

*Museum Dr. Jungfer*

HEINRICH-HERTZ-INSTITUT FÜR SCHWINGUNGSFORSCHUNG  
BERLIN-CHARLOTTENBURG

# Technischer Bericht Nr. 22

Ueber die Eignung photoelektronischer Bauelemente  
zur Messung mechanischer Schwingungen

Dipl.-Phys. H. MEWES

1 9 5 8

Ueber die Eignung photoelektronischer Bauelemente zur  
Messung mechanischer Schwingungen

Zusammenfassung

In der Abteilung Mechanik des Heinrich-Hertz-Instituts ist in letzter Zeit systematisch das Problem behandelt worden, inwieweit mechanische Schwingungen auf photoelektronischem Wege gemessen werden können. Hierbei stellte sich naturgemäss die Aufgabe, die sehr verschiedenen photoelektronischen Bauelemente auf ihre Verwendbarkeit auf das genannte Ziel zu untersuchen. In diesem Bericht werden die Resultate im Anschluss an eine grundsätzliche Darlegung des Prinzips und der Methoden der optischen Erfassung mechanischer Schwingungsvorgänge wiedergegeben, wobei sich schliesslich einige wenige Zellen und Elemente für den gedachten Verwendungszweck als sehr geeignet erwiesen.

Die Arbeit ist also als Ergänzung zu all denjenigen Untersuchungen anzusehen, die sich hinsichtlich mechanischer Schwingungen mit der Entwicklung von Messprinzipien und -anordnungen auf optisch-elektrischer Grundlage befassen.

Heinrich-Hertz-Institut für Schwingungsforschung

Der Bearbeiter

gez.: H. Mewes

(Dipl.-Phys. H. Mewes)

Der Abteilungsleiter

gez. P. Matthieu

(Prof. Dr. phil. P. Matthieu)

Der Institutsdirektor

gez. Gundlach

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

Berlin-Charlottenburg, den 20.11.1958

## Inhaltsübersicht

Einleitung

Grundsätzliches über die Möglichkeit der lichtelektrischen Messung mechanischer Schwingungen

Verhalten der verschiedenen photoelektronischen Aufnehmer

Übersicht über die Eigenschaften photoelektronischer Bauelemente

Kennlinien und genaue Eigenschaften einiger ausgewählter lichtempfindlicher Schaltelemente

Abschließende Hinweise

Übersicht über in Betracht gezogene photoelektronische Bauelemente

Literatur

## Ueber die Eignung photoelektronischer Bauelemente zur Messung mechanischer Schwingungen

### Einleitung:

Bei der Aufgabe, zeitabhängige mechanische Größen, insbesondere Schwingungsvorgänge, meßtechnisch zu erfassen, zeigt es sich im allgemeinen immer wieder, daß eine direkte Beobachtung bzw. Messung der betreffenden Vorgänge entweder gar nicht möglich ist oder aber mit einem so geringen Grad von Genauigkeit, daß eine zahlenmäßige Festlegung als Meßergebnis für die praktischen Bedürfnisse unbefriedigend bleibt. Man wird daher den in Frage stehenden mechanischen Vorgang, hier also die Schwingung, abzubilden suchen auf eine solche physikalische Größe, die der genaueren Messung leichter zugänglich ist, so daß bei bekanntem Zusammenhang zwischen dem ursprünglichen Schwingungsvorgang und dem Bildvorgang von den Meßergebnissen an diesem letzteren eindeutig geschlossen werden kann auf die Zahlenwerte, die den mechanischen Schwingungsvorgang bestimmen.

Um zwei Vorgänge aufeinander abzubilden, kann man den für bekannte physikalische Effekte gegebenen gesetzmäßigen Zusammenhang ausnutzen, wie etwa durch den Thermoeffekt Wärmegrade auf elektrische Spannungen abgebildet werden, oder wie beim Kerr-effekt zufolge einer elektrischen Feldstärke bestimmte optisch isotrope Flüssigkeiten anisotrop werden, wodurch wiederum durch Doppelbrechung der Polarisationszustand eines die Flüssigkeit durchsetzenden Lichtstrahls verändert werden kann. Einige solcher physikalischer Vorgänge sind umkehrbar, andere nicht. So ist die Umkehrung des Thermoeffekts als Peltier-Effekt bekannt, während zum zweitgenannten Effekt, dem Kerreffekt, keine Umkehrung existiert. Wie ein physikalischer Effekt in der einen Ablafrichtung dazu dienen kann, wenig zugängliche Größen durch leicht meßbare indirekt zu erfassen, kann die Umkehrung oft dazu dienen, solche Vorgänge in wohldefinierter Weise zu erzeugen.

Die herkömmlichen Methoden der Schwingungsmesstechnik bedienen sich fast ausschließlich des Induktionseffektes, um aus dem Bereich mechanischer Bewegungsvorgänge in den Bereich elektrischer

Spannungen und Ströme zu gelangen. Hier sind exakte Messungen wesentlich leichter möglich, vor allem deswegen, weil die Meßwerte weitgehend verstärkt werden können oder anderweitig - etwa durch bekannte Kompensationsschaltungen oder durch Modulation - beeinflussbar sind. Auch der piezoelektrische Effekt dient vielfach zum Bau von Schwingungsgebern. Schliesslich sei noch die Methode der Aenderung eines ohmschen Widerstandes, angewandt als Dehnungsmeßstreifen-Verfahren, genannt. Die so ermöglichte Messung mechanischer Schwingungsvorgänge auf elektrischem Wege hat sich daher gegenüber rein mechanischen Methoden, die mit Hebelübersetzungen usw. arbeiten, durchgesetzt und ist in technischer Hinsicht in einer Vielgestalt von Anwendungsformen vervollkommenet. Sowohl die elektromagnetische Induktion als auch der piezoelektrische Effekt (gleichermaßen auch der magnetostriktive Effekt) dienen umgekehrt zur Erzeugung mechanischer Schwingungsvorgänge bestimmter Amplitude und Frequenz. Auf diese allgemeinen Zusammenhänge bzw. auf die weithin bekannte Schwingungsmeßtechnik kann im Rahmen dieser Arbeit nicht näher eingegangen werden. Vielmehr soll durch das Angeführte die Grundlage und der Ansatz für weitere Betrachtungen gegeben werden.

Will man nämlich neue Wege der Schwingungsmeßtechnik erschließen, die, was für die Praxis bedeutsam ist, die bekannten Verfahren an Einfachheit und Genauigkeit möglichst übertreffen und auch gewisse Nachteile derselben vermeiden, so liegt es nahe, andere physikalische Zusammenhänge als das Induktionsgesetz und den Piezoeffekt heranzuziehen und auf ihre Anwendungsmöglichkeit zu untersuchen. In voller Allgemeinheit soll dieser Gedanke hier nicht verfolgt werden, sondern es soll vielmehr ein besonderer Effekt, nämlich der lichtelektrische Effekt, näher betrachtet werden. Wohlverstanden kann es sich nicht darum handeln, grundlegend neue Erkenntnisse über die verschiedenen Photoeffekte zu gewinnen; denn diese sind aus anderen Zusammenhängen als allgemein bekannt anzusehen. Vielmehr liegt hier die Frage der Eignung der auf diesen Effekten beruhenden photoelektronischen Bauelemente für unsere ganz besondere Problemstellung vor, die ausgehend von den seitens der Mechanik zu stellenden Forderungen beantwortet werden soll.

## Grundsätzliches über die Möglichkeit der lichtelektrischen Messung mechanischer Schwingungen:

Mechanische Schwingungen, die stets als Translationsschwingungen oder als Drehschwingungen auftreten, lichtelektrisch zu erfassen, ist direkt nicht möglich. Benutzt man jedoch die mechanische Schwingung dazu, auf irgendeine definierte Weise die Intensität eines Lichtstrahls so zu steuern, daß die Intensitätsschwankungen ein Maß für die mechanische Amplitude werden und die Lichtwechselfrequenz der mechanischen Frequenz entspricht, so kann diese Lichtschwingung als Abbild der mechanischen Schwingung nunmehr photoelektrisch aufgenommen, d.h. in gleichfrequente Strom- oder Spannungsschwankungen umgesetzt werden. Diese Größen können dann in bekannter Weise schalttechnisch, etwa zu Verstärkungszwecken, weiter behandelt und schließlich angezeigt werden. Diese optischelektrische Wandlung mechanischer Größen hat mit den oben angeführten, induktiven und piezoelektrischen Methoden den Vorteil gemeinsam, daß sie letztlich zu elektrischen Größen führt, die, wie erwähnt, besonders leicht meßpraktisch auswertbar sind. Nicht gemeinsam mit diesen Methoden hat sie die Umkehrbarkeit, da weder zu den verwendeten mechanisch-optischen Wandlungen, noch zum lichtelektrischen Effekt inverse Vorgänge existieren. So sind also die auf lichtelektrischer Grundlage beruhenden Verfahren nur zur Schwingungsmessung, nicht aber zur Schwingungserzeugung geeignet. Wegen der praktisch weitaus wichtigeren Aufgabe der Messung spielt das aber eine untergeordnete Rolle.

Das ganze Problem gliedert sich also in drei Teile:

1. Die Wandlung der mechanischen Schwingbewegung in entsprechend modulierte Licht.
2. Die Wandlung der Lichtschwingung in die Schwingung einer elektrischen Größe.
3. Die Weiterverarbeitung dieser primär erhaltenen elektrischen Größe bis zur Anzeige.

Für diesen letzten Teil bieten sich im wesentlichen die gleichen Verfahren an, wie sie sich auch bei den herkömmlichen Wegen als geeignet herausgestellt haben, wie etwa die Modulation auf eine Trägerfrequenz, Verstärkung, Wandeln von Strom in Spannung und umgekehrt, Benutzung von Brückenschaltungen zur Kompensation von Störeffekten usw. Die hier liegenden Probleme stehen nicht

im Vordergrund dieser Untersuchungen. Auch die Wege, die als Lösung des ersten Teils gangbar sind, sollen hier nur soweit angeführt werden, als sie zum Gesamtverständnis wichtig sind. Eine vollständige Anführung bzw. eine genaue Analyse von Vor- und Nachteilen muß als nicht in den engeren Rahmen des Themas gehörend an anderen Orte erfolgen.

Ein einfacher Weg, das Licht zu steuern, besteht darin, denjenigen Teil des schwingenden Gebildes, dessen Verhalten untersucht werden soll, über ein Hebelsystem oder eine andere Anordnung mit einer stetig verstellbaren Blende (Fenster) zu koppeln, so daß sich die Blendenöffnung im Rhythmus der Schwingungen verändert und dadurch die Stärke eines hindurchtretenden Lichtstrahls variiert wird. Es kann dabei gleichermaßen von den Linearschwingungen eines stabförmigen Gebildes, die in Quer- oder Längsrichtung erfolgen mögen (Biege- bzw. Dehnungsschwingungen), wie auch von den Drehschwingungen eines seiner Teile ausgegangen werden. Der Vorteil dieser Methode ist es, daß man die Amplitude der Schwingbewegung linear in Lichtintensitätsschwankungen umsetzen kann, sofern die Blendenöffnung eine geeignete Form erhält. Als Hauptnachteil muß angesehen werden, daß mit der Ankopplung der Blenden- vorrichtung eine zusätzliche Massenbelastung des schwingenden Teiles vorgenommen wird. Ferner macht es bisweilen Mühe, die Mitführung des Fensters spiel- und trägheitsfrei zu gestalten. Schließlich können sich bei zu schmalen Fensterschlitzten, die bei sehr kleinen Schwingamplituden erforderlich sind, die durch Lichtbeugung hervorgerufenen Störungen messungsverfälschend auswirken. Trotz dieser Nachteile kann jedoch die Fenstermethode als ein Prototyp sämtlicher mechanisch-optischer Wandler verstanden werden; denn erstens ist sie besonders leicht in ihrem Wirken zu durchschauen und zweitens kann jedes beliebige andere Prinzip mechanisch-optischer Wandlung hinsichtlich seiner mathematischen Struktur durch geeignete Wahl der Form der Blendenöffnung auf die Fenstermethode abgebildet werden. Beispielsweise kann die Lichtsteuerung mittels Polarisationsfolien durchgeführt werden. Dann wird bei Drehschwingungen der Drehwinkel  $\alpha = \alpha(t)$ , der sich nach einer durch die Schwingung vorgegebenen Zeitfunktion ändert, gemäß der Beziehung  $J = J_0 \cos^2 \alpha$  in Lichtintensitätsschwingungen  $J = J(t)$  umsetzen. (Translations-

schwingungen lassen sich über entsprechende Hebelanordnungen ebenfalls über Polarisationsfilter modulieren). Dieses Gesetz der Lichtsteuerung kann nun auch durch eine Fensteröffnung nach Art der Abbildung 1 verwirklicht werden.

