

Technischer Bericht Nr. 46

Eine netzunabhängige, leicht transportable Meßeinrichtung zur Registrierung mechanischer Schwingungen

Dipl.-Ing. W. HEUSLER

H 46

1 9 6 1

Eine netzunabhängige, leicht transportable Meßeinrichtung
zur Registrierung mechanischer Schwingungen

Zusammenfassung:

Die exakte Messung mechanischer Schwingungen nach Amplitude, Kurvenverlauf und Frequenz in drei Koordinatenrichtungen erfordert einen beträchtlichen apparativen Aufwand, was in vielen Fällen sehr störend ist. Es wird über die Entwicklung eines einfachen, batteriegespeisten Meßgerätes zur Anzeige des Kurvenverlaufs mechanischer Schwingungen berichtet. Das Gerät - bestehend aus drei Teilen: Geber, Trägerfrequenzverstärker und Katodenstrahloszillograph - ist leicht transportierbar und hat einen geringen Leistungsbedarf. Für den Geber wird ein sehr einfaches fotoelektronisches Meßprinzip verwendet, das jedoch infolge einer statischen Eichmöglichkeit der gesamten Meßapparatur während des Betriebes eine recht genaue Messung möglich macht. Im Trägerfrequenzverstärker und Katodenstrahloszillographen kommen ausschließlich Halbleiterbauelemente zur Verwendung. Dadurch wird der relativ kleine Aufbau und der niedrige Leistungsbedarf erreicht. Von besonderem Interesse dürfte die Entwicklung des transistorisierten Katodenstrahloszillographen sein, da man damit erstmals in der Lage ist, unter den genannten Bedingungen auch die Kurvenform und die Frequenz der Schwingungen zu messen.

Heinrich-Hertz-Institut für Schwingungsforschung

Der Bearbeiter

gez. Heusler

(Dipl.-Ing.W. HEUSLER)

Der Abteilungsleiter

gez. P. Matthieu

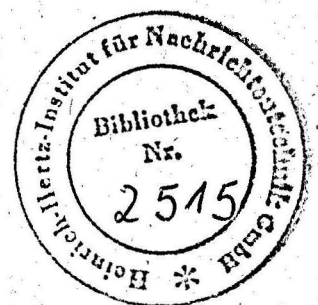
(Prof.Dr. P. MATTHIEU)

Der Institutsdirektor

gez. L. Cremer

(Prof.Dr.-Ing. L. CREMER)

Berlin-Charlottenburg, den 6. Februar 1961



I. Einleitung

II. Grundsätzliches über die fotoelektronische Messung mechanischer Schwingungen unter Verwendung von Trägerfrequenz.

1. Prinzip der fotoelektronischen Messung mechanischer Schwingungen
2. Gründe für die Verwendung von Trägerfrequenz
3. Fotoaufnehmer
4. Ein einfaches Verfahren zur mechanisch-optischen Wandlung

III. Entwicklung eines Trägerfrequenzverstärkers bei Amplitudenmodulation mit der Spannung eines Selen-Photoelementes

1. Modulationsverfahren und Modulationskennlinie
2. Ankopplungsprobleme
3. Schaltbild und Daten des Trägerfrequenzverstärkers

IV. Ein fotoelektronischer seismischer Schwingungsaufnehmer für translatorische Bewegungen

1. Konstruktive Ausführungen
2. Daten des Gebers

V. Ein volltransistorisierter Katodenstrahloszillograph

1. Vor- und Nachteile eines Transistoroszillographen
2. Technische Daten und Schaltbild
3. Einzelheiten über die Schaltung
 - a) Netzgerät
 - b) Horizontalablenkung und Synchronisierung
 - c) Vertikalverstärker

I. Einleitung

In der Praxis der mechanischen Schwingungsmessung hat es sich gezeigt, daß sehr häufig die Aufgabe vorliegt, eine Bauwerks-, Boden- oder Maschinenschwingung mit möglichst geringem Aufwand, dafür eventuell etwas weniger eingehend meßtechnisch zu erfassen. Man möchte, ehe man z.B. umfangreiche Untersuchungen einleitet, wissen, von welcher Größenordnung und welcher Art die vorhandenen Schwingungen sind. Das erfordert eine Meßeinrichtung, die leicht und ohne großen Transportaufwand überall einsatzfähig ist. "Überall" bedeutet in diesem Falle auch dort, wo kein Netzanschluß zugänglich ist. Das Meßgerät muß also aus einer Batterie versorgt werden, was einen entsprechend kleinen Leistungsbedarf erfordert.

In der letzten Zeit sind von der einschlägigen Industrie Geräte entwickelt worden, die es gestatten, in Zusammenarbeit mit einem geeigneten Aufnehmer Mittelwerte bzw. Effektivwerte der mechanischen Schwingungen durch Anzeige an einem Instrument zu messen. Meistens werden geschwindigkeitsproportionale Aufnehmer benutzt, die auf einen Transistorverstärker arbeiten.

Selbst bei Beschränkung auf die Messung periodischer Vorgänge reicht für viele Fälle nach unseren Erfahrungen jedoch eine Mittelwertanzeige nicht aus. Die Amplitudenanzeige an einem Instrument gibt keinerlei Auskunft über die Schwingfrequenz und Kurvenform. Gerade das ist jedoch häufig zur Ermittlung der Resonanzfrequenz oder der Ursache einer Erregung notwendig. Ferner werden bei einer Mittelwertanzeige kurzzeitige Spitzenwerte, wie sie ja auch in periodischen Schwingungen vorkommen, nicht richtig erfaßt. Ein Ziel unserer Entwicklung war es deshalb, auch bei einem orientierenden Meßgerät die Anzeige des Kurvenverlaufs der Schwingungen zu ermöglichen. Am geeignetsten für diesen Zweck ist ein Katodenstrahl-Oszillograph. Die handelsüblichen Oszillographen können nicht benutzt werden, da sie infolge der Verwendung von Elektronenröhren einen zu hohen Leistungsbedarf haben, der sie auch bei einer eventuellen Vorschaltung eines Gleichspannungs-

wandlers für den Batteriebetrieb unbrauchbar macht. Aus diesem Grunde wurde ein mit einer 7 cm-Bildröhre bestückter volltransistorisierter Katodenstrahl-Oszillograph entwickelt, der nur eine Leistung von 5 W benötigt. Inzwischen ist auch ein amerikanisches Gerät dieser Art auf den Markt gekommen, das jedoch wegen seiner universelleren Ausführung technisch sehr aufwendig ist und daher preislich so hoch liegt, daß es für ein einfaches Schwingungsmeßgerät nicht in Frage kommt.

Ein zweites Ziel der Untersuchungen war es, die Verwendungsmöglichkeit eines bisher wenig benutzten Meßprinzips für ein solches Gerät zu erproben. Es handelt sich hierbei um das fotoelektronische Verfahren. Ein Nachteil jedes optischen Prinzips muß sofort genannt werden: Es muß dem Meßgerät zusätzlich Leistung in Form von Licht zugeführt werden. Demgegenüber stehen im Vergleich zu anderen Meßprinzipien einige Vorteile. Die mechanisch-optische Wandlung ist wegproportional. Die Wegmessung ermöglicht erstens eine statische Eichung mit einer Mikrometerschraube und erspart zweitens die bei Aufnehmern nach dem Induktionsprinzip zur Anzeige des Weges notwendige Integration. Durch die statische Eichung direkt vor der Messung werden alle Fehler, die durch Änderung der Empfindlichkeit von Geber, Verstärker und Anzeigegerät in Folge Alterungs- und Temperatureinflüssen auftreten können, ausgeschaltet. Diesen Vorteil der statischen Eichmöglichkeit haben auch alle mit Trägerfrequenz betriebenen Induktivaufnehmer. Die bekannten Brückenschaltungen erfordern jedoch auf der elektronischen Seite einen wesentlich größeren Aufwand als der in diesem Bericht beschriebene Verstärker zum Anschluß eines fotoelektrischen Aufnehmers. Die Trägerfrequenzbrücke muß nach Betrag und Phase abgeglichen werden und macht eine relativ aufwendige phasenrichtige Demodulation notwendig.

Es würde im Rahmen dieser Arbeit zu weit führen, die Vor- und Nachteile der verschiedenen Meßprinzipien bis ins einzelne gegeneinander abzuwägen. Jedes Prinzip hat für bestimmte Anwendungsbereiche seine Vorteile und damit seine Berechtigung. Es sollte nur gezeigt werden, daß das fotoelektronische Verfahren durchaus Vorteile hat, die eine Anwendung in der Schwingungsmeßtechnik rechtfertigen.

II. Grundsätzliches über die fotoelektronische Messung mechanischer Schwingungen unter Verwendung von Trägerfrequenz

1. Prinzip der fotoelektronischen Messung mechanischer Schwingungen

Zur Messung mechanischer Schwingungen auf fotoelektrischem Wege verwendet man ganz allgemein folgendes Grundprinzip:

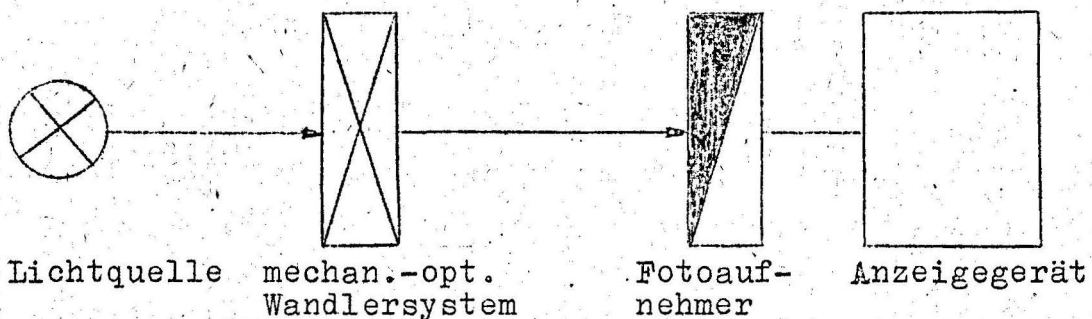


Abb. 1

Dem Wandler-System können sehr verschiedenartige Prinzipien zugrunde liegen, die zunächst nicht diskutiert werden sollen. Erforderlich ist lediglich, daß die mechanische Bewegung einer Anordnung die Beleuchtungsstärke auf dem Fotoempfänger bei konstanter Lichtintensität ändert.

Der Zusammenhang zwischen Amplitude der Bewegung und der Beleuchtungsstärke muß linear sein, damit man bei linearer optisch-elektrischer Wandlung eine wegproportionale Anzeige erhält. Ueber die Auswahl eines geeigneten Aufnehmers soll später berichtet werden. Nur eine Einschränkung muß schon hier gemacht werden. Da die Untersuchungen im Hinblick auf den Bau eines kleinen tragbaren Meßgerätes gemacht wurden, kommen nur Halbleiterbauelemente in Betracht. Bei keinem der handelsüblichen Fotoaufnehmer ist aber die abnehmbare Spannungs- oder Stromänderung so groß, daß zur Erfassung dynamischer Vorgänge ein Oszillograph oder ein Direktschreiber ohne vorhergehende Verstärkung angesteuert werden kann. Man ist also immer gezwungen, die Meßgröße zu verstärken.

