Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 54 (1963)

Heft: 5

Artikel: Der Gleichstrom-Kompensationsverstärker als Mittelwertmesser

Autor: Götze, S.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-916462

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 13.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

cellule photoélectrique dans tous les cas. Il existe même actuellement un procédé électro-chimique donnant une image légèrement brunâtre ayant toutes les nuances entre le noir et le blanc et sortant de l'appareil prête à être utilisée comme document pour la confection de clichés pour les journaux.

Ces appareils, en fait, ne sont plus des accessoires, mais comme les PTT ne peuvent prendre sur eux de mettre tous ces divers procédés à la disposition des intéressés, ils en permettent le raccordement de la même façon que pour les dispositifs accessoires.

Les conditions techniques requises pour ces installations sont aussi contenues dans les recommandations du C.C.I.T.T. Le raccordement se fait soit par ligne louée, soit par le réseau téléphonique public ordinaire, mais avec le risque de voir des défauts, des rayures dans l'image, dus aux effets de friture des contacts de relais et sélecteurs dans les centraux.

La qualité de la reproduction est aussi évidemment influencée par la caractéristique de la ligne et en général les câbles à forte pupinisation conviennent mal pour ce genre de transmission.

Pour terminer, il faut mentionner comme dernière nouveauté dans le domaine des télécommunications la machine à traiter les données et à programmer.

Le besoin de relier ces machines entre elles à de grandes distances se fait de plus en plus sentir pour répondre aux nécessités de la centralisation dans les affaires. Il existe d'ailleurs déjà de tels réseaux à l'étranger permettant d'alimenter à distance les machines calculatrices.

Des problèmes techniques assez délicats se posent du fait de la grande vitesse à laquelle les signaux codés doivent être transmis.

Si les informations envoyées n'ont pas besoin d'être traitées immédiatement, la bande perforée comme en télégraphie avec ses 50 à 100 bauds peut suffire, le baud étant le nombre d'informations qui peuvent être transmises dans un temps déterminé. Par contre, si le flux d'information doit être traité immédiatement et qu'il soit de l'ordre de 1000 à 2000 bauds, simple supposition, des dispositifs spéciaux devront être intercalés dans les circuits pour transmettre les signaux par exemple d'après le système de la variation de fréquence ou d'autres moyens.

Le laboratoire d'essais et de recherches des PTT a déjà procédé à des expériences avec de telles machines pour déterminer les conditions les meilleures et les plus économiques d'adaptation des installations d'abonnés à un tel service. Les grandes écoles techniques s'intéressent aussi à ces problèmes d'avenir.

L'entreprise des PTT et particulièrement les services des télécommunications se trouvent par là même devant des tâches nouvelles, mais grâce à l'électronique et aux câbles porteurs coaxiaux qu'ils possèdent en toujours plus grand nombre, il n'est pas dit qu'ils ne pourront pas résoudre ces difficultés comme ils en ont déjà résolu d'autres avec la collaboration étroite de l'industrie suisse de la branche.

Tout cela sort quelque peu du sujet de cet article, ce qui est excusable, car actuellement, à propos de télécommunications, on ne sait bientôt plus si l'accessoire doit être considéré comme l'objet principal et le principal comme accessoire!

Adresse de l'auteur:

R. Pfisterer, inspecteur technique, Direction générale des PTT, Speichergasse 6, Berne.

Der Gleichstrom-Kompensationsverstärker als Mittelwertmesser

Von *S. Götze*, Wohlen

621.375.024.083.5

Das Prinzip des Gleichstrom-Kompensationsverstärkers erlaubt eine annähernd leistungslose Messung von Strömen und Spannungen mit hoher Genauigkeit. Der Ausgangsstrom der Messverstärker kann in weiten Grenzen von der Grösse des Lastwiderstandes unabhängig gemacht werden; damit wird die Schaltung für Fernmessung besonders geeignet. Durch eine Kunstschaltung mit Kondensatoren und Widerständen kann die Einstellzeit der Anordnung stark vergrössert werden, womit die Bildung von Mittelwerten bei stark schwankender Messgrösse möglich und die Auswertung oft erheblich vereinfacht wird. Anforderungen an einen Mittelwertbildner werden diskutiert, und es wird ein Ersatzschaltbild angegeben. Die in der Literatur verstreut vorhandenen Gesetzmässigkeiten des Gleichstrom-Kompensationsverstärkers werden zusammengefasst. Die experimentell und theoretisch neu gewonnenen Gesetzmässigkeiten und technischen Grenzen werden diskutiert. Einige angeführte Beispiele beziehen sich auf robuste Betriebsgeräte, jedoch umfasst die angegebene Theorie auch höchstempfindliche Laboratoriums-Messgeräte.

Le principe de l'amplificateur de courant continu à compensation permet une mesure de courants et de tensions avec une grande précision et presque sans puissance. Le courant de sortie de l'amplificateur de mesure peut être rendu très indépendant de la grandeur de la résistance de la charge, ce qui convient particulièrement à la télémesure. Par un montage spécial de condensateurs et résistances, la durée d'ajustage du dispositif peut être nettement prolongée, permettant ainsi d'obtenir des valeurs moyennes d'une grandeur qui varie fortement et de simplifier souvent l'interprétation de la mesure. L'auteur examine les exigences à poser à un dispositif formant une valeur moyenne et il indique un schéma équivalent. Il groupe les lois qui régissent ces amplificateurs et qui ne sont indiquées que sporadiquement dans la littérature, puis il discute des lois et limites techniques établies par des expériences et par la théorie. Quelques exemples indiqués concernent de robustes appareils d'exploitation, mais la théorie présentée s'applique également à des appareils de laboratoire d'une haute sensibilité.

1. Funktion und Wirkungsweise des Gleichstromkompensationsverstärkers

Das Kompensationsverfahren von *Lindeck-Rothe* kann zu einem automatisch arbeitenden Verstärker weiterentwickelt werden. Man erhält dann den Gleichstrom-Kompensationsverstärker, von dem in dieser Arbeit die Rede ist. Über die Grundlagen dieser Anordnung sind zahlreiche Arbeiten erschienen [1...8][1]). Hier sollen Funktion und Gesetzmässigkeiten nur soweit zusammengefasst werden, als diese für das spätere Verständnis notwendig sind.