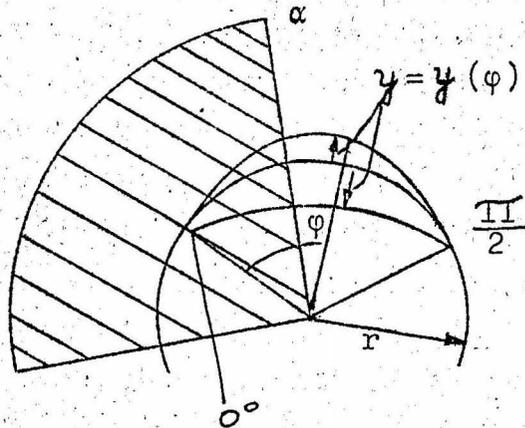


Abb. 1

Der von der schraffierten Blende freigegebene Teil der sichelförmigen Blendenöffnung (Gesamtfläche  $F$ ) zwischen den beiden Kurven  $y = y(\varphi)$ , die nach außen und innen von einem Kreise vom Radius  $r$  abgetragen sind, läßt die Lichtstärke (da in Polarkoordinaten  $f = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} r^2(\varphi) d\varphi$ )

$$J = \frac{J_0}{F} \int_{\alpha}^{\pi/2} \frac{1}{2} [(r+y)^2 - (r-y)^2] d\varphi = \frac{2J_0}{F} r \int_{\alpha}^{\pi/2} y(\varphi) d\varphi$$

hindurch, Da aber  $J = J_0 \cos^2 \alpha$  sein soll, folgt durch Gleichsetzen der rechten Seite, daß  $y = \frac{F}{2r} \sin 2\varphi$  gewählt werden muss, um mit der Blende das für Polarisationsfilter zutreffende Modulationsgesetz darzustellen,  $F$  und  $r$  können beliebig vorgegeben werden,

Andere Lichtmodulationen, wie etwa die variable Ausleuchtung einer Fläche durch Schrägstellen zum Lichtstrahl nach dem Lambert'schen Gesetz  $J = J_0 \cos \alpha$  oder durch veränderliche Entfernung von der Lichtquelle gemäß der Formel

$$J = \frac{r_0^2}{r^2} J_0$$

oder durch Verwendung eines Graukeils, dessen Verschiebung das Licht mehr oder weniger aufhellen läßt (nach einem Exponentialgesetz), lassen sich alle durch die Fenstermethode darstellen,

sofern nur  $y = y(\varphi)$  geeignet gewählt wird. Selbstverständlich wird man, wenn die Fenstermethode ursprünglich zur Anwendung gelangt, die Blende rechteckig wählen, wenn Translations-schwingungen abgebildet werden sollen und kreisringförmig wählen, wenn Drehschwingungen erfaßt werden sollen, um im ganzen Verschiebungsbereich lineares Verhalten der Lichtintensität über der Amplitude zu erreichen. So ist die Fenstermethode sowohl als ein besonderes Verfahren anwendbar, wie als gedankliches oder auch konstruktiv verwirklichtes Modell anderer Lichtmodulationsverfahren. Sie hat den Vorteil, nicht spektral selektiv auf den zur Modulation verwendeten Lichtstrahl zu wirken, bzw. es kann umgekehrt ein gewünschter Spektralbereich gegenüber allen anderen Wellenlängen der von der Lichtwelle gelieferten Strahlung durchgelassen und damit zur Messung verwendet werden, indem geeignete Spektralfilter in die Fensteröffnung eingesetzt werden. Dies kann wegen der unterschiedlichen spektralen Empfindlichkeit der zahlreichen photoelektronischen Bauelemente unter Umständen erforderlich sein. Andere Lichtmodulatoren, z.B. Polarisationsfilter, weisen schon von sich aus ein bestimmtes spektrales Verhalten auf und bereiten im allgemeinen wegen der notwendigen spektralen Anpassung an die anderen Glieder einer Meßanordnung (Lichtquelle, Photozelle) einige Schwierigkeiten. Als besonders vorteilhaft bei der Fenstermethode kann schließlich der Umstand angesehen werden, daß der oftmals nicht lineare Gang der elektrischen Größe (Strom, Spannung, Widerstand) des photoelektronischen Bauelementes in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke durch entsprechende Gestalt der Fensterblende wieder linearisiert werden kann, ähnlich wie das weiter oben für die Erfassung anderer Gesetzmäßigkeiten durch die Blendenform dargelegt wurde.

#### Verhalten der verschiedenen photoelektronischen Aufnehmer.

Wenn in dieser Untersuchung verschiedene Eigenschaften photoelektronischer Bauelemente festgestellt bzw. geprüft werden sollen, so ist das dahingehend zu verstehen, daß bei den sehr zahlreichen und verschiedenartigen im Handel erhältlichen lichtelektrischen Zellen mit im allgemeinen festliegenden Eigenschaften das Verhalten bei der Messung mechanischer Schwingungen zu ermitteln ist, nachdem diese Schwingungen zuerst auf eine

der oben beschriebenen Weisen in Lichtschwingungen übersetzt worden sind. Es sind dann diejenigen Elemente herauszufinden, die in möglichst vielen ihrer Eigenschaften mit den Forderungen übereinstimmen, die im Idealfall auf Grund der Besonderheiten mechanischer Schwingungen an sie zu stellen sind.

Von Eigenschaften, die die zur Messung mechanischer Schwingungen verwendeten photoelektronischen Bauelemente aufweisen müssen, ist an erster Stelle eine möglichst hohe Empfindlichkeit zu nennen, d.h. einem bestimmten Schwankungswert in der Beleuchtungsstärke muß ein großer Schwankungswert der von der Zelle gelieferten elektrischen Größe entsprechen. Diese kann, wie weiter unten näher ausgeführt werden soll, ein Widerstand, ein Strom oder eine Spannung sein. Gute Empfindlichkeit ist zu fordern, damit nicht ein unverhältnismäßig hoher Aufwand an elektrischen Verstärkungsschaltungen erforderlich wird, der erstens die Wirtschaftlichkeit eines solchen Meßverfahrens weitgehend einschränken würde, aber auch gegenüber der Einstreuung vom Störwerten, vor allen Dingen durch Rauschen, begünstigend wirken würde. Der durch solche Rauscheffekte und auch Feldeinstreuungen bewirkte Störpegel liegt, wie die Erfahrung gezeigt hat, sehr oft in der Größenordnung der eigentlichen Meßwerte oder übertrifft sie noch, besonders dann, wenn es gilt, sehr kleine Schwingungsamplituden aufzunehmen. In diesen Fällen ist aber die Messung ungenau bzw. ganz undurchführbar. Es ist daher unbedingt erforderlich, daß die Empfindlichkeit der Photozelle hinreichend groß ist. Im allgemeinen wird man ganz ohne elektrische Weiterverstärkung nicht auskommen, die jedoch aus den genannten Gründen nicht über Gebühr umfangreich gestaltet werden sollte, vor allem nicht bei nichtstationären Meßgeräten, wo noch die Gründe des leichten Transports und der leichten Hantierbarkeit hinzukommen. Bei stationären Anlagen, vor allem solchen, die zu Eichzwecken errichtet werden, kann und muß der Aufwand größer sein, um auch kleinste Meßwerte zu erfassen; hier können auch Vorrichtungen zur Unterdrückung vom Störwerten vorgesehen werden.

Nächst der Frage der Empfindlichkeit ist die Frage der Trägheitslosigkeit von entscheidender Bedeutung für die Verwertbarkeit eines photoelektronischen Bauelementes zur Erfassung nicht

statischer Vorgänge. Weitaus die meisten praktisch interessierenden mechanischen Schwingungsvorgänge dürften diejenigen sein, deren Frequenz zwischen 0 und 1000 Hz liegen, obwohl gelegentlich auch höherfrequente Vorgänge, z.B. gewisse Oberschwingungen mechanischer Schwinger, beachtet werden müssen. Reine akustische oder Ultraschallvorgänge scheiden für diese Betrachtungen aus, so daß der angegebene Frequenzbereich umfassend genug ist. Ein hoher Prozentsatz von Schwingungsvorgängen liegt sogar nur an der unteren Grenze dieses Bereiches. An das Trägheitsverhalten des photoelektronischen Bauelementes ist also die Forderung zu richten, daß es bis 1000 Hz (und wenn möglich noch höher) praktisch trägheitslos arbeitet, also so geringe Anstiegszeiten hat, daß Schwingungen unter dieser Frequenzgrenze unverzerrt abgebildet werden. Gerade die große Trägheit machen einige sonstvor allem in der Empfindlichkeit - hervorragende Elemente für weite Frequenzbereiche zu Meßzwecken unbrauchbar.

Bei den anderen Eigenschaften, die ein photoelektronisches Bauelement hat, ist zwar nach Möglichkeit darauf zu achten, daß auch hier günstige Verhältnisse vorliegen, ein großer Teil etwaiger Unzulänglichkeiten läßt sich jedoch durch geeignete Maßnahmen meist umgehen oder ausgleichen. So ist die Linearität, d.h. der lineare Gang der erzeugten elektrischen Größe (Widerstand, Spannung, Strom) mit dem Wert der auftreffenden Lichtmenge, eine Eigenschaft, die zwar die Konstruktion eines Meßgerätes erleichtert, die aber nicht notwendig gefordert zu werden braucht. Kennt man die genauen Kennlinien, von denen die meisten, wie sich zeigt, nicht allzu stark gekrümmt sind, so kann man entweder auf diesen Kennlinien einen solchen Arbeitsbereich aussteuern, der auf einem möglichst wenig gekrümmten Stück der Kurve liegt, oder aber man kann durch Verwendung anderer nichtlinearer Schaltelemente die Anzeigegröße in Bezug auf die Lichtgröße relinearisieren. Schließlich kann das Licht selbst derart nichtlinear gesteuert werden, daß im ganzen wieder ein linearer Zusammenhang gegeben ist; dieser Weg läßt sich am leichtesten, wie oben schon ausgeführt, mit Hilfe der Fenstermethode durchführen. Die erste Möglichkeit, nämlich Aussteuerung eines wenig gekrümmten Kurvenstückes, ist immer dann unbeschreibbar, wenn die Schwingungsamplitude so groß wird, daß die Kurve

nicht mehr durch ihre Tangente ersetzbar ist, oder wenn der Bereich der elektrischen Größe teilweise oder ganz oberhalb der durch andere Umstände festliegenden Belastungsgrenze des betreffenden Elementes liegt, so daß eine Aussteuerung bis in diese Größen zur Zerstörung des Elementes führen könnte. Die in der Praxis auftretenden Schwingungsamplituden sind allerdings meist so klein, daß die Licht-Strom-Kennlinie fast an jeder Stelle für ein entsprechendes Kurvenstück als geradlinig anzusehen ist. Es zeigt sich also, daß die Forderung auf Linearität im genannten Sinne insofern nicht sehr streng zu sein braucht, da anderweitiger Ausgleich möglich ist. Das ganze Problem der eventuellen Nichtlinearität, sowohl an der Stelle der mechanisch-optischen Modulation wie auf der Seite der lichtelektrischen Modulation kann schließlich auch durch Aufnahme von Eichkurven für die jeweilige Meßanordnung umgangen werden.

Ebenso verhält es sich mit dem Dunkelstrom bei einem photoelektronischen Bauelement, das bei Lichteinwirkung einen Urstrom liefert. Es ist dies jener Restgleichstrom, der bei Dunkelheit infolge von Temperaturwirkung erzeugt wird. Diese Größe kommt entweder dadurch nicht zur Anzeige, daß die Meßgröße als Wechselstrom oder Wechselspannung verstärkt wird, wobei der Gleichstromanteil (also auch der Dunkelstrom) nicht miterfaßt wird, oder aber daß sie durch einen Kondensator abgesperrt wird. Wenn die den Dunkelstrom bewirkenden Temperaturen während der Messung schwanken, so ist diese Schwankung meist niedriger in der Frequenz als die Meßfrequenz, und man kann wieder die eine Größe gegen die andere durch Schaltglieder eliminieren. Hier liegen allerdings schwierigere Verhältnisse vor, und von einer universell geeigneten Lösung kann noch keine Rede sein.

Eine weitere, sehr charakteristische Eigenschaft ist die spektrale Empfindlichkeit, sonderlich die Lage des Maximums der spektralen Empfindlichkeit. Diese muß bei der Verwendung zwar berücksichtigt werden, bereitet aber ebenfalls keine unüberwindlichen Schwierigkeiten. Prinzipiell ist darauf zu achten, daß die Lichtquelle, die in der Meßanordnung verwendet wird, vorwiegend oder wenigstens teilweise den Spektralbereich aussendet, auf den die Photozelle anspricht, daß ferner die zur Modulation dienende Vorrichtung, z.B. Polarisationsfilter, sich dem Spektralverhalten

der Lichtquelle und des Aufnehmers anpaßt. Man wird zweckmäßig Licht, das von der Zelle lichtelektrisch nicht verarbeitet wird, durch Dazuschaltung geeigneter Selektivfilter wegfiltern, da es, sofern es Rot oder Infrarot ist, vor allem bei längerer Bestrahlung eine Erwärmung zur Folge hat. Dadurch wiederum ergibt sich eine Verschiebung der Kennwerte und Kennlinien, die zumeist eine mehr oder weniger große Temperaturabhängigkeit aufweisen. Die größte Empfindlichkeit der Meßanordnung erreicht man, wenn das Spektralmaximum aller spektral selektiv wirkenden Teile des Meßgerätes möglichst zusammenfallen. Das läßt sich insofern stets durchführen, als die dieser Forderung entsprechenden Lichtquellen leicht zu beschaffen sind und Spektralfilter mit den gewünschten Durchlaßbereichen ebenfalls; wodurch die Anpassung an die fest vorgegebene Spektraleigenschaft des photoelektronischen Bauelementes möglich wird.

Einige weitere Eigenschaften, auf die bei den zu verwendenden photoelektronischen Bauelementen zu achten wäre, sind eventuell auftretende Ermüdungs-, Alterungs- und Instabilitätserscheinungen. Bei den heutigen technologischen Fertigungsverfahren sind hier jedoch zumeist gewisse Mindestforderungen bei den im Handel zugänglichen Elementen erfüllt. Bei der Anwendung zur Schwingungsmessung treten ferner keine zu hohen Belastungen auf, es werden auch keine solchen Dauerbeanspruchungen vorgenommen, wie sie etwa bei den Lichtschrankenwendungen oder bei den Anwendungen zur Fertigungs- und Betriebskontrolle vorliegen, so daß nur geringe Störungen dieser Art auftreten können.

Die größte Schwierigkeit ist eigentlich durch die starke Temperaturabhängigkeit der Kennwerte gerade der sonst zur Schwingungsmessung sehr geeigneten photoelektronischen Bauelemente gegeben. Es wird die Aufgabe geeigneter Kompensationsschaltungen sein, Meßverfälschungen, die davon herrühren, zu unterdrücken. Je nach Sachlage kann entweder ein sich im thermischer Hinsicht möglichst gleichartig verhaltendes Paar von Photoelementen in zwei Zweigen einer Brückenschaltung; von denen das eine Element dem Licht ausgesetzt ist, in der Meßdiagonale der Brücke den Ausgleich der Störungen bewirken (wobei das zweite Element, das dem Licht nicht ausgesetzt wird, nicht unbedingt ein eigentliches Photoelement zu sein braucht), oder man gleicht durch Serienschaltung vom NTC-

Widerständen aus. Schließlich sind auch Arbeitspunktstabilisierungen durch Gegenkopplungsschaltungen erprobt worden.