2. Gründe für die Verwendung von Trägerfrequenz

Die direkte Verstärkung der vom Fotoaufnehmer abgegebenen Größe bereitet dann erhebliche Schwierigkeiten, wenn

es sich um statische Werte oder sehr langsam veränderliche Vorgänge handelt. Wenn man eine statische Eichmöglichkeit der Meßanlage fordert, erstreckt sich der bei mechanischen Schwingungen zu erfassende Frequenzbereich von 0 bis ca. 1000 Hz. Benutzt man nun die niederfrequenten Meßgröße dazu, eine Trägerfrequenz zu modulieren, dann kann man die mit einem Gleichspannungsverstärker verbundenen Schwierigkeiten der Nullpunktskonstanz bei hoher Verstärkung umgehen. Die Trägerfrequenz bietet hier den Vorteil der leichteren Verstärkungsmöglichkeit; sie ist nicht, wie bei anderen bekannten passiven Systemen (Induktivitäts- oder Widerstandsänderung einer Brückenschaltung), ein für das Meßprinzip unbedingt notwendiger Bestandteil. Der Trägerfrequenzverstärker ist praktisch driftfrei, und das rechtfertigt den etwas höheren Aufwand, der ja durch den zusätzlich notwendigen Trägerfrequenzgenerator, den Modulator und Demodulator gegeben ist. Die Untersuchungen beschränken sich auf die Amplitudenmodulation. Es gibt grundsätzlich bei diesem Problem 2 Möglichkeiten, die Modulation durchzuführen:

- a) Modulation auf optischem Wege,
- b) Modulation auf elektrischem Wege.

Die Modulation auf optischem Wege, d.h. Erzeugung eines hochfrequenten Lichtes, dem die Niederfrequenz aufgeprägt wird, wurde in der Abteilung Mechanik untersucht. Sie ist aber gegenüber der elektrischen Modulation sehr aufwendig und kompliziert, so daß sie für den praktischen Einsatz nicht in Frage kommt. Deshalb soll sie auch hier übergangen werden. Ehe nun Näheres über die Trägerfrequenzverstärkung, insbesondere über das verwendete Modulationsverfahren, ausgesagt werden kann, muß eine kurze Betrachtung über die Auswahl des Fotoaufnehmers vorangehen.

3. Fotoaufnehmer

Ziel der Untersuchung ist, die Entwicklung eines kleinen tragbaren Meßgerätes. Deshalb kommen nur Halbleiter-Bauelemente in Betracht. Es können aktive ebenso wie

passive Elemente verwendet werden. Für den genannten Zweck wird man jedoch Wert darauf legen, bei möglichst geringen Beleuchtungsstärken eine gute fotoelektrische Steilheit zu erhalten, d.h. große Strom- bzw. Spannungsänderungen bei kleinen Änderungen der Beleuchtungsstärke. Als Richtwert sei angegeben, daß bei einer mittleren Beleuchtungsstärke von etwa 10 lx eine Änderung von ± 1 lx zur Vollaussteuerung genügen soll.

Im technischen Bericht Nr. 22 wurden die verschiedenen auf dem Markt befindlichen Bauelemente auf ihre Verwendbarkeit für die Messung mechanischer Schwingungen untersucht. Danach und unter Berücksichtigung der oben aufgestellten Forderungen kommen in der Hauptsache zwei verschiedene Typen in Betracht:

- a) ein Fototransistor
- b) ein Fotowiderstand

Beide Typen können jedoch, wie gezeigt werden soll, in diesem speziellen Anwendungsfall nicht verwendet werden.

Der Fototransistor wäre eigentlich das ideale Bauelement, wenn man vor der starken Temperaturabhängigkeit einmal absieht. Man kann den Fototransistor elektrisch mit der Trägerfrequenz und optisch mit der zu messenden Lichtintensität ansteuern und hat so auf sehr einfache Weise die Modulation vollzogen. Wegen seiner im Vergleich zu einem normalen Transistor sehr dicken Basiszone hat ein Fototransistor jedoch eine relativ niedrige obere Grenzfrequenz (Beim OCP 71 überschlägig 3 kHz). Die dadurch bedingte niedrige Trägerfrequenz führt wiederum zur Verwendung relativ großer Bauelemente (Spulen), die erstens dem Kleinbau eines Transistorgerätes widersprechen und zweitens für ein leichtes tragbares "Taschenmeßgerät" nicht geeignet sind. Die benutzte Trägerfrequenz liegt mit 150 kHz um ein Vielfaches über der mit einem Fototransistor zu beherrschenden Frequenz und gestattet es, sehr kleine Spulensätze zu benutzen.

Mit dem zweiten erwähnten Bauelement, dem Fotowiderstand, wurden umfangreiche Versuche gemacht. Es wurden Cadmium-Selenid-Fotowiderstände verschiedener Fabrikate benutzt. Die Empfindlichkeit von einigen A/Lm übertrifft die der übrigen Halbleiter-Fotobauelemente und liegt in der Größenordnung der Empfindlichkeit eines Fotomultipliers. Auch die Modulation einer Trägerfrequenz läßt sich mit einem Fotowiderstand in sehr einfacher und eleganter Weise durchführen. Der Ohmsche Widerstand ist, wie Abb. 2 zeigt, abhängig von der Beleuchtungsstärke.

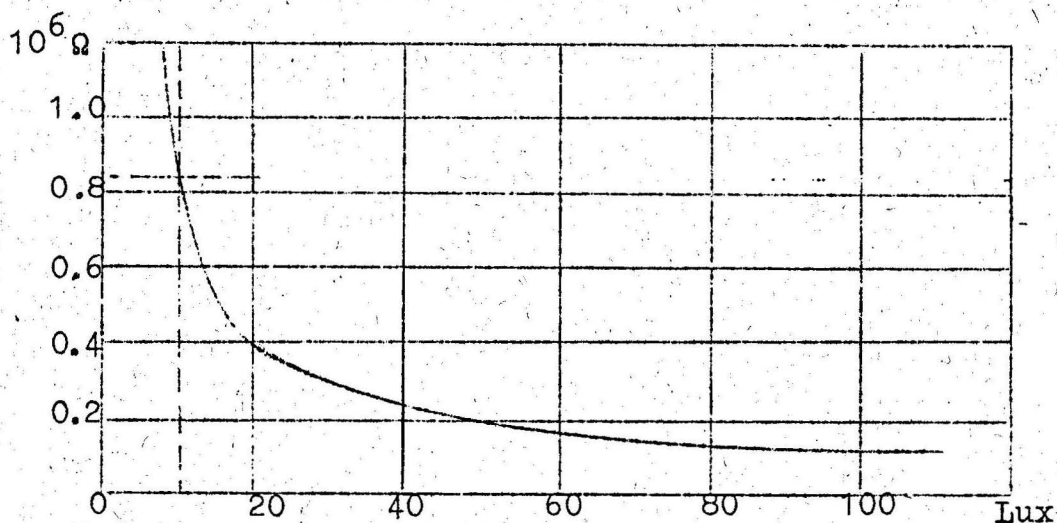


Abb. 2: Abhängigkeit des Fotowiderstandes von der Beleuchtungsstärke

Die Kennlinie kann in kleinen Bereichen (Grundhelligkeit etwa 10 lx, Änderung ± 1 lx) als linear angesehen werden. Bei der Modulation wird nun der Fotowiderstand in den Basisspannungsteiler zur Einstellung des Arbeitspunktes gelegt, wie Abb. 3 im Prinzip zeigt.

Im nichtmodulierten Zustand wird der Arbeitspunkt des Transistors durch den Basisspannungsteiler - bestehend aus dem Widerstand R_b und dem Fotowiderstand, der eine entsprechende mittlere Beleuchtungsstärke erhält, sowie dem Emitterwiderstand - so eingestellt, daß der Transistor im gekrümmten Teil seiner Kennlinie arbeitet. Durch Änderung der Beleuchtungsstärke im Takte der niederfrequenten Schwingung ändert sich der Widerstand des Fotoaufnehmers und verschiebt somit den Arbeitspunkt des Transistors. Wegen der Krümmung der Kennlinie ändert

sich auch die Steilheit und damit die Verstärkung, d.h. die an der Basis eingespeiste Trägerfrequenz wird moduliert. Die Empfindlichkeit des Fotowiderstandes ist groß genug, um einen vernünftigen Modulationsgrad zu erzielen.

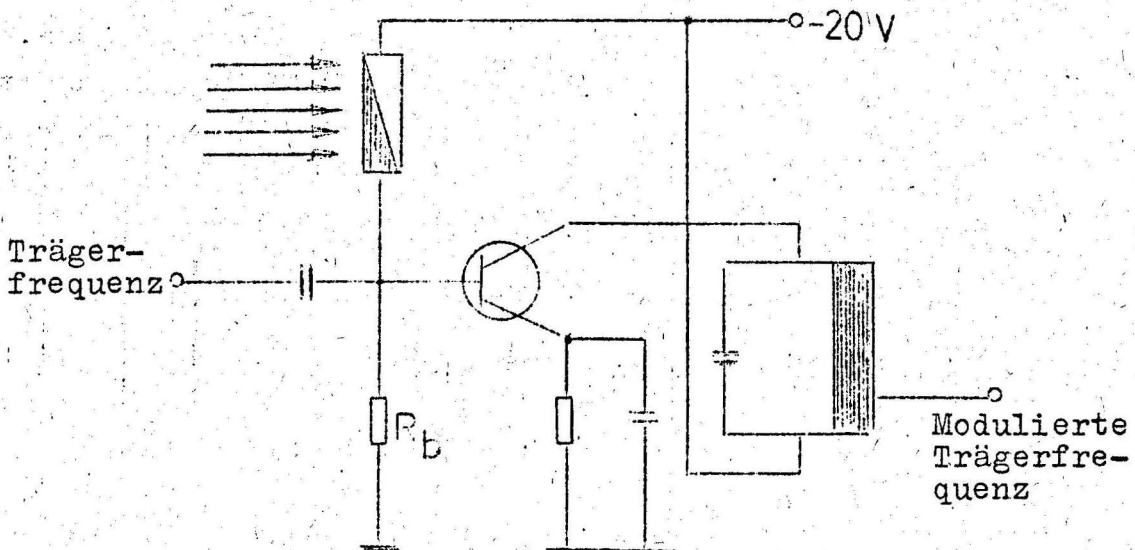


Abb. 3: Prinzipschaltung einer Transistor-Modulationsstufe mit einem Fotowiderstand

Im Laufe der Untersuchungen konnte jedoch eine sehr starke Frequenzabhängigkeit der Fotowiderstände festgestellt werden, die eine Verwendung zu Meßzwecken unmöglich macht, obwohl andere sehr günstige Eigenschaften vorliegen. Die folgende Abb. 4 zeigt den Widerstandsverlauf in Abhängigkeit von der Frequenz bei konstanter Beleuchtungsstärke. Dabei wurde die günstigste Type herausgesucht und die Messungen bei optimaler Einstellung durchgeführt. Der Frequenzgang ist nämlich außerdem noch von der Beleuchtungsstärke und der angelegten Spannung abhängig. Man kann bei anderen Einstellungen weit schlechtere Ergebnisse nachweisen.