Das Schaltbild der Anordnung zeigt Fig. 1. An die Eingangsklemmen wird die zu messende Spannung U_x geschaltet. Der Quellwiderstand (Innenwiderstand) der Spannungsquelle sei R_q. Die Hilfsstromquelle H treibt einen Strom durch die Widerstände R_k (Kompensationswiderstand) und R_2 (Aussenwiderstand, Ver-

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

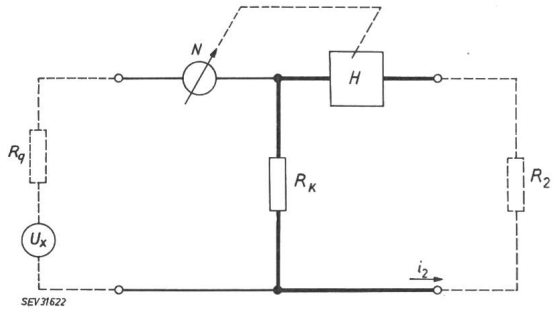

Fig. 1
Schaltbild des Gleichstrom-Kompensationsverstärkers
N Nullmotor; *H* Hilfsstromquelle; R_q Quellwiderstand der Spannungsquelle; R_K Kompensationswiderstand; R_2 Aussenwiderstand (0...6 kΩ); U_x Meßspannung; i_2 Ausgangsstrom

braucher). Der Nullmotor *N* regelt die Hilfsspannungsquelle und damit den Ausgangsstrom i_2 so, dass der Spannungsabfall am Kompensationswiderstand R_k gleich der Meßspannung wird.

$$U_x = R_k\, i_k \tag{1}$$

Die Grösse des Aussenwiderstandes ist in einem grossen Bereich beliebig wählbar. Der Variationsbereich (meist 0...6 kΩ) hängt von der Leistungsfähigkeit der Hilfsspannungsquelle ab. Durch diese Unabhängigkeit vom Lastwiderstand wird das Messprinzip besonders geeignet für Gleichstromfernmessungen, da die Grösse des Leitungswiderstandes nicht in die Messung eingeht.

2. Messbereich und Genauigkeit

Das geschilderte Messprinzip hat seine technischen Grenzen, die vor allem in der Ansprechempfindlichkeit des Nullmotors ihre Ursache haben. Nullmotore guter Empfindlichkeit (für Betriebsmessgeräte) sind meist entsprechend Fig. 2 gebaut. Eine Drehspule ist im Magnetfeld zwischen Spitzen gelagert und trägt eine Vorrichtung zum Steuern der Hilfsstromquelle (Kondensatorplatte, Metallplättchen zum Verstimmen eines Schwingkreises, o. ä.). Die Spitzenlagerung bedingt einen kleinen Reibungsfehler. Die Stromzuführung für die Drehspule geschieht über sehr dünne Zuführungsbändchen, die nur eine sehr geringe Richtkraft erzeugen. Obwohl Reibung und Richtmoment sehr klein sind, ist hierdurch ein Mindestdrehmoment, d. h. ein Mindeststrom durch den Nullmotor erforderlich, um diesen zum Ausschlagen zu bringen. Bei einem idealen Nullmotor (kein Reibungsfehler, kein Richtmoment) wird der Ansprechstrom unendlich klein.

Der so erforderliche Mindeststrom des Nullmotors (i_N) hat einen Fehler in der Gleichheit der beiden Spannungen in Gl. (1) zur Folge. Ist R_n der Innenwiderstand des Nullmotors, so gilt die modifizierte Beziehung:

$$U_x = R_k\, i_k\, [1 \pm E_N] \tag{2}$$

Der entstehende Fehler durch Reibung und Richtmoment des Nullmotors wird:

$$E_N = \frac{R_q + R_N + R_k}{R_k} \cdot \frac{i_N}{i_2} \tag{3}$$

Ferner hat der erforderliche Mindeststrom zur Folge, dass der Meßspannungsquelle ständig ein kleiner Strom entnommen wird. Der effektive Eingangswiderstand R_1 des Verstärkers kann also die Grösse

$$R_1 = R_k \frac{i_2}{i_N} \tag{4}$$

nicht überschreiten. Für einen idealen Nullmotor ohne Reibung und Richtmoment würde der Eingangswiderstand unendlich gross, bzw. die der Meßspannungsquelle entnommene Energie unendlich klein.

Kleinsten Fehler und gleichzeitig kleinsten Bedarf an Messenergie erhält man für Widerstandsanpassung, wenn:

$$R_q = R_N \tag{5}$$

d. h. der Innenwiderstand des Nullmotors wird möglichst gleich dem Quellwiderstand der Spannungsquelle gewählt. Der Innenwiderstand des Nullmotors lässt sich leicht durch geeignete Wahl des Drahtdurchmessers der Drehspule und der Windungszahl anpassen, wobei der Wickelraum konstant gelassen wird.

Unter Beachtung von Gl. (5) und den Konstruktionsdaten des Nullmotors erhält man nun die charakteristische Beziehung zwischen Genauigkeit und Messbereich U_b (auf den der Fehler bezogen) zu:

$$U_b\, E \geqq k \sqrt{R_N} \tag{6}$$

Diese Beziehung besagt, dass bei gegebenem Quellwiderstand der Spannungsquelle das Produkt aus zulässigem Fehler E und Messbereich U_b grösser als eine gegebene Zahl bleiben muss. Hohe Messempfindlichkeit (kleiner Wert von U_b) und hohe Messgenauigkeit (kleiner Wert für E) schliessen sich gegenseitig aus. Der Faktor k lässt sich durch die Daten der Bauelemente, insbesondere Reibung und Richtmoment des Nullmotors ausdrücken und sollte bei der Konstruktion möglichst klein gehalten werden. Gute Kompensationsverstärker robuster Bauart erreichen einen Wert von $k = 1{,}2 \cdot 10^{-5}$. Mit stark steigendem Aufwand sind für Laborgeräte mit höchstempfindlichen aber auch weniger robusten Nullmotoren wesentlich kleinere Werte erreichbar. Für einen Quellwiderstand von $R_q \approx 10\ \Omega$ und der genannten Grösse für k lässt sich bei einer geforderten Genauigkeit von 0,5% ein kleinster Spannungsmessbereich von $U_b = 8$ mV realisieren. Die erforderliche Eingangsleistung ist ca. 10^{-8} W.

