

Der Bolometer-Verstärker ist ein Gleichstrom-Kompensator mit selbsttätiger Steuerung. Gleich anderen Verstärkern, die auf lichtelektrischer oder induktiver Grundlage arbeiten, beruht seine Wirkungsweise auf der Schaltung des Lindeck-Kompensators (s. ATM J 932-2). Seit dem ersten Bericht (ATM Z 64-1) ist der Bolometer-Verstärker in Schaltung und Aufbau neu gestaltet worden; hierüber zu berichten ist die Aufgabe dieses Blattes.

Der eigentliche Verstärkungsvorgang. Zur Steigerung der Telegraphiergeschwindigkeit auf Unterseekabeln erfand der englische Ingenieur Heurtly¹⁵ seinen Bolometer-Verstärker. Das Drehspulmeßwerk übernahm er vom Heberschreiber, ersetzte aber die Schreibvorrichtung durch Düsenbolometer. Unbefriedigend blieb die Erzeugung der Kühlluft. Die Lösung dieser Aufgabe gelang H. Sell durch Anwendung des Schalldüsen-Prinzips. Auch die konstruktive Vereinigung der Bolometer mit dem Winderzeuger ist inzwischen gelungen.

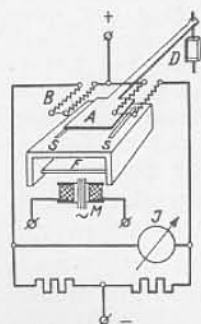


Bild 1. Bolometer-Verstärker ohne Kompensationsschaltung.

Im Bild 1 wird die Skizze, im Bild 2 das Lichtbild der Anordnung gezeigt. Die Blattfeder *F* wird von dem Elektromagnet *M* zu kräftigen Schwingungen angeregt. Sie spannt und entspannt dabei die in der Kammer eingeschlossene Luft, die während der Druckphase in scharf gerichtetem Strahl aus den Schlitzen *S* strömt, um die Bolometer *B* zu kühlen. Eine Fahne *A*, die den Zeiger des Galvanometers *G* bildet, steuert die Abkühlung, indem sie die Düsen mehr oder minder abdeckt.

Die Kompensationsschaltungen. Die im Bild 1 dargestellte Schaltung der Bolometer-Brücke ohne Rückführung genügt nicht den hohen Genauigkeits-Forderungen, die die Meßtechnik an ihre Geräte stellt. Allen neueren Verstärkern ist deshalb eine Kompensationsschaltung übergeordnet mit der Aufgabe, die geforderte

Genauigkeit zu sichern. Zwei Schaltungen stehen zur Verfügung, die „Kompensationsschaltung“, geeignet zur Messung von Spannungen, und die „Saugerschaltung“, geeignet zur Strommessung. (Bild 3 und 4).

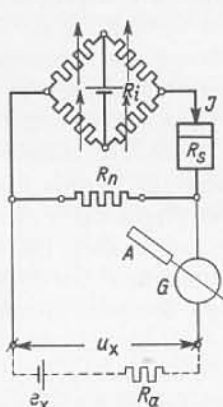


Bild 3. Kompensationsschaltung.

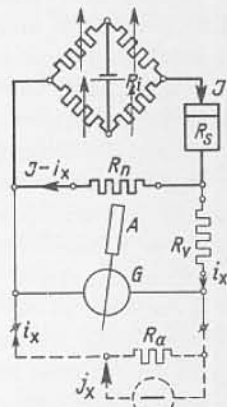


Bild 4. Saugerschaltung.

Für beide Schaltungen wurden bereits eingehende Darstellungen der Wirkungsweise gegeben^{11, 17}, es genügt, hier den gemeinsamen Grundgedanken beider Schaltungen klarzulegen. In beiden Schaltungen sei das Regelgalvanometer völlig richtkraftlos gedacht, es setzt sich wie ein Motorzähler in Bewegung, sobald die zu messende Größe u_x bzw. i_x angeschaltet wird. Die Abdeckfahne *A* verstimmt dabei zugleich die Bolometer-Brücke, der verstärkte Strom *J* beginnt zu fließen. Das Galvanometer bewegt sich, solange seine Klemmenspannung von Null verschieden ist, es bleibt stehen, sobald seine Klemmenspannung zu Null geworden ist. Dies tritt bei der Kompensationsschaltung ein, wenn der Spannungsabfall an R_n der zu messenden Spannung gleich geworden ist: $J \cdot R_n = u_x$. Bei der Saugerschaltung wird die Klemmenspannung des Galvanometers zu Null, wenn die Spannungs-Abfälle an R_n und R_v einander gleich geworden sind: $(J - i_x) \cdot R_n = i_x \cdot R_v$. Es ergeben sich die Grundgleichungen:

$$\text{Kompensationsschaltung: } J = u_x / R_n$$

$$\text{Saugerschaltung: } J = i_x \cdot (R_n + R_v) / R_n$$

Einige Sätze über das Verhalten des richtkraftlosen Verstärkers.

1. Die Kompensationsschaltung (*K*-Schaltung) ermöglicht die wattlose Messung von Spannungen; die Saugerschaltung (*S*-Schaltung) die wattlose Messung von Strömen.
2. Der Widerstand der *K*-Schaltung wird im geregelten Zustand unendlich groß, der der *S*-Schaltung zu Null.
3. Die Messung ist in beiden Fällen unabhängig von Schwankungen der Hilfsspannung, der Galvanometer- und Bolometer-Widerstände, der Zuleitungen zum Anzeigeelement und zum Galvanometer (Kompensationsverfahren mit eingeprengtem Strom¹⁶).

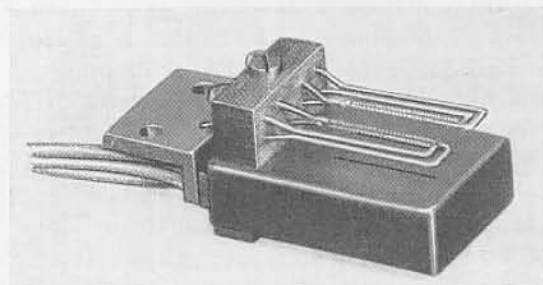


Bild 2. Bolometer-Anordnung.

4. Die *K*-Schaltung braucht zur Strommessung einen Nebenwiderstand, die *S*-Schaltung zur Spannungsmessung einen Vorwiderstand.

5. Bei der *S*-Schaltung können Ströme wattlos, fehlerfrei und ohne Rückwirkung auf gleichzeitige Einzelanzeige summiert werden durch Parallelschalten an den Eingangsklemmen.

6. Die Ausgangsströme beider Schaltungen können fehlerfrei und rückwirkungsfrei summiert werden.

Der Bolometer-Verstärker als Gleichstrom-Meßwandler. Gegen die bisher übliche Betrachtungsweise, die die Richtkraft im Steuergalvanometer vernachlässigt, sind erhebliche Einwände zu machen. Jede Betrachtung eines Meßgerätes muß zuletzt die Fehler erfassen. Eine Theorie der Meßwandler, die die Eigenschaften des Eisens und der magnetischen Verkettung als ideal voraussetzt, kann nur eine Erklärung der Arbeitsweise des Transformators und die Übersetzung angeben; sie versagt, sobald man nach der Genauigkeit und nach der richtigen Bemessung fragt. Auch der Bolometer-Verstärker kann als Wandler aufgefaßt werden. Seine wichtigste Fehlerursache ist die mechanische Rückwirkung des Kühlwindes auf den Zeiger; diese ist recht erheblich und entspricht bei modernen Verstärkern einer Feder von 30 mgcm/90°. Es erscheint demnach unzulässig, diese Fehlerursache einfach zu vernachlässigen. Die Aufgabe ist vielmehr, die Richtkraft möglichst voraussetzungslos zu berücksichtigen, um die Elemente des Verstärkers so bemessen zu können, daß die schädlichen Wirkungen der Stördrehmomente gering bleiben. Davon hat der Verfasser an anderer Stelle berichtet¹⁸, es sollen hier nur die Ergebnisse der Untersuchungen angegeben werden. Die Richtkraft im Steuergalvanometer hat zur Folge, daß der Ausgangsstrom *J* in beiden Schaltungen meist kleiner ausfällt, als nach den Grundgleichungen zu erwarten wäre; diese müssen also durch ein Fehlerglied berichtigt werden:

$$K\text{-Schaltung: } J = (1 - f) \cdot u_x / R_n$$

$$S\text{-Schaltung: } J = (1 - f) \cdot i_x \cdot (R_n + R_v) / R_n.$$

Es ist leicht zu erkennen, daß unsere Verstärker sich wie die Meßwandler der Wechselstromtechnik verhalten. Der Faktor $1/R_n$ bei der *K*-Schaltung entspricht dem Übersetzungsverhältnis des Wechselstromwandlers, er soll deshalb als „Übersetzung der *K*-Schaltung“ bezeichnet werden. Entsprechend ist bei der *S*-Schaltung der Faktor $(R_n + R_v)/R_n$ „Übersetzung der *S*-Schaltung“ zu nennen. Jetzt können auch die Fehlerglieder *f* gedeutet werden. Sie sind die unkorrigierten „Übersetzungsfehler“ der Gleichstromwandler. Der Bolometer-Verstärker und alle selbstkompensierenden Verstärker mit mechanischer Steuerung reihen sich damit ein in eine Gruppe neuartiger Meßgeräte, die man als „aktive Meßwandler“ bezeichnen kann. Zu dieser Gruppe gehören auch die galvanometerlosen gegengekoppelten Röhrenverstärker, deren Erschließung für die Meßtechnik noch bevorsteht.

Der Übersetzungsfehler. Er wird hervorgerufen durch die im Regelgalvanometer wirksamen Stördrehmomente und bestimmt damit die Genauigkeit des Bolometer-Verstärkers. Es ist möglich, die Übersetzungsfehler zu berechnen¹⁸, im folgenden genügt es, sie als experimentell bestimmbare Größen zu betrachten. In den Bildern 3 und 4 sind die Meßschaltungen, an die die Verstärker angeschlossen werden, als aktive

Zweipole dargestellt. Für die Messung sind dann zwei Aufgaben zu unterscheiden. Entweder soll der Verstärker als einfacher Strom- und Spannungsmesser die Klemmenspannung u_x und den Strom i_x messen (Galvanometer-Aufgabe), oder es wird verlangt, daß die EMK e_x bzw. der eingepreßte Strom j_x gemessen wird. Den verschiedenen Aufgaben entsprechen verschiedene Übersetzungsfehler. Der bei der Messung von Klemmenspannungen und Klemmenströmen auftretende unkorrigierte Übersetzungsfehler heißt „Stromfehler“ f_s . Er wird für Nennbürde angegeben, d. h. für den Widerstand des angeschlossenen Tintenschreibers und beträgt bei guten Verstärkern 0,5...1,5%. Liegt dagegen die Aufgabe vor, eine EMK (eines Thermoelements) oder einen eingepreßten Strom zu messen, so ergibt sich, daß der Ausgangsstrom um f_t kleiner ist, als die Übersetzung angibt; f_t wird „Totaler Übersetzungsfehler“ genannt, bei guten Verstärkern ist er kleiner als 3%.

Der Betriebswiderstand des Bolometer-Verstärkers.

Für den richtkraftlosen Verstärker ergab sich, daß sein Eingangswiderstand bei der *K*-Schaltung unendlich groß, bei der *S*-Schaltung zu Null wird. Wegen der störenden mechanischen Richtkräfte muß dieser Satz eingeschränkt werden. Das Ergebnis der Untersuchungen lautet: Die *K*-Schaltung verhält sich wie ein Spannungsmesser mit dem inneren Widerstand: $(R_g + R_n)/f_s$, die *S*-Schaltung wie ein Strommesser mit dem Widerstand: $f_s \cdot R_g \cdot R_v / (R_g + R_v)$.

Beispiel: Ein Bolometer-Verstärker mit dem Meßbereich 6 mV, einem Rähmchenwiderstand von 20 Ω und einem Stromfehler von 1% verhält sich wie ein Spannungsmesser für 6 mV mit dem inneren Widerstand von etwa 2000 Ω. Ein Stromverstärker in *S*-Schaltung mit dem gleichen Rähmchen und dem gleichen Stromfehler wirkt wie ein Strommesser für 0,3 mA bei einem inneren Widerstand von 0,2 Ω. Diese Zahlen wurden an ausgeführten Verstärkern gemessen.