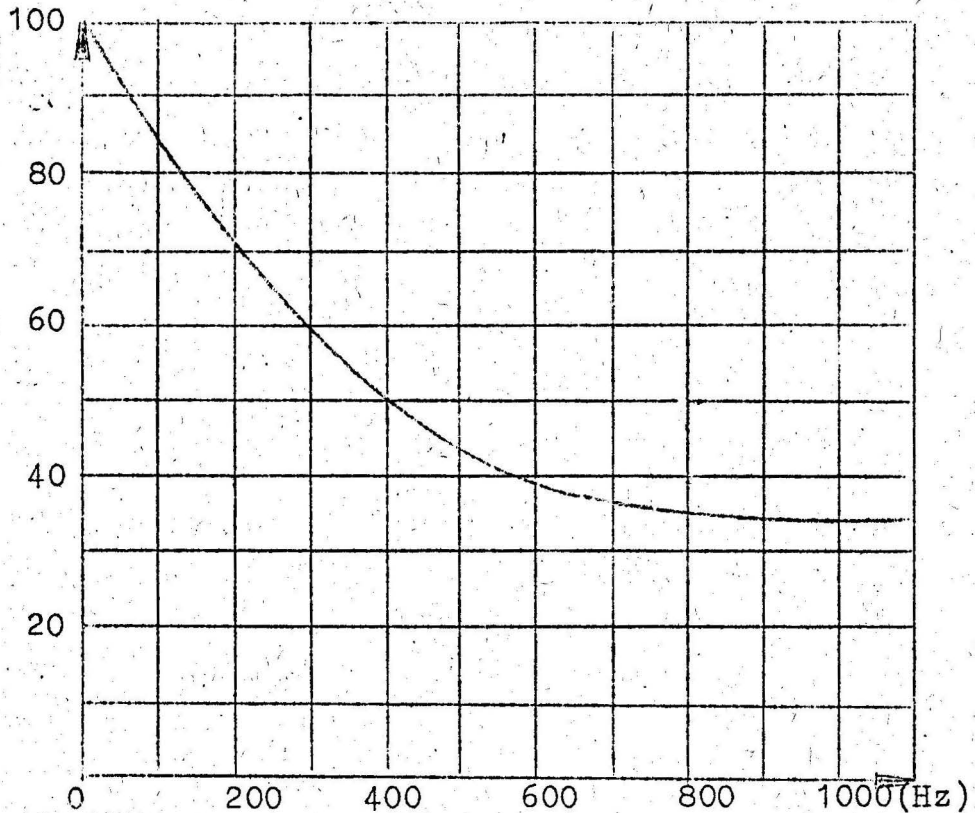


Abb. 4: Frequenzgang des Fotowiderstandes PTW-K10 IR

Es ist nicht Zweck dieser Arbeit, die Frequenzabhängigkeit genauer zu untersuchen. Der Sachverhalt sollte hier nur etwas eingehender dargelegt werden, da derartige Messungen wohl erstmalig durchgeführt wurden und somit die Erkenntnisse über das Frequenzverhalten neu sind.

Nach den bisherigen Ausführungen kommen also weder ein Fototransistor noch ein Fotowiderstand in Betracht, obwohl ihr Einsatz vor allen Dingen wegen der hohen Empfindlichkeit sehr zu wünschen wäre. Nach eingehendem Studium der verbleibenden Möglichkeiten wurde nun ein Selen-Fotoelement der Fa. Electrocell verwendet, das zwar in der Empfindlichkeit wesentlich schlechter ist, dafür aber frequenzunabhängig bis zu einigen kHz arbeitet. Es bestand ferner der Vorteil, daß die Fa. Elektrocell uns das Fotoelement in den Abmessungen der lichtempfindlichen Fläche ganz nach unseren Wünschen herstellte.

Das Selen-Fotoelement wird ohne Vorspannung als aktives Element betrieben, woraus sich natürlich ein völlig anderes Modulationsverfahren ergibt. Die geringe Empfindlich-

keit von einigen mV/lx bei einer Beleuchtungsstärke von ca. 10 lx - sie geht bei einer Belastung mit einem Widerstand von 5 kOhm noch auf den zehnten Teil herunter - macht eine Vorverstärkung notwendig, da die zur Verfügung stehende Spannung nicht ausreicht, um die Modulation durchzuführen.

4. Ein einfaches Verfahren zur mechanisch-optischen Wandlung

Wie eingangs gesagt, beruht das Prinzip der fotoelektrischen Messung mechanischer Schwingungen darauf, daß die Beleuchtungsstärke eines lichtempfindlichen Elementes infolge der mechanischen Schwingung geändert wird. Das kann natürlich auf sehr verschiedene Weise erreicht werden. In früheren Technischen Berichten wurde z.B. ausführlich die Anwendung der Polarisationsoptik behandelt. Wohl der einfachste Weg, das Licht zu steuern, besteht darin, eine im Strahlengang angebrachte Blende im Takte der zu untersuchenden Schwingung zu verändern. Dieser Prototyp der mechanisch-optischen Wandler - es können nämlich alle anderen Prinzipien hinsichtlich ihrer mathematischen Struktur durch geeignete Wahl der Blendenöffnung auf die Fenstermethode abgebildet werden - ist für Translationsschwingungen besonders leicht zu verwirklichen. Um eine lineare Änderung der Fotospannung zu erzielen, ist in diesem Falle eine rechteckige Blendenform zu wählen.

Die Änderung der Fotospannung als Funktion der Blendenöffnung wird durch 2 physikalische Vorgänge hervorgerufen. Wird im Strahlengang keinerlei Optik angeordnet, so ist die auf dem Fotoempfänger ausgeleuchtete Fläche proportional der Blendenöffnung, siehe Abbildung 5.

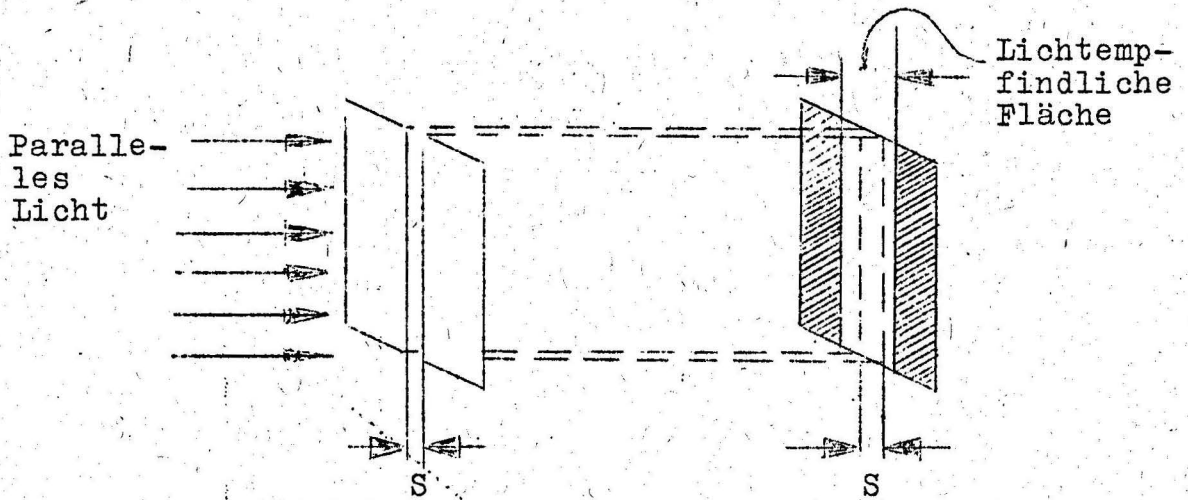


Abb. 5: Lichtsteuerung durch eine rechteckige Blende

Die Fotospannung ist dann direkt proportional der Blendenöffnung s . Ferner ist aber, wie man leicht einsieht, wegen der endlichen Ausdehnung der Lichtquelle (kein paralleles Licht) auch die Beleuchtungsstärke auf dem Fotoelement abhängig von der Öffnung s . Beide Einflüsse überlagern sich linear. Die Fotospannung U_F ist also nur dann proportional der Blendenöffnung s , wenn $U_F = f(E)$ einen linearen Zusammenhang zeigt. Aus Abb. 6 ersieht man, daß das bei der Leerlaufspannung keineswegs der Fall ist.

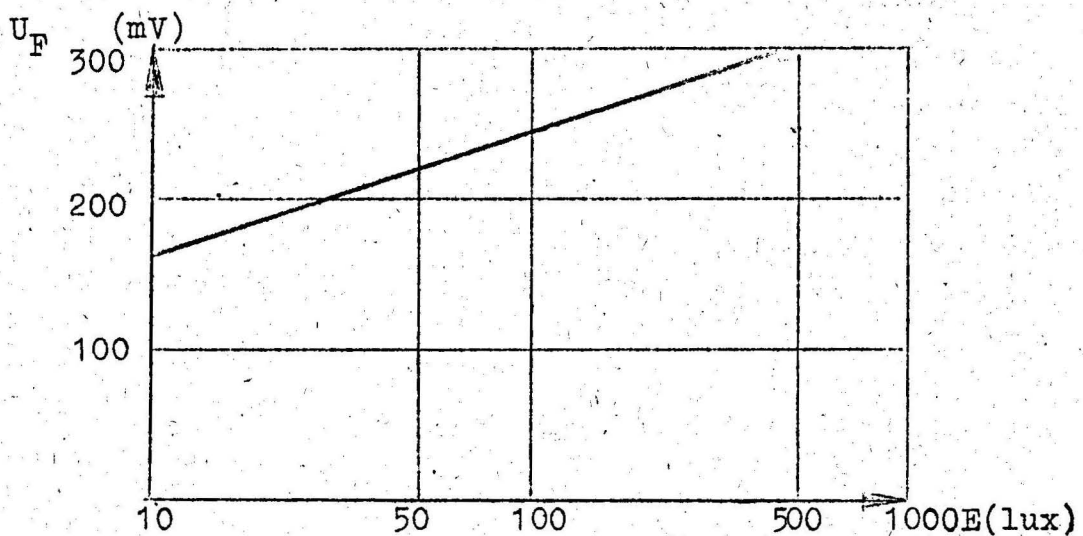


Abb. 6: Leerlaufspannung eines Fotoelementes in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke

Bei Belastung mit einem Widerstand von 5 kOhm erhält man jedoch eine vollkommen lineare Abhängigkeit der Fotospannung von der Blendenöffnung, s. Abb. 17.