3. Anwendung und Funktion einer Mittelwertbildung

Bei der Mehrzahl von Überwachungsaufgaben interessiert der Mittelwert der Messgrösse. Dies gilt für Durchfluss- und Fördermengen, elektrische Leistungen, und zahlreiche weitere Messgrössen, bei denen meist die Menge oder die Leistung pro Zeiteinheit ermittelt werden muss. Schwankt die Messgrösse wenig oder nur

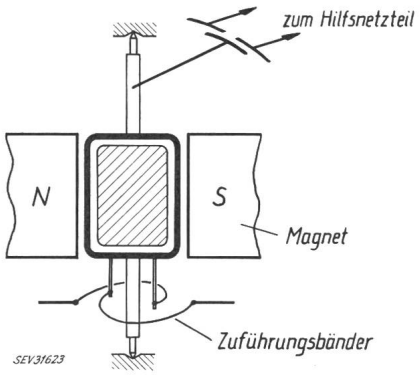

Fig. 2
Prinzip des Nullmotors

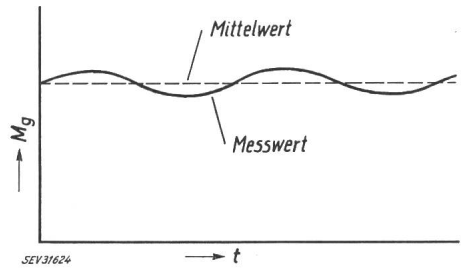

Fig. 3
Mittelwertbildung bei wenig veränderlichen Messgrössen
M_g Messgrösse; t Zeit

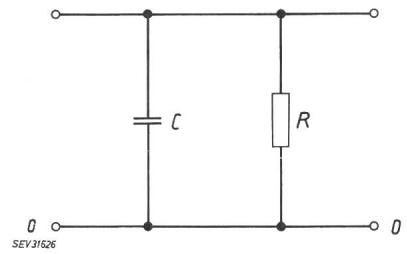

Fig. 5
RC-Glied zur Mittelwertbildung
C Kondensator; *R* Entladewiderstand

selten, so ist der gesuchte Wert einfach von dem Diagramm eines Registrier- oder Anzeigegerätes abzulesen. Das Auge des Messenden hilft in diesem Fall meist mit und bildet bei einfachen Vorgängen mehr oder weniger unbewusst den mittleren Wert (Fig. 3), d. h. die gerade Linie, welche mit der Nullinie die gleiche Fläche pro Zeiteinheit umschliesst. Selbstverständlich lässt sich dieser Vorgang auch graphisch durchführen, indem für jeweils gleiche Zeitintervalle die Fläche bestimmt wird und durch die so gewonnenen Mittelwerte der Zeitintervalle eine glatte Kurve gezogen wird.

Diese umständlichen Methoden sind bei einfachem Verlauf des Messvorganges mitunter zumutbar und bezüglich Genauigkeit befriedigend. Bei stark schwankenden Messwerten nimmt jedoch die Auswertearbeit für hinreichende Genauigkeit so stark zu, dass sie praktisch nicht mehr durchführbar ist. Ausserdem möchte man den Wert sofort und nicht erst nach langer Auswertearbeit ablesen und verwerten. Diese Forderung ist selbstverständlich, wenn mit der Messgrösse geregelt wird. Die Bildung des Mittelwertes wird also vom Messgerät selbst verlangt. Fig. 4 zeigt ein typisches Anwendungsbeispiel.

Hier werden (Fig. 4a) die auf einem Förderband transportierten Gewichte registriert. Fig. 4b zeigt die gleiche Registrierung mit einem Mittelwertmesser

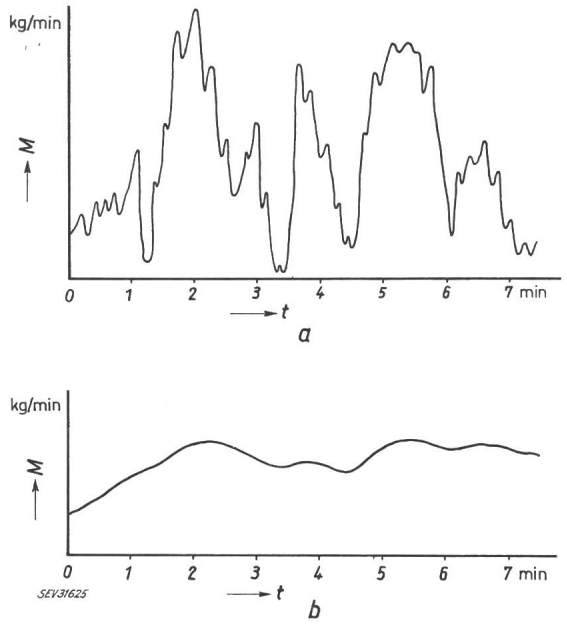

Fig. 4
Registrierung einer Fördermenge
a mit normalem Messwertumformer (kleine Zeitkonstante, ca. 0,5 s); *b* mit Mittelwertbildner (grosse Zeitkonstante, ca. 50 s); M Fördermenge; t Zeit

(Zeitkonstante ca. 50 s). Während die Registrierung der Fig. 4a eine umständliche Auswertearbeit erfordert, liefert Fig. 4b sofort den Überblick. Analoges gilt für Messgrössen aller Art wie Spannungsüberwachung, Frequenzüberwachung in Netzen usw. Dabei wird man nicht immer eine extrem grosse Zeitkonstante benötigen, sondern diese dem Messproblem anpassen.

Messtechnisch wird von einer Mittelwertbildung verlangt, dass der Flächeninhalt unter der Originalkurve (Fig. 4a) und der Mittelwertkurve (Fig. 4b) gleich ist. Diese Forderung ist zu erreichen, wenn das Messgerät folgende Bedingungen erfüllt:

Gleiche Empfindlichkeit: bei konstantem Messwert zeigen normales Messgerät und Mittelwertbildner gleiche Werte.

Linearer Skalenverlauf: Die Anzeige muss dem Messwert streng proportional sein (sonst werden gleiche Flächenelemente bei der Mittelwertbildung verschieden bewertet).

Die einfachste, allgemein bekannte Anordnung zur Mittelwertbildung ist das *RC*-Glied (Fig. 5). Der Kondensator lädt sich entsprechend dem Flächeninhalt der Kurve $i(t)$ auf und entlädt sich entsprechend der gespeicherten Ladungsmenge über den Widerstand R (Fläche pro Zeit). Schnelle Änderungen des Eingangstromes «puffert» der Kondensator ohne die Summe der Ladungsmenge zu beeinflussen. (Der Kondensator muss deshalb einen hohen Isolationswiderstand besitzen; s. Abschnitt 6.)

