot \sin 2\alpha \quad (2)$$

Die maximale Änderung vom ϕ (maximaler Wert von $\frac{d\phi}{d\alpha}$) ist vorhanden bei

$$\begin{aligned} \frac{d^2\phi}{d\alpha^2} &= -\phi_0 \cdot 2 \cdot \cos 2\alpha_0 = 0 \\ \alpha_0 &= 45^\circ \end{aligned} \quad (3)$$

Sie hat die Größe

$$\frac{d\phi}{d\alpha}_{\max} = -\phi_0 \quad (4)$$

Da die Funktion $\phi_2 = \phi_0 \cos^2 \alpha$ an der Stelle $\alpha = 45^\circ$ einen Wendepunkt hat, liegt die größte Änderung von ϕ also gerade in dem Gebiet der größten Linearität. Bei Betrachtung der Tangente statt der Kurve selbst entsteht nur ein unbedeutender Fehler, weil die Tangente an dieser Stelle eine Berührung dritter Ordnung hat. Es kann also geschrieben werden:

$$\frac{\Delta \phi}{\Delta \alpha_{\max}} = - \phi_0$$
$$\Delta \phi_{\max} = - \phi_0 \cdot \alpha \quad (5)$$

Damit ergibt sich auf 1 Grad bezogen eine Aenderung von

$$\Delta \phi_{1 \text{ Grad, max}} = - \phi_0 \cdot \frac{\pi}{180} \quad (6)$$

als maximale Aenderung des Lichtstromes bei einer Verdrehung der Filter um 1 Grad gegeneinander.

b) Verwendung von mehreren Filtern

Die Lichtstromänderung bei einer Drehung eines Filters gegenüber einem zweiten läßt sich durch Hintereinanderschaltung mehrerer Filter noch weiter steigern. Es ist dazu erforderlich, daß je zwei nebeneinander liegende Filter durch die zu messende mechanische Schwingung relativ verdreht werden. Man kann die Anordnung der Filter so vornehmen, daß die Filter der Reihe nach abwechselnd dem ruhenden und dem bewegten System zugeordnet werden.

In Abbildung 2 ist eine Anordnung von 5 Filtern dargestellt. Bei dieser Anordnung sind die Filter P_1 , P_3 , P_5 starr miteinander zu dem System P_I verbunden ebenso die Filter P_2

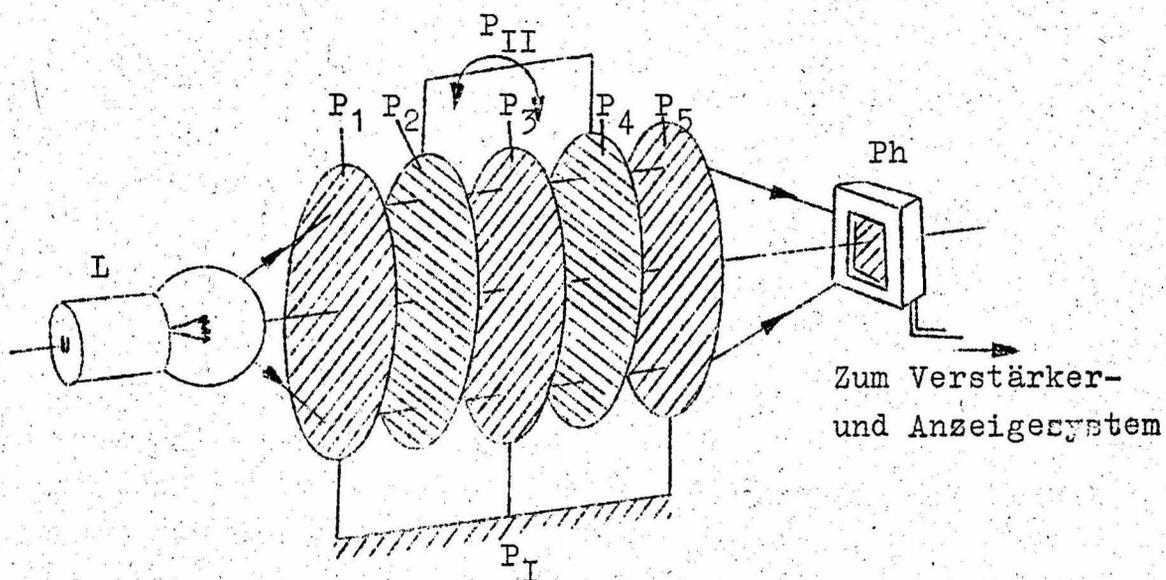


Abb. 2

und P_4 zu P_{II} . Wenn jetzt die Filter P_2 und P_4 gemeinsam entsprechend der mechanischen Schwingung Verdrehungen gegenüber den jeweiligen Nachbarfiltern ausführen, ist zwischen allen Filterscheiben eine lichtmodulierende Wirkung zu erwarten.

Es soll nun vorausgesetzt werden, dass die Filter jedes einzelnen Systems in Hellstellung zu einander stehen. Das heißt, die Schwingungsebenen der Filter P_1, P_3, P_5 sind parallel zueinander und auch die Schwingungsebenen der Filter P_2 und P_4 .

Die beiden Systeme P_I und P_{II} sollen nun gegeneinander um den Winkel α verdreht sein. In Abb. 3 ist eine schematische Darstellung der Filteranordnung gegeben. Der durch den i -ten

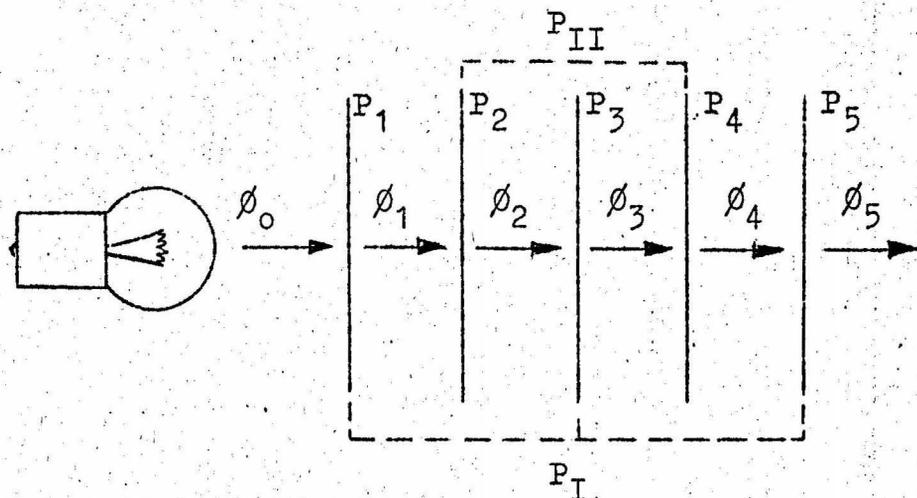


Abb. 3

Filter tretende Lichtstrom ist mit ϕ_i bezeichnet.

Aus dem ersten Filter tritt der Lichtstrom

$$\phi_1 = \frac{k}{2} \phi_0 .$$

Dabei ist k ein Lichtschwächungsfaktor, der von dem Filtermaterial abhängt. Der Faktor $1/2$ ergibt sich als statischer Mittelwert. Vor dem Filter ist unpolarisiertes, hinter dem Filter polarisiertes Licht vorhanden.

Nach dem zweiten Filter hat man

$$\phi_2 = \frac{k^2}{2} \cdot \phi_0 \cdot \cos^2 \alpha . \quad (7)$$

Aus dem dritten Filter tritt

$$\phi_3 = \frac{k^3}{2} \cdot \phi_0 \cdot \cos^4 \alpha .$$

Allgemein ergibt sich für die Lichtmenge, die aus dem n-ten Filter austritt,

$$\phi_n = \frac{k^n}{2} \phi_0 \cos^{2n-2} \alpha \quad (8)$$

$$n = 1, 2, 3, 4, 5 \dots$$

Als Änderung des durch n Filter hindurchtretenden Lichtstromes mit α ergibt sich

$$\frac{d\phi_n}{d\alpha} = - \frac{k^n}{2} \phi_0 \cdot (2n - 2) \cos^{2n-3} \alpha \sin \alpha \quad (9)$$

$$\frac{d\phi_n}{d\alpha} = - \frac{k^n}{2} \phi_0 (2n - 2) \cos^{2n-2} \alpha \cdot \text{tg} \alpha$$

Der Winkel α_0 , für den die Lichtänderung mit der Verdrehung der beiden Systeme P_I und P_{II} gegeneinander maximal wird, soll ermittelt werden. Das führt auf die Gleichung

$$\frac{d^2\phi_n}{d\alpha^2} = - k^n \phi_0 (n - 1) \left[\cos^2(n - 1) \alpha - (2n - 3) \cos^{2n-4} \alpha \sin^2 \alpha \right] - k^n \phi_0 (n - 1) \cos^{2(n-1)} \alpha \left[1 - (2n - 3) \text{tg}^2 \alpha \right] = 0 \quad (10)$$

Hieraus ergibt sich für α_0 die Bestimmungsgleichung

$$\text{tg}^2 \alpha_0 = \frac{1}{2n - 3} \quad (11)$$

Entsprechend dieser Gleichung kann für jede Filterzahl n der optimale Winkel α_0 bestimmt werden.

Es soll jetzt die bei dem jeweiligen Winkel α_0 vorhandene Lichtänderung je Winkeländerung allgemein ermittelt werden, also

$$\frac{d\phi_n}{d\alpha_{\max}} \quad (12)$$

Es hatte sich in (9) ergeben:

$$\frac{d\phi_n}{d\alpha} = -k^n \phi_0 (n-1) \cos^{2(n-1)} \alpha \operatorname{tg} \alpha$$

Um den Wert (12) darzustellen, wird geschrieben

$$\cos^{2(n-1)} \alpha_0 = \frac{1}{(1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_0)^{n-1}}$$

Damit ergibt sich aus (9):

$$\frac{d\phi_n}{d\alpha_{\max}} = -k^n \phi_0 (n-1) \frac{1}{(1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_0)^{n-1}} \operatorname{tg} \alpha_0 \quad (13)$$

Unter Anwendung von (11) folgt

$$\frac{d\phi_n}{d\alpha_{\max}} = -k^n \phi_0 \frac{1}{2^{n-1}} \frac{(2n-3)^{n-2}}{n-1} (2n-3)^{1/2} \quad (14)$$

oder

$$\frac{d\phi_n}{d\alpha_{\max}} = -k^n \phi_0 \frac{\sqrt{2n-3}}{2} \left(1 - \frac{1}{2n-2}\right)^{n-2} \quad (15)$$

Dies ist der allgemeine Ausdruck für die maximale Lichtänderung je Winkeländerung bei Verwendung von n Polarisationsfiltern.

Es soll jetzt allgemein ermittelt werden, welche Verbesserung der Lichtmengenänderung eintritt, wenn statt n Filtern $n+1$ Filter in der für $n+1$ günstigsten Winkelstellung verwendet werden. Hierzu wird unter Anwendung von (13) gebildet:

$$\Delta_n = \frac{d\phi_{n+1}}{d\alpha_{\max}} - \frac{d\phi_n}{d\alpha_{\max}} \quad (16)$$

Δ_n ist die Zunahme der Lichtänderung je Winkeländerung bei der Verwendung von $n+1$ statt n Filtern.

In der hier verwendeten Gleichung (13) liegt jeweils das Ergebnis für den Fall vor, daß die Winkelstellung α_0 - also die günstigste Winkelstellung - vorhanden ist.

$$\Delta_n = - k^n \varnothing_0 \frac{1}{2^n} \left[k \binom{2n-1}{n}^{n-1} (2n-1)^{1/2} - 2 \binom{2n-3}{n-1}^{n-2} (2n-3)^{1/2} \right] \quad (17)$$

Für praktische Fälle kann aus der Gleichung (17) sofort ermittelt werden, wie groß die Zunahme der Lichtänderung bei Hinzunahme eines weiteren Filters werden kann. Aus einfachen Messungen läßt sich der Wert k bestimmen. Nach Ermittlung vom Δ_n wird man dann überlegen, ob der errechnete Zuwachs der Lichtänderung es lohnt, die konstruktiven Erschwerungen, die durch Hinzufügen eines weiteren Filters in das Meßsystem entstehen, in Kauf zu nehmen.

Numerische Auswertung und Zusammenstellung

Im Anschluß an die bis hierher aufgestellten Beziehungen sollen die Formeln für praktisch wichtige Fälle ausgewertet werden und in einer Uebersicht zusammengestellt werden.

In der Zusammenstellung Abb. 4 sind die verschiedenen Werte neben der jeweiligen Filterzahl n angegeben. Die Größen α_0 sind nach Gleichung (11) ermittelt worden, die Werte für

$\frac{d\varnothing_n}{d\alpha_{\max}}$ nach der Gleichung (13). Für Δ_n ergeben sich die

Werte entweder aus der allgemeinen Gleichung (17) oder durch entsprechende Differenzenbildung der nach Gleichung (13) ermittelten Größen.