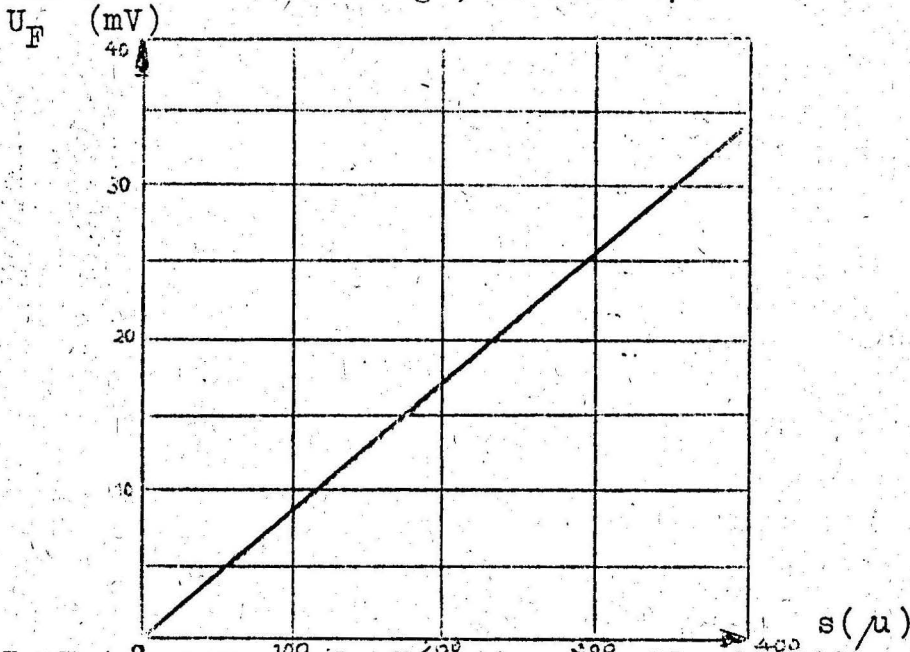


Abb. 7: Fotospannung als Funktion der Blendenöffnung s bei Belastung mit dem Eingangswiderstand des Verstärkers

Es wurde die Überlagerung beider Einflüsse, d.h. $U_F = f(s)$ aufgetragen anstatt $U_F = f(E)$, da die kleinen Beleuchtungsstärkeänderungen sehr schwer meßbar sind.

Das Verfahren der Fenstermethode hat den Vorteil, daß es völlig unabhängig von der Wellenlänge des verwendeten Lichtes ist, so lange man darauf verzichtet, durch Anpassung an die spektrale Empfindlichkeit des Fotoaufnehmers ein Maximum an Empfindlichkeit zu erzielen. Das ist im vorliegenden Fall, wo es darauf ankommt, mit geringstem Aufwand zu arbeiten, ein nicht zu unterschätzender Vorteil.

Die Empfindlichkeit der mechanisch-optischen Wandlung ist abhängig von der Blendenöffnung. Sieht man eine verstellbare Blende vor, so hat man auf diese einfache Weise eine Möglichkeit, die Empfindlichkeit des Aufnehmers zu verändern. Selbstverständlich muß dann entsprechend noch die Lichtintensität verändert werden, damit in der Ruhelage der Fotoaufnehmer immer dieselbe Spannung abgibt. Die verstellbare Blende läßt sich zusätzlich zur statischen Ei-

chung des Gebers verwenden, wenn man eine definierte Einstellbarkeit vorsieht.

III. Entwicklung eines Trägerfrequenzverstärkers bei Amplitudenmodulation mit der Spannung eines Selenfotoelementes

1. Modulationsverfahren und Modulationskennlinie

Den Aufbau des Meßverstärkers kann man am besten anhand des Blockschaltbildes verstehen.

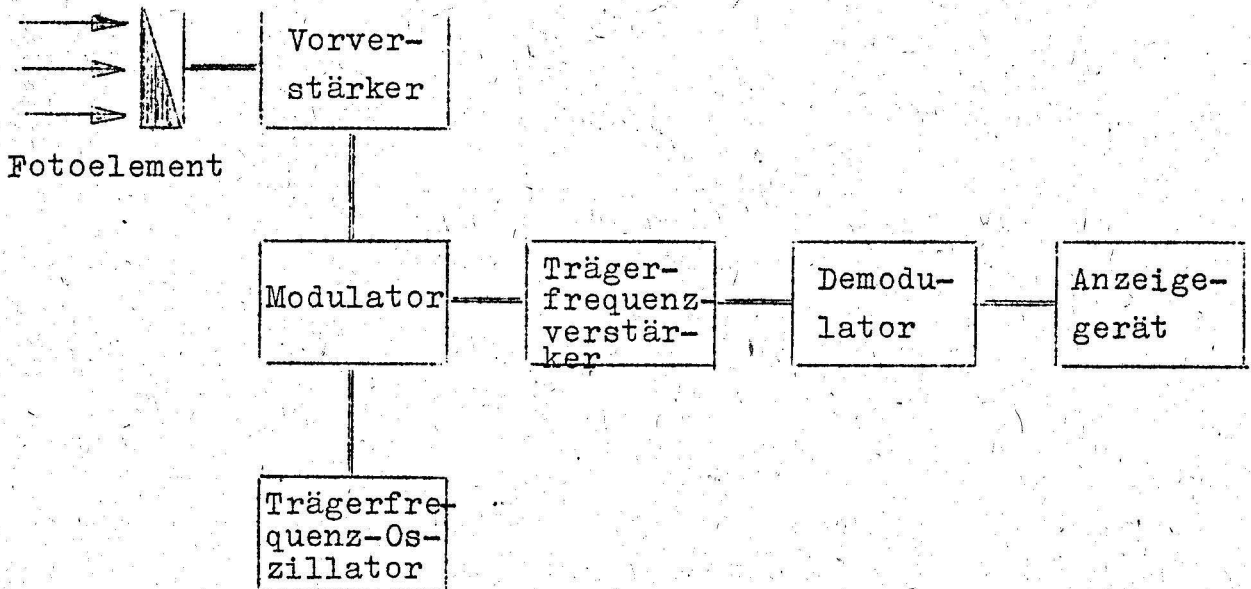


Abb. 8: Blockschaltbild des Trägerfrequenzverstärkers

Als Modulationsart wurde die Zweiseitenband-Modulation gewählt. Sie hat gegenüber allen anderen Arten den Vorteil der Einfachheit, was für den vorliegenden Zweck sehr zu wünschen ist. Die Modulation wird in einer Transistorstufe durchgeführt, die einerseits mit einer konstanten Trägerspannung und andererseits mit der Signalfrequenz angesteuert wird. Der Arbeitspunkt liegt im gekrümmten Teil der Kennlinie, so daß durch die Signalfrequenz eine Verstärkungsänderung und damit eine Modulation bewirkt wird. Man erhält also in bekannter Weise folgendes Bild:

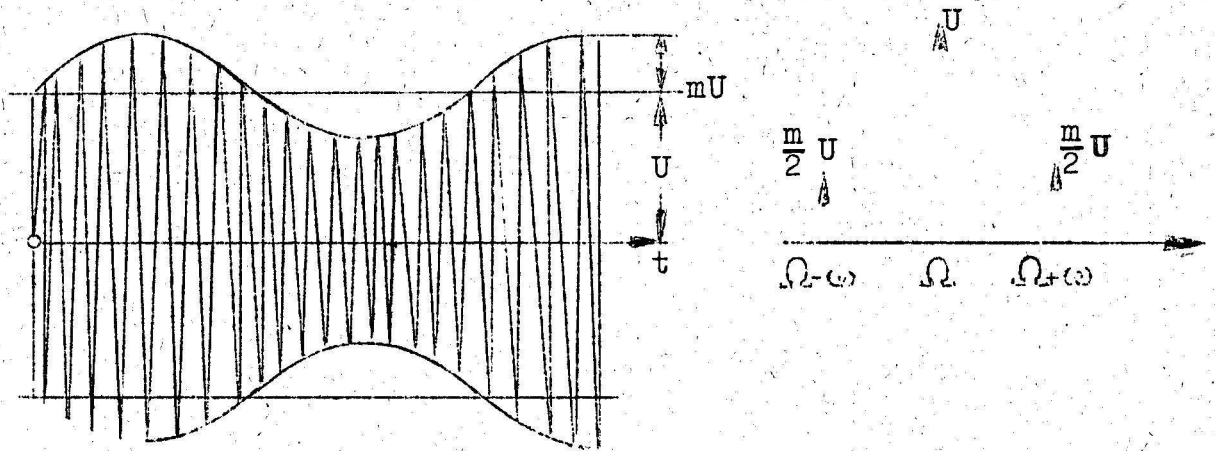


Abb. 9: Zweiseitenband-Amplitudenmodulation

Ω = Trägerfrequenz

ω = Modulationsfrequenz

m = Modulationsgrad

Dabei gilt: $u(t) = \hat{U}(1 + m \cos \omega t) \sin \Omega t$

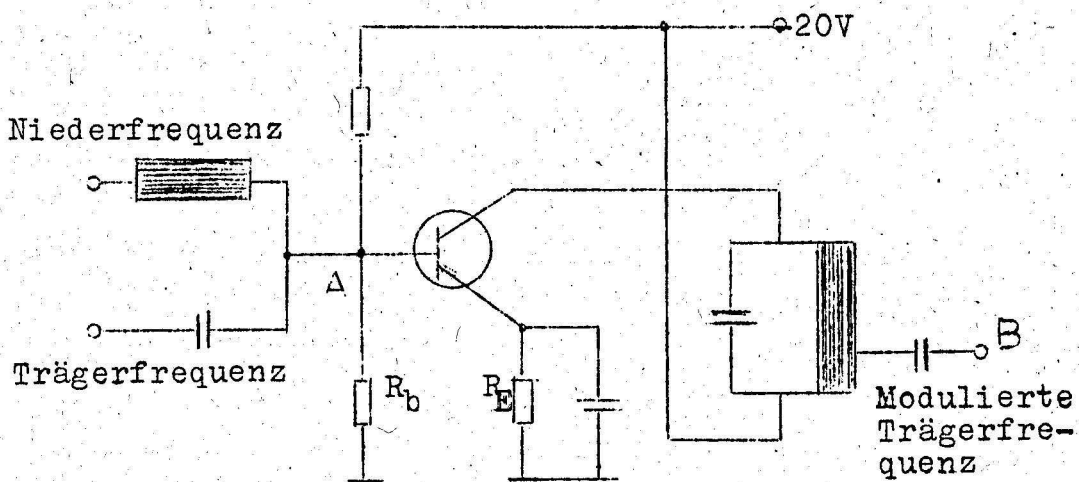


Abb. 10: Vereinfachte Modulationsschaltung

Die Niederfrequenz ist in diesem Falle die verstärkte Spannung des Fotoelementes.

Maßgebend für die Beurteilung der Modulation und für die optimale Einstellung des Arbeitspunktes (Basis-Emitter-Gleichspannung) ist die Modulationskennlinie $U_{\text{Träger}} = f(U_{\text{NF}})$, die man durch statische Messungen (punktwei-

ses Nachbilden der Signalspannung durch eine Gleichspannung) erhält.

Es ist zweckmäßig, bei der Betrachtung der Modulationsgüte den Vorverstärker miteinzubeziehen. Dadurch werden die Nichtlinearitäten der Vorstufe, die sich durch den mit der Modulation in weiten Grenzen veränderlichen Eingangswiderstand des Modulators ergeben, miterfaßt. Deshalb ist in Abb. 11 $U_{Tr} = f(U_F)$ aufgetragen.