Der Aufwand an Kapazität ist bei der geschilderten Mittelwertbildung hoch. Erheblich kleineren Aufwand erreicht man bei dem Gleichstrom-Kompensationsverstärker durch eine Kunstschaltung.

Weitere Methoden zur Mittelwertbildung sind bekannt (Messgeräte mit grossem Trägheitsmoment oder extrem hoher Dämpfung) führen jedoch für grössere Zeitkonstanten bald zu grossem technischem Aufwand.

4. Der Kompensationsverstärker als Mittelwertbildner

Die Untersuchung des Einstellverhaltens bei dem Kompensationsverstärker zeigt, dass die Einstellzeit durch Variieren der Bauelemente nur in relativ geringen Grenzen beeinflusst werden kann. Erfolgreich ist hier jedoch eine kapazitive Rückführung (Fig. 6). Der Kondensator C wirkt dabei dem «Nachregeln» des Nullmotors entgegen, bzw. verzögert dieses. Steigt z. B. die Meßspannung U_x, so muss zunächst der Kondensator über den Widerstand R_q aufgeladen werden, dessen Spannung langsam ansteigt. Erst dann spricht der Nullmotor in gleichem Masse verzögert an und regelt den Ausgangsstrom i_2 mit. Der Ausgangsstrom verursacht am Aussenwiderstand R_2 einen Spannungsabfall, der die Aufladung des Kondensators

weiterhin verzögert. Damit erhält man mit relativ klein bemessener Kapazität C bereits eine erhebliche Vergrösserung der Einstellzeit der Anordnung.

Die mathematische Behandlung liefert in guter Übereinstimmung mit dem Experiment ein Zusatzglied in Gl. (1) bzw. (2).

$$U_x = R_k\, i_2\, [1 \pm E_N] \cdot [1 + p\,\tau] \qquad (7)$$

Dabei ist p die in der Theorie der Regelung übliche Abkürzung

$$p = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \qquad (8)$$

und τ die Zeitkonstante des Mittelwertmessers, die in folgender Weise von den Bauelementen abhängt:

$$\tau = \frac{R_q\, R_2}{R_k}\, C \qquad (9)$$

Um dieses Ergebnis aus der exakten Gleichung zu erhalten (die exakte Gleichung ist von 4. Ordnung in p), wird eine Näherung gebildet. Diese hat zur Voraussetzung, dass der Fehler durch den Nullmotor (E_N) klein gegen 1 ist und dass der Kompensationswiderstand klein ist gegen den Innenwiderstand des Nullmotors. Beide Bedingungen sind jedoch praktisch gut erfüllt (Faktor 50 und mehr), so dass der Ausdruck für die Zeitkonstante (Gl. 9) mit guter Genauigkeit gültig ist. Die Diskussion der exakten Gleichung ist kompliziert und führt hier zu weit.

Das Zusatzglied in Gl. (7) hat genau die Gestalt wie bei einem RC-Glied. Damit lässt sich das Ersatzschaltbild des Kompensationsverstärkers als Mittelwertmesser angeben (Fig. 7). Die Anordnung der C-Rückführung wirkt wie ein sehr hochohmiger Verstärker mit parallel geschalteter Kapazität der Grösse:

$$C_E = \frac{R_2}{R_k}\, C \qquad (10)$$

Der Klemmenwiderstand R_E aus Gl. (4) ist dabei immer gross gegen den Quellenwiderstand R_q und kann für die Zeitkonstante vernachlässigt werden.

Wie Gl. (10) zeigt, wirkt das Verhältnis R_2/R_K vergrössernd auf die verzögernde Wirkung der Kapazität C, d. h. bei einem grossen Wert des Verhältnisses kann bereits mit kleiner Kapazität C eine grosse Zeitkonstante erreicht werden. Während die Grösse von R_k durch den vorgegebenen Spannungsmessbereich gegeben ist, kann R_2 in gewissen Grenzen variiert werden.

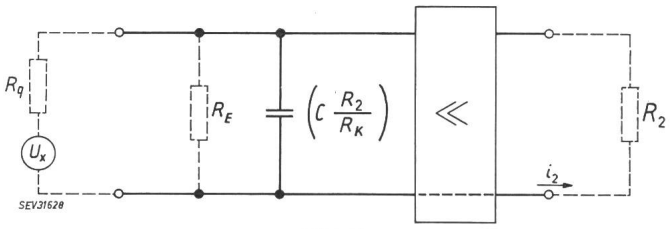

Fig. 7
Ersatzschaltbild des Mittelwertmessers
R_E Eingangswiderstand des Kompensationsverstärkers
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 1

Der maximale Wert des Aussenwiderstandes R_2 ist durch die Dimensionierung der Speisespannungsquelle gegeben. Ist der eigentliche Verbraucher nicht hochohmig genug, so wird der Aussenwiderstand zur Erzielung einer hohen Zeitkonstante mit dem Zusatzwiderstand R_{21} auf den zulässigen Höchstwert gebracht.

Wird nicht eine extrem grosse Zeitkonstante gefordert, so lässt sich in der Schaltungsvariation (Fig. 8) die Zeitkonstante bequem variieren. Die Stellung des Potentiometers R_{21} lässt sich direkt in Einheiten der Zeitkonstanteeichen, denn nach Gl. (9) gilt:

$$\tau = \text{konst.} \cdot R_{21} \qquad (11)$$

Allerdings ist hierbei eine Reduzierung des Variationsbereiches vom eigentlichen Verbraucherwiderstand R_2, z. B. auf 0...4 kΩ in Kauf zu nehmen, damit der Gesamtwiderstand $R_2 + R_{21}$ mit $R_{21} = 2$ kΩ die zulässige Grösse von 6 kΩ nicht überschreitet. Auch ist in diesem Fall die dreifache Kapazität erforderlich.

Schliesslich sei noch die Grösse von R_q etwas genauer betrachtet. Für eine grosse Zeitkonstante ist ein hoher Wert von R_q erwünscht [Gl. (9)]. Ein grosser Wert von R_q vergrössert jedoch auch den Fehler [Gl. (6)]. Der Widerstand R_q wird deshalb zweckmässig so hoch gewählt (durch künstliches Vergrössern mit dem Vorschaltwiderstand R_{q1}), wie es Messbereich und zulässiger Fehler erlauben (Fig. 9). Die künstliche Vergrösserung des Widerstandes R_q erlaubt eine kleinere Bemessung der Kapazität, vergrössert jedoch gleichzeitig die notwendige Messenergie auf ca. $2 \cdot 10^{-8}$ W.