Nachdem diese Uebersicht über die für unsere Betrachtungen in Frage kommenden Eigenschaften photoelektronischer Bauelemente gegeben ist, soll jetzt das Verhalten der einzelnen Typen näher dargelegt werden. Wir haben dazu technische Daten und Unterlagen einer sehr großen Anzahl von Einzelfabrikaten untersucht, und viele Exemplare auch praktisch erprobt. Es zeigt sich jedoch, daß diejenigen photoelektronischen Bauelemente, die auf dem gleichen physikalischen Prinzip beruhen, sich im Grunde gleich verhalten, wenn man von für uns unwesentlichen Unterschieden, die auf der verschiedenartigen Technologie der Herstellung beruhen, und die im Hinblick auf besondere Verwendungszwecke angestrebt worden sind, absieht.

Wir werden daher die zu betrachtenden photoelektronischen Bauelemente einteilen in solche, die auf dem äußeren Photoeffekt beruhen, in solche, die auf dem (im Grunde wesensgleichen) inneren Photoeffekt beruhen und in solche, deren Wirkungsprinzip der Sperrschichtphotoeffekt ist. Der dem Sperrschichteffekt verwandte Becquereleffekt, der bei Belichtung von Elektroden in einem Elektrolyten auftritt, bleibt, da er wegen seiner geringen Empfindlichkeit und einer gewissen Unhandlichkeit in der Anwendung nicht technisch ausgenutzt wird, auch hier außer Betracht.

Der äußere Photoeffekt besteht bekanntlich darin, daß eine geeignete Alkalimetallschicht mit Licht bestrahlt wird und dadurch aus ihr Elektronen freigemacht werden gemäß der Beziehung:

$$h\nu = A + \frac{1}{2} m v^2 = A + e V$$

wobei  $\nu$  die Frequenz des Lichtes im Falle monochromatischer Strahlung bzw. eine der Frequenzen im Falle polychromatischer Strahlung ist;  $h$  ist die Planck'sche Konstante. Diese von einem Lichtquant in die Metallschicht gebrachte Energie dient zur Herauslösung eines Elektrons und teilt sich gemäß der rechten Seite auf in die Ablösearbeit  $A$ , die erforderlich ist, um das Elektron aus dem Kristallverband zu lösen und aus der Oberfläche austreten zu lassen und in einen Restbetrag, der dem Elektron als kinetische Energie  $\frac{1}{2} m v^2$  ( $m$  Elektronenmasse,  $v$  deren Geschwindigkeit) mitgegeben wird. Die Gleichung enthält ferner die

Darstellung der mitgeteilten kinetischen Energie durch Elektronenvolt. Zufolge der Größe A, die von der Art und Vorbehandlung des belichteten Materials abhängt, wird für ein bestimmtes Material eine Grenzfrequenz festgelegt, unterhalb der die Schicht nicht mehr lichtelektrisch anspricht. Da die Größe A bei Alkalimetallen besonders niedrig liegt, werden in zur Anwendung kommenden Photozellen diese Metalle verwendet. Sie bilden die Katode eines evakuierten Gefäßes, in dem ferner eine ringförmige Anode mit einer Saugspannung von ca. 100 V angebracht ist.

Durch Absorptionserscheinungen bedingt liegt meist auch eine obere Frequenzgrenze der spektralen Empfindlichkeit vor. Zwischen beiden Grenzen ist der Empfindlichkeitsverlauf meist so, daß ein ausgeprägtes Maximum existiert. Man kann also durch Wahl eines geeigneten Materials der Katode der Photozelle die spektrale Empfindlichkeit besonderen Wünschen anpassen. Bei spektraler Anpassung von Lichtquelle und Fotozelle beträgt im allgemeinen die Empfindlichkeit  $10 - 50 \cdot 10^{-6}$  A/Lm. Der Photostrom steigt in weitem Bereich linear mit der Belichtung, so daß die angegebene Empfindlichkeit überall in dieser Größe gilt und nicht nur einen Mittelwert darstellt. Für alle photoelektronischen Bauelemente liegt allerdings eine obere elektrische Belastbarkeitsgrenze vor, bei deren Ueberschreitung Zerstörung des Elementes eintritt. In unserem Fall dürfen pro Flächeneinheit der Photokatode im Mittel nicht mehr als  $10 - 20 \cdot 10^{-6}$  A entnommen werden, andernfalls diese irreversible Veränderungen oder volle Zerstörung erleidet. Der höchstzulässige Lichtstrom hängt also von der Fläche der lichtempfindlichen Katodenschicht ab, deren Größe bei den handelsüblichen Zellen  $1 - 10 \text{ cm}^2$  beträgt. Demgemäß müssen die Fest- und Schwankungswerte der Lichtstärke bemessen werden. Außerst vorteilhaft ist, daß der äußere Photoeffekt sehr trägheitslos verläuft, und zwar erfolgt die Elektronenauslösung bei Lichtquanteneinfall in etwa  $10^{-8}$  sec, d.h. für den Frequenzbereich mechanischer Schwingungen liegt völlige Trägheitslosigkeit vor. Zusammenfassend ist also festzustellen, daß bis auf die geringe Empfindlichkeit alle Eigenschaften im Sinne obiger Forderungen ideal wären für den vorgesehenen Verwendungszweck.

Die im allgemeinen kleinen Amplituden der Schwingungen haben auch kleine Lichtintensitätsschwankungen zur Folge, also muß bei

Benutzung von Vakuumphotozellen die an einem im Anodenkreis liegenden Widerstand zu Folge des lichtabhängigen Urstromes entstehende Spannungsschwankung über Wechselspannungsverstärker um ein Vielfaches verstärkt werden. Die bei einer solchen Anordnung durch Rauschen auftretenden Störungen (also für Photozelle und Verstärker zusammen) sind jedoch in jedem Fall größer als das Rausch-Signal-Verhältnis bei den sogleich zu besprechenden Photokathoden mit Sekundär-Elektronen-Vervielfachern, so daß für genaue und empfindliche Messungen diese letzteren zu bevorzugen sind. Erwähnt sei noch, daß der Dunkelstrom bei Photokathoden sehr niedrig liegt. Außer den bei einigen Typen auftretenden Ermüdungserscheinungen gibt es sonst keine Eigenschaften, die eine Anwendung einschränken oder unmöglich machen könnten.

Neben diesen reinen Vakuumzellen gibt es noch edelgasgefüllte Zellen (unter niedrigem Druck). Bei hinreichender Anodenspannung werden hier die primär erzeugten Elektronen so beschleunigt, daß sie auf ihrem Wege die Gasatome ionisieren und so der Ladungstransport vervielfacht wird. Die Empfindlichkeit liegt bei gasgefüllten Zellen um den Faktor 3 - 10 höher als bei den gleichen Vakuumzellen. Da die Ionisierung und die nach beendigttem Lichteinfall erforderliche Entionisierung der Raumladungswolke Zeit erfordert, haben diese Zellen eine größere Trägheit. Bei einer Lichtwechselfrequenz von etwa  $10^4$  Hz erfolgt nur noch 80 %ige Aussteuerung, so daß genaue Messungen nur bis zu einigen  $10^3$  Hz möglich sind; das ist für den Bereich mechanischer Schwingungen im allgemeinen auch noch angängig. Es kommt aber hinzu, daß Gaszellen nicht mehr belichtungsproportional arbeiten, so daß für größere Aussteuerbereiche besondere Eichungen oder andere Maßnahmen vorzusehen wären. Der Gewinn durch die zehnfache Empfindlichkeit ist nicht so erheblich, daß die Weiterverstärkung wesentlich einfacher ausfallen würde. Im übrigen verhalten sich diese Zellen ebenso wie die Vakuumzellen.

Die jetzt zu besprechenden Photokathoden mit Sekundärelektronen-Vervielfachern (genannt Photo-Multiplier) haben nun den Vorteil, bei sonst gleich guten Eigenschaften wie die Vakuum- oder Gaszellen sich auch hinsichtlich der Anfangsempfindlichkeit (vor der Weiterverstärkung) sehr günstig zu verhalten. Bei ihnen

treten wie bei der einfachen Vakuum-Photozelle vermöge des äußeren Photoeffektes Elektronen aus der Photokatode aus, werden nun aber innerhalb der Röhre zur Auslösung von Sekundärelektronen aus besonders gestalteten und geeignet angebrachten Elektroden, den sogenannten Dynoden, veranlasst, von denen jede gegen die vorhergehende eine Beschleunigungsspannung von im Mittel 70 - 150 V hat. Die erste Dynode gegen die Katode hat meist eine etwas höhere Spannung, um zu gewährleisten, daß auch alle lichtelektrisch aus der Katode austretenden Elektronen abgesaugt und auf die erste Dynode beschleunigt werden, während die Anode gegenüber der letzten Dynode meist eine etwas kleinere Potentialdifferenz hat als die Potentialstufen sonst betragen, um an ihr Sekundäreffekte zu vermeiden. Die Gesamtspannung, die zur Versorgung der Dynoden erforderlich ist, ist also recht erheblich und muß zudem sehr konstant sein, da die Verstärkung außer von der Dynodenzahl auch von der Spannung zwischen diesen abhängt. Da die praktisch verwendete Dynodenzahl 7 - 11 beträgt, sind also etwa 1000 V stabilisierte Gleichspannung erforderlich. Man erreicht dann damit aber auch eine  $10^6$ -fache Verstärkung, so daß die Empfindlichkeit von Multipliern mit einigen Ampere/Lumen angegeben werden kann. Jedoch stellt auch dies wegen der Höchstbelastbarkeit von etwa 1 mA Stromstärke im Multiplier nur eine Nenngröße dar. Der Multiplier ist aber das weitaus empfindlichste und in der Empfindlichkeit durch die Dynodenspannung sogar regelbare photoelektronische Bauelement und läßt sich, da er auch die anderen günstigen Eigenschaften von Photokatoden in sich vereinigt, am ehesten zur Messung sehr kleiner Amplituden verwenden, vorwiegend zu Eichzwecken bei stationären Meßanlagen. Erschwerend wirkt sich lediglich der Aufwand zur Erzeugung und Stabilisierung einer hohen Gleichspannung aus.

Die bisher genannten lichtelektrischen Bauelemente beruhen, wie dies näher ausgeführt wurde, auf dem äußeren Photoeffekt. Hier treten die Elektronen aus der Oberfläche des bestrahlten Kristallverbandes heraus. Beim inneren Photoeffekt verlassen die lichtelektrisch freigemachten Elektronen den Kristallverband nicht, sondern werden nur aus dem Valenzband ins Leitfähigkeitsband gehoben, so daß sie nicht mehr fest an ihren Ort gebunden sind und somit die Leitfähigkeit des betreffenden Materials erhöhen. Der primäre Akt der photoelektrischen Wirkung ist zwar der

gleiche wie beim äußeren Photoeffekt, die Wirkung besteht aber in der Widerstandsherabsetzung des beleuchteten Schaltelementes, hat also bei einer angelegten Spannung eine Erhöhung des hindurchgehenden Stromes zur Folge, die unabhängig von der Richtung der angelegten Spannung ist. Diese auf dem inneren Photoeffekt beruhenden Schaltelemente heißen Photowiderstände (oder Photoleiter). Mit der Eigenschaft, von der Richtung der angelegten Spannung unabhängig zu sein, stehen sie im Gegensatz zu den vorhergehend besprochenen Photokatoden. Sie stellen im übrigen gewöhnliche Widerstände dar, jedoch mit zumeist nicht-linearer Strom-Spannungs-Kennlinie. Als Materialien für solche Photowiderstände dienen im allgemeinen Halbleiter, da bei diesen schon geringe Energiebeträge, also solche, die durch thermische Eigenbewegung oder eben auch Lichteinstrahlung aufgebracht werden, ausreichen, um Elektronen aus dem Valenzband des betreffenden Kristallgefüges in das Leitfähigkeitsband zu heben. Ist der Abstand zwischen der oberen Grenze des Valenzbandes und der unteren Grenze des Leitfähigkeitsbandes in dem vorliegenden Kristallsystem klein (Größenordnung 1 eV und weniger), so ist der Photowiderstand rot- und infrarotempfindlich, weist dann aber auch hinsichtlich seiner Kennwerte eine starke Wärmeabhängigkeit auf, was sich sehr störend bemerkbar macht. Das ist z.B. sehr ausgeprägt bei Germanium der Fall. Solche aus einem einheitlichen Stoff bestehenden Halbleiter, sogenannten Eigenhalbleiter, sind also dadurch elektrizitätsleitend, daß ein Teil der Elektronen durch Energiezufuhr befähigt worden ist, die mehr oder weniger große verbotene Zone, nämlich im Energietermschema des Systems den Abstand zwischen oberer Grenze des Valenzbandes und unterer Grenze des Leitfähigkeitsbandes, zu überwinden und energetisch gesehen sich im Leitfähigkeitsband zu befinden. Im Valenzband haben diese Elektronen eine Lücke hinterlassen, ein Loch oder Defektelektron, das nun auch bei der Elektrizitätsleitung zum Ladungstransport beiträgt, dadurch nämlich, daß Valenzelektronen von Atom zu Atom weiterwandern können und auf diese Weise die entstandene Lücke oder das Loch sich in der entgegengesetzten Richtung bewegt. Die Eigenhalbleitung besteht also zu gleichen Teilen aus Elektronen- und Löcherleitung. Durch Energiezufuhr erhöht sich die Zahl der gebildeten Elektronen-Lochpaare.