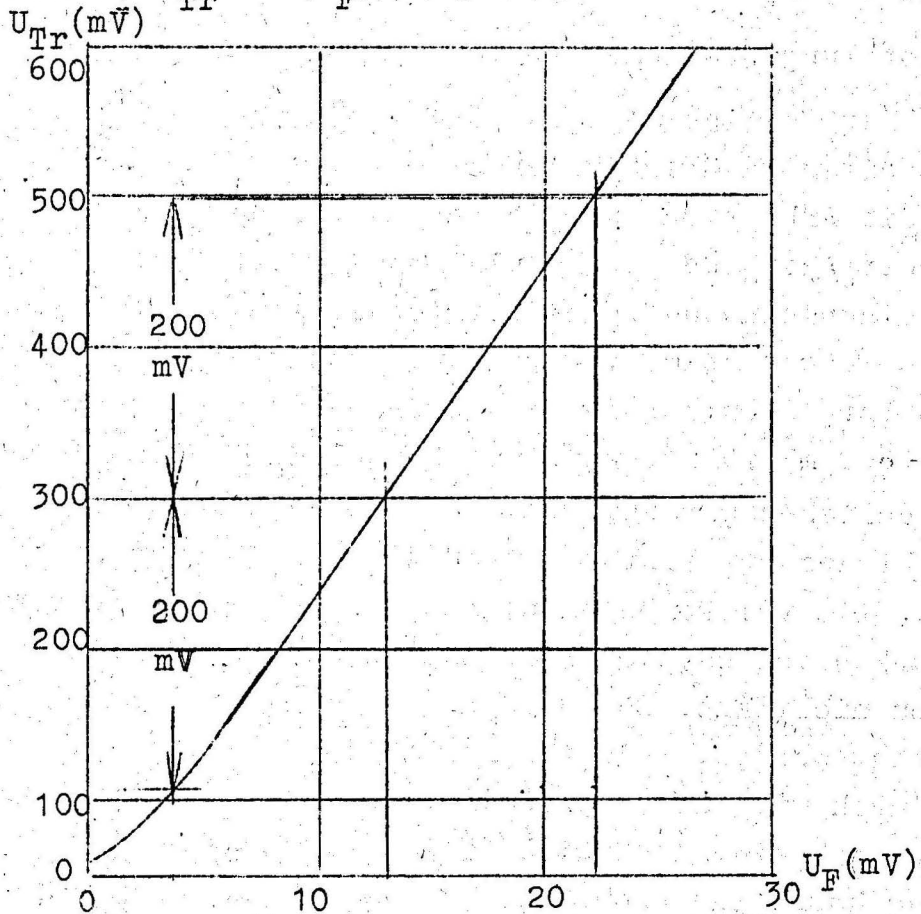


Abb. 11: Statische Modulationskennlinie

U_F gemessen am Eingang des Vorverstärkers

U_{Tr} gemessen am Punkte B gemäß Abb. 7

Um einen möglichst großen Modulationsgrad einigermaßen verzerrungsfrei zu erreichen, wird der Arbeitspunkt wie eingezeichnet festgelegt. Der Modulationsgrad beträgt dann bei Vollaussteuerung $m = 67 \%$.

Die Trägerfrequenz von 150 kHz wird in einer quarzstabilisierten H e e g e n e r -Schaltung erzeugt, deren Schaltung aus dem Gesamtschaltbild zu entnehmen ist. Da

sich der Eingangswiderstand des Modulators bei Aussteuerung ändert und, zudem bei einer Transistorstufe sowieso relativ niedrig ist, muß dafür Sorge getragen werden, daß die Trägerspannung unabhängig von der Belastung konstant bleibt. Der Innenwiderstand des Generators muß also entsprechend niedrig sein. Um einen Nebenschluß der Trägerfrequenz zu vermeiden, muß die Vorstufe über eine Drossel angekoppelt werden.

2. Ankopplungsprobleme

Bei der Entwicklung des Vorverstärkers waren zwei Schwierigkeiten zu überbrücken,

- a) die Ankopplung des Fotoelementes und
- b) der Anschluß der Modulationsstufe.

Um einen einwandfreien Betrieb zu gewährleisten, darf das Fotoelement keine Vorspannung erhalten. Da nun die Basis des Vorstufentransistors gegen Masse eine Spannung von ca. 600 mV führt, kann das Fotoelement nicht direkt angeschlossen werden. Die ideale Lösung wäre, den Arbeitspunkt des Transistors durch die Fotospannung einzustellen. Die vom Fotoelement bei den möglichen Beleuchtungsstärken von ca. 10 lx abgegebene Spannung reicht jedoch dazu nicht aus. Es muß deshalb eine Brückenschaltung aufgebaut werden, in deren Nullzweig das Fotoelement liegt. Dadurch wird die Empfindlichkeit des Fotoelementes leider noch einmal um etwa 25 % herabgesetzt. Die Ankopplung über einen Kondensator ist nicht zulässig, da der Gleichwert mit übertragen werden soll.

Das erwähnte zweite Problem besteht darin, daß bei direkter Ankopplung an den Modulator - und das ist zu erstreben, um eine weitere Gegenkopplung zu vermeiden - die Vorstufe mit einer sehr niedrigen Kollektor-Emitter-Spannung arbeiten muß. Mit dem verwendeten Transistortyp OC460 läßt es sich erreichen, daß die Stufe noch bei einer Spannung von 500 mV stabil arbeitet. Durch den festen Basisspannungsteiler wird eine Temperaturstabilisierung erreicht. Die Spannungsverstärkung der Vorstufe beträgt etwa 3.

Die vom Modulator abgegebene modulierte Trägerspannung wird in einer weiteren Resonanzverstärkerstufe etwa 20-fach verstärkt und in einer Diodenschaltung mit nachfolgender Siebung und Kompensation der Richtgleichspannung durch eine Zenerdiode demoduliert. Die am Ausgang entnehmbare Spannung beträgt verzerrungsfrei maximal ± 4 V. Damit läßt sich bequem ein Katodenstrahloszillograph bzw. ein technischer Schnellschreiber aussteuern.

Im folgenden sollen noch einige Bemerkungen zur Anpassung der einzelnen Stufen gemacht werden. Grundsätzlich ist Leistungsanpassung anzustreben, weil im Gegensatz zur Röhrenschaltung wegen des geringen Eingangswiderstandes eines in Emitterbasisschaltung arbeitenden Transistors die Leistungsverstärkung und nicht die Spannungsverstärkung interessiert.

Die Kreisgüte Q_K ist durch das verwendete Kernmaterial der Spulen vorgegeben. Die Anforderung an die Gesamtgüte Q ist nicht kritisch. Man wird, um eine hohe Verstärkung zu erreichen, den Verstärker ziemlich breitbandig auslegen. Dadurch ist auch eine relativ große Verstimmung, wie sie durch die stark arbeitpunktabhängigen Blindelemente der TRANSISTOREN möglich ist, zulässig. Für die Dimensionierung wird Wirkanpassung zugrunde gelegt. Angaben über die Dimensionierung von Transistor-LC-Verstärkerstufen finden sich ausführlich in einem Artikel der NTZ 1959, Heft 11 "Zur Schmalbandverstärkung mit Transistoren". Deshalb soll an dieser Stelle nicht näher auf die Berechnung der Anpassungen und damit der Wickeldata für die Spulen eingegangen werden. Als Kernmaterial wurden Schalenkerne der Type S 18/12 - 0,5 - III B 3 - K 3000047 der Firma Valvo benutzt. Die Transistoren sind Silizium-Transistoren der Firma Intermetall.

3. Daten und Schaltbild des Trägerfrequenzverstärkers

Eingang:

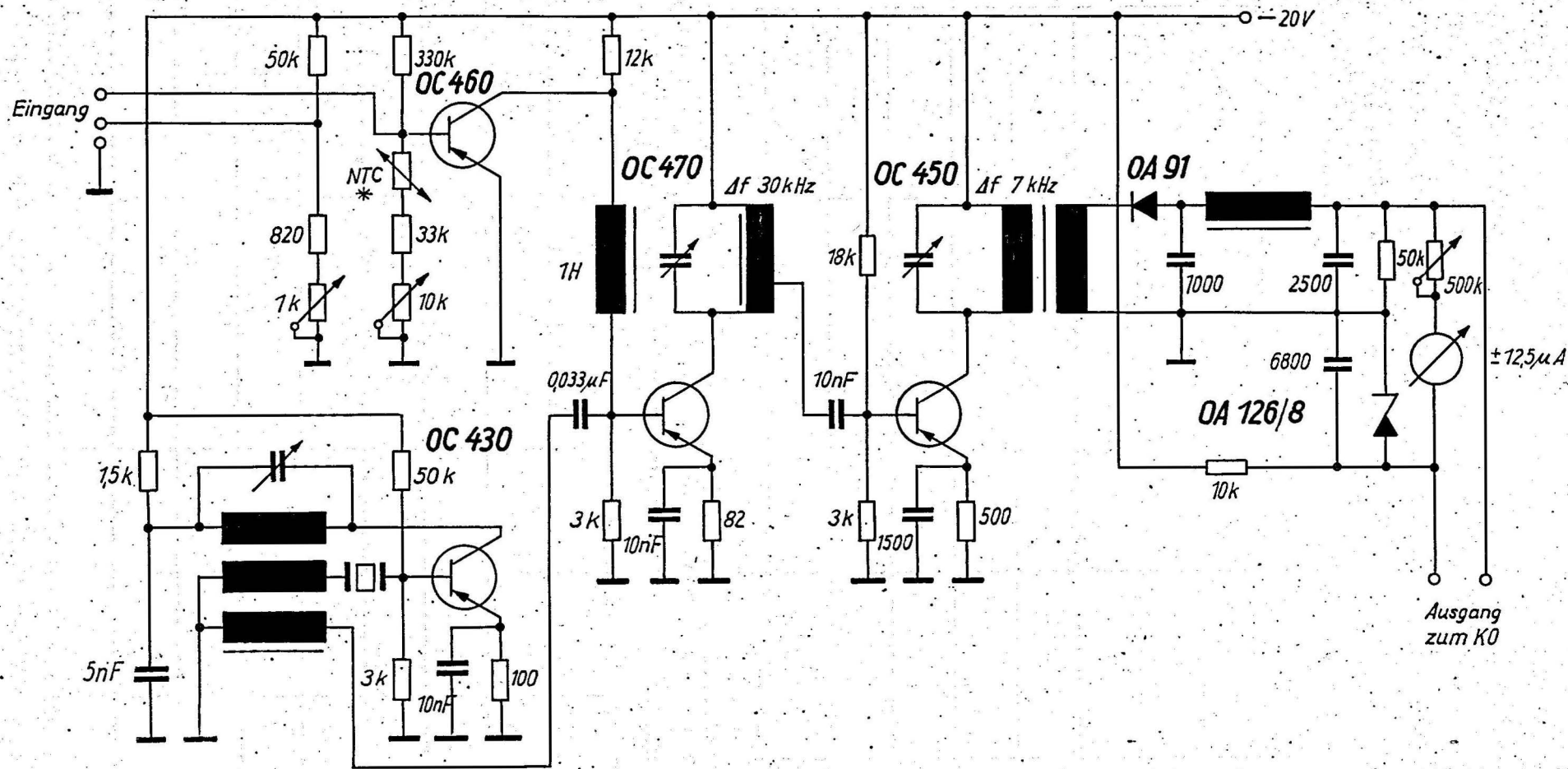
Speziell ausgebildet zum Anschluß eines Selen-Fotoelementes der Type U (Fa. Elektrocell). Die Nullstellung des Verstärkers wird erst durch eine entsprechende Fotospannung erreicht.