4. Ergebnisse der Laborversuche an Filtern

Zur Bestätigung der theoretischen Ueberlegungen einerseits und zur Auffindung günstiger Anordnungen für praktische Ausführungen wurden verschiedene Messungen durchgeführt, deren Ergebnisse hier angegeben werden sollen.

Das Ziel der angestellten Untersuchungen war folgendes:

- 1.) Feststellung der Lichtmengenänderung bei Verdrehung der Filter um nur kleine Winkel.

n	$\operatorname{tg}^2 \alpha_0$	α_0	$\frac{d\phi_n}{d\alpha_{\max}}$	$\Delta_n = \frac{d\phi_{n+1}}{d\alpha_{\max}} - \frac{d\phi_n}{d\alpha_{\max}}$	$\frac{\frac{d\phi_{n+1}}{d\alpha_{\max}}}{\frac{d\phi_n}{d\alpha_{\max}}}$	ϕ_n $\alpha = \alpha_0$	$\frac{\phi_{n+1} \alpha = \alpha_0}{\phi_n \alpha = \alpha_0}$
2	1	45°	$-k^2 \phi_0 \cdot 0,5$	$-\phi_0 \cdot k^2 [0,65 \cdot k - 0,5]$	$k \cdot 1,3$	$k^2 \phi_0 \cdot 0,25$	$k \cdot 1,125$
3	1/3	30°	$-k^3 \phi_0 \cdot 0,65$	$-\phi_0 \cdot k^3 [0,777k - 0,65]$	$k \cdot 1,195$	$k^3 \phi_0 \cdot 0,281$	$k \cdot 1,03$
4	1/5	$24,12^\circ$	$-k^4 \phi_0 \cdot 0,777$	$-\phi_0 \cdot k^4 [0,887k - 0,777]$	$k \cdot 1,14$	$k^4 \phi_0 \cdot 0,2898$	$k \cdot 1,014$
5	1/7	$20,75^\circ$	$-k^5 \phi_0 \cdot 0,887$			$k^5 \phi_0 \cdot 0,2938$	
$\lim_{n \rightarrow \infty}$	0	0			k		

- 2.) Feststellung des Bereiches, in dem bei den verschiedenen Kombinationen größtmögliche Linearität herrscht.

Diese Frage ist insofern interessant, als es dieses Verfahren gestattet, auch große Winkeländerungen zu messen, weil der Bereich der Linearität gleichzeitig der Bereich der größten Empfindlichkeit ist.

- 3.) Vergleich der Empfindlichkeiten der verschiedenen Kombinationen von Filterpaaren.

Die verwendeten Polarisationsfilter sind von der Firma Polaroid Corporation of America gelieferte linear polarisierende Folien, die zwischen Plastikscheiben gekittet sind.

Als Lichtquelle wurden Soffittenlampen verwendet mit einer Leistungsaufnahme von 15 W bei 12 bzw. 6 V Spannung. Für die Durchführung der Messungen wurde ein Photowiderstand (CdS) der Firma Dr. B. Lange verwendet, obwohl für die endgültigen Ausführungen empfindlichere Photoaufnehmer mit entsprechenden Verstärkern verwendet werden sollen - Photodiode, Phototransistor, Multiplier -, erschien es für diese vergleichenden statischen Versuche genügend, einen Photowiderstand mit verhältnismäßig großer Trägheit zu verwenden.

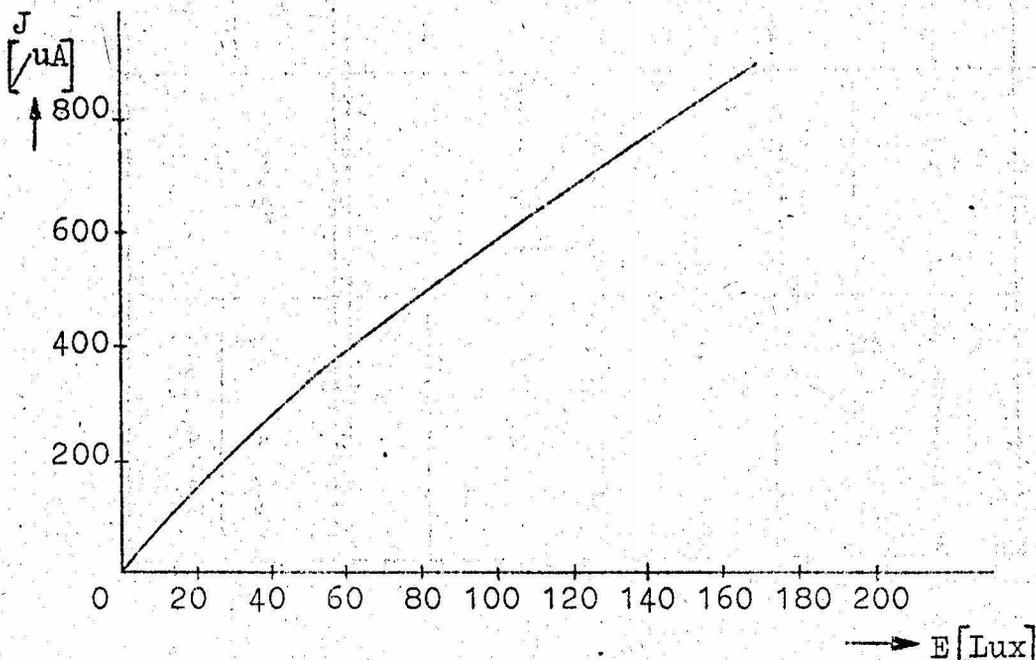


Abb. 4a

In Abb. 4a ist für den bei diesen Versuchen benutzten CdS-Photowiderstand der Photostrom über der Beleuchtungsstärke aufgetragen. In dem Bereich 450 - 1000 μ A ist der Photostrom der Beleuchtung direkt proportional. Deswegen dürfen in den folgenden Betrachtungen der Photostrom direkt als Maß für den Lichtfluß und die Änderung des Photostromes bei Verdrehung der Filter direkt als Lichtflußänderung je Winkeländerung betrachtet werden,

a) Untersuchung an zwei Filtern

Zur Bestätigung des für zwei Filter geltenden Lichtänderungsgesetzes (1)

$$\phi_2 = \phi_0 \cos^2 \alpha$$

wurde der in dem Stromkreis Spannungsquelle - Photowiderstand - Amperemeter - fließende Strom (Abb. 5) über der jeweiligen Verdrehung der Filter gegeneinander aufgetragen.

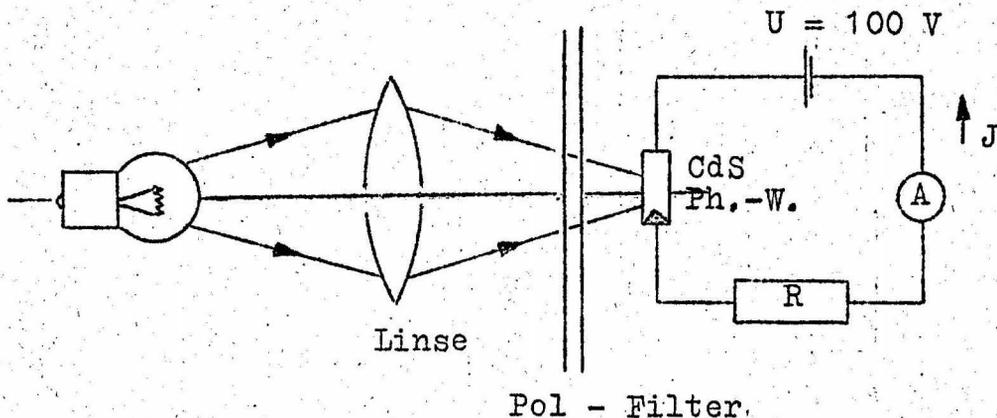
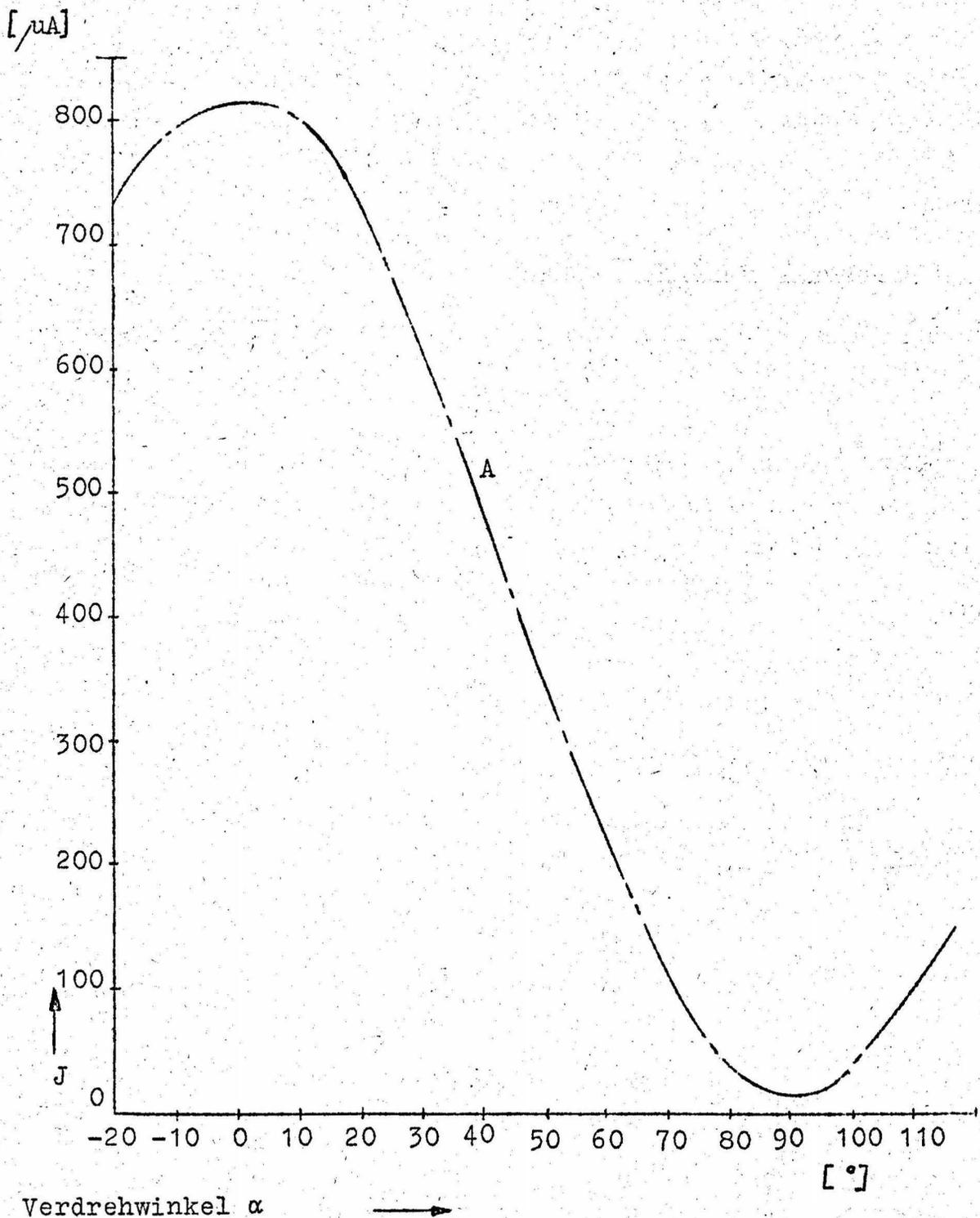


Abb. 5

Die Kurve A Abb. 6 zeigt die Ströme über den dazugehörigen Winkeln. Man erkennt sehr deutlich den Charakter der Funktion $\cos^2 \alpha$. Bei $\alpha = 90^\circ$ gehen die Werte allerdings nicht bis 0 herunter. Das hängt damit zusammen, daß die Filter in der Dunkelstellung immer noch einen geringen Anteil des Lichtes hindurchlassen. Entscheidend ist aber der Bereich um $\alpha = 45^\circ$. Dort ist eine sehr gute Linearität zu beobachten.



Kurve A. Graphische Darstellung der Meßergebnisse des in Abschnitt 4a beschriebenen Versuches.