In der Praxis kommen jedoch wenig ausgesprochene Eigenhalbleiter zur Anwendung, sondern sogenannte Störstellenhalbleiter, d.h. in dem betreffenden Kristallgefüge befinden sich in geringer Konzentration Fremdatome, bei denen - und dieser Fall sei zuerst genannt - das Niveau ihrer Valenzelektronen wenig unterhalb des Leitfähigkeitsbandes des Grundgitters liegen, so daß sie durch geringe Energiezufuhr, wie sie schon durch die Eigenbewegung infolge der jeweiligen Temperatur erfolgen kann, ihre Elektronen teilweise ins Leitfähigkeitsband schicken können. Die Störstellenatome heißen dann Donatoren und die Leitfähigkeit wird von den freibeweglichen Elektronen aufgebracht; wir haben einen n-Typ halbleiter. Wenn daneben noch Eigenhalbleitung durch Paarbildung im oben beschriebenen Sinne eintreten kann, da das Grundgitter ein Halbleitermaterial ist, sind in der Minderheit auch Löcher vorhanden, von denen man aber absehen kann, wenn nur ein einheitlicher Störstellenhalbleiter eines Typs vorliegt. Anders ist es, wenn eine geeignete Kombination mit einem p-Typ halbleiter zur Bildung einer Sperrschicht führt. Ein solcher p-Typ halbleiter weist an freibeweglichen Ladungsträgern Defektelektronen oder Löcher im Ueberschuß auf, dadurch nämlich, daß in das Grundgitter Störatome eingestreut sind, deren Valenzniveau energetisch wenig über dem Valenzband des Grundstoffes liegt, so daß hier Elektronen zum Teil aus dem Valenzband in das Störstellenniveau gehoben sind und im Valenzband Löcherleiter zurückbleiben. Die als Photowiderstände verwendeten Halbleiter stellen nun im allgemeinen jeweils solche Störstellenhalbleiter eines Typs dar. Photowiderstände sind im allgemeinen träger als Photokathoden (Werte sehr unterschiedlich je nach Typ von einigen 10 bis einigen  $10^3$  Hz Grenzfrequenz). Es zeigte sich aber, daß unter den Photowiderständen trotz mancher Nachteile solche sind, deren Empfindlichkeit bis zu der Größenordnung von einigen A/Lumen reicht, so daß sie in dieser Hinsicht mit Multipliern vergleichbar werden. Bei einer solchen Empfindlichkeitsangabe ist selbstverständlich die primäre Widerstandsänderung unter Zugrundelegung einer bestimmten Spannung auf eine Stromänderung (bezogen auf die auffallende Lichtströmeinheit) umgerechnet worden, um vergleichbare Dimensionen zu haben.

Schließlich soll noch der Mechanismus des Sperrschichtphotoeffektes betrachtet werden. Sein Zustandekommen wird ermöglicht,

wenn zwei verschiedene Halbleitertypen der oben beschriebenen Art, also ein p-Typhalbleiter und ein n-Typhalbleiter an einer Grenzfläche aneinanderstoßen, sei es, daß sie aufeinander legiert sind oder aber aus einem einheitlichen Kristall gewachsen sind, der von zwei Seiten verschieden dotiert ist. Jeder Halbleiter ist für sich ursprünglich elektrisch neutral, indem etwa der n-Typhalbleiter an freibeweglichen Ladungsträgern eine gewisse Anzahl von Elektronen enthält, die durch die Donatoren neutralisiert werden, da diese nach Abgabe ihrer Elektronen als raumfeste positiv geladene Ionen im Kristallgefüge an ihrem Platz bleiben. Entsprechend wird beim p-Typhalbleiter die frei bewegliche Ladungswolke der Defektelektronen (Löcher) elektrisch neutralisiert durch die gitterfest angeordneten negativ geladenen Akzeptoren. Sobald nun ein solcher n-Halbleiter an einen p-Halbleiter grenzt, macht sich das Konzentrationsgefälle beider frei beweglichen Ladungsträgerarten nach der jeweilig anderen Seite des Kristalls hin bemerkbar und Elektronen wechseln von der n-Seite zur p-Seite hinüber, und umgekehrt wandern Löcher von der p-Zone in die n-Zone. Dies geschieht auf Grund des Konzentrationsgradienten als Diffusionsvorgang so lange, bis die sich dadurch aufbauende Raumladung durch ihr elektrisches Feld einen entgegengesetzten Ladungsträgerstrom von solcher Größe hervorruft, daß ein weiterer Anstieg der Raumladung verhindert wird. Im Gleichgewicht herrscht also eine Spannung zwischen beiden Halbleiterzonen, derart, daß die p-Schicht negativ und die n-Schicht positiv aufgeladen ist. Der Spannungsabfall erfolgt an der Grenze der beiden Zonen längs einer Strecke, die nach beiden Seiten hin quer zum Uebergang durch die Diffusionslänge der Ladungsträger bestimmt ist, d.h. der Weglänge, die ein Ladungsträger zurücklegt, bis er sich mit einem entgegengesetzten wieder vereinigt. Durch Drahtanschlüsse ist dieser Potentialunterschied nach außen jedoch nicht feststellbar, da die auftretenden Kontaktpotentiale mit dem Grenzschichtpotential zusammen die Summe 0 ergeben. Neben diesen durch Störatome in beiden Kristallhälften vorhandenen Ladungsträgern befinden sich noch in wesentlich geringerer Zahl Löcher-Elektronenpaare, die aus den eigentlichen Kristallgitteratomen thermisch wie bei den reinen Eigenhalbleitern gebildet worden sind. Im dynamischen Gleichgewicht steht der Bildungsquote dieser Ladungs-

trägerpaare eine ebenso große Rekombinationsquote gegenüber. Wenn nun Lichtquanten auf den Kristall fallen, so führt diese Energiezufuhr ebenfalls zur Bildung eines Loch-Elektronenpaares pro Photon, und die in der Nähe der Grenzschicht, also dem Potentialgefälle, gebildeten Paare werden nach verschiedenen Seiten hin abgetrieben, nämlich gemäß dem oben ausgeführten strömen die Elektronen in die n-Zone. Umgekehrt verhält es sich mit den Löchern. Durch diesen Vorgang wird der ursprünglich zwischen der n- und p-Zone bestehende Spannungsunterschied abgebaut und die Differenz zwischen dem ursprünglich an der p-n-Grenze herrschenden Potentialsprung und dem während der Belichtung vorliegenden Potentialsprung tritt im Leerlauf (also Widerstand zwischen den äußeren Anschlüssen der beiden Schichten) als Photospannung auf. Schließt man die äußeren Anschlüsse kurz, so ist (wenn der geringe innere Widerstand des p-n-Halbleiters vernachlässigt wird) der fließende Kurzschlußstrom gleich dem durch die Bestrahlung ausgelösten Urstrom. Man sagt dann, daß ein aus einer solchen p-n-Schicht bestehendes photoelektronisches Bauelement, wegen der zwei Zonen und Anschlüsse Photodiode genannt, als Photoelement wirkt, indem durch die Bestrahlung ein Urstrom erzeugt wird. Durch den äußeren Verbindungskreis können die freigemachten Ladungsträger abfließen. Bei Unterbrechung der Beleuchtung hört die Wirkung auf, da die in die Einzelschichten eintretenden Ladungsträger sich sofort mit den weit in der Ueberzahl dort vorhandenen entgegengesetzten Ladungen kombinieren und die Nachlieferung wegen des fehlenden Photoneneinfalls unterbleibt.

Neben dieser Verwendung einer p-n-Schicht ohne eine äußere Spannungsquelle kann bei der Photodiode auch eine Hilfsspannung herangezogen werden. Die p-n-Schicht, die ja Gleichrichterwirkung hat, wird dann an die Gleichspannung so angeschlossen, daß sie in Sperrichtung gepolt ist, d.h. man verbindet die p-Zone mit dem negativen Pol und die n-Zone mit dem positiven Pol. Im einfachsten Fall kann in diesen Kreis noch ein (reim ohmscher) Reihenwiderstand geschaltet werden. Die zwischen den beiden Zonen zufolge des oben beschriebenen Vorganges herrschende Spannung wird dann noch erhöht, und über die Grenzschicht fließen vermöge dieser Spannung nur die <sup>in</sup>beiden Zonen wegen des Eigenhalbleitereffektes vorhandenen Minderheitsladungsträger. Dies ist der

Sperrstrom, Nullstrom oder Dunkelstrom. Wenn jetzt Belichtung vorliegt, werden sämtliche freigemachten Ladungen durch die äußere Spannung abgesaugt, sofern diese Spannung höher ist als eine gewisse Mindestsaugspannung, deren Größe aber sehr klein ist. Der Strom ist dann nicht von der Spannung, sondern nur von der Beleuchtungsstärke abhängig und dieser innerhalb weiter Grenzen proportional.

Anstelle einer Photodiode, beruhend auf einer einfachen p-n-Schicht, kann nun auch ein Phototransistor Verwendung finden. Es liegt dann die Schichtfolge n-p-n oder p-n-p vor. An den Uebergängen existieren zwei entgegengesetzte Potentialgefälle, die die Mittelzone, die Basisschicht genannt, auf einem gewissen Potential halten, das beim n-p-n-Transistor z.B. negativ gegenüber den Randzonen, nämlich der Emitter- und Kollektorzone, ist. Entsprechend umgekehrt verhält es sich beim p-n-p-Phototransistor. Da das ganze Gebilde völlig einem gewöhnlichen Transistor gleicht, werden üblicherweise hier dieselben Bezeichnungen für die Transistorteile verwendet. Bei Kontaktierung der äußeren Anschlüsse (Emitter- und Kollektoranschluß) ist von den beiden Halbleiterzonenübergängen der eine im Sperrrichtung, der andere in Durchlaßrichtung gepolt, und zwar wird die Polung so gewählt, daß die Basis-Kollektordiode in Sperrrichtung, die Emitter-Basisdiode in Durchlaßrichtung gepolt ist. Im Falle eines p-n-p-Transistors hieße das, daß die Kollektorzone mit dem negativen Pol der Spannungsquelle und die Emitterzone mit dem positiven Pol der Spannungsquelle zu verbinden ist. Da die eine Diodenschicht gesperrt ist, fließt nur ein geringer Sperrstrom, der aus den Minderheitsladungsträgern beiderseits der Kollektor-Basisdiode besteht. Dazu treten noch einige Ladungsträger, die aus der Emitterzone von den dort vorhandenen freibeweglichen Ladungen (beim n-p-n-Transistor z.B. also Elektronen) beim Hineindiffundieren in die Basisschicht bis in den Bereich des Kollektor-Basis-Potentialgefälles gelangen. Der dadurch bestimmte Stromanteil ist aber nur gering, da die Lage des elektrischen Potentials der mittleren Zone, also der Basiszone, dem Hineindiffundieren entgegenwirkt. Bei gewöhnlichen Transistoren wird bekanntlich dieser letztere Stromanteil durch elektrische Ansteuerung der Basis oder des Emitters wesentlich erhöht. Beim

Phototransistor erfolgt nun die Ansteuerung durch Lichtbestrahlung. Man fokussiert den Lichtstrahl auf die Basis Emitterdiode, wodurch sich erstens derselbe Effekt wie bei der einfachen Photodiode ergibt und zweitens durch die auf diese Weise in die Basiszone gelangten Ladungen deren Potential derart verändert wird, daß das Hineindiffundieren von der aus der Emitterzone stammenden Ladungsträger wesentlich erleichtert wird. Die Folge ist, daß der primär ausgelöste Photostrom (reiner Photodiodeneffekt) um ein Vielfaches verstärkt wird (ungefähr 20-fach, Transistoreffekt).

Die modernen Photodioden und Phototransistoren bestehen nun aus kleinen Einkristallen. Folglich sind Störungen, die auf den polykristallinen Charakter bei klassischen Sperrschichtzellen zurückzuführen sind, hier nicht zu finden. Vor allem sind solche Elemente außerordentlich trägheitslos. Photodioden auf Germaniumbasis sind z.B. bis  $10^5$  Hz hinaus als trägheitsfrei anzusehen. Bei Phototransistoren liegt die Grenze zwar tiefer, ist aber bei Steuerungen durch Wechsellicht und besonders solches, das durch mechanische Schwingungen erzeugt worden ist, als immer noch sehr hoch anzusehen. Die Grenze ist etwa  $15 \times 10^3$  Hz. Daß sie tiefer liegt als bei der einfachen Photodiode, kann durch die Zeit erklärt werden, die die Ladungsträger zum Hindurchdiffundieren durch die Basiszone benötigen. Auch vergeht eine Zeitspanne, ehe die primär photoelektrisch erzeugten Ladungsträger die Mittelzone so weit auffüllen, daß der Diffusionsvorgang ermöglicht wird. Diese Aufladung erfolgt ähnlich wie bei einem Kondensator, so daß dem Vorgang eine Kapazität zugeordnet werden kann, die zusammen mit dem Widerstand des Transistors (sonderlich der Basiszone) ein RC-Glied darstellt, also eine Zeitkonstante bedeutet. Durch fortschreitende Technologie der Transistor-Herstellung wird es möglich, die Basiszone sehr dünn herzustellen, wodurch die Frequenzgrenze heraufgesetzt wird. Wenn dies auch für gewöhnliche Transistoren ein erstrebenswertes Ziel ist, dürfte für die Meßtechnik mechanischer Schwingungen mit Hilfe von Phototransistoren die bisher vorhandene Trägheitslosigkeit als völlig ausreichend angesehen werden.

Ehe das Verhalten der verschiedenartigen photoelektronischen

Bauelemente in tabellarischer Uebersicht zusammengestellt und diejenigen Elemente, die sich auf Grund dieser Untersuchungen für die Messung mechanischer Schwingungen als besonders geeignet erwiesen haben, mit ihren genauen Daten genannt werden sollen, sei noch kurz auf eine Entwicklung der RCA hingewiesen, bei der eine p-n-Schicht in anderer Weise als bei der Photodiode zur Erzeugung einer Photospannung verwendet wird. Ueblicherweise entspricht die an den Elektrodenanschlüssen der p- und n-Zone abgreifbare Leerlaufphotospannung der Beleuchtungsstärke im Gebiet des p-n-Ueberganges. Da wegen der Diffusionslänge der Ladungsträger die Lichtempfindlichkeit des Halbleiterzonenüberganges nach beiden Seiten glockenkurvenförmig abfällt, kann in beschränktem Umfang auch eine Spannungsabhängigkeit von dem Auftreffpunkt eines scharfen intensitätskonstanten Lichtbündels erreicht werden. Diese Möglichkeit der Photospannungsmodulation durch seitlich abgelenktes Licht an Stelle von intensitätsmäßig variiertem Licht ist jedoch nur auf sehr kleine Bereiche beschränkt, in ihrem Verlauf von Exemplar zu Exemplar der verwendeten Photodiode sehr unterschiedlich und außerdem nicht-linear wegen des Glockenkurvenverlaufs der Lichtempfindlichkeit am p-n-Uebergang.