Eingangswiderstand: Im Arbeitspunkt ca. 6 k Ω
Ausgang: In Nullstellung gleichspannungsfrei durch Kompensation mit einer Zenerdiode
Ausgangswiderstand: 6 k Ω
Ausgangsspannung: Linear maximal ± 4 V
Am Ausgang liegt ein Instrument zur Einstellung des Nullpunktes und Messung statischer Werte. Meßbereich ± 5 V.
Ausgangsbuchse: Erdfrei; Spannung gegen Gehäuse - 7,5 V
Verstärkung: 400-fach
Frequenzbereich: 0 Hz - 1.000 Hz bei einem Abfall um 1 db bei 1.000 Hz
Störspannung am Ausgang bei angeschlossenem Fotoelement: 5 mV
Trägerfrequenz: 150 kHz, quarzstabilisiert
Versorgungsspannung: 20 V aus 5 eingebauten Mallory-Batterien der Type TR 131
Leistungsaufnahme: 170 mW
Gehäuseabmessungen: 100 mm x 100 mm x 240 mm

IV. Ein fotoelektronischer seismischer Schwingungsaufnehmer für translatorische Bewegungen

1. Konstruktive Ausführungen

Nach dem unter II,4 beschriebenen Verfahren wurde ein seismischer Schwingungsaufnehmer entwickelt. Das seismische System wird gebildet durch 2 Blattfedern, die als Masse den einen Teil der Blende tragen. Die Eigenfrequenz dieses Schwingungssystems beträgt 12 Hz. Die Dämpfung ist magnetisch ausgeführt. Das Gegenstück der Blende ist durch eine Mikrometerschraube verstellbar, so daß sowohl eine Einstellung der Empfindlichkeit als auch eine statische Eichung ohne Berührung des seismischen Systems möglich ist. Die Lichtquelle ist eine 4 V-Fadenlampe, deren Helligkeit durch einen Vorwiderstand verändert werden kann. Als Fotoaufnehmer ist ein Selenfotoelement eingebaut, dessen aktive Fläche 2 x 16 mm beträgt. Amplituden von $\pm 0,3$ mm können bei entsprechender Blendenöffnung maximal gemessen werden, während andererseits bei einer Blendenöffnung von 20 μ noch keinerlei Linearitätsabweichungen



* B 320 07 P/1k5

Abb. 12 150 kHz-Trägerfrequenzverstärker mit
Modulationseingang für Fotospannung

2. Daten des Aufnehmers

Eigenfrequenz:	12 Hz
Dämpfungsmaß:	$D \approx 0,6$
Amplitudenbereich:	$\pm 1 \text{ } \mu\text{ bis } \pm 0,3 \text{ mm}$
Empfindlichkeit zusammen mit dem TF-Verstärker:	max. 60 mV/ μ
Anzeige am Transistor- Oszillographen:	ca. 2 cm/ μ
Leistungsaufnahme:	max. 3 W bei 6 V
Querempfindlichkeit:	1 : 70

Unter Verwendung eines Fotoelementes anderer Abmessungen läßt sich der Meßbereich zu größeren Amplituden hin erweitern. Ebenso kann bei Benutzung einer Lichtquelle größerer Helligkeit die Empfindlichkeit noch erhöht werden. Die Grenze liegt etwa bei einer Blendenöffnung von 20 μ . Dann wird die Messung durch Unregelmäßigkeiten in der Blendenausführung verfälscht. Außerdem wird die Wärmeentwicklung bei größerer Lampenhelligkeit schließlich so groß, daß die Daten des Fotoelementes wesentlich beeinflusst werden. Das Aufnehmergehäuse muß ja lichtdicht sein, so daß eine Wärmeabfuhr unmöglich ist. Die angegebene Empfindlichkeit von 2 cm/ μ am Oszillographenschirm reicht jedoch für den geplanten Anwendungsbereich bei weitem aus.

V. Ein volltransistorisierter Katodenstrahl-Oszillograph

1. Vor- und Nachteile eines Transistor-Oszillographen

Wenn im Rahmen eines solchen Berichtes einiges über die Entwicklung eines Katodenstrahl-Oszillographen gesagt werden soll, so müssen die Grundlagen über Oszillographen und Oszillographen-Meßtechnik vorausgesetzt werden. Es können nur die speziell durch die Ausführung mit Transistoren entstehenden Probleme behandelt werden. Grundsätzlich läßt sich nach den gewonnenen Erkenntnissen sagen, daß man unter Beschränkung der Forderungen Transistoren im Oszillographenbau sehr gut einsetzen und bei erträglichem Aufwand recht leistungsfähige Geräte erstellen kann. Ein genereller Ersatz der Elektronenröhren durch

Transistoren im klassischen Oszillographenbau ist jedoch keineswegs möglich, so lange nicht Katodenstrahlröhren entwickelt sind, die den Anforderungen eines Transistors angepaßt sind.

Die Ablenkempfindlichkeit moderner Katodenstrahlröhren liegt in günstigen Fällen bei etwa 10 V/cm. Es müssen also zur Aussteuerung einer 7 cm-Bildröhre etwa 70 V an den Endstufentransistoren erzeugt werden. Sieht man noch eine Horizontal- und Vertikalverschiebung vor, dann ist mindestens ein Aussteuerbereich von 100 V notwendig. Für den Transistor bedeutet das eine entsprechend hohe zulässige Kollektor-Emitter- bzw. Kollektor-Basissspannung. Ferner muß der Transistor in diesem weiten Bereich linear arbeiten und soll eine hohe Grenzfrequenz von einigen MHz in Emitter-Basissschaltung haben. Letztere Forderung kann bisher nicht erfüllt werden. Das bringt aber eine Beschränkung des Frequenzbereichs, was gerade bei einem guten Labor-Oszillographen nicht zulässig ist. Schwierigkeiten bereitet auch die Forderung nach einem hohen Eingangswiderstand von $> 1 \text{ MOhm}$ in einem weiten Frequenzbereich. Dazu kommt die Temperaturunabhängigkeit. Sie ist notwendig, weil ein Labor-Meßoszillograph oft über Stunden hinweg betrieben wird und eine gute Nullpunktkonstanz haben muß. Der einzige große Vorteil eines Transistor-Oszillographen - der geringe Leistungsbedarf - spielt im Laborbetrieb überhaupt keine Rolle und fällt gegenüber den großen Schwierigkeiten nicht ins Gewicht.

Für bestimmte Anwendungsbereiche jedoch, vor allen Dingen für transportable netzunabhängige Geräte, insbesondere im Fahrzeug- und Flugzeugbetrieb, ist ein Transistor-Oszillograph die einzige Lösung. Man kann sich oft, wie im vorliegenden Falle der Messung mechanischer Schwingungen auf einen bestimmten Frequenzbereich und eine begrenzte Meßzeit beschränken und so die erwähnten Nachteile ausschalten. Bevor einige Einzelheiten des entwickelten Gerätes behandelt werden, sollen die erreichten technischen Daten vorangestellt werden.

2. Technische Daten und Schaltbilder

Katodenstrahlröhre: DG 7 - 74 A
Abmessungen des Gehäuses: 120 mm x 175 mm x 315 mm

Vertikalablenkung

Empfindlichkeit: 25 mV/cm
Eingangsspannungsteiler, geeicht
25 mV/cm, 100 mV/cm, 500 mV/cm
1 V/cm, 5 V/cm, 10 V/cm
Eingangswiderstand: 500 k Ω im 25 mV-Bereich,
sonst $> 1 \text{ M}\Omega$
Frequenzbereich: 0 Hz bis 100 kHz
Spannung gegen Gehäuse: -10.6 V

Horizontalablenkung

Geeichte Zeitablenkung
in Stufen: 50 ms/cm ./.. 20 μ s/cm
Feinregelung innerhalb der Stufen
X-Dehnung: 1.5fach
Synchronisierung: intern
Leistungsbedarf: 5 W bei 6 V

3. Einzelheiten über die Schaltung

a) Netzgerät

Der Oszillograph soll aus einer 6 V-Batterie gespeist werden. Zum Betrieb werden folgende Spannungen benötigt:

Anodenspannung 500 V
Fokussierungsspannung 40 bis 110 V
Gitterspannung ± 47 bis -28 V
Speisespannung für Horizontal- und Vertikal-Endverstärker 100 V
Speisespannung für den Meßverstärker 25 V

Um diese zum Teil hohen Spannungen zu erzeugen, wird ein Gegentakt-Gleichspannungswandler verwendet. Die Schwingfrequenz beträgt etwa 6 kHz. Die so erzeugte Rechteckspannung wird über entsprechende Wicklungen des Uebertragers auf die gewünschten Werte hochtransformiert und mit Brückengleich-