Durch Kurzschliessen des Vorschaltwiderstandes mit einer Taste («Starttaste») lässt sich im Betrieb die Zeitkonstante kurzzeitig stark verkleinern. Dies ist in manchen Fällen wertvoll, da Einschwingvorgänge, z. B. beim Einschalten des Gerätes mit der gleichen

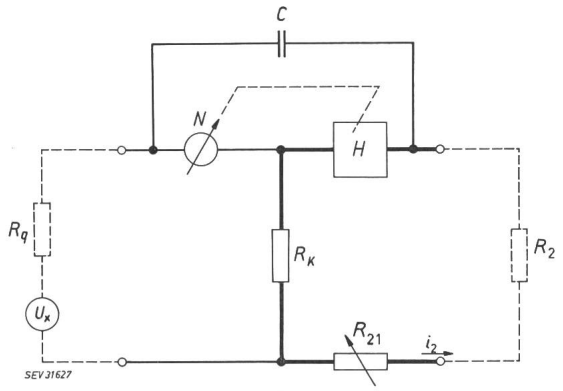

Fig. 6
Prinzipschaltbild des Mittelwertmessers
Bezeichnungen siehe Fig. 1

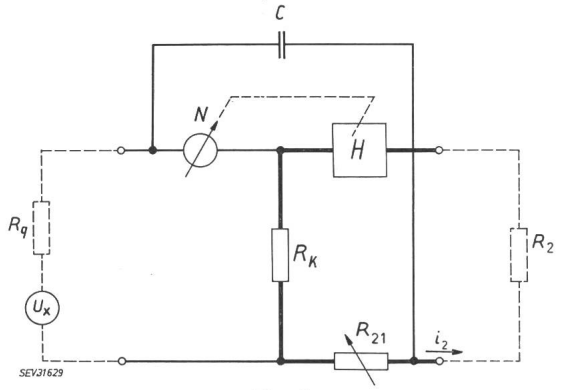

Fig. 8
Mittelwertmesser mit einstellbarer Zeitkonstante
R_2 Aussenwiderstand (z. B. 0...4 kΩ); R_{21} Potentiometer für einstellbare Zeitkonstante
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 1, 6 und 8

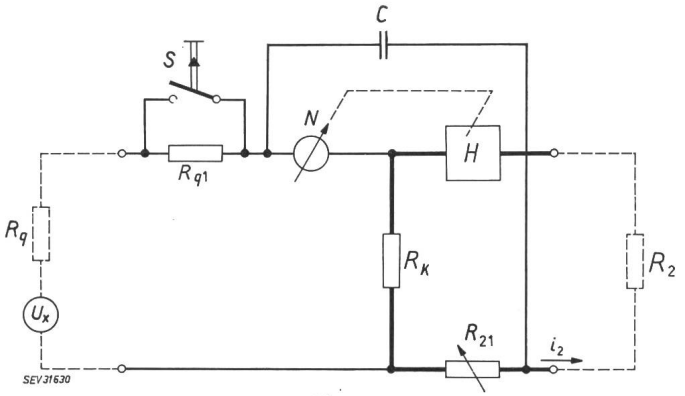

Fig. 9
Künstlich vergrösserter Quellwiderstand und «Starttaste»
S Starttaste; R_{q1} Vorschaltwiderstand
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 1 und Fig. 8

stark vergrösserten Einstellzeit ablaufen, mit der sonst rasche Änderungen des Messwertes gemittelt werden.

Setzt man die Genauigkeitsbeziehung in Gl. (6) in die Beziehung für die Zeitkonstante Gl. (9) ein, so erhält man nach entsprechender Umformung:

$$\tau = \text{konst.} \cdot U_B E^2 R_2 C \qquad (12)$$

d. h. mit höheren Ansprüchen an die Genauigkeit (kleiner Fehler E) steigt der Kapazitätsaufwand quadratisch, bei höheren Ansprüchen an die Messempfindlichkeit (kleiner Messbereich U_b) steigt der Kapazitätsaufwand proportional. Hohe Ansprüche an Messempfindlichkeit und Genauigkeit müssen «erkauft» werden.

5. Die Auswahl der Kondensatoren

An die Kondensatoren müssen hinsichtlich Isolationswiderstand R_L hohe Anforderungen gestellt werden, da ein Leckstrom des Kondensators direkt über den Nullmotor fliesst und einen zusätzlichen Fehler E_C verursacht.

Die Kondensatorenhersteller geben den Isolationswiderstand meist als Zeitkonstante τ_C an

$$\tau_C = R_L C \qquad (13)$$

Ist τ die verlangte Zeitkonstante des Mittelwertmessers, so ergibt sich der zusätzliche Fehler durch den Leckstrom des Kondensators:

$$E_C = \frac{\tau}{\tau_C} \qquad (14)$$

Die Grundgleichung des Mittelwertmessers wird dann:

$$U_x = R_k i_2 [1 \pm E_N \pm E_C] \cdot [1 + p\tau] \qquad (15)$$

In Tabelle I sind einige Kondensatortypen zusammengestellt. Praktisch verwendbar sind nur Kondensatoren mit metallisierter Kunststoffolie, die eine ausreichende Isolation besitzen und in bezug auf Volumen und Preis günstig sind. Lässt man bei Verwendung dieser Kondensatoren mit $\tau_C = 50000$ s einen zusätzlichen Fehler von $E_C = 0{,}1\% = 10^{-3}$ zu, so ist eine Zeitkonstante des Mittelwertmessers von $\tau \approx 50$ s realisierbar.

6. Die Saugschaltung

Das Prinzip des Kompensationsverstärkers lässt sich auch für die Messung kleiner Ströme anwenden. Fig. 10 zeigt das Prinzipschaltbild.