Man kann aber unter Vermeidung der genannten Nachteile eine solche Abhängigkeit der Photospannung von der Lage des Auftreffpunktes des Lichtstrahls auf die Photoschicht erreichen, indem man die Kontaktierung einer p-n-Sperrschichtzelle etwas anders vornimmt (richtungsabhängige Photozelle, entwickelt von der RCA). Es wird eine relativ großflächige p-n-Schicht verwendet, die dadurch entsteht, daß auf ein dünnes Plättchen von negativ dotiertem Germanium (n-Seite) Indium aufgelegt wird, wobei sich der p-n-Uebergang an der Grenze ausbildet. Die negative Schicht ist so dünn, daß ein auftreffender Lichtstrahl bis zum p-n-Uebergang hindurchdringt. Es entsteht dann nicht nur die übliche Photospannung quer zur p-n-Trennfläche, sondern daneben bildet sich um den Lichteinfallspunkt ein Spannungsgefälle nach allen Richtungen hin parallel zur Grenzfläche aus derart, daß der getroffene Punkt auf dem geringsten Potential liegt und kreisförmig um ihn herum positivere Aequipotentiallinien entstehen. Dieses Spannungsgefälle verläuft

linear mit der Entfernung von diesem Punkt tiefster Spannung. Wenn also am Rande des Kristalls auf der n-Seite metallische Kontakte angebracht werden, liegen diese auf einem unterschiedlichen Potential, wenn das Licht unsymmetrisch zu diesen Kontakten auffällt. Die an den Kontakten abgreifbare Potentialdifferenz geht dann also ebenfalls linear mit der Auswanderung des Lichtstrahls aus der symmetrischen Mittellage. Dieser Vorgang kann also ebenfalls, nach Verstärkung der entstandenen Spannung, zur Messung der Schwingamplitude herangezogen werden, wobei nicht die Lichtintensität, sondern durch geeignete Spiegelanordnungen die Richtung des Lichtstrahls moduliert wird. Als Empfindlichkeit dieser Zellenanordnung kann im Mittel 1 mV je mm Strahlauslenkung angegeben werden. Im Trägheitsverhalten gleicht sie der normal verwendeten Photodiode, spricht also bis zu sehr hohen Frequenzen (ca.  $10^5$  Hz) verzerrungsfrei an.

#### Uebersicht über die Eigenschaften photoelektronischer Bauelemente

Schließlich sollen in einer tabellarischen Uebersicht die Größenordnungen der in Frage kommenden Daten und sonstigen Eigenschaftsmerkmale aller in den letzten Abschnitten ihrem Wirkungsprinzip nach näher beschriebenen Typen photoelektronischer Bauelemente zusammengestellt werden.

Die Lichtempfindlichkeit wird grundsätzlich auf den einfallenden Lichtstrom bezogen (Einheit: Lumen), da einerseits die verschiedenen photoelektronischen Bauelemente auch eines Typs unterschiedliche Größen hinsichtlich der aktiven Flächen aufweisen, andererseits aber ein durchgehender Vergleich ermöglicht werden soll. Voraussetzung ist also immer die gleiche Ausleuchtung dieser Fläche. Bei den als Photoelementen (also ohne Hilfsspannung) wirkenden Typen wird sowohl die Leerlaufspannung als auch der Kurzschlußstrom zur Empfindlichkeitsangabe benutzt, da dadurch für den Praktiker die ganze Anwendungsbreite am besten umrissen ist. Der erzielbare Kurzschlußstrom je Lichtstromeinheit gibt gleichzeitig das Maß für die Empfindlichkeit bei Verwendung mit Hilfsspannung an. Für die Photowiderstände müßte eigentlich der Widerstandswert in Abhängigkeit vom Licht angegeben werden. Unter Zugrundelegung der normalerweise für den

betreffenden Photowiderstand zulässigen Betriebsspannung (grober Durchschnitt ca. 100 V) kann aber auch hier die Stromempfindlichkeit benutzt werden, was einen besseren gegenseitigen Vergleich ermöglicht, vor allem mit auf anderem Wirkungsprinzip beruhenden Elementen. Da diese Widerstände außerdem spannungsabhängig sind, muß für die genaue Berechnung einer Schaltung für den dann tatsächlich zur Anwendung gelangen Photowiderstand eine Strom-Spannungskennlinienschar mit der Beleuchtungsstärke als Parameter zu Hilfe genommen werden. Im Falle von nichtlinearem Empfindlichkeitsverlauf stellen die Zahlenangaben die durch entsprechende Schaltung erreichbaren günstigsten Werte dar, die dann am besten experimentell durch Widerstandsabgleich und Lichtstromvariation zu verwirklichen sind.

Es ist in dieser groben Übersicht für die spektrale Empfindlichkeit lediglich die Lage des Spektralmaximums angegeben. Für die Höchstbelastung ist im allgemeinen die bei Dauerbetrieb vertretbare Maximalleistung maßgeblich. Bei Photokatoden (Vakuum- und Gaszellen) ist jedoch der größtzulässige Strom pro Flächeneinheit der Katode der für die Grenzbelastung entscheidende Wert. Schließlich darf bei den meisten photoelektronischen Bauelementen auch eine Höchstspannung nicht überschritten werden, da bei überhöhter Feldstärke Durchschlag und Zerstörung, besonders bei den Sperrschichten, eintritt. In der zunächst aufgeführten allgemeinen Übersicht wird nur der besonders charakteristische Grenzwert aufgeführt. Der Dunkelstrom bzw. Dunkelwiderstand ist in der ersten Übersicht nicht mitaufgeführt. Er liegt bei fast allen photoelektronischen Bauelementen gegenüber den Meßwerten bei Belichtung tief genug, so daß die Anwendbarkeit nicht im Frage gestellt ist. Die Werte erstrecken sich vom  $10^{-9}$  bis  $10^{-8}$  A bei Photokatoden (Vakuum-, Edelgaszellen, Multiplier) über maximal  $10^{-5}$  A bei einigen Photowiderständen (Thalofid, PbS) und sind lediglich bei Germanium-Phototransistoren noch etwas höher, etwa  $3 \times 10^{-5}$  A (Photodioden:  $10^{-5}$  A). Störende Dunkelströme lassen sich durch die Meßanordnung unterdrücken, indem sie als Gleichstrom gegenüber dem Wechselstrom des Meßwertes im Verstärker nicht miterfaßt werden.

Voraussetzung bei solchen Datenangaben ist, daß die Farbtemperatur der Lichtquelle dem Spektralverhalten des lichtempfindli-

Photoelektron. Bauelement	Empfindlich- keit	Belastungs- grenze	Kleinste nach- weisb. Lichtmg.	Frequenz- grenze	Spektral- maximum	andere Eigensch. Bemerkungen	Mat.d.Elemente bzw.Katodengrund- substanzen
Vakuumphotozel- len	20-100 /uA/Lm	10-20 /uA/cm <sup>2</sup> Kat. fl.	10 <sup>-7</sup> Lm	10 <sup>8</sup> Hz	0,4-0,8/u	linear; ermüdbar	Cd, K, Na, Cs.
Edelgasphoto- zellen	100-400 /uA/Lm	" "	" "	10 <sup>4</sup> Hz	" "	nichtlinear; ermüdbar	" "
Photomultiplier	100 A/Lm	1 mA Anodenstr.	10 <sup>-8</sup> Lm	10 <sup>8</sup> Hz	" "	hohe konstante Gleichsp.erfor- derlich	" "
Photowider- stände	10-50mA/Lm Ausnahmen: bis 10 A/Lm	50-100 mW	10 <sup>-8</sup> -10 <sup>-7</sup> Lm	10 <sup>2</sup> -10 <sup>4</sup> Hz	0,5-2,5/u	nichtlinear, rel. träge, ermüdbar	Se, Se-Te, Thalo- fid, CdS, CdSe, PbS
(herkömmliche) Sperrschicht- zellen	200-300 mV/Lm Leerl. Sp.100-600 /uA/Lm	0,2 V Leerl. 10 mA Kurzschl.	10 <sup>-6</sup> Lm	10 <sup>2</sup> -10 <sup>3</sup> Hz	0,5-0,6/u	träge, ermüdbar	Cu-Cu <sub>2</sub> O, Se (gegen Metall)
Germaniumphoto- dioden	200 mV Leerl.Sp. 30mA/Lm	50 mW	10 <sup>-7</sup> Lm	10 <sup>5</sup> Hz	1,5/u	stark tempera- turabhängig	Germanium (dotiert)
Germaniumphoto- transistoren	0,5-1,0 A/Lm	50 mW Kol- lektor Verl. Lstg.	10 <sup>-7</sup> Lm	10 <sup>3</sup> -10 <sup>4</sup> Hz	1,5/u	stark tempera- turabh.; nicht- linear	Germanium (dotiert)
Siliziumphoto- zellen	0,5 V/Lm Leerl.Sp. 9 mA/Lm	100 mW	10 <sup>-8</sup> Lm	10 <sup>4</sup> Hz	0,9/u	hohe Leist.Abg., geringe Tempera- turabhängigkeit, hohe zul.Betriebs- temperatur	Silizium

chen Materials angepaßt wird. Die Wellenlänge der maximalen Empfindlichkeit gibt einen groben Anhaltspunkt für das spektrale Verhalten der Zelle.

Da die gemachten Ausführungen andere zu beachtende Gesichtspunkte genügend umrissen haben, kann die Uebersicht unmittelbar folgen. Es handelt sich um Mittelwerte; einige Exemplare, die zum Teil gegenüber ihrem Typus auch Ausnahmen sind, (besonders bei den Photowiderständen) und die zur tatsächlichen Verwendung empfohlen werden können, werden mit genaueren Daten anschließend aufgeführt.

### Kennlinien und genaue Eigenschaften einiger ausgewählter lichtempfindlicher Schaltelemente

Es handelt sich nun darum, unter allen in Betracht kommenden photoelektronischen Bauelementen einige wenige auszuwählen, die für irgendwelche entwickelten oder noch zu entwickelnden optischen Meßmethoden tatsächlich zur Anwendung kommen können. Neben allen bisher schon bedachten Eigenschaften kommt es unter Umständen auch darauf an, daß das betreffende Element billig, mechanisch robust und räumlich klein ist, wenn auch die Forderungen nach hoher Meßempfindlichkeit und -genauigkeit bisweilen nur durch größeren Aufwand erfüllt werden können. Immerhin können auf Grund dieser Untersuchungen vier photoelektronische Bauelemente aus der sehr großen Fülle von Typen und Exemplaren hinsichtlich all ihrer Eigenschaften zusammengenommen gegenüber anderen als für den gedachten Verwendungszweck recht vorteilhaft angesehen werden. Es sind dies der Photowiderstand CdSe der Firma Dr. Lange, die Photodiode TP 50 der Firma Siemens und Halske, der Phototransistor OCP 71 der Firma Valvo und der Photomultiplier 931 A der RCA. Unter den Photowiderständen dürfte die CdSe-Zelle tatsächlich die zur Zeit einzige sein, die in jeder Hinsicht den Vorzug verdient. Ein gleich groß empfindlicher Photowiderstand ist noch die CdS-Zelle, die aber weitaus träger ist. Unter den Photodioden sind noch einige weitere der TP 50 vergleichbar, die aber nicht als besser geeignet anzusehen sind. Hingewiesen sei besonders auf den französischen Typ DPD 11 (Germanium), ferner den Valvo-Typ OAP 12 mit um ein geringes höherer Empfindlichkeit, aber auch höheren Dunkelstrom und