Die Drehmomentbildung im Steuergalvanometer.

Das Einstellmoment wird bei guten Verstärkern vorwiegend elektrisch erzeugt. Dies zeigt der folgende Gedankenversuch. Lenkt man von Hand das Steuergalvanometer aus seiner Ruhelage aus, so ist zunächst das mechanische Stördrehmoment der Luftströme und Systemfedern zu überwinden. Gleichzeitig wird aber auch die Bolometer-Brücke verstimmt; diese schiebt über das Galvanometer einen Strom, der das Meßwerk wieder in seine Nulllage zu treiben versucht. Das dabei pro Winkelgrad Ausschlag entwickelte Drehmoment ist das Einstellmoment der „elektrischen Feder“. Die Summe aus dem mechanischen Störmoment D_m und dem elektrisch erzeugten Einstellmoment D_{el} ist das gesamte Einstellmoment D . Führt man diesen Versuch rechnerisch durch, so kommt man zu der einfachen Beziehung: $f_t = D_m/D$. Diese Gleichung ist die Grundlage für die Konstruktion moderner Verstärker. Während man sich früher ängstlich bemühte, dem Ideal der Richtkraftlosigkeit möglichst nahe zu kommen, nehmen die neuen Verstärker die mechanischen Störmomente als gegebene Tatsachen an, steigern aber mit allen Mitteln das Drehmoment der elektrischen Feder, um den totalen Übersetzungsfehler in genau vorgegebenen Grenzen zu halten. Diese Grundgedanken sind bei dem Zwerg-Verstärker (Bild 5) zuerst durchgeführt worden.

Die Rückwirkung der Luftströme auf das Meßwerk entspricht einer mechanischen Feder von etwa

30 mgcm/90°. Hält man einen totalen Übersetzungsfehler von 3% für gerade noch zulässig, so bedeutet dies, daß das Drehmoment der elektrischen Feder auf mindestens 1000 mgcm/90° getrieben werden muß. Dies ist nur zu erreichen, wenn gewisse Bemessungsregeln beobachtet werden. Es genügt aber nicht, den

totalen Empfindlichkeitsfehler auf $< 3\%$ begrenzt. Die Festlegung des totalen Empfindlichkeitsfehlers auf maximal 3% bestimmt die empfindlichsten Meßbereiche; es sind beispielsweise noch ausführbar: Spannungsverstärker für Temperatur-Messung, Meßbereich 6 mV, Verbrauch etwa $3 \mu A$, Anwendungsbereich $R \leq 20 \Omega$; Stromverstärker in Saugschaltung, Meßbereich 0,3 mA, Verbrauch etwa 0,06 mV, Anwendungsbereich $R_a \geq 20 \Omega$. Das gesamte Einstellmoment entspricht einer Feder von 1,2...3 gcm, der mechanische Gütefaktor nach Keinath errechnet sich für das Regelgalvanometer zu 50...125, eine in der Technik der Drehspulgeräte ungewöhnlich hohe Ziffer, in der sich die Maßnahmen zur Steigerung des elektrisch erzeugten Drehmomentes auswirken.

Der Bolometer-Verstärker als Regler. Der Zwergverstärker unterscheidet sich von den älteren Ausführungen durch das hohe Einstellmoment. Würde man ihn in den alten Kompensationsschaltungen (Bild 3 und 4) betreiben, so wäre jede Messung unmöglich; das Regelgalvanometer würde unaufhörlich zwischen den Zeigeransschlägen hin- und herpendeln. Betrachtet man die S- und K-Schaltung vom Gesichtswinkel der Regelung, so erkennt man, daß die Verstärker eigentlich Regler mit starrer Rückführung sind. Es ist auch aus der Praxis der wärmetechnischen Regelung bekannt, daß derartige Anordnungen ins Pendeln kommen, wenn die Laufzeit des Reglers kleiner ist, als die Zeitkonstante der regulierten Größe. Dies trifft auf unsere Anordnung zu. Das Regelgalvanometer ist infolge seiner kleinen Abmessungen und seines hohen Einstellmomentes sehr schnell geworden, die Bolometer-Brücke ist dagegen mit thermischer Trägheit belastet, die durch eine Zeitkonstante von 50...100 ms beschrieben werden kann. Um die Einstellung des Reglers stabil zu machen, gibt es zwei Wege. Entweder wählt man das Einstellmoment und damit die Reguliergeschwindigkeit so klein, daß die Pendelungen verschwinden (träge Regelung), oder man steigert rücksichtslos die Reguliergeschwindigkeit, unterdrückt aber die Schwingungen mit einer nachgiebigen Rückführung (Schnellregelung¹³). Die früheren Anordnungen waren träge Regler, der neue Zwergverstärker ist ein Schnellregler, er kann nur in Verbindung mit einer nachgiebigen Rückführung verwendet werden.