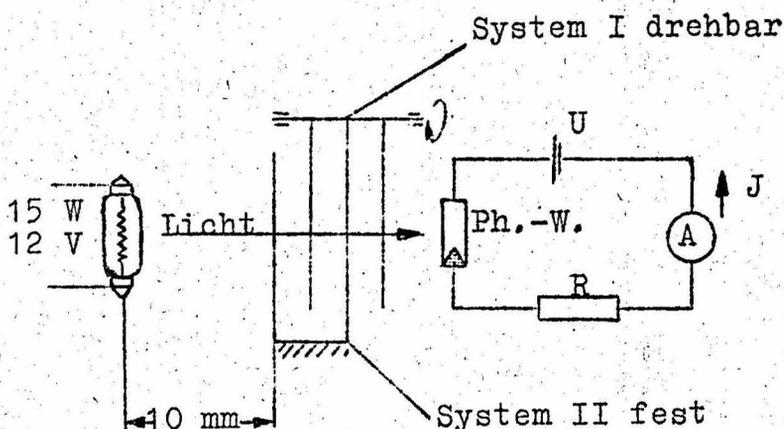
Abb. 6

b) Untersuchung an mehreren Filtern

Um die Wirkung mehrerer Filter zu beobachten, wurden verschiedene Meßreihen aufgenommen. Die Anordnung der Filter wurde so vorgenommen, dass die Filter jedes Systems in Bezug auf ihre Polarisationsrichtung parallel stehen. Die beiden Systeme wurden dann so zusammengefügt, daß das Licht abwechselnd durch einen Filter des einen und durch einen Filter des anderen Systems treten muss (Abb. 2). Die Verdrehung des einen Systems gegenüber dem anderen wurde variiert und die jeweils hindurchtretende Lichtmenge dadurch erfasst, daß der in dem Kreis Spannungsquelle - Photowiderstand - Belastungswiderstand fließende Strom gemessen wurde. Die Ströme über den entsprechenden Winkelstellungen aufgetragen ergeben die dargestellten Kurven.

Zur Kontrolle wurden verschiedene Meßreihen aufgenommen, bei denen mit verschiedenen Spannungen und verschiedenen Belastungswiderständen gearbeitet wurde. Die Zahl der Glühbirnen wurde in einzelnen Fällen ebenfalls geändert.

ba) Untersuchung an 4 Filtern



Versuchsanordnung für 4 Filter

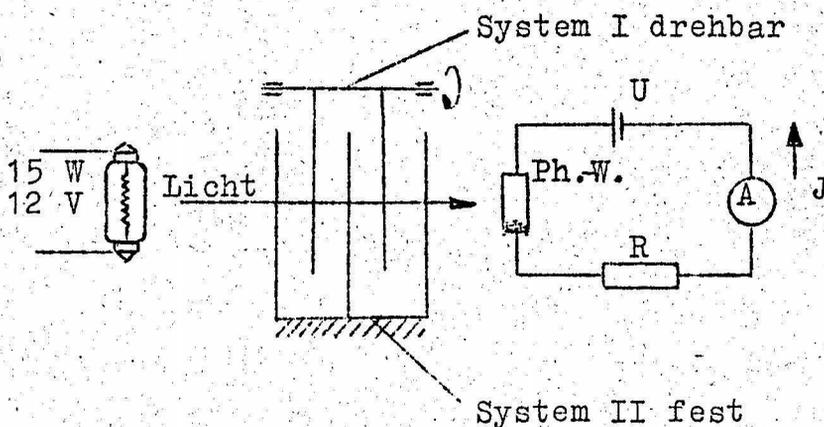
Angaben zu den Kurven

Kurve	Spannung U (V)	Widerstand R (k Ω)
B	70	5
C	100	5
D	45	10
E	70	10
F	100	10
G	100	50
H	45	50
I	100	50

Abb. 8

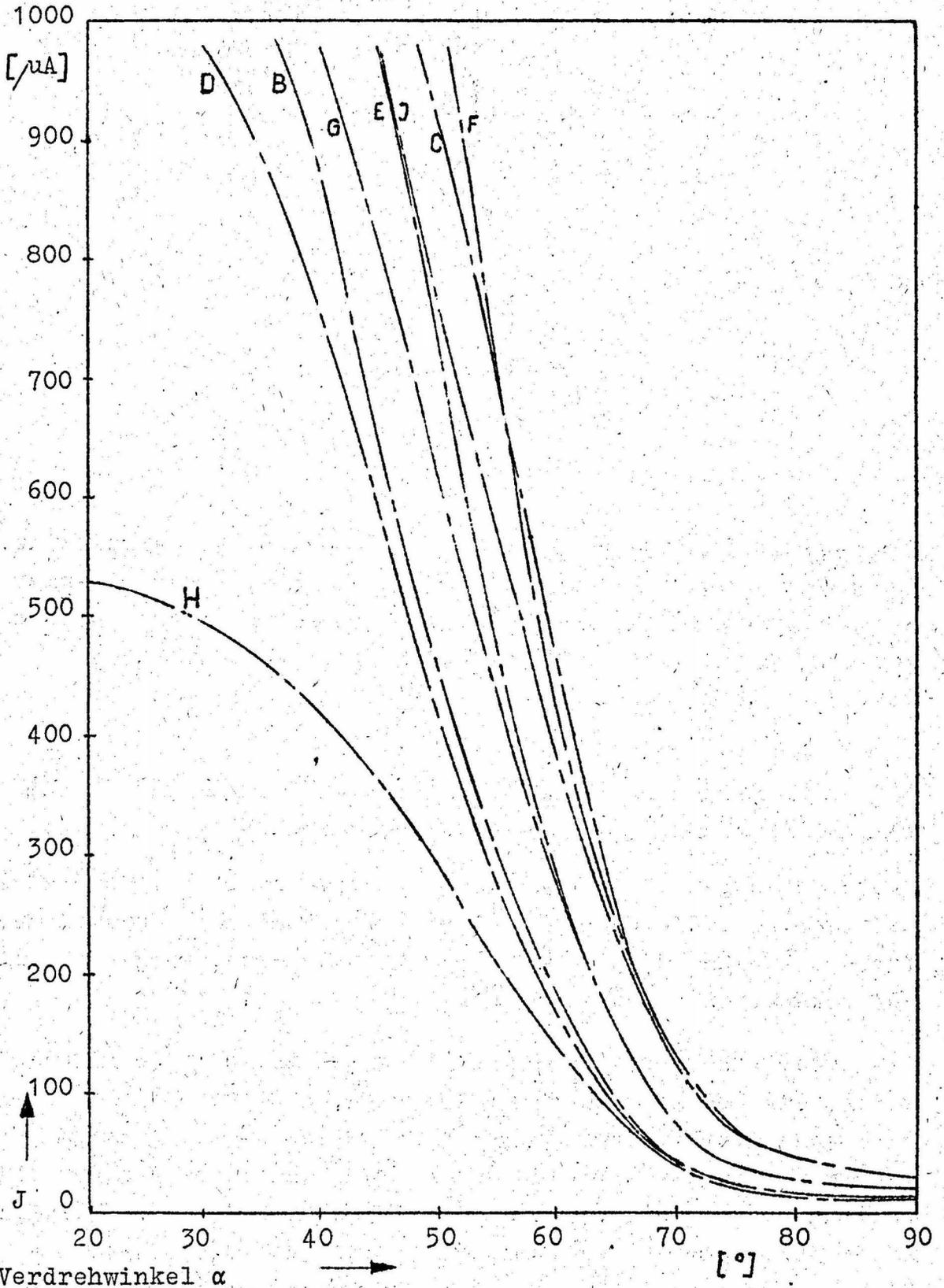
Die zugehörige Versuchsanordnung ist in Abb. 7 dargestellt. Aus diesen Versuchen mit den in Abb. 8 angegebenen Versuchsbedingungen resultieren die Meßergebnisse, die durch die Kurven B, C, D, E, F, G, H, J in Abb. 9 dargestellt sind.

b β). Untersuchung an 5 Filtern



Versuchsanordnung für 5 Filter

Abb. 10



Kurven B - C - D - E - F - G - H - I -

Abb. 9

Graphische Darstellung der Meßergebnisse der in Abschnitt 4 b α beschriebenen Versuche

Angaben zu den Kurven

Kurve	Spannung U (V)	Widerstand R (k Ω)
K	45	ohne
L	100	10/3
M	100	5
N	45	10
O	45 2 Lampen	10
P	100	10
Q	100 2 Lampen	10
R	100	50

Abb. 11

Die zugehörige Versuchsanordnung ist in Abb. 10 dargestellt. Es wurden genau wie bei vier Filtern auch hier nacheinander die verschiedenen in Abb. 11 angegebenen Systemkonstanten vorgegeben. Die Ergebnisse dieser Messungen sind durch die Kurven K, L, M, N, O, P, Q, R in Abb. 12 dargestellt.

b γ) Untersuchung an Filtern bei Veränderung der Filterzahl mit sonst gleichbleibender Versuchsanordnung

Diese Messungen sollen das unter (17) dargestellte Gesetz bestätigen. Die Gleichung (17) stellt die allgemeine Form dar für die Zunahme der Lichtänderung je Winkeländerung bei der Verwendung von $n + 1$ statt n Filtern,

Die numerische Auswertung dieser Formel in Abb. 4 Spalte 5 zeigt, daß bei Hinzunahme eines weiteren Filters zu einer Anzahl schon vorhandener Filter eines Systems die Änderung der Lichtmenge je Winkeländerung einen Wert hat, der von der Filterzahl und von dem Lichtschwächungsfaktor abhängt. Aus der Spalte 6 der Abb. 4 ist zu ersehen, daß die Lichtänderung bei $n + 1$ Filtern nur dann größer ist als diejenige bei n Filtern, wenn k ungefähr $= 1$ ist, also annähernd keine Lichtschwächung vorhanden ist. Bei allen Filtern tritt aber eine größere Lichtschwächung ein, die einem Wert k entspricht, der wesentlich

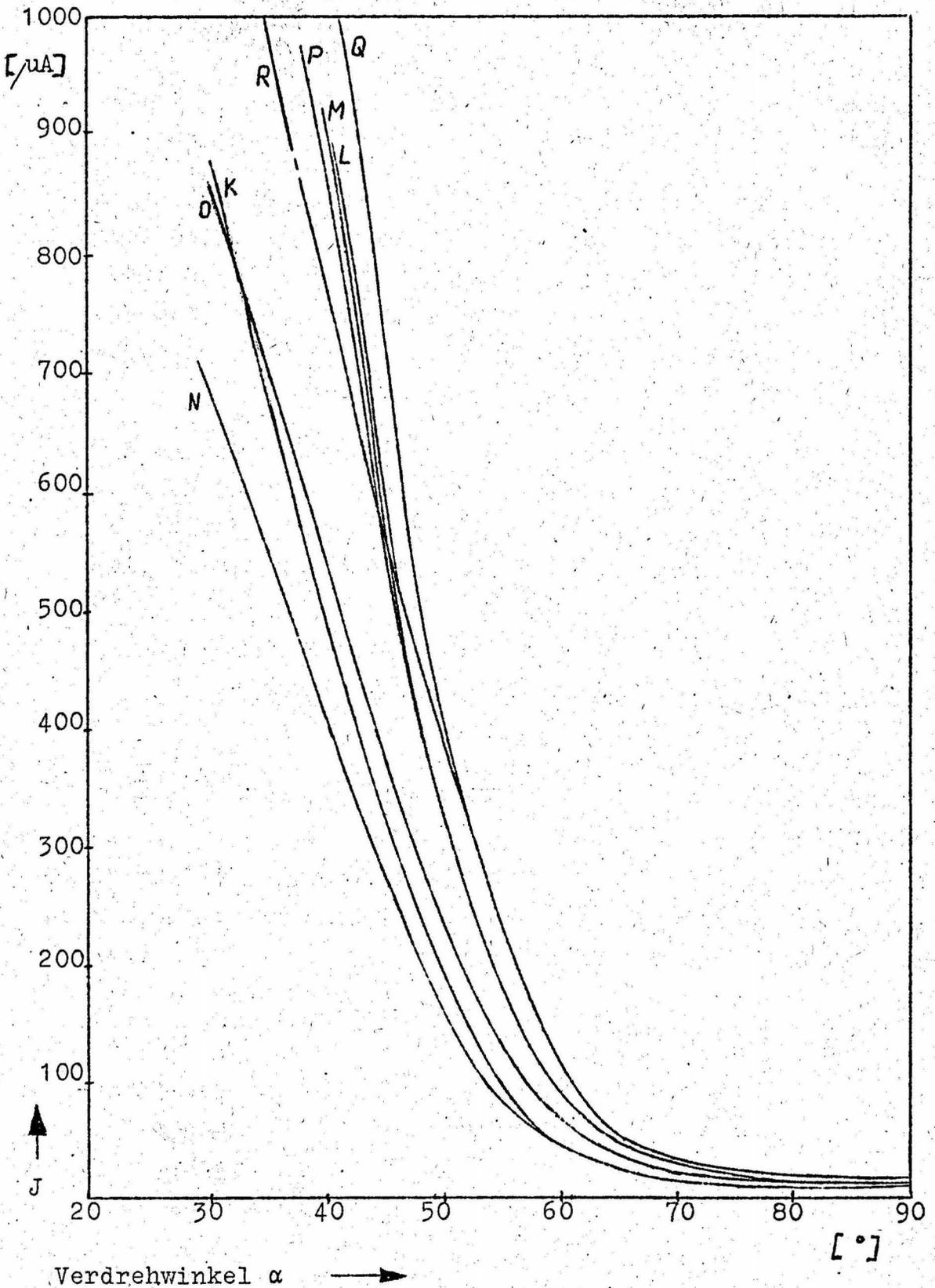


Abb. 12

Kurven K - L - M - N - O - P - Q - R -

Graphische Darstellung der Meßergebnisse der im Abschnitt 4b B beschriebenen Versuche.

kleiner ist als eins. Bei den hier verwendeten Filtern ist $k = 0,69$. Wie aus der Spalte 7 der Abb. 4 zu ersehen ist, wird aber auch der bei der jeweiligen Winkelstellung $\alpha = \alpha_0$ auf den Photoempfänger fallende Lichtstrom durch den Faktor k stark verkleinert, es fällt also wesentlich weniger Licht auf den Photoempfänger wenn ein weiterer Filter verwendet wird.