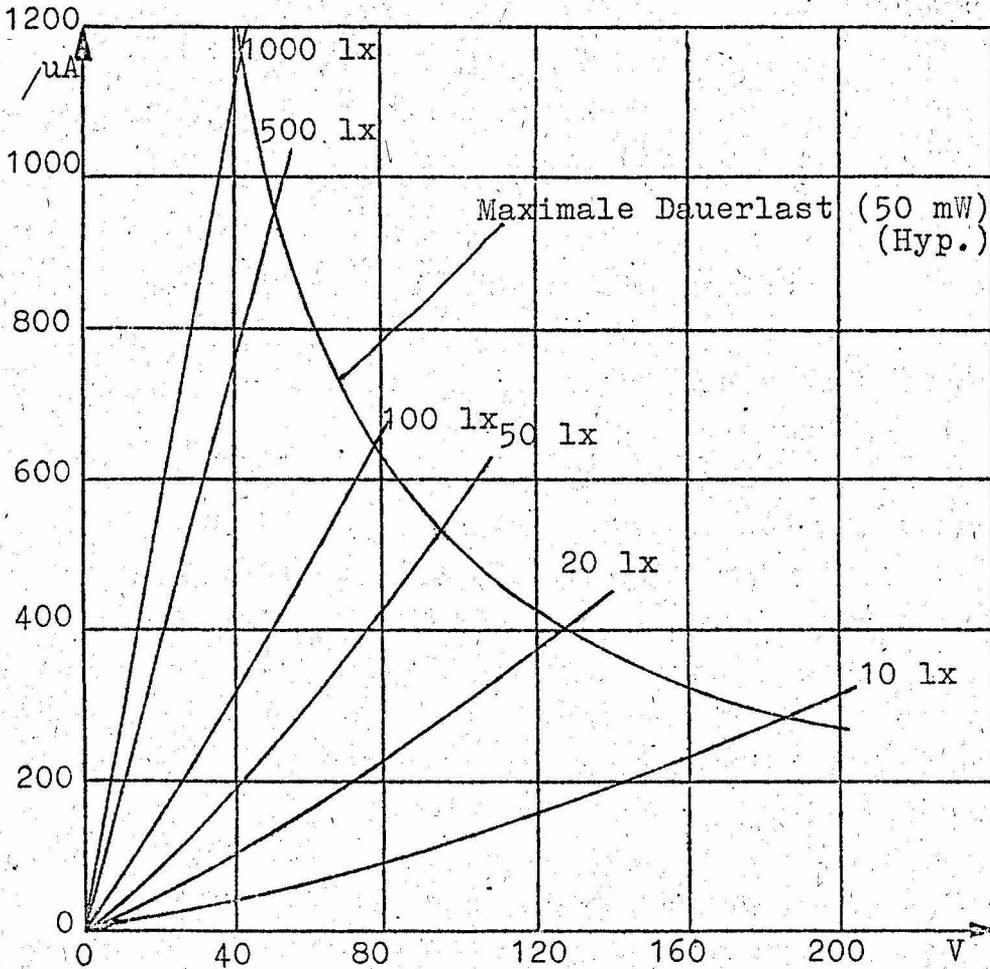
kleinerer höchst zulässiger Sperrspannung. Andere im Handel erhältliche Typen weisen oft starke Exemplarstreuungen auf und liegen vielfach unter den angegebenen Kenndaten. Die hier empfohlenen Photoelemente ermöglichen wenigstens im allgemeinen reproduzierbare Schaltverhältnisse. Was für Photodioden gesagt ist, gilt auch für Phototransistoren. Auch hier gibt es schon eine größere Anzahl von Typen, die, wenn sie sich überhaupt gemäß den angegebenen Kenndaten verhalten, als im wesentlichen gleichwertig gelten können. Meist sind es aus gewöhnlichen Transistoren hervorgegangene Typen, deren eine p-n-Schicht dem Lichteinfall durch konstruktive Maßnahmen besonders gut ausgesetzt ist, indem Linsenfenster angebracht sind, die gleichzeitig den Germaniumkristall vor Feuchtigkeit schützen. So ist z.B. der Phototransistor OCP 71 von Valvo aus dem normalen Transistor OC 71 entstanden, ähnlich der Telefunken-Typ OC 660 F aus dem OC 604. Man kann auch normale Schalttransistoren als Phototransistoren verwenden, wenn die Schutzschicht entfernt wird. Der erreichbare Gütegrad ist aber stets viel geringer als bei den von vornherein als Phototransistoren konstruierten Exemplaren. Außerdem korrodiert ein freigelegtes Exemplar sehr schnell. Für die Zwecke dieser Untersuchungen wurden einige derartige Versuche gemacht, und zwar abgesehen von einem Germanium-Transistor der Firma Telefunken vor allem mit den Silizium-Transistoren OC 430, 440, 450, 460 vom Intermetall, um überhaupt das Verhalten von Phototransistoren auf Silizium-Basis festzustellen. In keinem Fall kann aber von einem befriedigenden und jederzeit reproduzierbaren Erfolg die Rede sein. Daher ist schließlich der Valvo-Typ OCP 71 gewählt worden. Die Dioden und Transistoren auf Germanium-Basis sind stets sehr temperaturabhängig, besonders der Dunkelstrom, aber auch der Lichtstrom, so daß diese Elemente in jedem Fall besondere Schaltmaßnahmen erfordern, um die dadurch hervorgerufenen Störungen auszugleichen. Wird - besonders für Eichenlagen - auf hohe Empfindlichkeit bei geringem Dunkelstrom und geringer Temperaturabhängigkeit und gleichzeitig auf hohe Trägheitslosigkeit Wert gelegt, so muß zum Photomultiplier zurückgegriffen werden. Zu ihrem Betrieb ist aber eine hohe und konstante Gleichspannung erforderlich, ein Aufwand, der nicht für jedes vorgesehene Meßgerät auf optischer Grundlage notwendig oder tragbar ist. Auch hier bieten sich viele gleich-

artige Möglichkeiten, und lediglich Billigkeitsgründe haben die Wahl auf den sehr guten Typ der RCA (Radio Corporation of America), nämlich den Photo-Multiplier 931 A fallen lassen. Will man noch genauer arbeiten, so muß man bei höheren Kosten auf andere Fabrikate zurückgreifen, Z.B. empfiehlt sich dann der Valvo-Typ 50 AVP, der grob gesagt um eine Zehnerpotenz empfindlicher ist. Daß Multiplier an Stelle von Vakuum- oder Gaszellen mit entsprechenden Verstärkern zur Anwendung gelangen, liegt, wie weiter oben ausgeführt, an dem viel günstigeren Signal-Rausch-Verhältnis und der sehr hohen Empfindlichkeit. Für Meßzwecke empfiehlt sich das immer, während einfache Lichtschrankenschaltungen (Ein- Ausschaltungen) im allgemeinen mit einfachen Photozellen arbeiten.

Für die Zwecke der Konstruktion elektro-optischer Meßgeräte dürfte je nach den besonderen Anforderungen und Umständen eines dieser vier photoelektronischen Bauelemente die erforderlichen Dienste leisten. Ihre genaueren Daten seien im folgenden zusammengestellt. Die Spektralempfindlichkeit wird für alle vier Elemente zusammen zum Schluß in einem Diagramm aufgezeichnet. Es sind von uns Meßanordnungen mit diesen Elementen ausgeführt und auch praktisch verwendet worden. Durchschnittlich kann vom guter Bewährung gesprochen werden, obwohl die eigentlichen Meßprinzipien noch stark in der Entwicklung sind. Die Bauelemente selbst betrifft diese Entwicklung natürlich nicht, sondern nur die Art der Lichtmodulation vor dem Element und die Verstärker- und Kompensationsschaltungen danach. Selbstverständlich können neue in den Handel kommende Photozellen unter Umständen noch besser geeignet sein als die bisher bekannten.

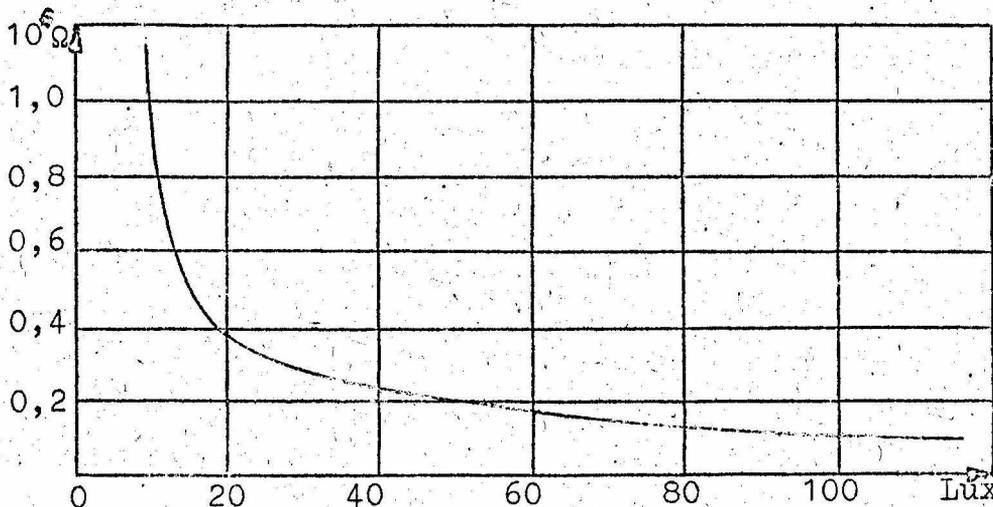
Wir beginnen mit dem Photowiderstand CdSe, Firma Dr. Lange. Empfindlichkeit: Die genaue Empfindlichkeit geht aus dem in der folgenden Abbildung (Abb. 2) gezeigten Zusammenhang zwischen Strom und Spannung hervor, wobei die am Ort der lichtempfindlichen Fläche herrschende Beleuchtungsstärke zum Lichtmaß gewählt wird. Der erforderliche Lichtstrom läßt sich über die Fläche, die meist sehr genau bekannt ist, errechnen unter Voraussetzung gleicher Ausleuchtung. Im Falle der CdSe-Zelle beträgt diese Fläche  $10 \text{ mm}^2$  (Abmessung  $2 \times 5 \text{ mm}$ ). Als Orientierungsmaß für die

Empfindlichkeit wird (gleich in Strom umgerechnet) 1 bis 10 A/Lm angegeben, jedoch ist das wegen der oberen zulässigen Dauerlast von 50 mW ein bei den üblichen Spannungen von 100 bis 200 V ein viel zu großer Stromwert. Eine bessere Angabe und ein ursprüngliches Maß für einen Photowiderstand ist der Widerstandsabfall bei Beleuchtung. Jedoch verläuft der Widerstand über der Beleuchtung nicht linear, fällt vielmehr in diesem Falle hyperbelähnlich ab, wozu noch kommt, daß der CdSe-Widerstand sich auch in ohmscher Hinsicht nicht streng linear verhält. Also



Strom-Spannungs-Charakteristik der Cd-Se-Zelle  
Parameter: Beleuchtungsstärke in Lux

Abb. 2



Widerstand-Beleuchtungsstärke-Charakteristik;  
Zellenspannung 60V

Abb. 3

lassen sich die Empfindlichkeitseigenschaften nicht in einem Zahlenwert zusammenfassen, sondern müssen aus dem Strom-Spannungs-Diagramm mit der Beleuchtungsstärke in Lux als Parameter entnommen werden. Zur Orientierung ist anschließend noch für die Zellenspannung 60 V der Widerstandsverlauf über der Beleuchtungsstärke wiedergegeben, wobei zu bemerken ist, daß für andere Spannungswerte die Kurven ganz dicht bei der gezeichneten und praktisch parallel zu ihr verlaufen. Siehe Abb. 2 und 3.

Maximalwerte: Die maximale Belastung, die der Zelle zugemutet werden kann, beträgt für Dauerbetrieb  $N_{\max} = 50$  mW, kann aber kurzzeitig bis zur Spitzenbelastung von 100 mW darüber hinausgehen. Spannungsmäßig dürfen nicht mehr als 300 V = bzw. 200 V Spannung angelegt werden, womit für eine in Abb. 2 einzuzeichnende Widerstandsgerade für einen in Reihe liegenden Abgriffswiderstand der äußerste in Frage kommende Fußpunkt auf der Spannungslinie (Abszisse) festgelegt ist. - Wellenlänge des Lichtes maximaler Empfindlichkeit 0,75  $\mu$ .

Dunkelwiderstand: Der Dunkelwiderstand liegt verhältnismäßig hoch und ist  $R_0 > 10^6 \Omega$ .

Temperaturverhalten: Im Dauerbetrieb sind maximal 75° Celsius Zellentemperatur zulässig, kurzzeitig auch bis 100° Celsius. Ueber das Verhalten der Kenndaten ist, da der Widerstand erst seit kurzem im Handel ist, wenig bekannt. Als Anhaltswert kann angegeben werden, daß der Widerstand um 1 % fällt bei 1° Celsius Temperaturerhöhung.

Trägheit: Von der Firma wird angegeben, daß die Zeitkonstante etwa 1 msec beträgt. Wir konnten Schwingungen bis 1400 Hz unverfälscht messen, so daß mit Sicherheit 1000 Hz als obere Grenzfrequenz für Schwingungsmessungen bezeichnet werden können.

Bemerkungen: Ein Vorteil der CdSe-Zelle ist ihre Kleinheit, mechanische Robustheit sowie ihre hohe Empfindlichkeit, die im wesentlichen spektral am roten Ende des sichtbaren Lichtes und besonders im angrenzenden Infrarot liegt, dabei aber nicht über 0,9 bis 1  $\mu$  hinausgeht. Die Zelle ist sehr billig und daher auch zusammen mit dem erforderlichen Aufwand günstiger als ein Multiplier. Trägheitsmäßig verhält sie sich bei ihrer hohen Empfindlichkeit besser als die meisten anderen Photowiderstände.

Lichtempfindliche Fläche: 2 x 5 mm.

Photodiode TP 50, Firma Siemens und Halske.

Hier muß unterschieden werden zwischen der Anwendung als Photoelement, also ohne Hilfsspannung, und der Anwendung als Photodiode, also mit Hilfsspannung. Als Photoelement wird man sie nur dann verwenden, wenn man mit ihr eine nachfolgende Transistorstufe ansteuert. Man kann dann aber auch an Stelle von Photodiode (als Element) und Transistor zusammen einen Phototransistor nehmen, was in der Wirkung gleichwertig ist. Um Lichtschwankungen in merkliche Spannungsschwankungen zu verwandeln, verwendet man die Diode mit Hilfsspannung (in Sperrichtung) und greift an einem Arbeitswiderstand ab.

Empfindlichkeit: Die Photodiode arbeitet oberhalb einer nur kleinen Sättigungssaugspannung weitgehend linear, so daß die Empfindlichkeit mit dem Zahlenwert  $3 \cdot 10^{-2} \mu\text{A/lx}$  eindeutig bestimmt ist. Als Photoelement ist die Lichtabhängigkeit nicht linear; im Mittel gilt für die erzielbare Leerlaufspannung  $10^{-4} \text{ V/lx}$ . Je geringer der Lastwiderstand, umso mehr ist der erzeugte Strom der Belichtung proportional und schließlich gilt für den Kurzschlußstrom wieder sehr genau der Wert  $3 \cdot 10^{-2} \mu\text{A/lx}$ . Die Empfindlichkeit in beiden Verwendungsarten geht im einzelnen aus der folgenden graphischen Darstellung hervor (Abb. 4).

Zur Orientierung ist je eine Widerstandsgerade eingezeichnet.

Maximalwerte: Die Maximalbelastung ist 50 mW bei 20° C Umgebungstemperatur und fällt um 0,8 mW je 1° C. Ueber 50° C Umgebungstemperatur soll das Element im allgemeinen nicht betrieben werden, entsprechend ungefähr 20 mW dann noch zulässiger Belastung. Als höchst zulässige Sperrspannung verträgt die Photodiode 100 V.- Die maximale Empfindlichkeit liegt bei der Wellenlänge  $\lambda = 1,5 \mu$ .

Dunkelstrom:  $I_D = 3,5 \mu\text{A}$  (bei 20° C Umgebungstemperatur).