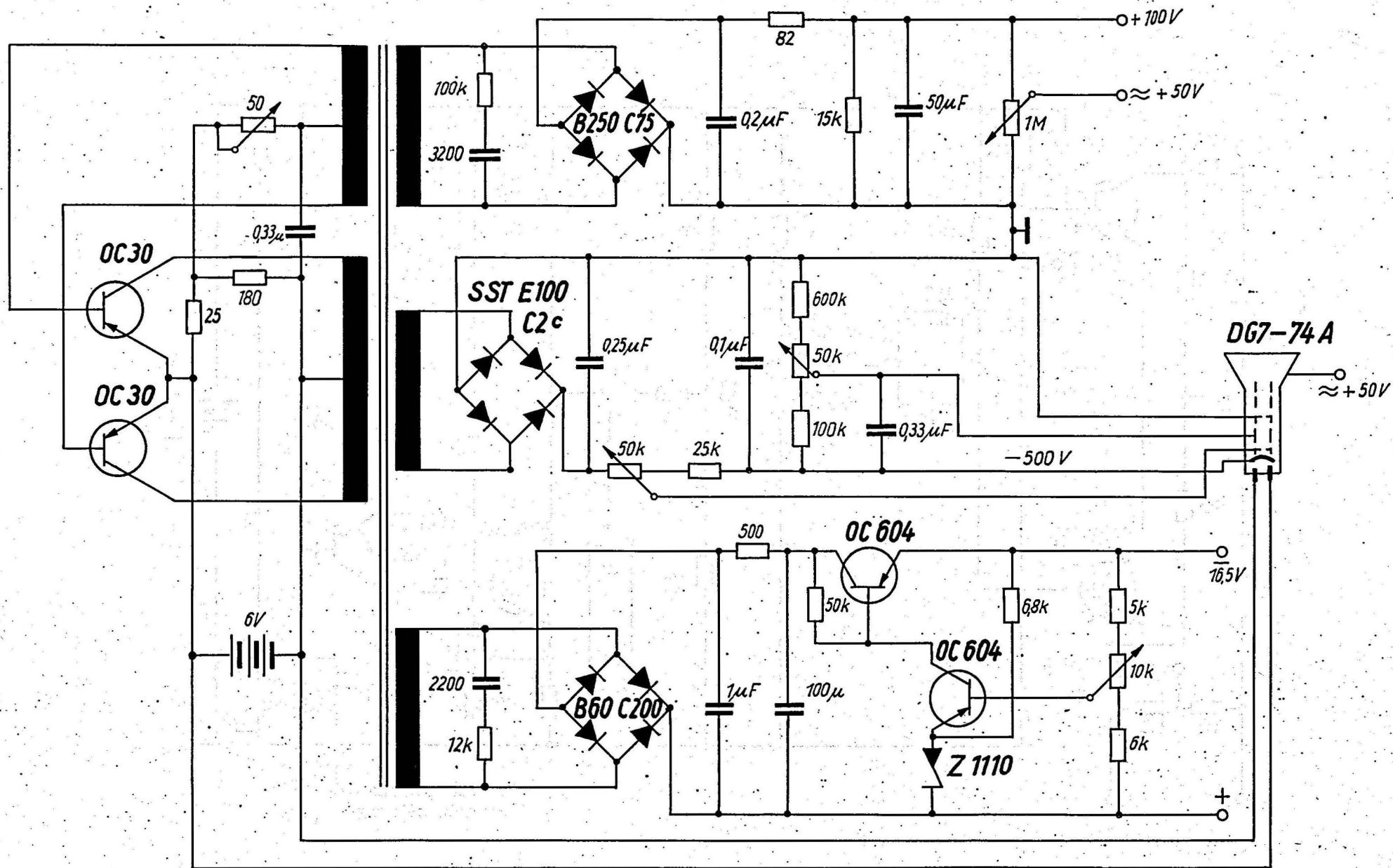


Abb.15 Netzteil

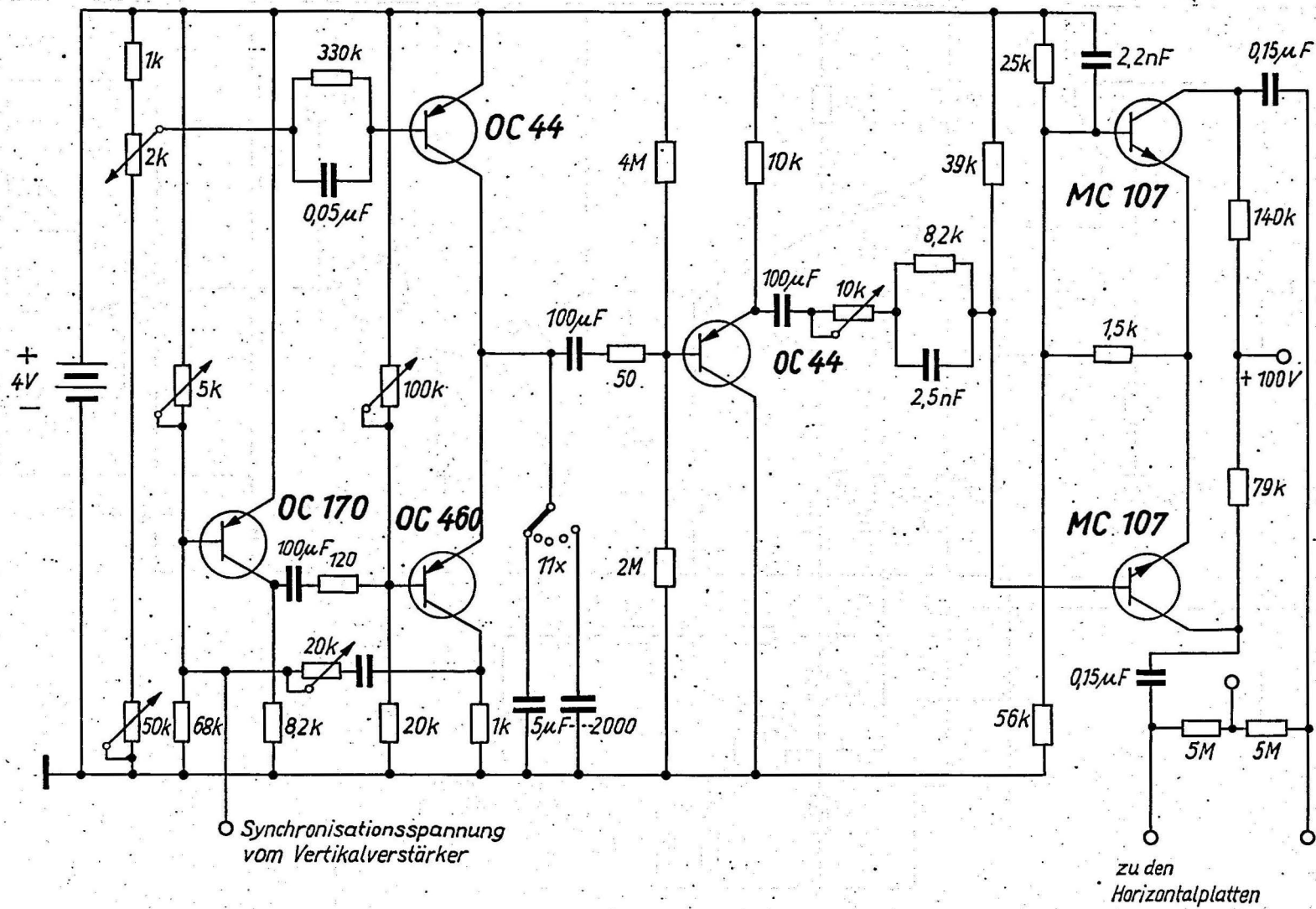


Abb. 16 Horizontalablenkung

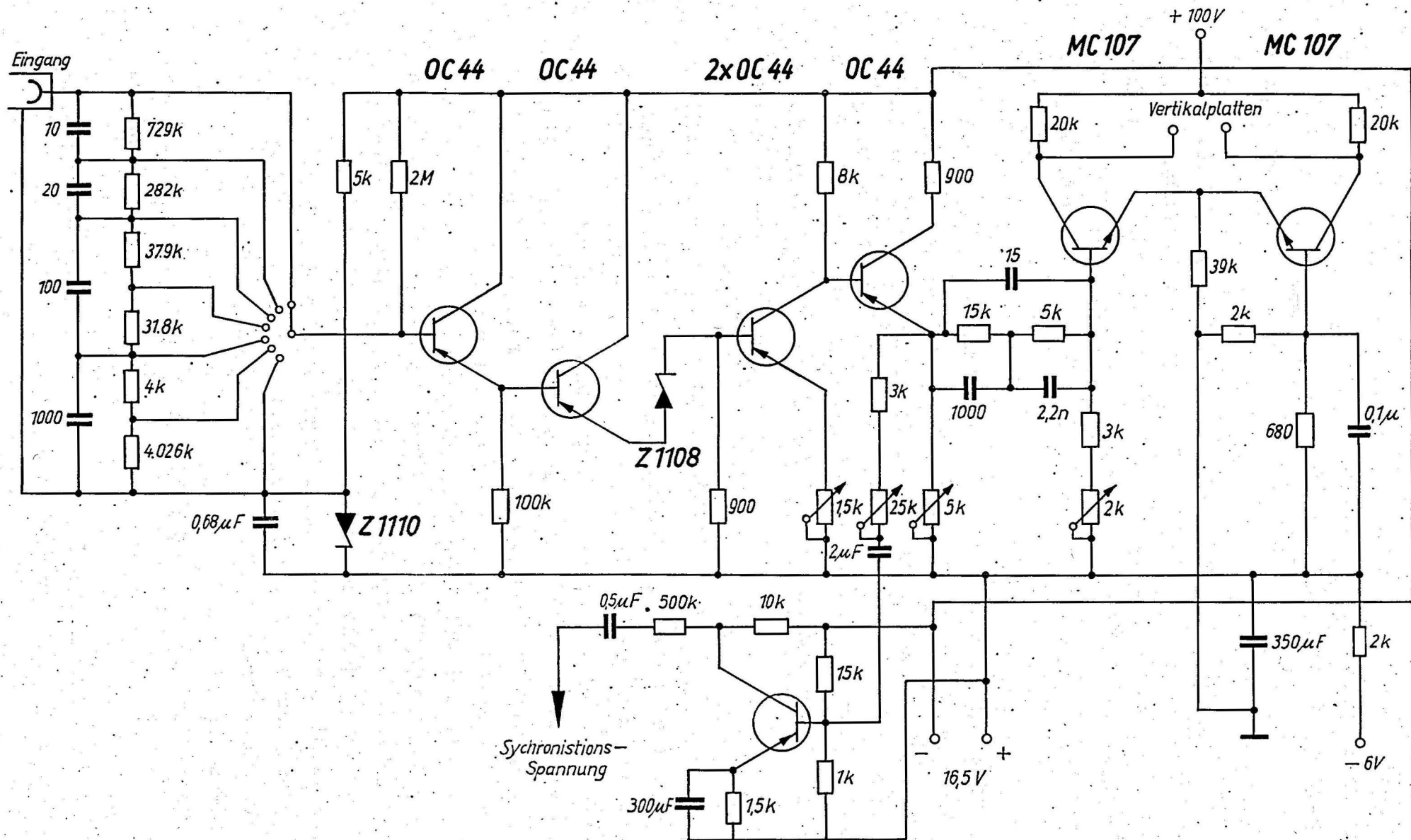


Abb. 17 Vertikalverstärker

richtern gleichgerichtet. Dieser Aufwand an Gleichrichtern ist notwendig, da bei einem Gegentaktwandler der Transformator in beiden Perioden der Wechselspannung belastet sein muß, damit die Schaltung symmetrisch arbeitet.

Durch eine Verdopplerschaltung könnte auch die Nachbeschleunigungsspannung von 1000 V erzeugt werden. Die Helligkeit reicht auch ohne Nachbeschleunigungsspannung vollkommen aus. Die Fokussierungsspannung und die für die Helligkeitssteuerung notwendige Gitterspannung werden über Spannungsteiler gewonnen.

Die Versorgungsspannung für den Meßverstärker muß sehr genau sein und wird deshalb stabilisiert. Eine Zenerdiode dient als Vergleichsnormal. Eine übliche Serien-Regelschaltung mit 2 Transistoren liefert eine stabilisierte Spannung von 16,5 V, die in geringen Grenzen durch ein Potentiometer einstellbar ist, um dem Eingang bei Inbetriebnahme auf Nullpotential zu bringen.

b) Horizontalablenkung und Synchronisierung

Der Sägezahngenerator entspricht in seinem Aufbau der bekannten Röhrenschaltung mit 3 Pentoden. Die Transistor-Kennlinien ähneln weitgehend den Pentoden-Kennlinien in entsprechendem Betrieb, so daß man mit einem Transistor eine Kondensatoraufladung mit konstantem Strom - das bedeutet einen zeitlinearen Spannungsanstieg - erreichen kann. Mit den verwendeten Transistoren 2 x OC 44 und OC 170 lassen sich Kippfrequenzen bis zu 50 kHz erzeugen. Die Spannung am Ladekondensator beträgt 1,4 V. Eine sehr günstige Schaltungsvariante besteht darin, als Steuertransistor einen npn-Transistor zu verwenden. Der Steuertransistor sperrt dann immer und öffnet nur in der kurzen Rücklaufzeit. Die Grenzfrequenz der erhältlichen npn-Transistoren liegt aber zu niedrig. Die Schaltung wird aus einer eingebauten 4 V-Mallory-Batterie mit einer Kapazität von 1 Ah betrieben; der Stromverbrauch beträgt ca. 1 mA.

Der Kippgenerator kann sehr einfach synchronisiert werden. Trennt man die Rückkopplungsleitung vom Entladetransistor

auf, so endet der Schwingvorgang. Der Ladekondensator wird nicht mehr entladen. Durch Einkoppeln einer von der Meßspannung abgeleiteten positiven Synchronisationsspannung an der Basis des Steuertransistors kann der Entladevorgang eingeleitet werden und danach eine neue Aufladung beginnen. Durch geeignete Bemessung der Rückkopplung und der Synchronisationsamplitude - beide sind von außen einstellbar - wird eine gute Synchronisation erreicht. Die geeichte Ablenkung in ms/cm wird dadurch nicht verfälscht. Bei Uebersynchronisation nimmt lediglich die X-Amplitude ab.