Um aber trotzdem in einen für den Photoempfänger günstigen Arbeitsbereich zu gelangen, kann der Lichtstrom ϕ_0 so weit vergrößert werden, daß der Wert ϕ_n die erforderliche Größe hat. (Die Vergrößerung von ϕ_0 wird aber dadurch begrenzt, daß die Polaroid-Folien wärmemäßig nur einer bestimmten Bestrahlung standhalten.)

Bei den hier durchgeführten Versuchen ist entsprechend den eben geschilderten Verhältnissen so vorgegangen worden, daß der Lichtstrom ϕ_0 jeweils so eingestellt wurde, daß bei der Meßreihe 1 die Anfangswerte ϕ_n und bei der Meßreihe 2 die die Endwerte ϕ_n gleiche Größe haben. Die Messungen sind für den Bereich $\alpha = 40^\circ - 50^\circ$ durchgeführt worden.

Theoretische Formulierung der Versuche zu 4by

Für beide Meßreihen ist die mittlere Winkelstellung $\alpha = 45^\circ$. (In dieser theoretischen Betrachtung wird statt $\alpha = 40^\circ$ für die erste Meßreihe und statt $\alpha = 50^\circ$ für die zweite Meßreihe beide Male $\alpha = 45^\circ$ gesetzt. Der theoretische Fehler, der sich durch diese Vereinfachung ergibt, ist sehr gering, wie es sich auch in den Versuchsergebnissen später zeigt.)

Aus der Formel (9) ergibt sich für $\alpha = 45^\circ$ mit $\sinus 45^\circ = \cosinus 45^\circ = 1/2 \sqrt{2}$

$$\frac{d\phi_n}{d\alpha_{45^\circ}} = - k^n \phi_0 (n-1) \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^{2n-2}$$

$$\frac{d\phi_n}{d\alpha_{45^\circ}} = - k^n \phi_0 \cdot \frac{n-1}{2^n - 1} \quad (18)$$

Für ϕ_{n45} ergibt sich aus der Formel (8) für $\alpha = 45^\circ$

$$\phi_{n45} = \frac{k^n}{2} \phi_0 \left(\frac{1}{2} \sqrt{2}\right)^{2n-2} \quad (19)$$

$$\phi_{n45} = \left(\frac{k}{2}\right)^n \phi_0$$

entsprechend der Forderung, daß ϕ_{n45} für alle n konstant gehalten werden soll, (genau genommen für die Meßreihe 1 $\phi_{n40} = \text{konstant}$ und für die Meßreihe 2 $\phi_{n50} = \text{konstant}$) muß also sein:

$$\left(\frac{k}{2}\right)^n \phi_0 = \text{konstant} = K \quad (20)$$

Aus Gleichung (18) ergibt sich nach Einführung von (20)

$$\frac{d\phi_n^*}{d\alpha_{45}} = -K \cdot 2(n-1) \quad (21)$$

das Zeichen * weist darauf hin, daß es sich um Beziehungen handelt, die für $\phi_n = \text{konstant}$ gelten.

Eine der Gleichung (17) entsprechende Darstellung ergibt sich jetzt zu:

$$\begin{aligned} \Delta_n^* &= -K \cdot 2n + K \cdot 2(n-1) \\ \Delta_n^* &= -2K \end{aligned} \quad (22)$$

Es entsteht ein konstanter Zuwachs der Lichtänderung je Winkeländerung bei Hinzunahme eines weiteren Filters. Durch Vergleich mit Gleichung (20) erkennt man, daß der Zuwachs direkt proportional ϕ_0 ist.

Die Versuchsdurchführung

Meßreihe 1.

Die Spannung an der Lichtquelle wurde jeweils so eingestellt, daß bei einer Verdrehung der Filtersysteme um 40° gegeneinander in dem Meßkreis gerade $1000 \mu\text{A}$ flossen. Das bedeutet, daß einerseits die Gleichung (20) erfüllt ist und daß andererseits der Photowiderstand nicht überlastet wird.

Meßreihe 2.

Die Spannung an der Lichtquelle wird so variiert, daß bei einer Verdrehung der Filtersysteme um 50° gegeneinander gerade $400 \mu\text{A}$ fließen.

Die Versuchsanordnung ist in Abb. 13 dargestellt. Die Spannung im Meßkreis $U = 100 \text{ V}$ und der Widerstand $R = 10 \text{ k}\Omega$ sind für alle Messungen konstant. In Abb. 14 sind die Meßergebnisse über den dazugehörigen Winkeln graphisch aufgetragen. Die Kurven S, T, U, V. stellen die Ergebnisse der Meßreihe 1 dar für $n = 2, 3, 4, 5$ Filter. Die Kurven W, X, Y, Z sind die Ergebnisse der Meßreihe 2 für $n = 2, 3, 4, 5$ Filter.

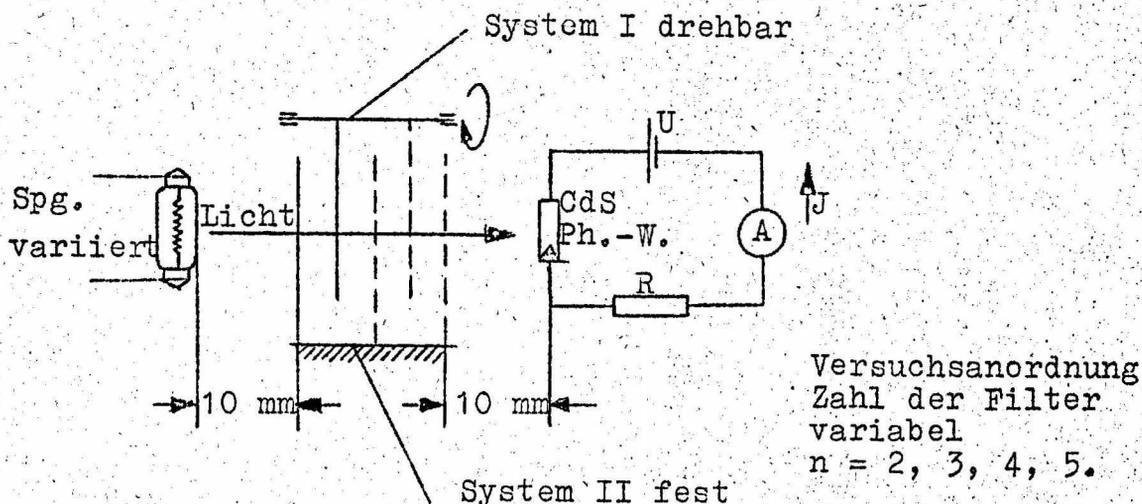


Abb. 13

Die Änderung des Lichtstromes je Winkel ist als Steigungswinkel aus den Kurven Abb. 14 ermittelt worden. In Abb. 15 werden die theoretisch ermittelten Werte den Meßergebnissen gegenübergestellt. Ferner sind in Abb. 15 prozentuale Angaben darüber vorhanden, um wieviel die Lichtmengenänderung je Winkel vergrößert wird, wenn ein weiterer Filter zu dem System hinzugefügt wird und um wieviel die Lichtmengenänderung sich vergrößert gegenüber der Verwendung von 2 Filtern.

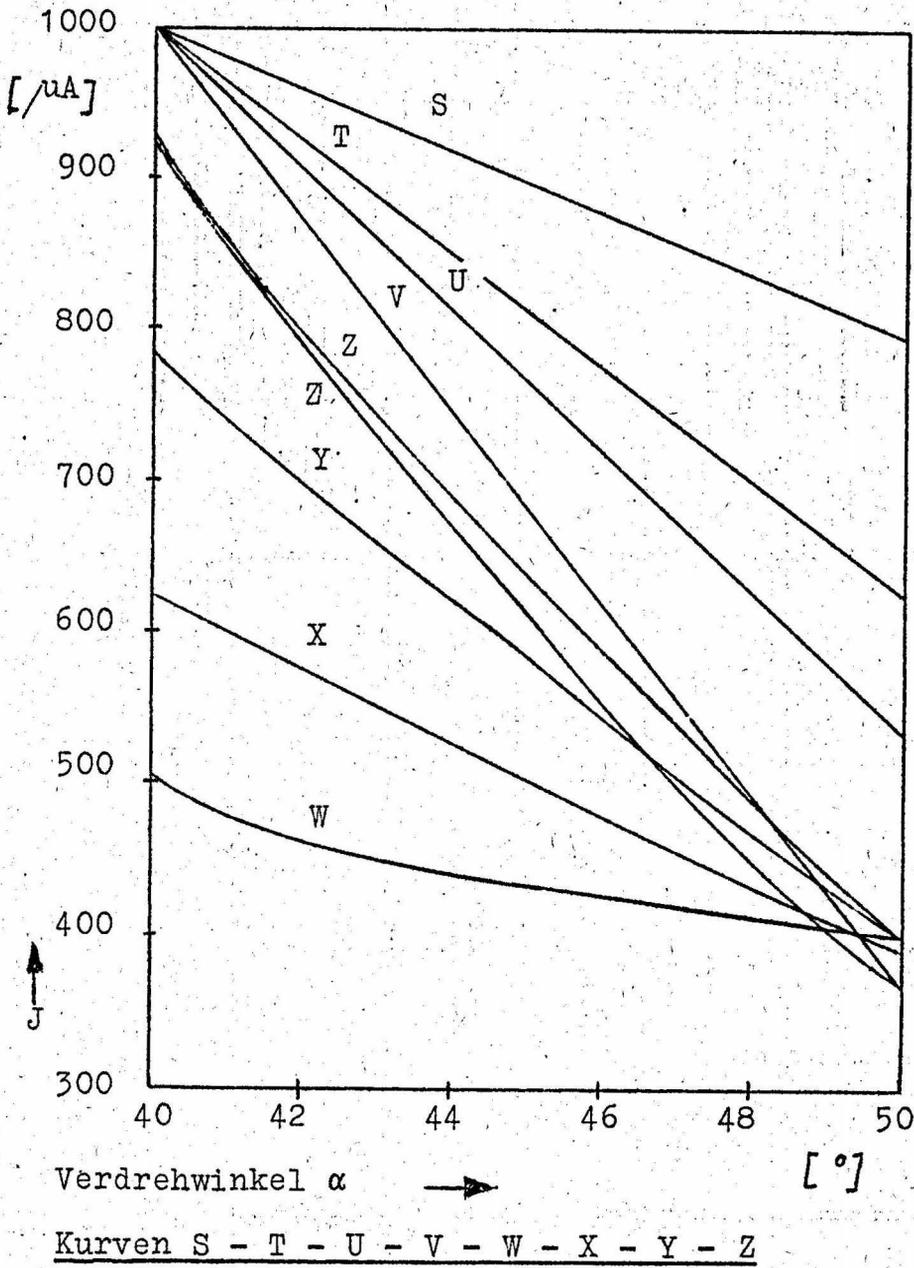


Abb. 14

Für alle diese Meßwerte gilt die Voraussetzung, daß es sich um Untersuchungen zwischen $\alpha = 40^\circ - 50^\circ$ handelt. Diese Messungen sollten nur die theoretischen Ueberlegungen bestätigen, sie sagen über die Grenze der Leistungsfähigkeit der Filterkombinationen noch nichts aus. Es ist zu erwarten, daß durch geeignete theoretische Untersuchungen Kombinationen gefunden werden können, die weit höhere Lichtänderungen je Winkeländerungen hervorrufen.

n	Theoretische Werte				Ergebnisse Meßreihe 1				Ergebnisse Meßreihe 2			
	$\frac{d\phi_n^{\#}}{d\omega_{45}}$	$\Delta n^{\#}$	Zunahme in % durch n+1 statt n Filtern	Zunahme in % gegenüber Verwendung von 2 Filtern	Steigg. / $\mu A/1^{\circ}$ entspr. $\frac{d\phi_n^{\#}}{d\omega_{45}}$	$\Delta n^{\#}$	Zunahme in % durch n+1 statt n Filtern	Zunahme in % gegenüber Verwendung von 2 Filtern	Steigg. / $\mu A/1^{\circ}$ entspr. $\frac{d\phi_n^{\#}}{d\omega_{45}}$	$\Delta n^{\#}$	Zunahme in % durch n+1 statt n Filtern	Zunahme in % gegenüber Verwendung von 2 Filtern
2	- k·2			-	20			-	15			-
		- k·2	100			15	75			13	86	
3	- k·4			100	35			75	28			86
		- k·2	50			15	43,7			12	43	
4	- k·6			200	50			150	40			166
		- k·2	33,3			15	30			15	37	
5	- k·8			300	65			225	55			266

Abb. 15

5. Zusammenstellung und Diskussion der Ergebnisse

Sämtliche Kurven enthalten einen sehr weiten Bereich guter Linearität. Dieser Bereich erstreckt sich über einen Verdrehwinkel von ungefähr 10° , also weit mehr, als für die geplante Anwendung erforderlich ist. Damit ist die Eignung des Meßprinzips als Gebersystem mit linearer Kennlinie für die Messung mechanischer Schwingungen nachgewiesen.