Die Pendelungen werden durch die thermische Trägheit der Bolometer verursacht. Die nachgiebigen Rückführungen haben beim Schnellregler die Aufgabe, dem Regelgalvanometer vorzutäuschen, daß die Verstärkung trägheitslos erfolgt. Dies geschieht im Bild 7 dadurch, daß über den Kondensator C ein Zusatzstrom zum Galvanometer geleitet wird, der nach dem Differentialquotient des verstärkten Stromes verläuft. Entsprechend wird im Bild 6 vom Wandler W eine Zusatzspannung in den Galvanometerkreis gegeben, die ein sofortiges Einsetzen des verstärkten Stromes vortäuscht. Es ist möglich, die zeitliche Einstellung des Galvanometers und des verstärkten Stromes rechnerisch zu verfolgen. Man gelangt dann zu Operatorengleichungen 4. Ordnung, die mit Hilfe des Entwicklungssatzes von Heaviside leicht zu lösen sind. Die im Bild 8...10 dargestellten Lösungen wurden mit dem Oszillograph ermittelt.

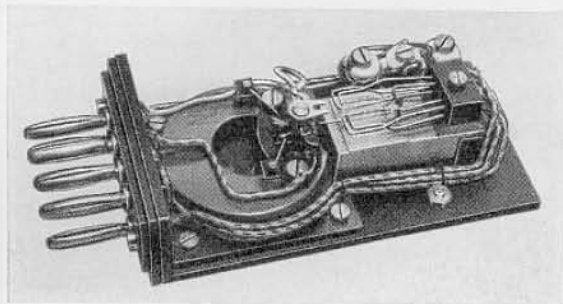


Bild 5. Zwerg-Bolometer-Verstärker.

Verstärker richtig zu bemessen, er muß auch richtig verwendet werden. Dies ist leicht einzusehen. Schließt man den Bolometer-Verstärker in S-Schaltung an eine Stromquelle an, deren innerer Widerstand null ist, so erscheint das Regelgalvanometer kurzgeschlossen, das wertvolle elektrische Einstellmoment kann sich nicht entwickeln. Ebenso ist es unzulässig, die K-Schaltung an einen unendlich großen Außenwiderstand anzuschließen. Die Verwendungsregel lautet:

Die K-Schaltung verlangt einen inneren Widerstand des Meßobjektes R_a , der gleich oder kleiner ist als der Widerstand des Regelgalvanometers R_g ; die S-Schaltung verlangt einen Widerstand R_a , der gleich oder größer ist als R_g .

Der Hersteller eines Bolometer-Verstärkers muß deshalb in schwierigen Fällen auf Grund genauer Kenntnis der meßtechnischen Aufgabe Schaltung und Widerstand des Regelgalvanometers dem Verwendungszweck anpassen.

Genauigkeit, einige Zahlen. Ein Maß für die erreichbare Genauigkeit ist das Verhältnis: Stördrehmoment/Gesamtdrehmoment, der totale Übersetzungsfehler. Alle bisher betrachteten Fehler sind unkorrigiert; ähnlich wie bei den Wechselstromwandlern kann man die Übersetzungsfehler korrigieren, indem man sie bei der Wahl der Übersetzung berücksichtigt. Die Übersetzung ist eine Konstante der Schaltung, also frei von allen Einflußgrößen. Temperatur-, Spannungs-, Fremdfeld- und Lageeinflüsse gehen deshalb nur in den totalen Übersetzungsfehler ein, sie sind „Fehler am Fehler“. Eine Genauigkeits-Zusage von 1% des Meßbereiches ist als sehr vorsichtig zu bezeichnen, wenn man den

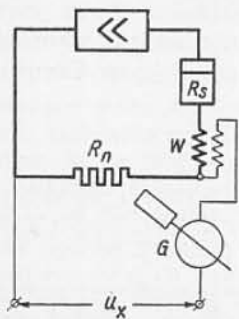


Bild 6. Kompensationsschaltung mit nachgiebiger Rückführung.