Die Ankopplung des X-Verstärkers an den Kippgenerator erfolgt über eine Kollektorstufe, die eine Impedanzwandlung vornimmt, um den Generator durch den niederohmigen Verstärkereingang nicht zu belasten. Als Endstufentransistoren werden Silizium-Transistoren MC 107 (nnp-Typ) der Firma Siemens mit einer Kollektor-Spitzenspannung von 100 V verwendet. Erst durch die Entwicklung dieser Typen wurde der Bau eines transistorisierten Oszillographen überhaupt ermöglicht. Die X-Ablenkempfindlichkeit der Katodenstrahlröhre DG 7 - 74 A beträgt 13,5 bis 16,5 V/cm, d.h. es müssen an den Platten ca. 100 V aufgebracht werden. Das kann mit 2 der genannten Transistoren im symmetrischen Betrieb hinreichend linear erreicht werden. Da die obere Grenzfrequenz der Transistoren bei ca. 10 kHz liegt, wird die höchste Ablenkfrequenz dadurch bestimmt. Mit einer zusätzlichen Höhenanhebung zwischen Kippgenerator und Endverstärker lassen sich als höchste Kippfrequenz 14 kHz erzielen.

Die Endstufentransistoren sind so eingestellt, daß im Ruhezustand T 7 fast gesperrt und T 8 leitend ist. Der Kippgenerator liefert einen gegen Masse positiven Spannungsanstieg. Die Änderung beträgt an der Basis von T 7 max. 0,5 V. Der gemeinsame Emitterwiderstand ist so bemessen, daß auch dort max. 0,5 V entstehen, so daß beide Transistoren gleichmäßig angesteuert werden. T 7 wird durch den Sägezahnanstieg geöffnet und T 8 gesperrt. An den Kollektorwiderständen können - bzw. + 50 bis 60 V abgenommen werden, die über Kondensatoren den Ablenkplatten zugeführt werden. Eine endgültige Symmetrierung erfolgt durch die Bemessung der Kollektorwider-

stände. Die X-Amplitude kann durch einen Widerstand eingestellt werden.

c) Vertikalverstärker

Der Meßverstärker ist gleichspannungsgekoppelt, um die statische Eichung der gesamten Schwingungsmeßeinrichtung zu ermöglichen. Das bringt einige Komplikationen, insbesondere für die Eingangsstufe mit sich. Der Eingang muß gleichspannungsfrei sein, andererseits benötigt der Transistor eine negative Basis-Emitter-Vorspannung zur Einstellung des Arbeitspunktes. Man muß also den Emitter auf positives oder die 2. Eingangsklemme auf entsprechend negatives Potential legen. Letzteres wird hier über eine Zenerdiode, die ja einen sehr kleinen dynamischen Widerstand (ca. $10\ \Omega$) hat und damit keine zusätzliche Gegenkopplung bewirkt, gemacht. Eine Nachregelung dieser Einstellung ist über die Speisespannung des Vorverstärkers möglich.

Zur Erzielung eines hohen Eingangswiderstandes von ca. $1\ \text{M}\Omega$ ist die erste Stufe als Impedanzwandler ausgeführt, da der Eingangswiderstand eines Transistors in der spannungsverstärkenden Emitterschaltung nur in der Größenordnung von $1\ \text{k}\Omega$ liegt.

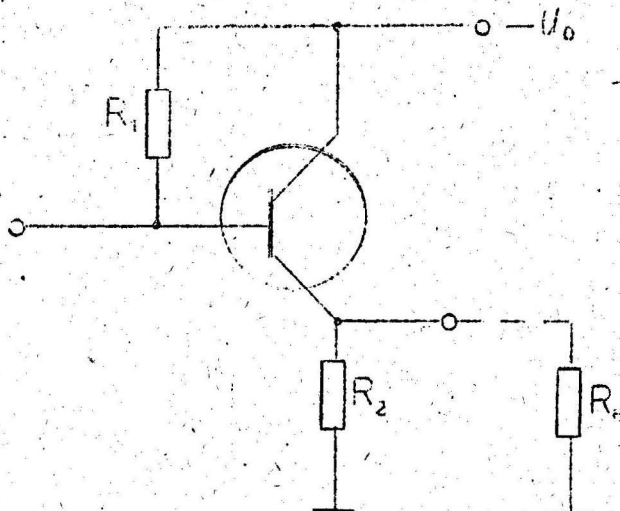


Abb. 18 Impedanzwandlerstufe

R_e = Eingangswiderstand der folgenden Stufe

Der Arbeitspunkt wird durch die Spannungsteilung zwischen R_1 und dem Eingangswiderstand der Stufe eingestellt. Unter Verwendung der h-Parameter eines Transistors läßt sich der Eingangswiderstand einer Kollektorstufe berechnen.

$$r_{ic} = \frac{h_{11c} + R_L h_c}{1 + h_{22c} R_L} \quad \frac{h_{11e} + R_L h_{21e}}{1 + h_{22e} R_L}$$

darin ist: $h_c = h_{11c} h_{22c} - h_{12c} h_{21c}$

$$R_L = \frac{R_2 R_e}{R_2 + R_e}$$

In Abhängigkeit von R_L erhält man dann folgenden Verlauf des Eingangswiderstandes:

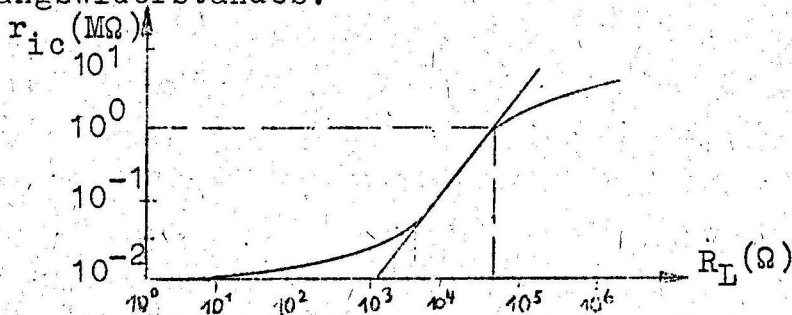


Abb. 19 Eingangswiderstand einer Kollektorstufe als Funktion des Belastungswiderstandes

Um einen hohen Eingangswiderstand zu erreichen, muß also ein Transistor mit hoher Stromverstärkung (h_{21e}) ausgewählt werden. Der eingesetzte OC 44 hat neben einer hohen Grenzfrequenz von 15 MHz in Basisschaltung auch eine hohe Stromverstärkung h_{21e} von ca. 100. Die Kurve zeigt ferner eine starke Abhängigkeit von R_L , d.h. im wesentlichen vom Eingangswiderstand der nächsten Stufe, da R_2 relativ groß (100 kΩ) gemacht werden kann. Die Grenze ist hier bei einer vorgegebenen Versorgungsspannung gegeben durch den notwendigen Mindeststrom zum stabilen Betrieb des Transistors. Um einen Eingangswiderstand in der Größe von 1 MΩ zu erreichen, muß eine weitere Kollektorstufe folgen, die so bemessen ist, daß ihr Eingangswiderstand größer als 20 kΩ ist. Das läßt sich auch bei Belastung durch eine Emitterstufe erreichen. Die so entwickelte Schaltung besitzt einen Eingangswiderstand von ca. 1 MΩ und einen Aussteuerbereich von 1,5 V. Durch den begrenzten Aussteuerbereich ist man gezwungen, den

Eingangsspannungsteiler noch vor die erste Stufe zu legen, und ihn entsprechend hochohmig auszulegen. Dadurch wird der Eingangswiderstand des Oszillographen noch etwas herabgesetzt. Die Spannungsverstärkung der beiden in Reihe geschalteten Kollektorstufen liegt nur wenig unter 1.

Zur Ankopplung der 3. Stufe wird eine Zenerdiode benutzt. Damit gelingt es, den Potentialunterschied zwischen dem Emitter der Stufe 2 und der Basis der Stufe 3 ohne Gegenkopplung über einen Ohm'schen Spannungsteiler zu überbrücken. Es muß nur dafür gesorgt werden, daß der für den Betrieb der Zenerdiode nötige Strom von mindestens 1 mA fließen kann. Die 3. Stufe arbeitet in Emitterschaltung mit einer stromgesteuerten Spannungsgegenkopplung durch einen Emitterwiderstand. Die Spannungsverstärkung beträgt etwa 8. Die 4. Stufe wird wieder als Kollektorstufe ausgebildet, um den Endverstärker rückwirkungsfrei anzukoppeln. Außerdem kann dann die Synchronisationsspannung abgenommen werden, ohne den Meßverstärker zu belasten.

Die Grenzfrequenz der in den Stufen 1-4 benutzten Transistoren OC 44 liegt bei einigen MHz, so daß im Vorverstärker keine Maßnahmen zur Höhenanhebung notwendig sind. Für die Endstufentransistoren gelten dieselben Forderungen wie beim Horizontalverstärker, nämlich ein Aussteuerbereich von ca. 80 V im symmetrischen Betrieb. Es wird auch hier die Type MC 107 der Firma Siemens verwendet. Die Schaltung arbeitet ähnlich wie der Horizontalendverstärker ohne besondere Phasenumkehrstufe. Der 2. Transistor der Gegentaktschaltung wird über den gemeinsamen Emitterwiderstand gegenphasig angesteuert. Die Basis des 1. Transistors wird über einen Spannungsteiler von etwa 1:4 an die Kollektorstufe angekoppelt. Der Spannungsteiler wird benutzt, um durch ein geeignetes Netzwerk eine Höhenanhebung zu bewirken, die wegen der niedrigen Grenzfrequenz der MC 107 schon bei etwa 10 kHz einsetzen muß. Die Grenzfrequenz des gesamten Meßverstärkers liegt bei etwa 100 kHz. Durch den Spannungsteiler läßt sich außerdem die Nullage des Elektronenstrahls auf dem Bildschirm einstellen.

Die Y-Ablenkempfindlichkeit der Katodenstrahlröhre DG 7 - 74 A beträgt ohne Nachbeschleunigung 6,6 V/cm. Um eine Eingangsemp-

findlichkeit von 25 mV/cm zu erreichen, muß die Gesamtverstärkung 264 betragen. Die Endstufenverstärkung liegt bei etwa 140. Das ist nötig, um die Spannungsteilung von 1:4 wieder auszugleichen.

Die Synchronisationsspannung wird vor der Endstufe abgenommen und in einer Emitterstufe mit einem OC 44 verstärkt, da eine Synchronisationsspannung von ca. 2 V benötigt wird. Eine Einstellung der Synchronisationsamplitude ist vorgesehen.

Da an den Ablenkplatten die Kollektorgleichspannung der Endstufentransistoren von ca. + 50 V liegt, müssen die Anoden und die Horizontalplatten der Oszillographenröhre gleichfalls auf dieses Potential gelegt werden, da sonst ein unerträglicher Astigmatismus auftritt. Die Endstufenspeisespannung von 100 V wird dazu über ein 1 M Ω -Potentiometer heruntergeteilt.