Die Ergebnisse der Versuche 4ba und 4bB

Bezeichnung	Spg. U(V)	Wdst. R(k Ω)	Zahl d. Lampen	Max. Steigg. $\mu\text{A}/5^\circ$	Zahl d. Filter	
B	70	5	1	210	4	
C	100	5	1	220		
D	45	10	1	160		
E	70	10	1	250		
F	100	10	1	340		
G	100	50	1	185		
H	45	50	1	80		
J	100	50	1	210		
K	45	ohne	1	200		5
L	100	10/3	1	300		
M	100	5	1	320		
N	45	10	1	150		
O	45	10	2	150		
P	100	10	1	280		
Q	100	10	2	280		
R	100	50	1	220		

Abb. 16

Die Steilheit der Kurven und damit die Empfindlichkeit des Gebersystems ist bei endgültigen Anordnungen abhängig von dem photoelektronischen Empfänger- und Verstärkersystem. Wie einleitend zu Abschnitt 4 bereits dargelegt wurde, sollten diese Kurven nur vergleichende Ergebnisse liefern, um allein die Wirkung der Filterkombinationen zu untersuchen. In der

Zusammenstellung Abb. 16 sind die maximalen Steigungen der aufgenommenen Kurven neben den Systemkonstanten angegeben.

Die Ergebnisse der Versuchsreihe 4by, die in Abb. 17 dargestellt sind, zeigen in sehr guter Uebereinstimmung mit der Theorie, daß bei Hinzunahme je eines weiteren Filters die Zunahme der Lichtänderung je Winkeländerung annähernd konstant ist.

Die Ergebnisse der Versuche 4by

Bezeichnung	Max. Steigung	Zahl d. Filter	
S	20 $\mu\text{A}/1^\circ$	2	
T	35 "	3	
U	50 "	4	Spannung für alle Messungen $U(\text{V}) = 100$
V	65 "	5	
W	15 "	2	
X	28 "	3	
Y	40 "	4	
Z	50-60 "	5	

Abb. 17

6. Anpassung von Lichtquelle, Filter und photoelektronischem Bauelement aneinander

a) Die photoelektronischen Bauelemente

Bei der Verwendung verschiedenartiger photoelektronischer Bauelemente ist darauf zu achten, daß die Ph.-B. entsprechend der Art der chemischen Zusammensetzung verschiedene Lichtwellenbereiche haben, in denen ihre Empfindlichkeit maximal ist.

Uebersicht über die maximale spektrale Empfindlichkeit verschiedener Ph.-B.

Basiselement	Lichtwellenlänge für maximale Empfindlichkeit in m/μ
Photokathoden:	
Cadmium	280
Natrium	380
Cäsium	680
Rotempfindliche Kunstschicht	850
Photowiderstände:	
Selen	700
Selen-Tellur	820
Thalofid	1000
Cadmiumsulfid	480
Cadmium-Selenid	750
Sperrschichtzellen:	
Selen-Photoelement	580
Cu ₂ O-Hinterwandzelle	640
PbS-Detektorzelle	1050
Photodioden und Transistoren:	
Germanium	1500
Silizium	800
Multipliiert u.a.	500

b) Die Polarisationsfilter

Entsprechend der spektralen Empfindlichkeit der in einer Anlage vorgesehenen Ph.-B. ist es nötig, das Licht möglichst in dem Wellenlängenbereich polarisieren zu können, für den die maximale Empfindlichkeit vorhanden ist.

Eine Anzahl verschiedener Filtertypen steht zur Verfügung,

mit denen diese Forderung zu erfüllen ist. Es sollen hier die Filterkennlinien für 2 Arten von Polarisationsfiltern angegeben werden, die für alle gebräuchlichen Ph.-B. verwendet werden können. Die Kennlinien stellen die Durchlässigkeit für Licht in Prozent dar. Dabei wird angegeben, ob es sich um einen Filter allein handelt, auf den nichtpolarisiertes Licht fällt oder ob es sich um ein Filterpaar handelt, das in paralleler bzw. gekreuzter Stellung der Polarisationsrichtungen angeordnet ist.

Filter Typ 1:

Es handelt sich hier um eine Käsemann-UV-Polarisationsfolie, die in dem Bereich von 280 bis 750 m/μ fast vollständig polarisiert. Die Lichtdurchlässigkeit in Parallelstellung ist aber im Bereich kurzer Lichtwellenlängen sehr gering. Bei Verwendung einer starken Lichtquelle kann man auch in dem Bereich von 280 - 400 m/μ gute Ergebnisse erwarten, weil die Durchlässigkeit bei gekreuzter Stellung der Filter in diesem Gebiet nur einige Prozent beträgt. Bei Lichtwellenlängen von über 750 m/μ ist dieser Filtertyp nicht mehr verwendbar. Man erkennt an dem Verlauf der Kennlinien (Abb. 18), daß für Lichtwellenlängen über 750 m/μ die Durchlässigkeit in gekreuzter Stellung sehr groß wird und sogar noch die Durchlässigkeit in Parallelstellung übertrifft, also eine totale Unwirksamkeit im Sinne der hier geforderten Bedingungen.

Filter Typ 2:

Handelt es sich um ein Ph.-B., dessen maximale Empfindlichkeit über 750 m/μ liegt, so wird der Filter Typ 2 verwendet. Dieses ist der Polaroid-HR-Filter, ein Infrarot-Polarisator. Seine Anwendbarkeit ist gegeben für den Bereich von 750 m/μ bis zu 2700 m/μ . Wie aus den Kennlinien Abb. 19 zu ersehen ist, liegt die Durchlässigkeit für diese Filter wesentlich geringer als für die Filter vom Typ 1. Dieser Nachteil ist aber durch Verwendung einer stärkeren Lichtquelle zu übergehen, zumal die gebräuchlichen Glühlampen in diesem Lichtwellenbereich ein besonders großes Emissionsvermögen besitzen. Entscheidend ist aber die Kennlinie, die für gekreuzte Filterstellung gilt. Sehr günstig ist diese, da sie in dem Gebiet um 1000 m/μ

Kennlinien für Polarisationsfilter

+ Durchlässigkeit in Kreuzstellung
Durchlässigkeit in Parallelstellung

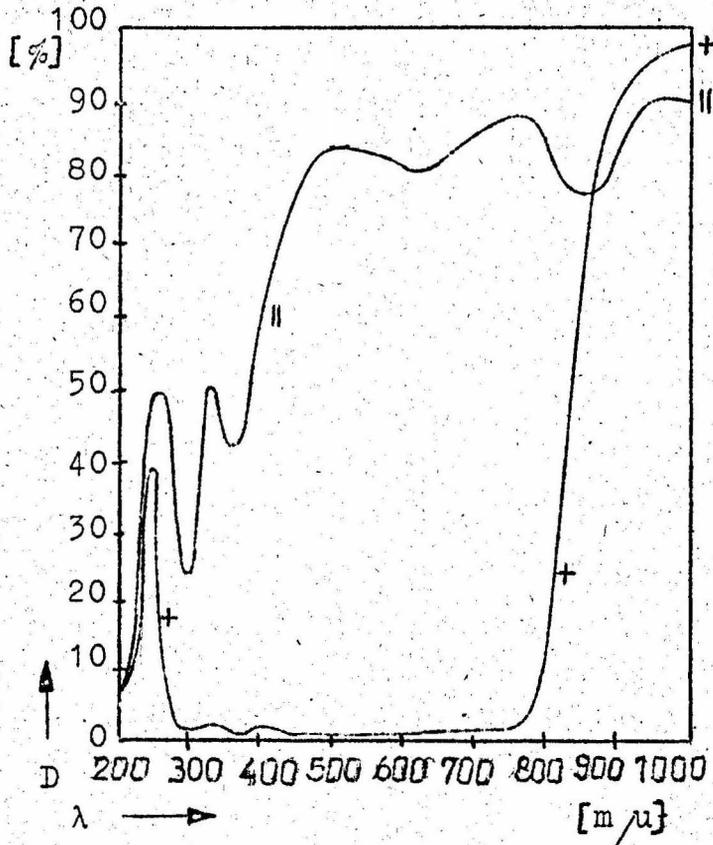


Abb. 18

Typ 1 KS - UV - Polarisationsfolie

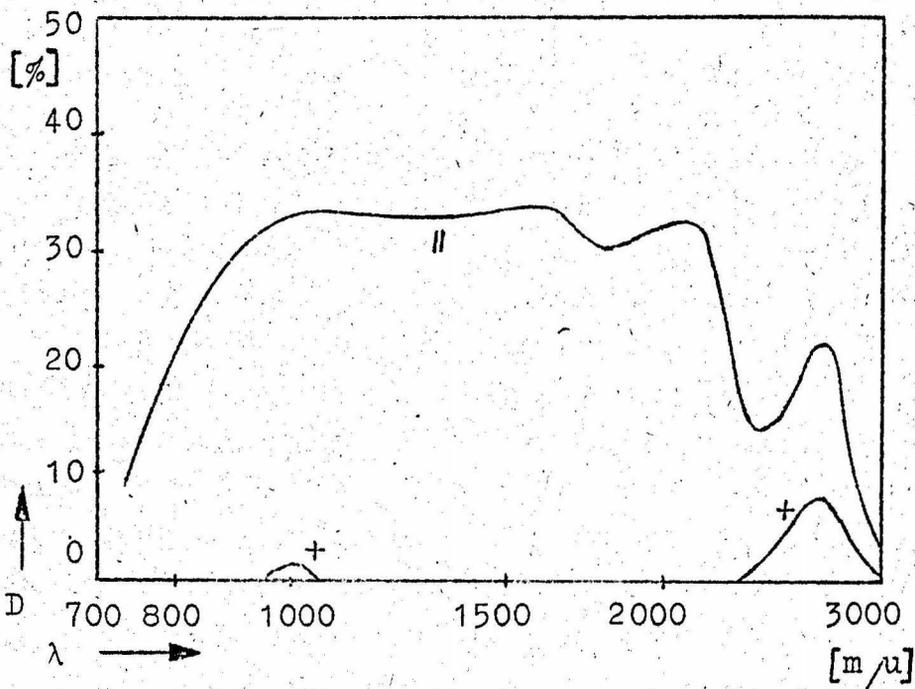


Abb. 19

Typ 2 Polaroid - HR - Filter

nur ungefähr 2 % Durchlässigkeit aufweist und in dem Gebiet zwischen 2400 bis 2700 m/ μ ungefähr 8 %. Für alle anderen Bereiche wird die Durchlässigkeit in gekreuzter Stellung zu Null.

Dieser Filtertyp umfasst gerade den Bereich, der für die hauptsächlich in Frage kommenden Ph.-B. günstig ist, wie z.B. die Ph.-B. auf Germanium-Basis, deren maximale Empfindlichkeit bei ca. 1500 m/ μ liegt.

Die Darstellung Abb. 20 soll anschaulich zeigen, welche Polarisationsfilter man für die verschiedenen Photoempfänger verwendet.

c) Die Lichtquellen

Als Lichtquellen kommen solche Lampen in Frage, die in dem Bereich der maximalen Empfindlichkeit des jeweils verwendeten Ph.-B. ein möglichst großes Emissionsvermögen besitzen. Da es sich bei fast allen hierfür besonders geeigneten Ph.-B. um Exemplare handelt, die eine sehr kleine lichtempfindliche Fläche besitzen, - wie z.B. Photowiderstand, Photodiode, Phototransistor - wird man unter Verwendung einer Optik die Lichtquelle auf den Empfänger abbilden. Die Abbildung setzt aber voraus, daß die Lichtquelle eine leuchtende Fläche hat, die erstens nicht sehr groß und zweitens vom möglichst gleichmäßiger Leuchtdichte ist.

Als zweckmäßig hinsichtlich der letztgenannten Bedingung und auch hinsichtlich der spektralen Zusammensetzung des ausgesandten Lichtes zeigen sich Lampen mit glühenden Festkörpern (Wendel, Bänder). Bei Benutzung einer Optik zur Abbildung der Lichtquelle auf den Photoempfänger muss die Lichtquelle möglichst homogen sein. Eine eng gewickelte Wendel oder besser ein kontinuierliches glühendes Band eignen sich dafür am besten. Je kleiner die leuchtende Fläche der Lichtquelle bei konstanter Leistung der Lampe, um so größer wird die Leuchtdichte und um so homogener wird die Leuchtdichteverteilung über die leuchtende Fläche sein.