Temperaturverhalten: Höchste Umgebungstemperatur 50° C. Germanium ist sehr temperaturempfindlich, so daß in der Nähe der oberen Belastungsgrenze (also 50 mW) sich der Photostrom infolge vom Eigenerwärmung kurzzeitig ändert. Bei kleinen Schwankungen um niedrigere Belastungsmittelwerte (10-20 mW) ist diese Erscheinung praktisch nicht ausgeprägt. Der Temperaturgang des Dunkelstroms

ist recht erheblich und wächst etwa exponentiell von 3-4  $\mu\text{A}$  bei  $20^\circ\text{C}$  auf ca. 20  $\mu\text{A}$  bei  $50^\circ\text{C}$ . Der Photostrom zeigt eine wesentlich geringere Temperaturabhängigkeit und steigt linear mit etwa 1 %/ $1^\circ\text{C}$ .

Trägheit: Als obere Grenze für die Frequenz gilt  $10^5$  Hz Wechsellicht.

Bemerkungen: Die Empfindlichkeit ist gegenüber der CdSe-Zelle sehr gering und macht in jedem Fall größeren Verstärkungsaufwand erforderlich. Die Lichtschwankungen dürfen nicht zu klein sein, um erfaßt zu werden, so daß vornehmlich reine Frequenzmessungen (etwa zur Ermittlung von Resonanzfrequenzen bei überhöhten Amplituden) mit der Photodiode erfolgen können. Der Vorteil liegt in der weitgehenden Linearität des Photostroms in Abhängigkeit von der Beleuchtung und in der völligen Trägheitslosigkeit hinsichtlich mechanischer Schwingfrequenzen. Die lichtempfindliche Fläche hat die Größe von etwa  $1\text{ mm}^2$ .

Der Phototransistor OCP 71, Firma Valvo.

Ein Phototransistor stellt praktisch die Vereinigung einer Photodiode mit einer nachfolgenden Transistor-Verstärkerstufe dar. Demzufolge ist abgesehen von der Empfindlichkeit weitgehend ähnliches Verhalten wie bei der Diode gegeben. Auch er beruht auf Germanium-Basis und ist in diesem Fall vom p-n-p-Type.

Empfindlichkeit: Das genaue Verhalten geht aus der Kennlinie hervor, im Mittel gilt  $2,5 \mu\text{A}/\text{Lux}$ . Dabei sind zwischen Emitter und Kollektor Spannungen zwischen 0,1 V (mindest erforderliche Absaugspannung) und 25 V (höchstzulässige Kollektor-Sperrspannung) anzulegen, und zwar so, daß die Kollektor-Basisdiode gesperrt ist, also der Kollektor-Anschluß erhält negatives Potential. Der Basisanschluß kann frei bleiben, aber auch zur Arbeitspunktstabilisierung gegen Temperaturschwankungen durch Gegenkopplung verwendet werden.

Maximalwerte: Maximale Kollektor-Sperrspannung 25 V; höchstzulässige Kollektor-Verlustleistung 25 mW; maximaler Kollektorstrom 10 mA. - Höchst zulässige Umgebungstemperatur  $50^\circ\text{C}$ . -

Spektrallinie größter Empfindlichkeit:  $1,5 \mu\text{A}$ .

Dunkelstrom: Etwa  $100 \mu\text{A}$  bei einer Umgebungstemperatur von  $25^\circ\text{C}$ .

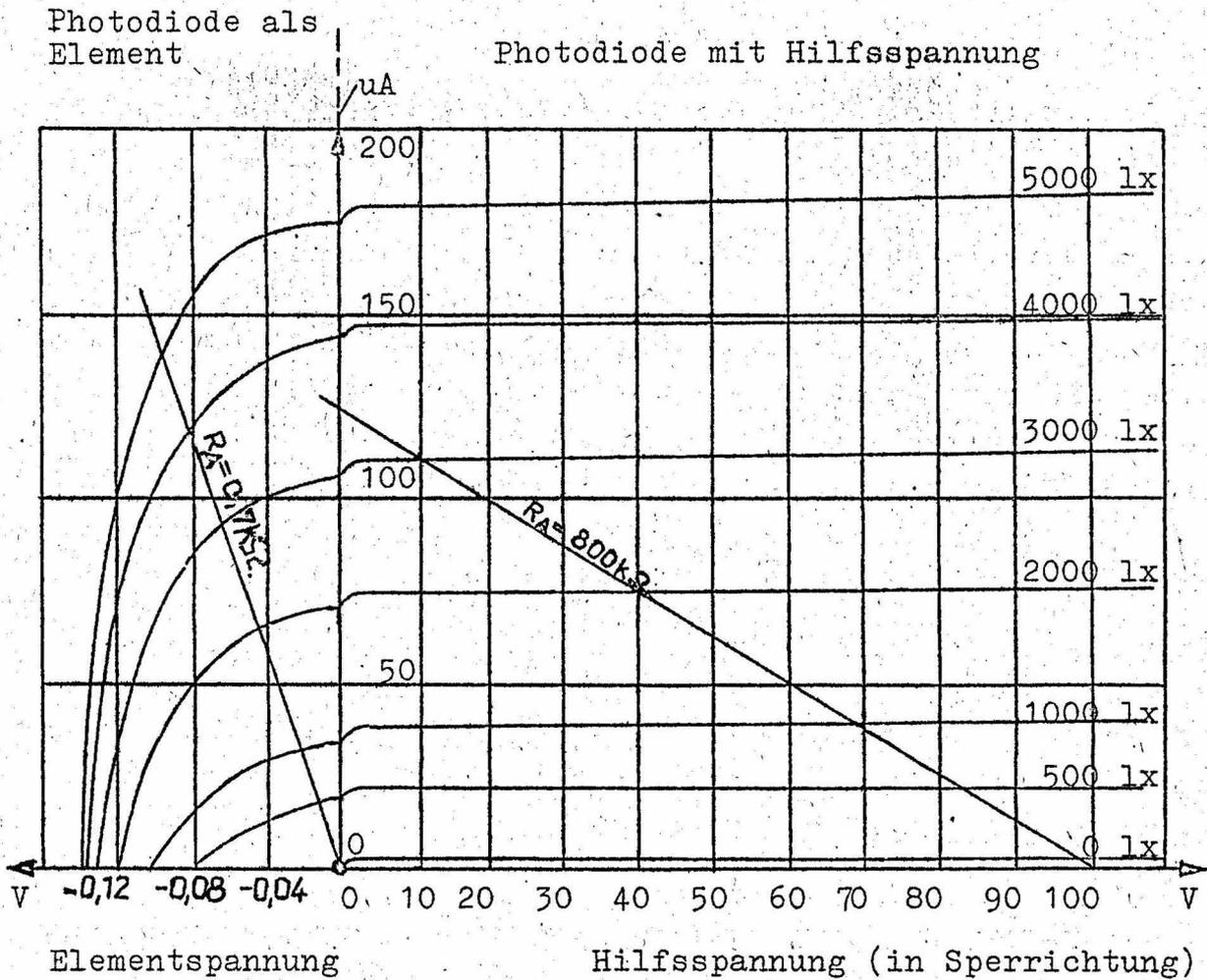


Abb. 4

Temperaturverhalten: Der Lichtstrom zeigt ebenso wie bei der Photodiode eine geringere Temperaturabhängigkeit als der Dunkelstrom. Der Phototransistor sollte unter allen Umständen durch Schaltmaßnahmen temperaturstabilisiert werden (Gegenkopplung über die Basis, Verwendung von NTC-Widerständen o.ä.). Pro 1 mW Kollektor-Verlustleistung steigt die Kristalltemperatur um  $0,4^{\circ}\text{C}$ .

Trägheit: Der Transistor ist bis  $10^4$  Hz als trägheitslos zu betrachten.

Bemerkungen: Lichtempfindliche Fläche etwa  $7\text{ mm}^2$ . Der Vorteil des Transistors gegenüber der Diode liegt in der höheren Empfindlichkeit. Als Nachteil muß der hohe Dunkelstrom angesehen werden. Der Lichteinfall größter Empfindlichkeit muß jeweils durch Verschieben im Lichtstrahl festgestellt werden.

Der Photomultiplier 931 A, Firma RCA.

Der Multiplier hat 9 Dynoden, also 10 Spannungsstufen. Bei im Mittel 100 V Spannungsanstieg auf einer Stufe werden im ganzen ca. 1000 V Gleichspannung, die stabil sein muß, benötigt. Dabei wird zwischen erster Anode und Katode etwas höherer (ca. 1,3 - 1,5-fach, um bei den hohen Austrittsarbeiten von Photokatoden alle Elektronen hinreichend zu beschleunigen), zwischen der 9. Dynode und der Anode etwas niedrigerer (0,7 -fach, um an der Anode Sekundäreffekte zu vermeiden) Spannungsabfall gewählt. Es sind höchstens 1250 V Gesamtspannung zulässig.

Empfindlichkeit: Bei durchschnittlich 100 V Stufenspannung erreicht man  $10^6$ -fache Verstärkung des aus der Katode ausgelösten Photostroms, entsprechend einer Empfindlichkeit vom 20 A/Lm. Zwischen 70 V (entsprechend dem Verstärkungsfaktor  $8 \times 10^4$ ) und 100 V Stufenspannung ist der Empfindlichkeitsverlauf im folgenden Diagramm wiedergegeben. (Abb. 6).

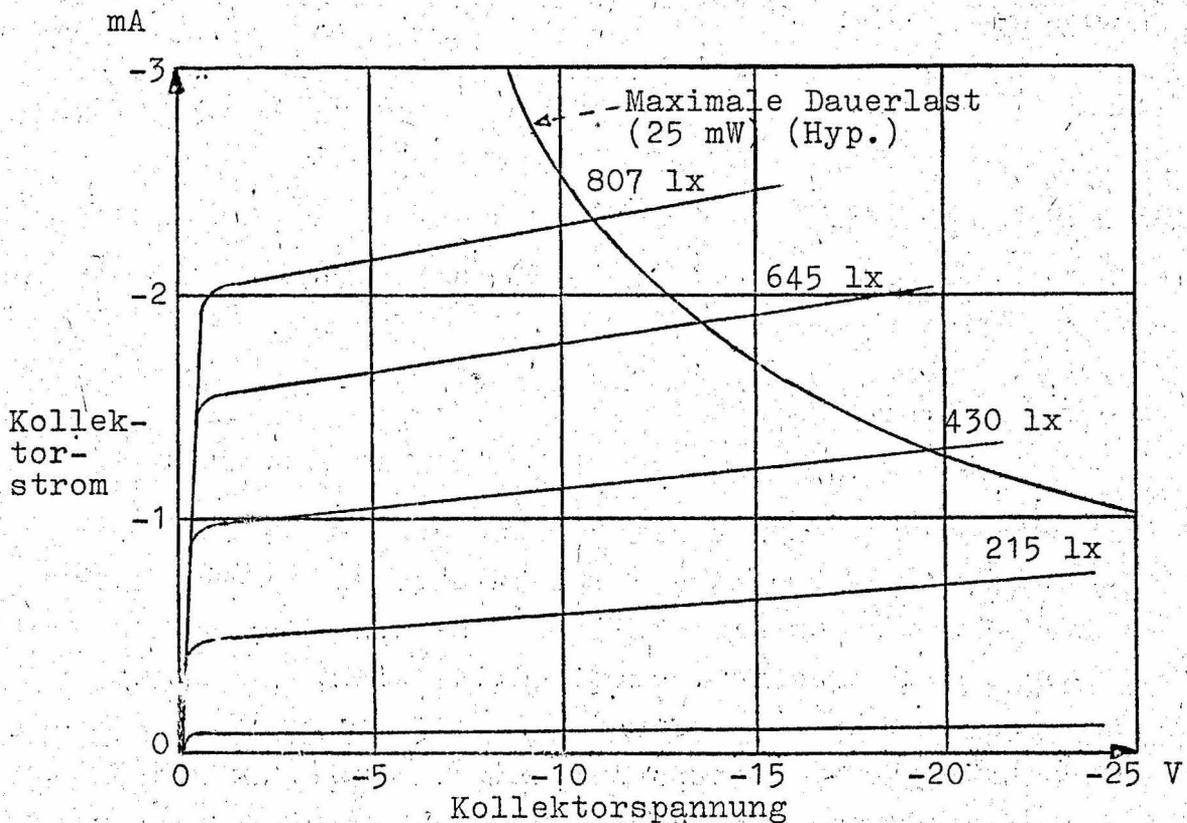


Abb. 5

Dabei ist der Vergleichsmöglichkeit wegen wieder auf die Beleuchtungsstärke Bezug genommen worden. Bei einer Katodenfläche von ziemlich genau  $1,67 \text{ cm}^2$  entspricht der gleichmäßigen Aus-

leuchtung mit 1 Lumen die Beleuchtungsstärke vom  $6 \times 10^3$  Lux. Innerhalb der Grenzen von 70 und 100 V kann die Verstärkung so variiert werden, daß Empfindlichkeiten von etwa 0,3 mA/lx bis 3,3 mA/lx einstellbar sind. Bei Betrieb unter ca. 70 V Einzelstufenspannung wird die hohe Empfindlichkeit des Multipliers nicht mehr recht ausgenutzt. Wenn viel mehr als 100 V angelegt werden, treten Störungen durch Kriechströme und Sprüheffekte auf.

Maximalwerte: Höchstzulässige Gesamtspannung 1250 V. Höchstzulässiger Anodenstrom 10 mA für kurze Zeiten, im Dauerbetrieb 1 mA. Stabiles und störungsfreies Arbeiten erfolgt bei noch niedrigeren Durchschnittswerten, etwa 0,1 mA. - Spektrallinie maximaler Empfindlichkeit 0,4  $\mu$ . - Höchste Umgebungstemperatur 75° C.

Dunkelstrom: Der an der Anode auftretende Dunkelstrom ist kleiner als  $10^{-9}$  A bei Zimmertemperatur.

Temperaturverhalten: Von Zimmertemperatur bis 60° C wächst der Dunkelstrom um eine Zehnerpotenz auf etwa  $10^{-8}$  A. Vakuumphotozellen und entsprechend Multiplier weisen unter den betrachteten Photoelementen das günstigste thermische Verhalten auf. Entsprechend ist auch der Multiplier diesbezüglich den anderen drei Zellen bzw. Elementen überlegen. Oberhalb 75° C erfahren die Katoden- und Dynodensubstanzen Veränderungen.