Der Meßstrom I_x, der nicht grösser sein darf als der Ausgangsstrom i_2, fliesst durch die Widerstände R_K und R_V und ruft daran einen Spannungsabfall hervor:

$$U_1 = I_x (R_K + R_V) \qquad (16)$$

Durch den Widerstand R_K fliesst ausserdem der Ausgangsstrom i_2 und ruft den Spannungsabfall U_2 hervor, der der Spannung U_1 entgegengerichtet ist.

$$U_2 = R_K i_2 \qquad (17)$$

An den Eingangsklemmen entsteht somit die resultierende Spannung:

$$U_1 = I_x (R_K + R_V) - R_K i_2 \qquad (18)$$

Der Nullmotor regelt über das Hilfsnetzteil H den Ausgangsstrom so, dass die Spannung am Eingang (U_1) verschwindet. Damit ergibt sich für den Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsstrom:

$$I_x = \frac{R_K}{R_K + R_V} i_2 \qquad (19)$$

Auch diese Beziehung gilt nur für einen idealen Nullmotor (Ansprechstrom $i_N = 0$). Durch Reibungs-

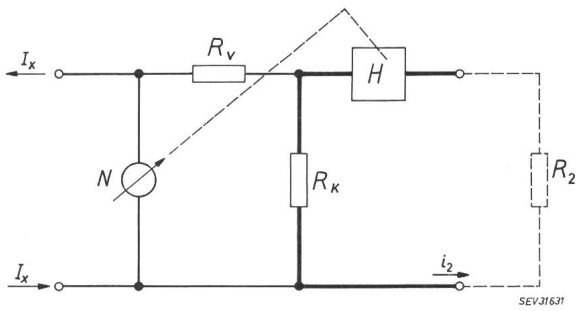

Fig. 10
Kompensationsverstärker in «Saugschaltung» für Strommessung
I_x Meßstrom; R_v Vorschaltwiderstand
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 1

Angaben über einige Kondensatortypen

Tabelle I

Typ des Kondensators	Zeitkonstante s	Spezifisches Volumen cm³/µF	Spezifischer Preis Richtwert Fr./µF	Verwendung
Elektrolyt	50 nach 3 min			unbrauchbar
Tantal	100 nach 3 min			
MP (1-lagig)	200	4,8	0,8	unbrauchbar
MP, mehrlagig	1 000	12	1,4	bedingt
Papier	1 000	12	1,0	brauchbar
Glimmer	5 000	135		zu gross,
Kunststoffolie	20 000...50 000	3	1,0	*gut*
Polystyren	50 000 000	145		zu gross (Sonderfälle)

fehler und restliches Richtmoment ergibt sich das Korrekturglied

$$I_x = \frac{R_K}{R_K + R_V} i_1 \left[1 \pm \frac{R_V + R_N + R_K}{R_K} \cdot \frac{i_N}{i_1}\right] =$$

$$= \frac{R_K}{R_K + R_V} i_2 [1 \pm E_N] \qquad (20)$$

Für den kleinsten Messbereich (I_b) und den zulässigen Fehler E besteht wieder eine charakteristische Beziehung nach Art der Gl. (6):

$$I_B E \geqq k \frac{1}{\sqrt{R_N}} \qquad (21)$$

Gl. (21) zeigt wieder, dass sich hohe Messempfindlichkeit und hohe Genauigkeit gegenseitig ausschliessen.

Gute Kompensationsverstärker liefern für k den Wert $1{,}2 \cdot 10^{-5}$. Mit einem Nullmotor des Innenwiderstandes $R_N = 3200\ \Omega$ erreicht man bei einem zulässigen Fehler von $E = 0{,}5\%$ einen kleinsten Messbereich von $I_b = 45\ \mu A$. Die erforderliche Messleistung ergibt sich zu ca. 10^{-8} W.

7. Mittelwertmesser in Saugschaltung

Durch eine geeignete C-Rückführung lässt sich auch die Saugschaltung mit stark vergrösserter Zeitkonstante ausbilden (Fig. 11). Die Betrachtungen von Abschnitt 4 werden sinngemäss auch auf diese Schaltung angewendet.

Die Grundgleichung der Saugschaltung erhält man in guter Übereinstimmung mit dem Experiment zu:

$$I_x = \frac{R_K}{R_K + R_V} i_2 [1 \pm E_N] \cdot [1 + p\tau] \qquad (22)$$

wobei sich die Zeitkonstante τ bestimmt zu:

$$\tau = \frac{R_1 R_2}{R_K} C \qquad (23)$$

Der Zusatzwiderstand R_1 ist für Funktion der Verzögerung notwendig, vergrössert jedoch den Eingangswiderstand und damit die erforderliche Messenergie. Aus Gründen der Energieanpassung bei kleinstem Fehler wird der Wert $R_1 = R_N$ gewählt. Damit ergibt sich doppelter Eingangswiderstand und doppelte erforderliche Messenergie.

Für die Dimensionierung von R_2 und R_K ergeben sich ähnliche Zusammenhänge wie in Abschnitt 4.

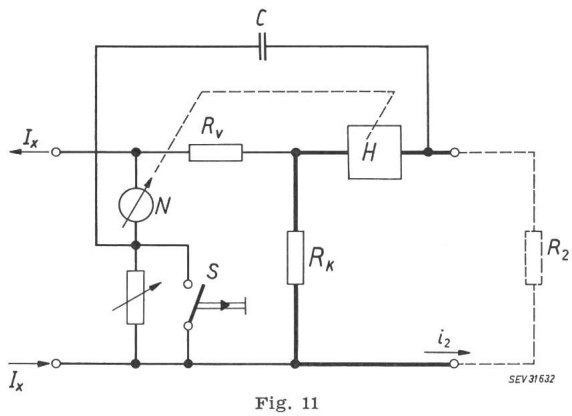

Fig. 11
Mittelwertmesser in Saugschaltung
R_1 Potentiometer für einstellbare Zeitkonstante; S Starttaste
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 1 und 10

Eine einstellbare Zeitkonstante lässt sich hier einfach durchführen, wenn der Widerstand R_1 als Potentiometer ausgebildet wird (damit entfällt hier eine Beschränkung für den Aussenwiderstand, von dem nur gefordert wird, dass er auf den Höchstwert ergänzt wird). Eine «Starttaste» schliesst den Widerstand R_1 kurz und ermöglicht eine kurzzeitige starke Verringerung der Einstellzeit.