Als besonders günstig in Bezug auf die Homogenität der Leucht-

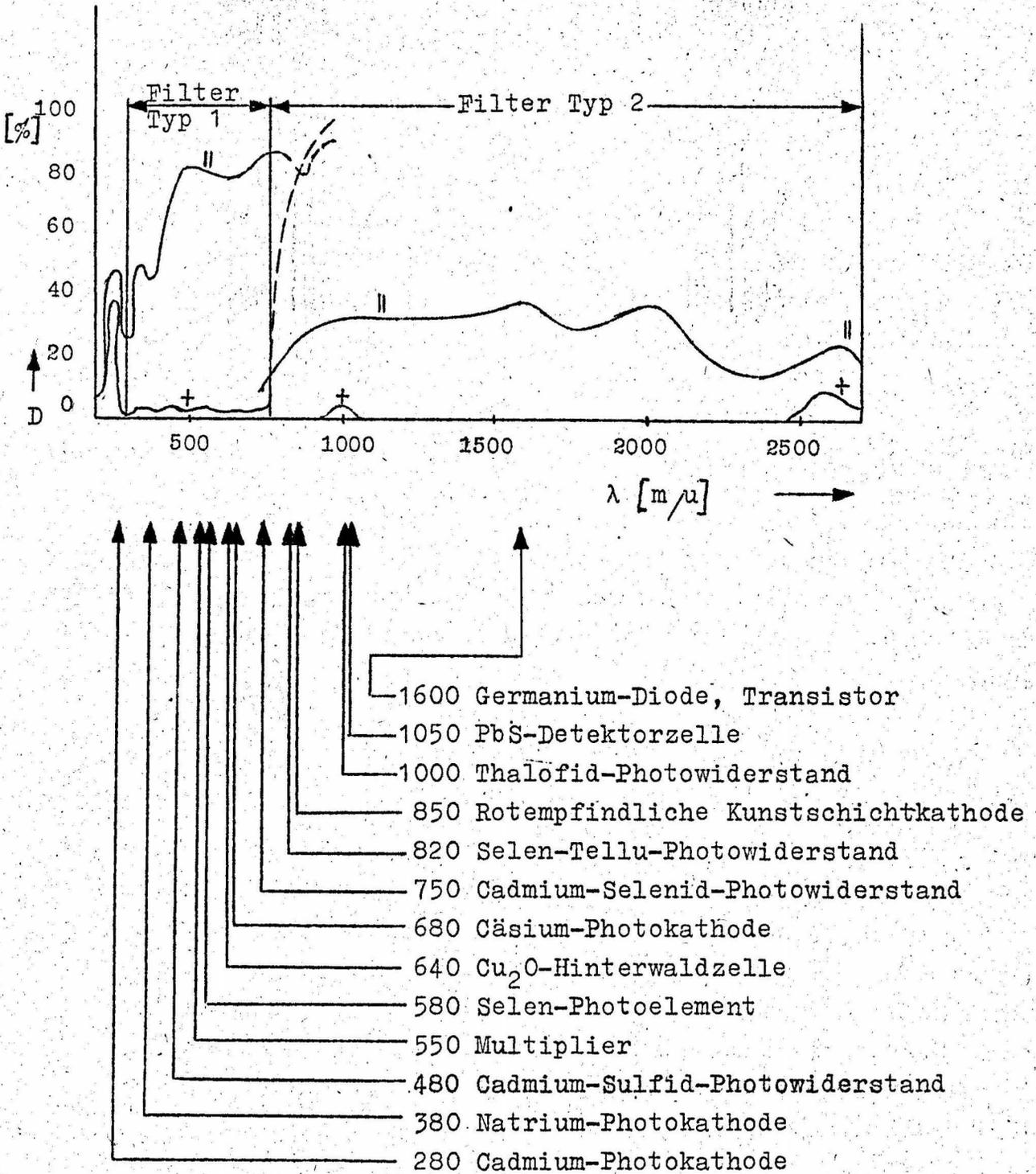


Abb. 20 Darstellung der Polarisationsfilter-Kennlinien in Zusammenhang mit den Bereichen der maximalen Empfindlichkeit der verschiedenen photoelektronischen Bauelemente

dichte erweist sich eine von der Firma Philips hergestellte Mikroprojektionslampe. Als Lichtquelle ist ein materielles Band vorhanden, dessen Abmessungen $9,5 \times 2,1$ mm sind. Die Leistungsaufnahme der Lampe ist 100 Watt bei einer Spannung von 6 Volt. Bei Verwendung dieser Lampe ist es bequem möglich, eine Optik zu verwenden; und man hat dabei den Vorteil, daß der Empfänger mit seiner meist sehr kleinen lichtempfindlichen Fläche trotz kleiner möglicher Ungenauigkeiten in der mechanischen Anordnung immer gleichmäßig bestrahlt wird.

Im Gegensatz dazu besteht bei einer Wendellampe die Möglichkeit, daß der meist sehr schmale lichtempfindliche Bereich eines photoelektronischen Bauelementes in Folge kleiner mechanischer Ungenauigkeiten von der Abbildung des Wendeldrahtes (mit sehr hoher Leuchtdichte) oder von der Abbildung des Wendelzwischenraumes (mit geringerer Leuchtdichte) getroffen wird.

Bei Verwendung der Photoempfänger ohne Optik ist es allerdings gleichgültig, ob Wendel- oder Bandlampen verwendet werden. Dabei kommt es einzig auf die ausgestrahlte Leistung der Lampe bzw. Lampen an.

Die spektrale Energieverteilung der verwendeten Lampen richtet sich nach der Temperatur der Lichtquellen. Nach dem Wien'schen Verschiebungsgesetz liegt das Maximum der Energieverteilungskurve weiter im Bereich des kurzwelligigen Lichtes, wenn die Temperatur erhöht wird. Wie aus der Darstellung der spektralen Energieverteilung (Abb. 21) zu ersehen ist, strahlen Lampen, die mit einer Temperatur von 2000°K leuchten, gerade in dem Bereich zwischen $1 - 2 \mu$ Lichtwellenlänge besonders stark. Das ist z.B. besonders günstig für die Verwendung von Ph.-B. auf Germanium-Basis, deren maximale Empfindlichkeit gerade bei Lichtwellenlängen von $1,6 \mu$ liegt.

Auch wenn die maximale Empfindlichkeit des vorgesehenen Ph.-B. beispielsweise bei einer Lichtwellenlänge von 2μ liegt, wird man mit einer möglichst hohen Leuchttemperatur arbeiten. Aus der Darstellung (Abb. 21) ist zu ersehen, daß zwar einer Temperatur von 1500°K gerade ein Maximum bei 2μ entspricht, daß der Absolutwert der Strahlungsenergie bei 2μ aber wesentlich geringer ist als die Energie, die in dem gleichen

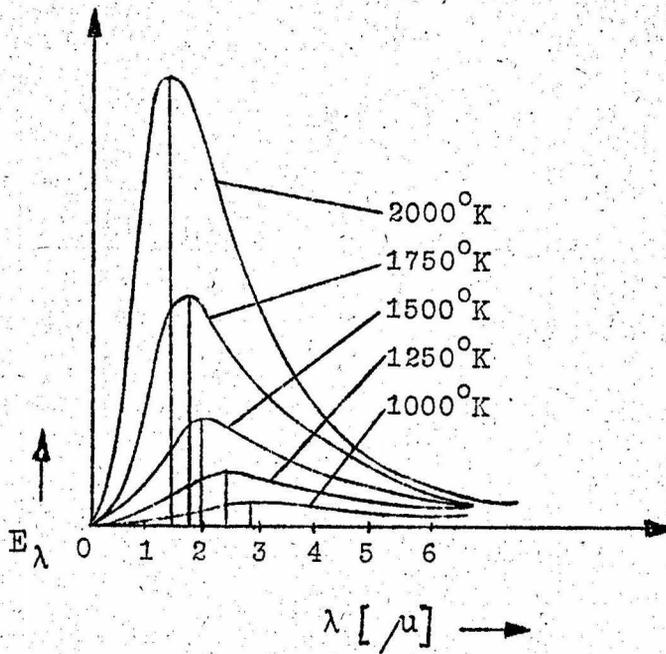


Abb. 21 Spektrale Energieverteilung eines glühenden festen Körpers

Lichtwellenbereich von einer heißeren Lichtquelle ausgesandt wird. Man nimmt hierbei aber in Kauf, daß in anderen Lichtwellenbereichen mehr Energie ausgesandt wird als erforderlich oder gewünscht ist.

Durch geeignetes Zwischenschalten von Selektiv- oder Stufenfiltern kann man dann die für den Photoempfänger ungünstigen Lichtwellenbereiche absorbieren.

d) Die gegenseitige Anpassung

Aus der vorangegangenen Beschreibung der einzelnen bei diesem Meßprinzip verwendeten Elemente geht deutlich hervor, daß eine entscheidende Bedeutung der richtigen Anpassung aneinander zukommt. Bei Verwendung eines bestimmten Photoempfängers ist darauf zu achten, daß einerseits die Polarisationsfilter gerade in dem Bereich der maximalen Empfindlichkeit möglichst einwandfrei und vollständig polarisieren und daß andererseits die Lichtquelle gerade in dem Bereich möglichst viel Energie ausstrahlt.

Im folgenden soll für 2 sehr unterschiedliche praktisch wichtige Fälle die Anpassung beschrieben werden. Im ersten Falle handelt es sich um einen Photoempfänger, der sein Empfindlichkeitsmaximum im sichtbaren Lichtwellenbereich hat; im zweiten Falle um einen solchen, dessen Empfindlichkeitsmaximum im Ultraroten liegt.

da) Die Anpassung für den sichtbaren Wellenbereich

Es soll als Photoempfänger ein CdS-Photowiderstand benutzt werden. Seine maximale spektrale Empfindlichkeit liegt bei $0,48 \mu$. Den prinzipiellen Verlauf der spektralen Empfindlichkeit zeigt die Darstellung 22c.

Die geeigneten Polarisationsfilter hierfür sind Filter vom Typ 1, deren Kennlinien in Abb. 18 dargestellt sind. Diese Filter polarisieren Licht, das auf diesen Photowiderstand besonders wirksam ist, fast vollständig. Als Lichtquelle soll eine Glühlampe mit einer Temperatur von 2000°K verwendet werden, deren spektrale Energieverteilung aus Abb. 21 zu ersehen ist.

Die qualitative Gegenüberstellung der Kennlinien der drei anzupassenden Elemente zeigt die Abb. 22.

Betrachtung des langwelligen Strahlungsbereiches:

Aus der Gegenüberstellung ist zu sehen, daß entsprechend Abb. 22a von der Lichtquelle ein erheblicher Anteil der Energie mit Lichtwellenlängen von mehr als 500μ ausgestrahlt wird. Die Filterkennlinien Abb. 22b zeigen, daß der Lichtanteil mit $\lambda > 750 \mu$ gar nicht mehr durch die Filter beeinflusst wird, also ungehindert hindurchtreten kann und auf den Empfänger gelangt. Aus der Kennlinie für den Empfänger Abb. 22c ist aber zu ersehen, daß Licht mit Wellenlängen von $\lambda > 550 \mu$ gar keinen Einfluß auf den Photowiderstand hat. Deswegen braucht man diesen starken aber unwirksamen Anteil des langwelligen Lichtes nicht herauszufiltern.