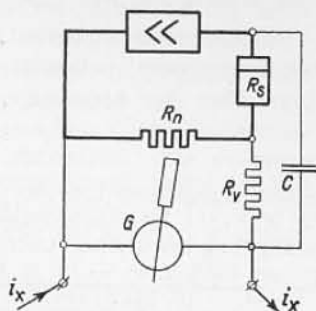


Bild 7. Saugschaltung mit nachgiebiger Rückführung.

Die Schaltung entsprach Bild 6. Im Zeitpunkt A wurde jeweils die zu messende Spannung abgeschaltet. Der verstärkte Strom schwingt sich dann nach der Kurve *a* auf den Wert Null ein. Die Kurve *b* gibt die Bewegung des Regelgalvanometers wieder, sie wurde über einen Spiegel aufgenommen, der am Meßwerk befestigt war. Im Bild 8 ist der Wandler zu klein und der Verstärker pendelt noch; im Bild 10 ist der Wandler zu groß; das Bild 9 gibt dagegen ein Beispiel für die Wirkung einer richtig bemessenen nachgiebigen Rückführung. Der Ausgangsstrom schwingt sich in 160 ms aperiodisch ein. Diese kurze Zeit wird durch das richtige Verhalten des Regelgalvanometers erreicht, das in kräftiger Überreglung den Ausgangsstrom zwingt, möglichst schnell zu verschwinden. Die schnellen überlagerten Schwingungen von 100 Hz rühren davon her, daß die Bolometer-Brücke mit gleichgerichtetem Wechselstrom gespeist wurde. Auch das Regelgalvanometer, das als Anzeige-Instrument eine Eigenfrequenz von 20 Hz besitzen würde, folgt diesen schnellen Schwin-

gungen. Der mit thermischer Trägheit belastete Bolometer-Verstärker ist damit schneller geworden als die meisten übrigen Verstärker, die durch eine an sich trägheitslose Verstärkung ausgezeichnet sind, aber langsam regeln. Der behandelte Zwerg-Bolometer-Verstärker ist deshalb auch in hervorragendem Maße

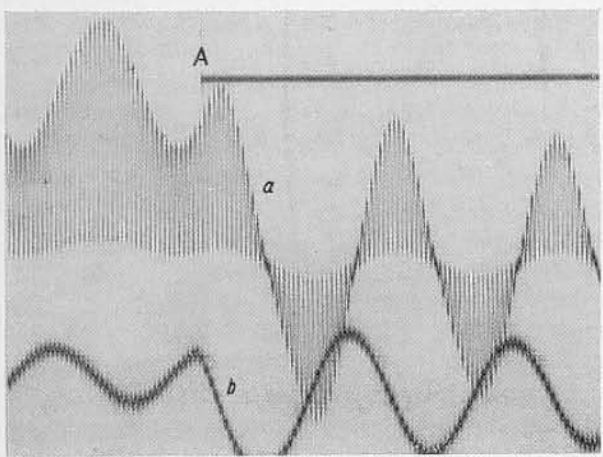


Bild 8. Wirkung der nachgiebigen Rückführung, Wandler zu klein.

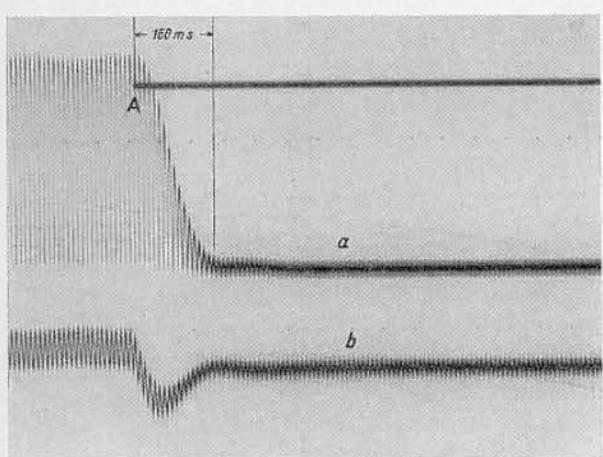


Bild 9. Wirkung der nachgiebigen Rückführung, Wandler richtig bemessen.