Durch den «Leckstrom» des Kondensators entsteht ein Fehler gleicher Grösse wie beim Spannungsverstärker, d. h. Gl. (14) gilt auch hier. Die entsprechende Gleichung für die Saugschaltung lautet damit vollständig:

$$I_x = \frac{R_K}{R_K + R_V} i_2 [1 \pm E_N \pm E_C] \cdot [1 + p\tau] \qquad (24)$$

8. Mittelwertbildung bei beliebigen Messwertumformern

Eine Variante des Mittelwertmessers verdient besonderes Interesse. Es gibt ein ganzes Programm von Messwertumformern, die Leistungen, Wechselströme, Wechselspannungen, Frequenzen usw. in einen Messgleichstrom umformen (meist 0...5 mA). Die in diesem Aufsatz beschriebene Mittelwertbildung lässt sich bei diesen Messwertumformern meist nicht durchführen. Schwanken die Messgrössen stark, so kann diesen Messwertumformern jedoch ein mittelwertbildender Kompensationsverstärker in Saugschaltung nachgeschaltet werden, der dann seinerseits am Ausgang den Mittelwert liefert.

Benützt wird hier die Schaltung nach Abschnitt 7 mit einem Strommessbereich von 5 mA. Der Ausgang des primären Messwertumformers wird dabei noch nicht einmal gestört, da der Eingangswiderstand des nachgeschalteten Mittelwertbildners unter 0,2 Ω liegt. Unabhängig vom nachgeschalteten Mittelwertbildner ist also eine Fernübertragung oder Direktregistrierung des Ausganges vom primären Messwertumformer möglich. Fig. 12 zeigt die Prinzipschaltung. Als Verbraucher können Schreiber, Regler, Rechenglieder u. a. angeschlossen werden.

9. Ausgeführte Beispiele

Um einen Begriff für die Grössenordnung zu bekommen, werden einige serienmässige Daten angegeben. Mit entsprechend stark steigendem Aufwand lassen sich für Einzelfälle Verbesserungen erzielen. (Zugrundegelegt für die folgenden Werte ist die Typenreihe Autocomp AC5 der Camille Bauer AG, Basel.)

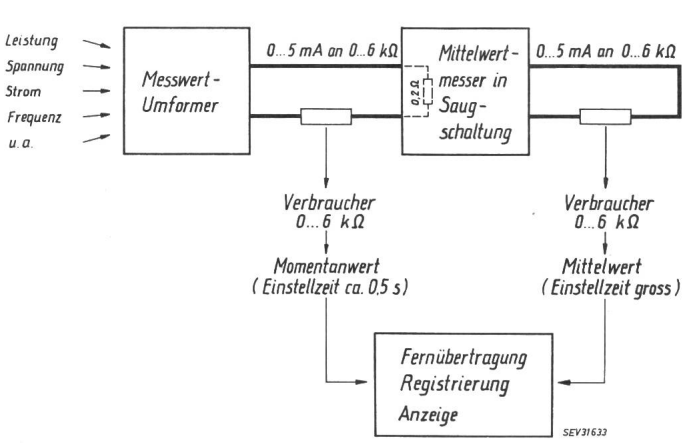

Fig. 12
Messwertumformer mit nachgeschaltetem Mittelwertbildner

a) Messbereich 10 mV; Genauigkeit 0,5%; Aussenwiderstand 0...6 kΩ; Ausgangsstrom 0...5 mA; gewünschte Zeitkonstante 20 s.

Schaltung nach Fig. 6; Der Aussenwiderstand wird auf 6 kΩ ergänzt; der gesamte Quellwiderstand $R_q + R_{q1}$ soll 17 Ω betragen; mit $C = 400$ µF wird eine Zeitkonstante von 20 s erreicht: Kondensatoren mit einer Zeitkonstante $\tau_C = 20000$ s ergeben einen zusätzlichen Fehler unter 0,1%. Der effektive Eingangswiderstand beträgt 7 kΩ; die für Vollausschlag erforderliche Messleistung ca. $1{,}5 \cdot 10^{-8}$ W.

b) Messbereich 50 mV; Genauigkeit 0,5%; Aussenwiderstand 0...4 kΩ; Ausgangsstrom 0...5 mA; einstellbare Zeitkonstante 0,5...50 s.

Schaltung nach Fig. 9; R_{21} als 2-kΩ-Potentiometer mit linearer Charakteristik; Kapazität 580 µF mit einer Zeitkonstante von $\tau_C = 50000$ s.

c) Die Leistungsabgabe eines Dreiphasen-Netzes bei ungleichförmiger Belastung soll registriert und gleichzeitig der Mittelwert mitgeschrieben werden; geforderte Genauigkeit der Mittelwerte 0,5%; geforderte Zeitkonstante 1...20 s einstellbar.

Schaltung nach Fig. 12; Messwertumformer (primär) mit Genauigkeit 0,2%; Ausgang 0...5 mA an 0...6 kΩ; nachgeschaltet Mittelwertbildner mit Messbereich 5 mA Genauigkeit 0,3%; Ausgang 0...5 mA an 0...6 kΩ; Kapazitätsaufwand 170 µF mit einer Zeitkonstante von 50000 s.

Zunächst lässt sich der Umfang der Anwendungen des mittelwertbildenden Kompensationsverstärkers noch nicht voll übersehen, so dass zumindest teilweise eine auf die Anwendung zugeschnittene Dimensionierung notwendig wird. Mit der Kenntnis der technischen Grenzen und der Gesetzmässigkeiten, die hier umrissen wurden, ist die Dimensionierung und die Bestimmung der Realisierbarkeitsgrenzen einfach möglich.

Literatur

[1] *Merz, L.:* Lichtelektrische Gleichstrom-Verstärker. ATM Lfg. 78(Dezember 1937), Bl. Z 64-3, S. T 167...T 168.

[2] *Kalusche, H.:* Verstärker für die Fernmesstechnik. ETZ-A 79(1958)2, S. 52...56.

[3] *Merz, L.:* Theorie der selbstkompensierenden Gleichstromverstärker mit direkt wirkender mechanischer Steuerung. Arch. Elektrotechn. 31(1937)1, S. 1...23.

[4] *Blamberg, E.:* Ein einfacher Gleichstrom-Messverstärker für Betriebsmessungen. Bull. SEV 41(1950)17, S. 634...638.

[5] *Blamberg, E.:* Selbstkompensierende Spezial-Messgeräte. Bull. SEV 46(1955)16, S. 721...725.

[6] *Volck, P.:* Selbstabgleichende elektrische Kompensatoren in der Betriebsmesstechnik. Z. Instrum.-Kde. 66(1958)2, S. 36...37.

[7] *Nelting, H.:* Elektronische Kompensatoren — ein wertvoller Baustein für die Automatisierung. Automatik 3(1958)4, S. 77...82.