Es ist jedoch sinnvoll, sich zu überlegen, ob man diesen Anteil des Lichtes mit großen Wellenlängen nicht deswegen herausfiltert, weil ja Photoempfänger besonders temperatur-

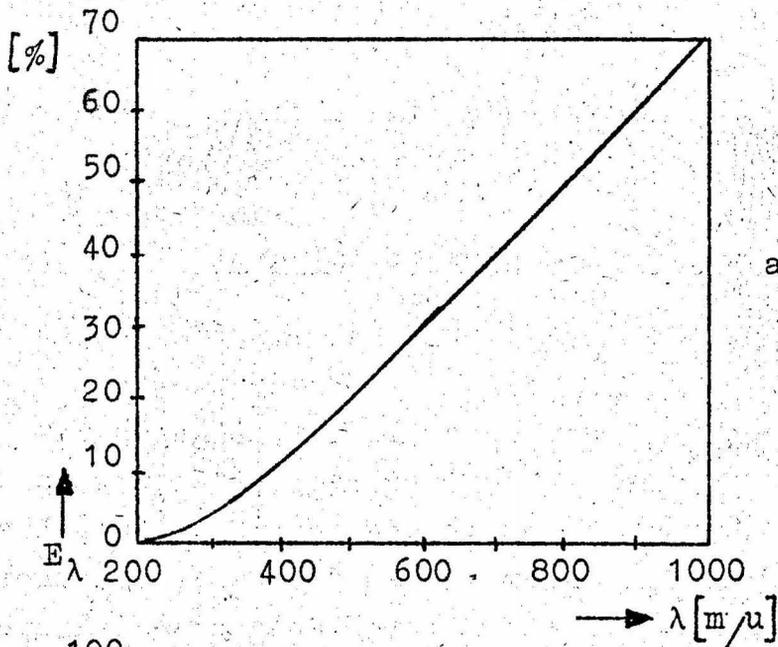
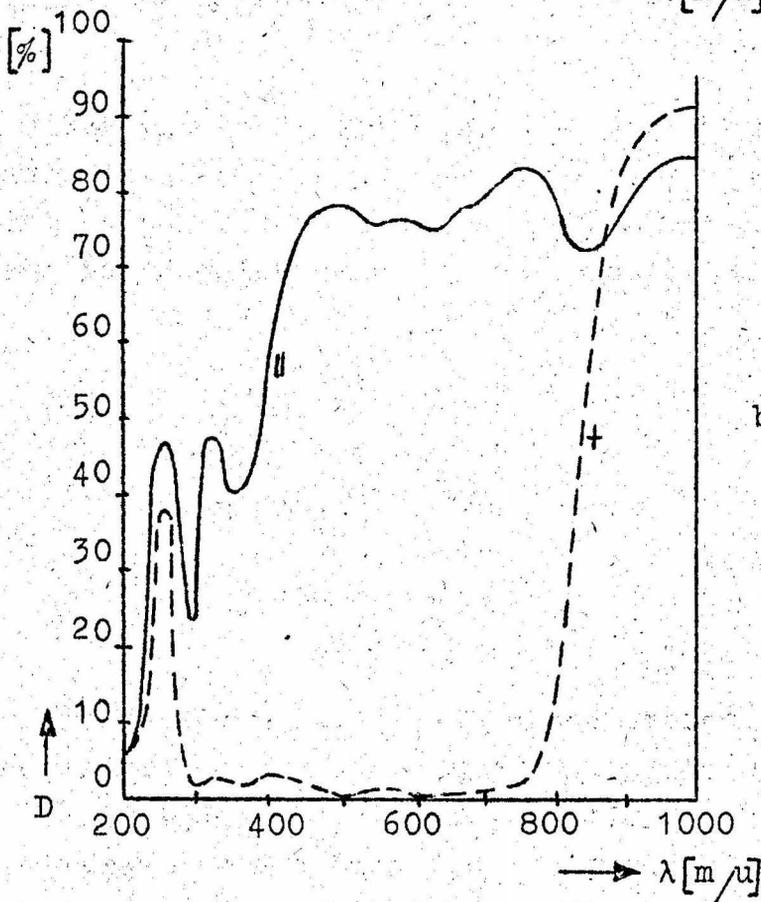
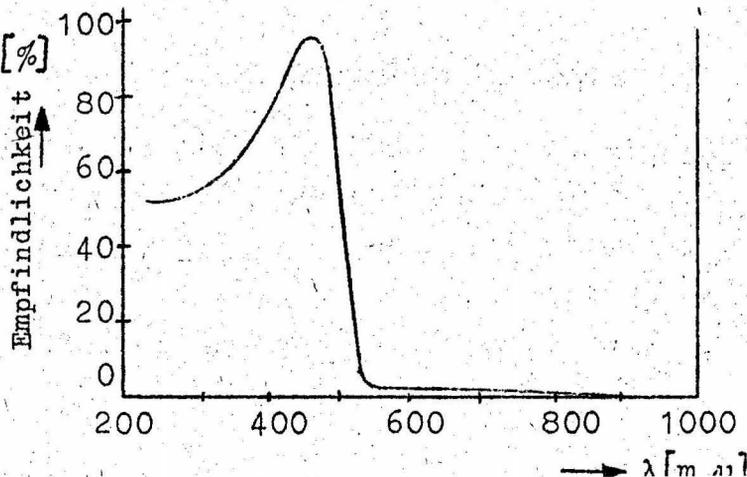


Abb. 22

a) Spektrale Energieverteilung der Lichtquelle
Maximum = 100 %



b) Spektrale Durchlässigkeit der Polarisationsfilter
|| Parallelstellung
+ Kreuzstellg.



c) Spektrale Empfindlichkeit des Photoempfängers
CdS-Photowiderstand

abhängig sind. Der in diesem Falle völlig unnötige Anteil mit $\lambda > 550 \text{ m}\mu$ würde den Empfänger nur erhitzen.

Betrachtung des kurzwelligen Strahlungsbereiches:

Die Betrachtung der Abb. 22b zeigt, daß bei Lichtwellenlängen von $\lambda < 270 \text{ m}\mu$ die Durchlässigkeit der Filter zwar gut aber die Polarisationswirkung sehr gering ist. Dagegen ist für $\lambda \approx 300 \text{ m}\mu$ die Durchlässigkeit in Parallelstellung schlecht, obwohl sehr günstige Polarisationswirkung vorhanden ist. Die Abb. 22c zeigt aber, daß in diesem Gebiet die Empfindlichkeit noch fast 60 % beträgt. Die Emission der Lichtquelle ist nach Abb. 22a nur sehr gering.

Es besteht also die Möglichkeit, daß in dem Bereich $\lambda \approx 270 \text{ m}\mu$ Licht auf den Empfänger trifft, das durch die Polarisationsfilter kaum beeinflusst wird und darum dem Meßvorgang gar nicht dient, sondern nur eine annähernd konstante Beleuchtung des Empfängers darstellt.

Man könnte durch einen Stufenfilter in diesem Falle alles Licht mit $\lambda < 280 \text{ m}\mu$ herausfiltern, um alles durch die Polarisationsfilter hindurchtretende Licht der Polarisation und damit der Modulation zu unterwerfen. Dabei würde man aber durch die Absorption des Filters in den langwelligen Bereichen den gesamten Lichtstrom reduzieren.

Die durchgeführten Versuche haben gezeigt, daß die Anbringung eines solchen Filters zwischen Lichtquelle und Polarisationsfiltern nicht nötig ist, weil ja auch die kleinen Wellenlängen wenigstens teilweise moduliert werden und andererseits die kurzwellig ausgesandte Energie der Lichtquelle sehr gering ist.

dB) Die Anpassung für den ultraroten Wellenbereich

Es soll als Photoempfänger eine Photodiode TP 50 (auf Germanium-Basis) verwendet werden. Seine maximale spektrale Empfindlichkeit liegt bei $1,6 \mu$. Den Verlauf der spektralen Empfindlichkeit zeigt die Darstellung Abb. 23c.

Als Polarisationsfilter kommen in diesem Falle solche vom Typ

2 in Frage, deren Kennlinien in 23b dargestellt sind.

Als Lichtquelle werde wieder eine Lampe mit einer Leuchttemperatur von 2000°K verwendet. Die Energieverteilung für den verwendeten Lichtwellenbereich ist in Abb. 23a dargestellt.

Die Gegenüberstellung der Kennlinien Abb. 23 zeigt, daß die Glühlampe gerade bei $\lambda \approx 1,6 \mu$ die maximale Energie aussendet und daß andererseits bei $\lambda \approx 1,6 \mu$ das Maximum der spektralen Empfindlichkeit des Photoempfängers liegt. Aus Abb. 23b ist zu ersehen, daß in diesem Gebiet vollständig polarisiert wird, also bei Dunkelstellung kein Licht durch die Filter hindurchtritt.

Licht mit $\lambda > 1,6 \mu$ wird in Kreuzstellung durch die Filter kaum hindurchgelassen außer in einem kleinen Gebiet bei $\lambda \approx 2,75 \mu$. Dieses Licht ist aber nach Abb. 23c auf den Empfänger gar nicht wirksam und stört deswegen nicht. Nach Abb. 23b gibt es bei $\lambda \approx 1 \mu$ einen kleinen Bereich, in dem nicht vollständig polarisiert wird. Es fällt also Licht auf den Empfänger, welches durch die mechanische Schwingung nicht vollständig moduliert wird. Diese Lichtmenge wird aber so klein sein, daß man die störende Wirkung in Kauf nimmt und darauf verzichtet, den gesamten Lichtstrom durch Selektivfilter zu reduzieren. Für kleine Lichtwellenlängen ist die Emission der Lampe verhältnismäßig gering, ebenso die Empfindlichkeit des Empfängers. Die Polarisationsfilter lassen Licht mit diesen kleinen Wellenlängen kaum hindurch.

Diese Kombination von Lichtquelle, Polarisationsfilter und Empfänger erweist sich als ganz besonders günstig.

7. Der konstruktive Aufbau der Meßgeräte

Dem Meßprinzip entsprechend müssen alle nach diesem Verfahren zu messenden mechanischen Schwingungen derart auf die Polarisationsfilter wirken, daß entsprechend der mechanischen Bewegung Verdrehungen der Filter gegeneinander erfolgen.

Bei der Messung von Drehschwingungen ist diese Forderung direkt erfüllbar, weil es sich in diesem Falle ja um Verdrehbewegungen handelt.

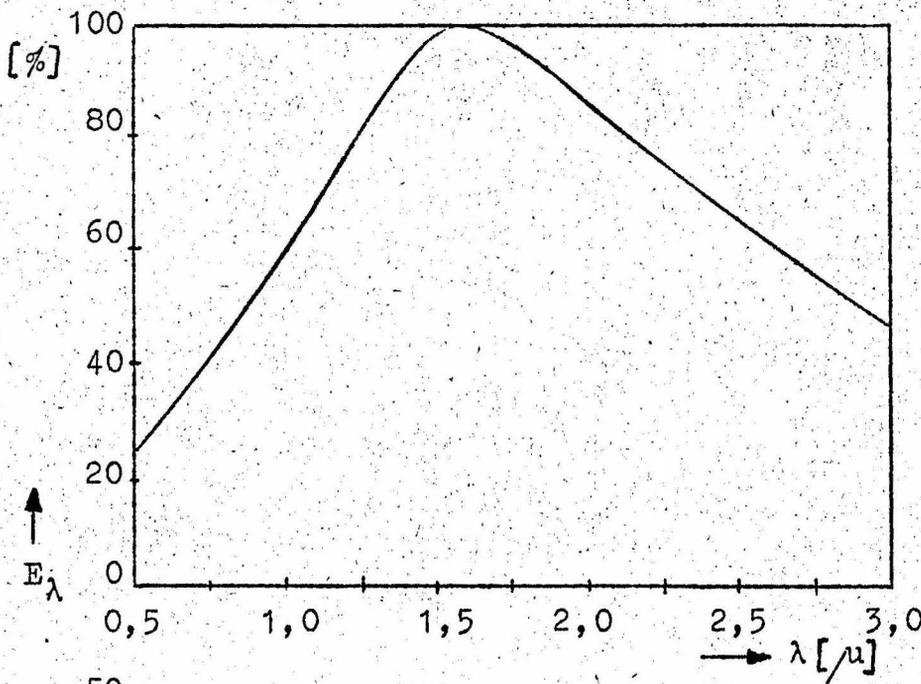
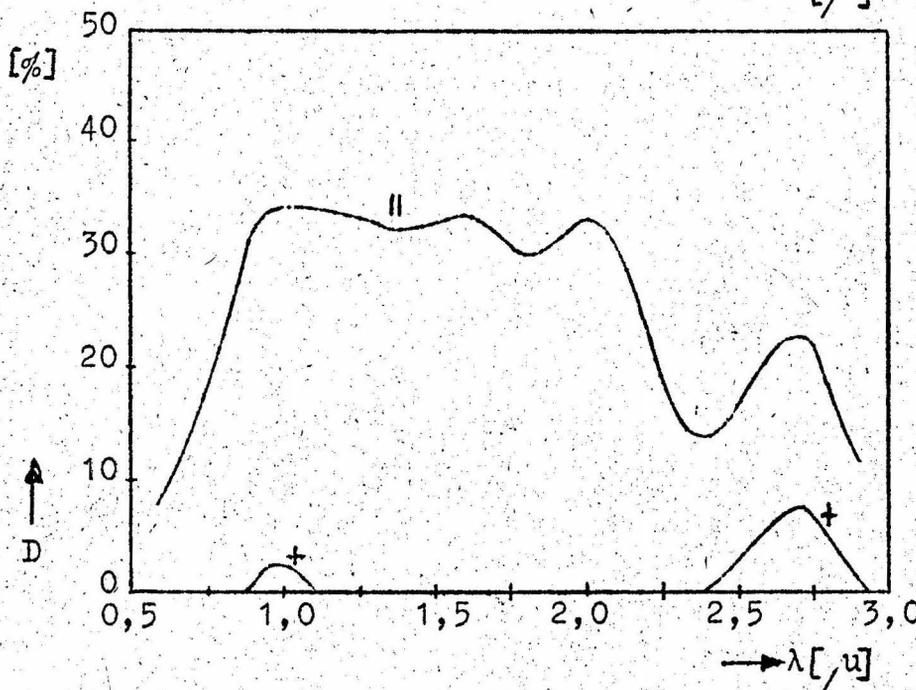