Frequenzverhalten: Der Multiplier ist praktisch als trägheitslos zu betrachten. Grenze etwa bei  $10^8$  Hz.

Bemerkungen: Der Photomultiplier stellt das empfindlichste und dazu noch in der Empfindlichkeit regelbare photoelektronische Bauelement dar. Seine Verwendung bei optischer Messung mechanischer Schwingungen ist unumgänglich, wenn es sich um die Erfassung kleinster Amplituden handelt. Dabei stellt er im Bereich mechanischer Schwingungen ein völlig trägheitsfreies Element dar. Damit er stabil arbeitet, empfiehlt es sich, ihn nicht zu hoch zu belasten und etwa 1/2 Stunden Anlaufzeit vorzusehen. - Der Querstrom für die Dynodenspannungen soll etwa das zehnfache des Lichtstromes betragen und daher auf ca. 10 mA bemessen sein. Die Katodenfläche beträgt 1,67 cm<sup>2</sup> (2,08 cm x 0,8 cm).

Zum Schluß sei für alle vier näher aufgeführten photoelektronischen Bauelemente die Spektralverteilung der Empfindlichkeit in

einem gemeinsamen Diagramm (Abb. 7) wiedergegeben. Dabei ist für jedes Element gesondert die größte Empfindlichkeit = 1 gesetzt. Dieser Wert ist natürlich für jedes Element ein anderer, wie die obigen Empfindlichkeitsangaben besagen, so daß der relative Vergleich nur für ein Element gilt.

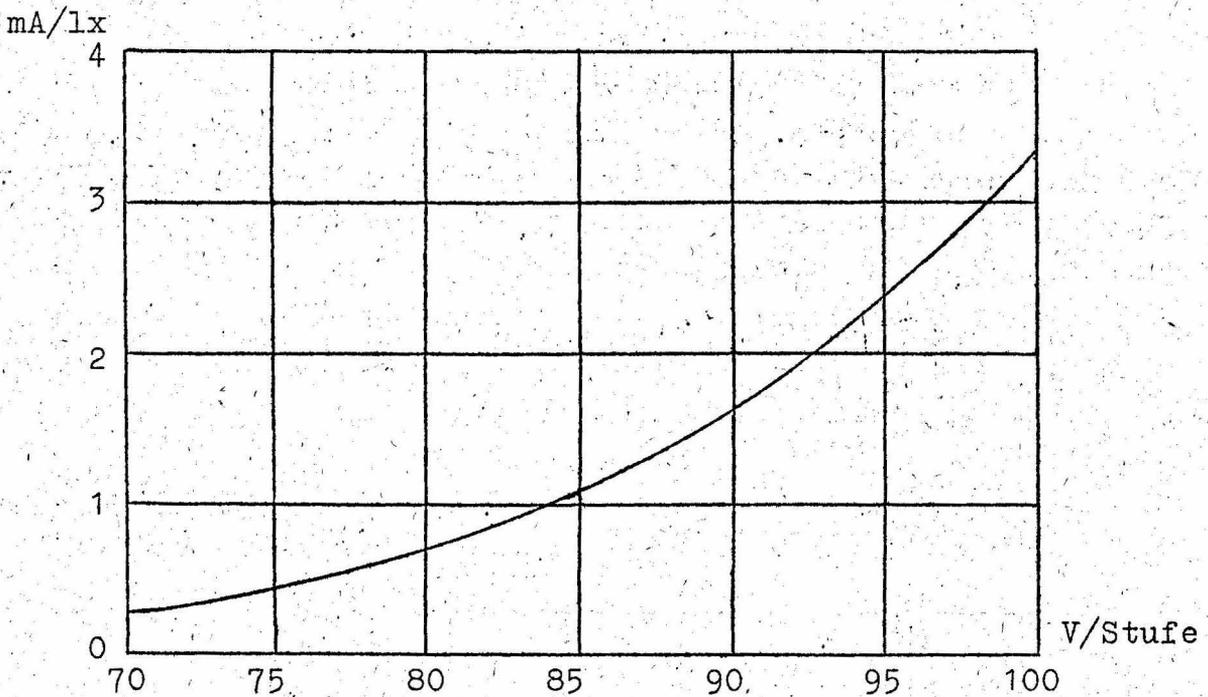


Abb. 6

### Abschließende Hinweise

Schließlich muß noch bemerkt werden, daß alle angegebenen Empfindlichkeitsmaße natürlich nur dann gelten, wenn das betreffende photoelektronische Bauelement solchem Licht ausgesetzt wird, dessen spektrale Zusammensetzung dem Verhalten des Elementes entspricht. Genau wird sich die Uebereinstimmung in den wenigsten Fällen herstellen lassen, jedoch kann man in einem begrenzten Spektralbereich, etwa in der Nähe der Wellenlänge der Maximalempfindlichkeit des Elementes, die Farbtemperatur der Lichtquelle geeignet wählen. Die Angabe der Farbtemperatur der Lichtquelle ist die geschlossenste Aussage für ihr spektrales Verhalten. Sie entspricht derjenigen Temperatur, die ein schwarzer Strahler haben muß, um in einem gewissen Spektral-

bereich die seitens des Elementes geforderte relative Intensitätsverteilung zu haben. Im Falle der Germanium-Photodiode TP 50 und des Phototransistors OCP 71 ist die günstigste Farbtemperatur der Lichtquelle (Glühlampenlicht)  $2400^{\circ}\text{K}$ , für den Photomultiplier 931 A sind  $2850^{\circ}\text{K}$  erforderlich und für die CdSe-Zelle etwa  $2600^{\circ}\text{K}$ .

Es ist klar, daß die Aussonderung geeigneter photoelektronischer Bauelemente als elektrische Geber bei optischen Methoden zur Messung mechanischer Schwingungen den Gesamtrahmen des Problemkreises nicht erschöpft. Abgesehen von den mannigfaltigen Möglichkeiten zur Lichtsteuerung durch den mechanischen Bewegungsvorgang gibt es auch zahlreiche Wege, das primär erhaltene elektrische Signal, das im einfachsten Fall an einem Reihenwiderstand zum Photoelement als Wechselspannung entsteht, zu verstärken bzw. gegen Störungen zu sichern. Vor allem Wärmeschwankungen können Anlaß zu Kompensationsschaltungen geben.

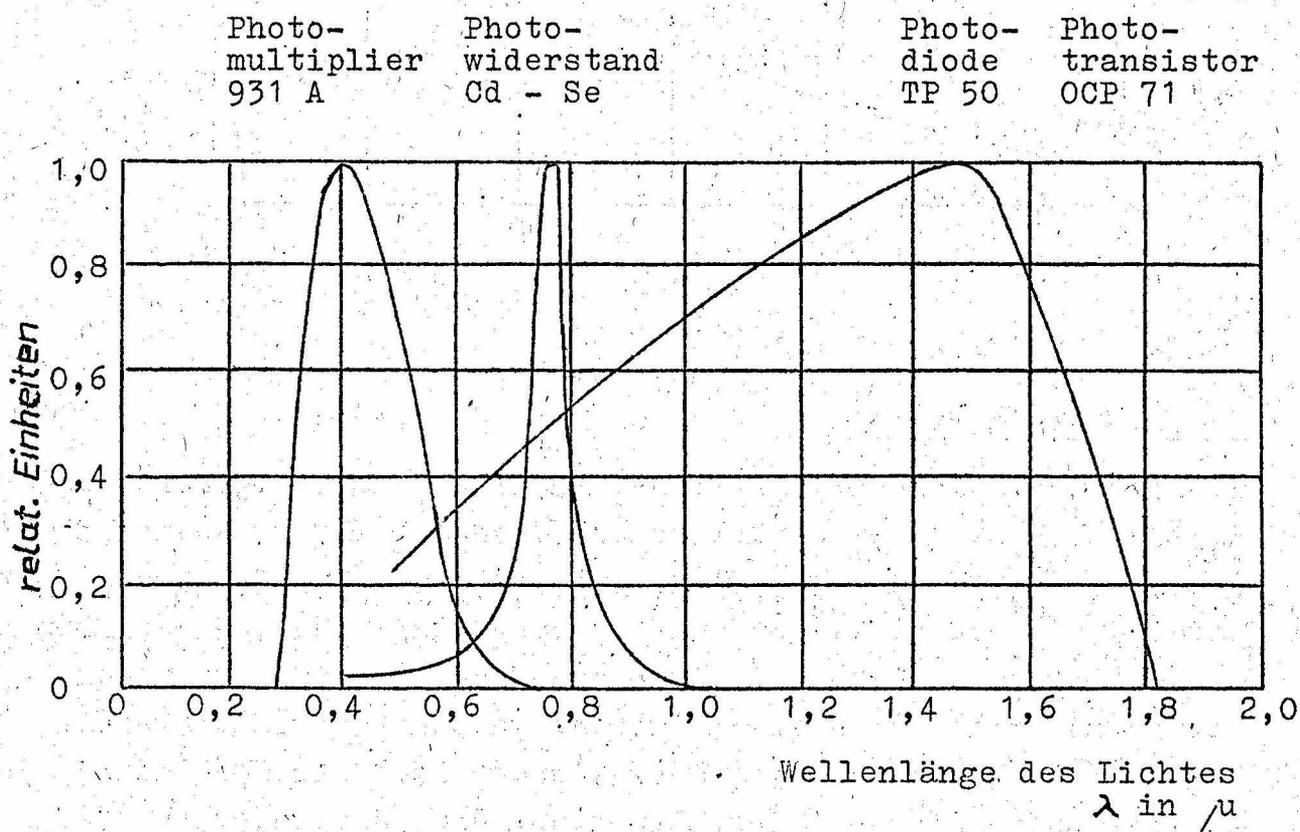


Abb. 7

U e b e r s i c h t

über in Betracht gezogene photoelektronische Bauelemente.

Im Zusammenhang mit dieser Untersuchung sind zahlreiche photoelektronische Bauelemente in Betracht gezogen worden, wobei Datenunterlagen studiert und verglichen und die Einzelexemplare ggf. auch experimentell geprüft worden sind.

- 1.) Firma Valvo (Hamburg): Photozellen Typ 90 AV (Vakuum), 35 45 (Vakuum), 58 CG (gasgefüllt), Photoelektronen-Vervielfacher 50 AVP, Phototransistor OCP 71, CdS Photoleiter ORP 30, PbS-Photoleiter 61 SV, Photodiode OAP 12.
- 2.) Firma Siemens und Halske: Photodiode TP 50,
- 3.) Firma Intermetall (Düsseldorf): Die für Lichteinstrahlung freigelegten Silizium-Transistoren (sie spiegeln also das Verhalten von Silizium-Phototransistoren wider) OC 430, OC 440, OC 450, OC 460.
- 4.) Firma AEG-Telefunken (Berlin): Die gasgefüllten Zellen 9011 G, 9012 G.
- 5.) Firma Elektrocell (Berlin): Selen-Element Typ U.
- 6.) Firma Dr. Lange (Berlin): CdS-Photowiderstand, CdSe-Photowiderstand.
- 7.) VEB Werk Bauelemente der Nachrichtentechnik (Teltow b/Bln.): Germanium-Photodiode (1 Typ ohne Bezeichnung).
- 8.) Firma Dr. Ing. R. Rost (Hannover-Herrenhausen: Photodioden GP 2, GP 10, GP 16, Phototransistor GPT.
- 9.) Firma Texas Instruments (Amerika, Dallas/Texas; über Panelectra, Zürich): n-p-n-Germanium-Phototransistor, Type 800.
- 10.) Firma General Transistors Corp. (Amerika, New York über Panelectra, Zürich): p-n-p-Phototransistor, Type 2 N 318 (früher GT-66)
- 11.) Firma Detectron (Frankreich, Bordeaux): Germanium-Photodiode DPD 11.
- 12.) Firma RCA (Amerika; über Firma Dr. Bürklin, München): Photomultiplier 931 A.

- 13.) Firma Sylvania (Amerika): Photodiode 1 N 77 A.
- 14.) Firma Tungstam (Amerika): 31 verschiedene Gas- und Vakuumzellen nur an Hand von Unterlagen.
- 15.) Firma Maurer (Neuffen/Wttbg.): 20 SEV (Sekundärelektronenvervielfacher) nur an Hand von Unterlagen.
- 16.) Firma Vakuum-Technik (Erlangen): Neben anderen die gasgefüllte Photozelle Typ 550 RT/GJE.
- 17.) National Fabricated Products (Amerika, Chicago: über Panelektra, Zürich): Die Silizium-Zelle Silicon Solar Battery, Type S-1.

L i t e r a t u r (Auswahl)

- W.D. BEVITT: "Transistors Handbook", Prentice Hall, Inc.  
J. DOSSE: "Der Transistor" , S. und H. AG.  
C. REUBER: "Multiplier, Eigenschaften u. Anwendungen",  
Radio Mentor 56, H. 10  
SIMON, SUHRMANN: "Der lichtelektrische Effekt u. seine An-  
wendungen", Springer Verlag, Berlin  
J.N. SHIVE: "The Phototransistor", Bell Lab. Rec. 28  
(1950)  
P.M. PFLIER: "Elektrische Messung mech. Größen", 2. Aufl.  
Berlin(1948)  
I.T. WALLMARK: "Photocell measures lights direction",  
Electronics (1957) Nr. 7  
Harry MILEAF: "The Phototransistor", Radio Electronics  
(1954)  
SUMMER: "Photosensistors"  
R.S. HUNTER: "Photometric Instruments" in "Process  
Instruments and Controls Handbook",  
Mc.Graw-Hill Com. (1957)  
WIESNER u. NISSEL: "Silicium-Fotoelemente", Siemens-Zeit-  
schrift (1958) Heft 3  
HOFFMANN: "Zur Wirkungsweise des n-p-n-Phototran-  
sistors", Zeitschr. f. angew. Physik  
(1958) Heft 9  
GERETH, MUESER: "Eine Prüfapparatur für Photohalbleiter"  
Zeitschr. f. angew. Physik (1958) Heft 9  
BERGER: "Halbleiter", Naturwissensch. Rundschau  
(1957) Heft 1

Ferner umfangreiche Firmenunterlagen und Datenblätter.