[8] *Raufenbarth, F.:* Gleichstrom-Kompensationsverstärker nach dem Lindeck-Rothe-Kompensationsverfahren. Elektrowelt 1(1956)7, S. 166...168.

Adresse des Autors:

S. Götze, Diplomphysiker, Camille Bauer Messinstrumente AG, Wohlen (AG).

Commission internationale de réglementation en vue de l'approbation de l'Equipement Electrique (CEE)

Tagung in Helsinki vom 22. bis 31. Oktober 1962

Die CEE trat vom 22. bis 31. Oktober 1962 in Helsinki zur Herbsttagung zusammen. Mit Ausnahme Griechenlands waren alle anderen 15 Mitgliedstaaten mit insgesamt etwa 120 Delegierten und Experten, wovon 5 aus der Schweiz, vertreten. Es wurden Sitzungen der technischen Komitees für Motorapparate, Wärmeapparate, Installationsrohre und Zubehöre, des Komitees für allgemeine Anforderungen sowie der Organisation für gegenseitige Anerkennung von elektrotechnischen Erzeugnissen abgehalten. Den Schluss der Tagung bildete die Plenarversammlung.

Das technische Komitee für *Motorapparate* führte vom 22. bis 26. Oktober unter dem Vorsitz seines Präsidenten, P. Poppe (Norwegen), fünf halbtägige Sitzungen durch. Diese galten im wesentlichen der Fortsetzung der Beratung zur Revision der CEE-Publikation 10, Anforderungen an Apparate mit elektromotorischem Antrieb. Es wurde auf der ganzen Linie eine Übereinstimmung mit den neuesten CEE-Publikationen angestrebt und eine grosse Zahl Änderungen und Ergänzungen gutgeheissen. Eine Aussprache über die Zulässigkeit von Mikro-Schaltern führte zur Festlegung, dass an Apparaten mit Anschluss-Schnüren im allgemeinen Mikro-Schalter allein zulässig sind. Bei ortsfesten Apparaten, die dauernd an das Netz angeschlossen sind, muss eine allfällig vorhandene Abschaltmöglichkeit allpolig sein. Sie kann entweder auf dem Apparat selbst angeordnet sein oder durch eine mitgelieferte Instruktionsvorschrift installationsseitig verlangt werden. Alle hinter diesen allpoligen Schalteinrichtungen (Schalter mit normaler Kontaktöffnung, Leitungsschutzschalter, Schütze usw.) verwendeten Schaltmöglichkeiten dürfen der Mikro-Schalterbauart entsprechen. Das Sekretariat wurde beauftragt, einen bereinigten Textentwurf des ersten Teiles mit den allgemeinen Bestimmungen für eine zweite Lesung vorzubereiten. Ferner wurden auf der Basis eines Vorschlages der Arbeitsgruppe, welche sich mit den Definitionen für die Klasseneinteilung des elektrischen Materials hinsichtlich des Schutzes gegen elektrischen Schlag befasst, einige grundlegende Begriffe diskutiert und klargestellt. Weitere Begriffe sollen an der nächsten Sitzung behandelt werden und später in einer vollständigen Sammlung als CEE-Empfehlung erscheinen. Ebenfalls an der nächsten Sitzung, welche für die Frühjahrstagung 1963 der CEE vorgesehen wurde, soll die Revision des zweiten Teiles mit den Sonderbestimmungen für Apparate mit elektromotorischem Antrieb in Angriff genommen werden.

Unter dem Vorsitz seines Präsidenten, Prof. G. de Zoeten (Niederlande), setzte das technische Komitee für *Wärmeapparate* am 24. und 25. Oktober an 3 halbtägigen Sitzungen die Beratungen zur Revision der CEE-Publikation 11, Anforderungen an elektrische Koch- und Heizapparate, fort. Durch rasche Behandlung der zahlreichen Eingaben aller teilnehmenden Länder war es möglich, den ersten Teil über allgemeine Bestimmungen zu beenden. Einzelne Beschlüsse, die vorgängig an den Sitzungen für Motorapparate gefasst worden waren, konnten ohne weitere Diskussion auch für die Wärmeapparate übernommen werden. Neben etlichen Änderungen wurden auch zusätzliche Anforderungen und Prüfbestimmungen aufgenommen. Die Bestimmungen für Temperaturregler und Temperaturbegrenzer sollen später revidiert werden, wenn der Entwurf des neugebildeten technischen Komitees für Thermostate vorliegt. Bis dahin soll dieser Abschnitt als separater Anhang der Publikation beigefügt werden. Einige Kriech- und Luftstrecken wurden etwas reduziert, speziell für den Fall, wo sie gegen Verschmutzen geschützt sind. Neu festgelegt wurde auch die Prüfspannung von 175 V für die Bestimmung der Kriechwegfestigkeit der Isolierstoffe. Dem Antrag der Schweiz, in die Publikation auch Bestimmungen über den Radiostörschutz aufzunehmen, wurde mehrheitlich zugestimmt. Es wurde dabei vorgesehen, auf die Empfehlungen der CISPR hinzuweisen. Das Sekretariat wird für eine zweite Lesung so bald als möglich einen neuen, bereinigten Textentwurf des ersten Teiles vorlegen. Die Aufnahme von zusätzlichen Bestimmungen für Wärmeapparate der Klasse II wurde beschlossen und die Ausarbeitung des Vorentwurfes einer Arbeitsgruppe übertragen. Die besondere Berücksichtigung der Einbauwärmeapparate für brennbare Umgebung konnte noch nicht diskutiert werden. Dieses Problem wird zusammen mit der Besprechung des zweiten Teiles, Sonderbestimmungen, auf die Traktandenliste der nächsten Sitzung genommen, welche anlässlich der Frühjahrstagung 1963 der CEE stattfinden wird.

Die *Organisation für gegenseitige Anerkennung von elektrotechnischen Erzeugnissen* (Certification Body) hielt am 25. Oktober unter dem Vorsitz ihres Präsidenten, Dr. F. Lauster (Deutschland), eine Sitzung ab. Sie besprach die nationalen Abweichungen von den entsprechenden CEE-Anforderungen jener Gegenstände, die seinerzeit auf die Vorzugsliste des Anerkennungsverfahrens gesetzt wurden. Es betrifft dies Sicherungen vom Typ D, Fehlerspannungsschutzschalter, Leitungsschutzschalter vom Typ L und H, tragbare Elektrowerkzeuge, Stecker sowie gummi- und PVC-