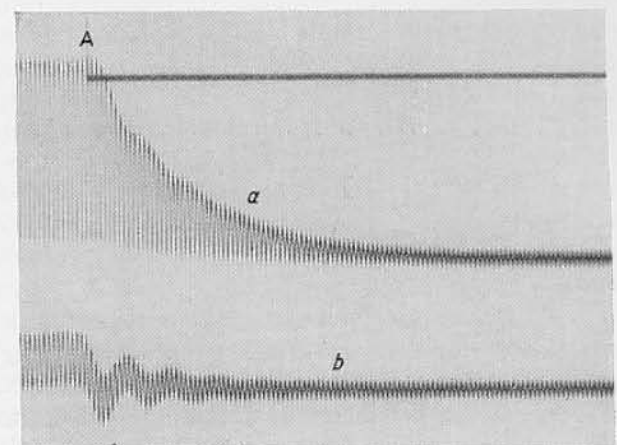


Bild 10. Wirkung der nachgiebigen Rückführung, Wandler zu groß.

unempfindlich gegen mechanische Erschütterungen und gegen Spannungsschwankungen im Netz, da er solche Störungen ausregelt, bevor sich der angeschlossene Tintenschreiber merklich bewegt. Die Oszillogramme wurden an dem normalen Spannungs-Verstärker für 6 mV aufgenommen.

Anwendungsbeispiele. Der Bolometer-Verstärker wird gewöhnlich in einen normalen Tintenschreiber eingebaut. Eine bemerkenswerte Ausführung des Bolometerschreibers ist der Multi-Z-Schreiber. Schaltet man in den Rähmchenkreis eines Vielfach-Instrumentes einen Bolometer-Verstärker in Saugschaltung, so wird die Anzeige des Instrumentes nicht gestört, da der Betriebswiderstand der Saugschaltung sehr klein ist (beispielsweise 0,2 Ω). Zugleich wird der Rähmchenstrom des Vielfach-Instrumentes verstärkt und aufgezeichnet. Es gelingt so mit einfachen Mitteln einen Tintenschreiber für Gleich- und Wechselstrom mit insgesamt 24 Meßbereichen zu schaffen.

Bei der Anzeige von Thermo-Spannungen über Vielfach-Umschalter stört oft die langsame Einstellzeit des Anzeige-Instrumentes. Wird ein Bolometer-Verstärker vor das Anzeige-Instrument geschaltet, so benötigt eine Meßstelle nur etwa 0,5 s. Bei dem hohen Betriebswiderstand des Verstärkers (6 mV 2000 Ω) erfolgt die Messung fast stromlos, also unabhängig vom Widerstand der Zuleitung.

Außerdem seien genannt: kontinuierliche Steuerung von Stromtoren, Schnellregistrierung hoher Temperaturen über das Ardrometer.

Literatur.

Vergleiche H. Sell, ATM Z 64—1 (August 1934). Außer der dort angegebenen Literatur: 11. J. Krönert, Meßbrücken und Kompensatoren, München: R. Oldenbourg 1935, S. 62/63. — 12. W. Skirl, Elektrische Messungen, 2. Aufl., Berlin: Walter de Gruyter 1936, S. 547...551. — 13. E. Juillard, Die selbsttätige Regelung elektrischer Maschinen, Berlin: J. Springer 1931, S. 39...53. — 14. R. Sewig, Objektive Photometrie, Berlin: J. Springer 1935, S. 88. — 15. M. Roscher, 60 Jahre technische Entwicklung der Unterseetelegraphie, Elektrotechn. Z. 33 (1912), S. 743. — 16. W. Stäblein, Über Verfahren zur Summenmessung, Elektrotechn. u. Maschinenb. 50 (1932), S. 69...76. — 17. W. Geyger, ATM J 932—1 und 2 (1936). — 18. L. Merz, Theorie der selbstkompensierenden Gleichstromverstärker, Arch. Elektrotechn. 31 (1937), S. 1...23.