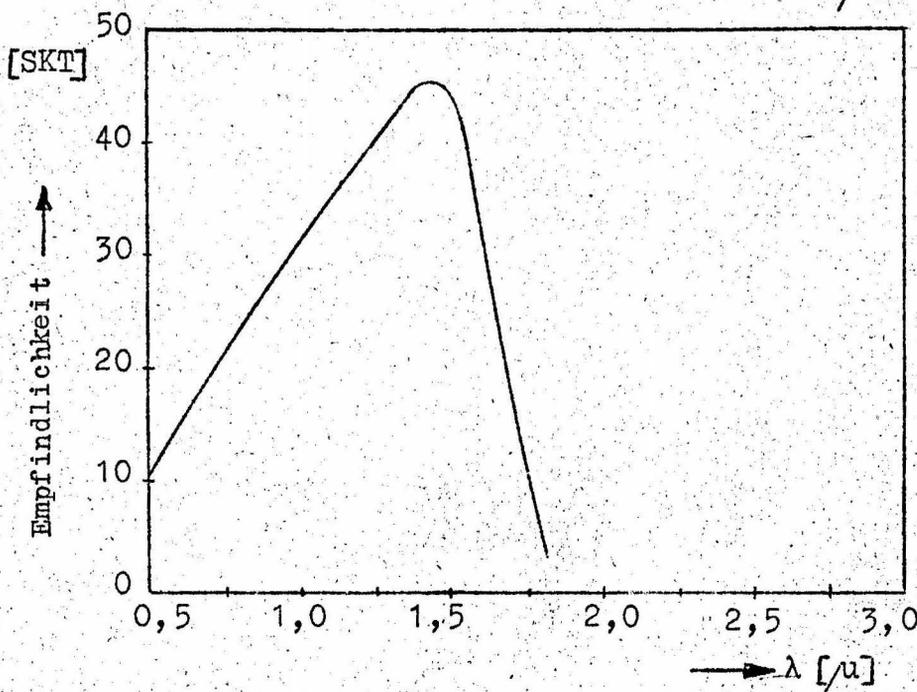
Abb. 23

a) Spektrale Energieverteilung der Lichtquelle



b) Spektrale Durchlässigkeit der Polarisationsfilter

|| Parallelstellg.
+ Kreuzstellung



c) Spektrale Empfindlichkeit des Photoempfängers Photodiode TP 50

Für die Messung von translatorischen Schwingungen muß eine Ueberführung der Translationsbewegung in eine Rotationsbewegung vorgenommen werden.

a) Die Messung von Drehschwingungen

Für die Messung von Drehschwingungen werden die Polarisationsfilter entsprechend Abb. 24 so angeordnet, daß ein Filter P_1 an dem auf Drehschwingungen zu untersuchenden Teil T_1 starr befestigt wird, während der andere Filter P_2 seismisch an Teil T_1 befestigt wird. D.h., der Filter P_2 befindet sich in einem seismischen Ring R und macht infolge der Trägheit des Ringes und der elastisch weichen Blattfederverbindung B von R mit T_1 dessen Schwingungen nicht mit.

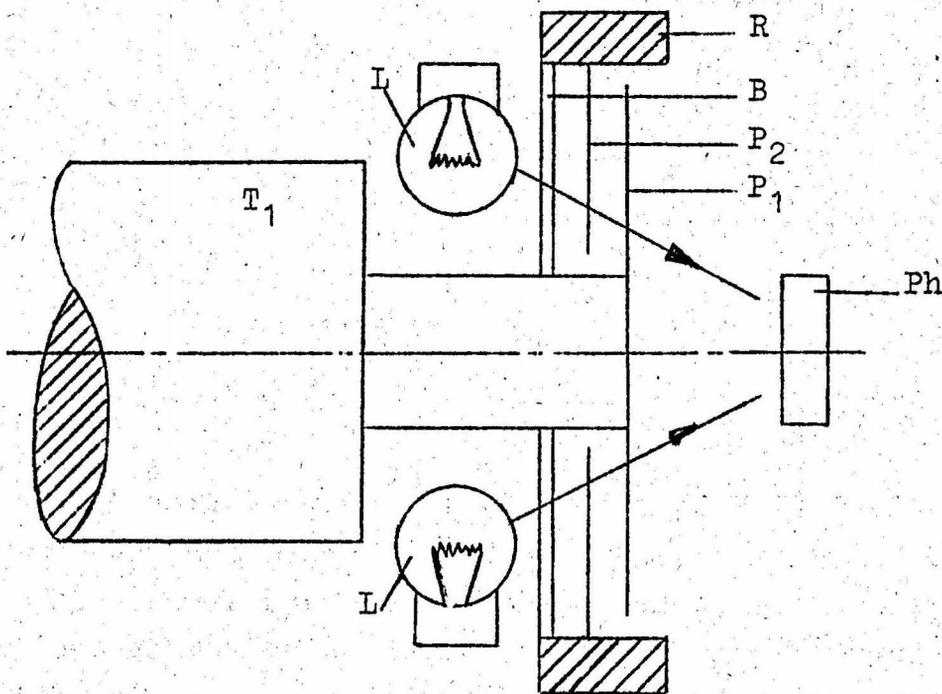


Abb. 24 Prinzip der Meßanordnung zur Messung von Drehschwingungen

Die den mechanischen Schwingungen von Teil T_1 entsprechenden Relativverdrehungen der Filter P_1 und P_2 gegeneinander modulieren nach den dargestellten Lichtmodulationsgesetzen die von den Lampen L ausgesandten durch sie hindurchtretenden Lichtstrahlen

und die auf den Photoaufnehmer Ph fallende Lichtmenge wird zur Anzeige oder Registrierung verwandt.

Durch geeignete konstruktive Anordnung ist man in der Lage, auch dann Drehschwingungen zu messen, wenn kein freies Wellenende am Meßobjekt zur Verfügung steht.

b) Die Messung von Translationsschwingungen

Die zu messende translatorische Schwingung muß in eine rotatorische Schwingung umgeformt werden. Das wird durch die in Abb. 25 dargestellte Anordnung ermöglicht.

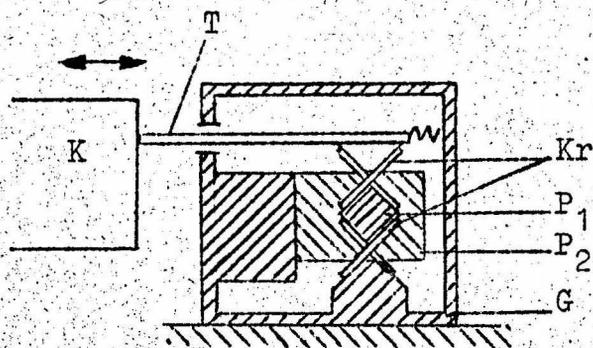


Abb. 25 Prinzip der Meßanordnung zur Messung von translatorischen Schwingungen

Der schwingende Teil K überträgt seine Bewegung über einen Taster T auf den Rahmen des Filters P_1 . Der Rahmen ist mit Hilfe von Kreuzfedergelenken Kr drehbar an dem Gehäuse G angebracht. Der Verdrehwinkel des Rahmens R und damit des in ihm befindlichen Filters P_1 ist (für kleine Verschiebungen) direkt proportional der translatorischen Verschiebung des Tasters T und umgekehrt proportional dem Abstand der beiden Kreuzfedergelenke. Parallel zu dem Filter P_1 wird der Filter P_2 , mit dem Gehäuse G starr verbunden, angebracht. (In Abb. 25 unterhalb der Zeichenebene).

Der senkrecht zur Bildebene der Abb. 25 liegende Strahlenverlauf ist in Abb. 26 dargestellt.

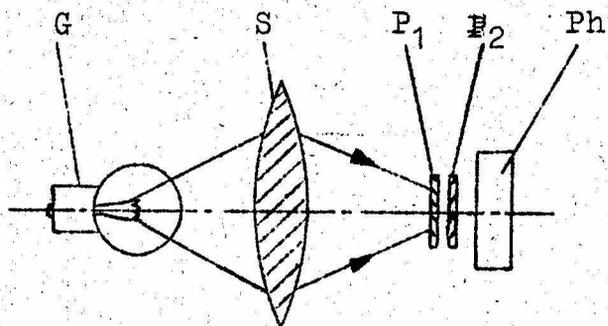
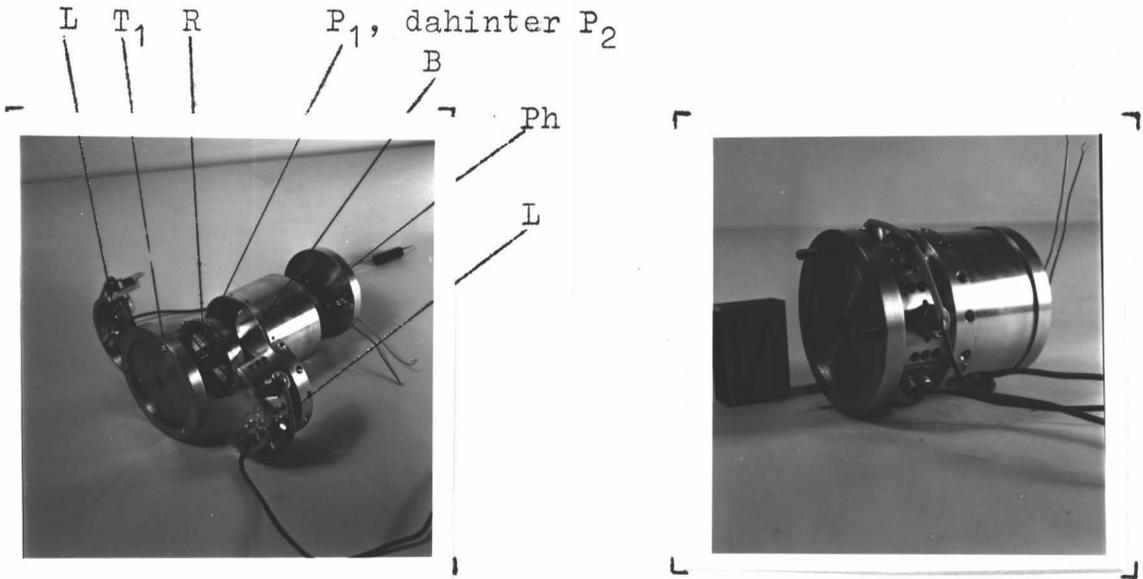


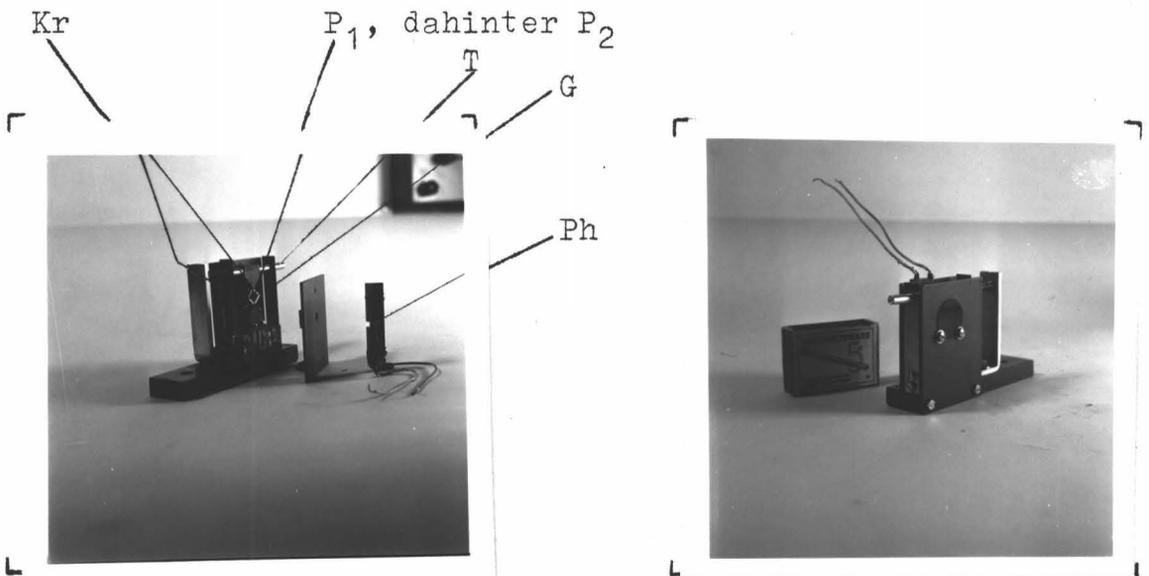
Abb. 26 Der Strahlengang

Ein von einer Glühlampe G durch beide Filter P_1 und P_2 gesandter Lichtstrom wird durch die Verdrehung der Filter gegeneinander moduliert und von dem dahinter liegenden Photoempfänger Ph aufgenommen. Für diese Anordnung verwendet man zweckmäßigerweise eine Sammellinse S, um möglichst viel des ausgesandten Lichtes auf den Empfänger zu strahlen.

Abbildungen von bereits ausgeführten Geräten



Geber für die Messung von Drehschwingungen
(Bezeichnungen siehe Abschnitt 7a)



Geber für die Messung von Translationsschwingungen
(Bezeichnungen siehe Abschnitt 7b)