

Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 41 (1950)
Heft: 17

Artikel: Ein einfacher Gleichstrom-Messverstärker für Betriebsmessungen
Autor: Blamberg, E.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1058930>

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: 19.04.2026

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

genommen wird und mit \ddot{u} bezeichnet werde, dann ist:

$$I_2 = (I - I_1) \ddot{u} \quad (2)$$

Setzt man diesen Wert in Gleichung 1 ein, so wird:

$$P_{vt} = 3 [I_1^2 (R_1 + R_4) + (I - I_1)^2 \ddot{u}^2 (R_2 + R_3')] \quad (3)$$

Differenziert man diese Gleichung in bekannter Weise nach I_1 , so findet man für das Minimum der Verluste den Ausdruck

$$I_1 = \frac{I \ddot{u}^2 (R_2 + R_3')}{R_1 + R_4 + \ddot{u}^2 (R_2 + R_3')} \quad (4)$$

Die auf die gleiche Spannung bezogenen Widerstände der zwei Leitungspfade betragen nach Fig. 1

$$R_1 = 6 \Omega; \quad R_4 = 3 \Omega; \quad R_2 = 12 \Omega; \quad R_3' = 0,66 \Omega$$

Damit ergibt sich:

$$I_1 = \frac{1800 \cdot 12,66}{6 + 3 + 9(12 + 0,66)} = \underline{186 \text{ A}}$$

Das heisst nun aber, dass über die 150-kV-Leitung 93 % der ganzen Leistung übertragen werden müssen, wenn sich die minimalen Verluste einstellen sollen.

Die parallel geschaltete 50-kV-Leitung ist vom Gesichtspunkt der Verluste aus gesehen praktisch fast bedeutungslos, denn sie muss nur 7 % des Stromes transportieren.

Da die Stromverteilung auf die beiden Leitungszweige ausser von den Leitungskonstanten auch noch vom Phasenwinkel des übertragenen Stromes und überdies von den Einstellungen der Stufenschalter abhängt — dem System also aufgezwungen wird —, so ist es ein reiner Zufall, wenn sich gerade die minimalen Verluste ergeben. Aus betrieblichen Gründen kann andererseits das günstigste Verhältnis nicht immer oder sogar nur selten einreguliert werden. Wie die Kurve Fig. 2 zeigt, können aber die zusätzlichen Verluste so erheblich sein, dass es im Hinblick auf diese am besten ist, wenn die 50-kV-Leitung geöffnet wird.

Mit Rücksicht auf die Sicherheit der Energielieferung (Verminderung von Unterbrüchen) sollte

jedoch die 50-kV-Leitung eingeschaltet bleiben, wobei diese Sicherheitsverbesserung verhältnismässig teuer bezahlt werden muss.

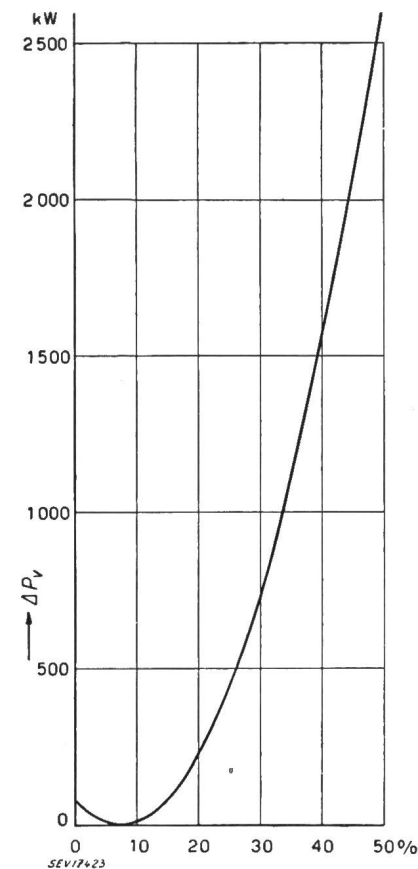


Fig. 2
Zusätzliche Verluste ΔP_v in Funktion der Beteiligung der 50-kV-Leitung am Energietransport
Total von A nach B übertragene Leistung 52 MVA
Abszisse: Prozentualer Anteil der 50-kV-Leitung am Energietransport

In Zeiten von Energieknappheit und relativ kleiner Störanfälligkeit wird man daher solche Leitungen eher ausschalten und in gewitterreichen Sommern eher einschalten.

Die hier am Beispiel einer 150-kV- und einer 50-kV-Leitung diskutierten Resultate gelten natürlich sinngemäss auch für andere Parallel-Leitungen verschiedener Spannung.

Adresse des Autors:

F. Schär, Elektrotechniker, Schöngrundstrasse 63, Olten (SO).

Ein einfacher Gleichstrom-Messverstärker für Betriebsmessungen

Von E. Blamberg, Basel

621.314.12.08

Es wird ein einfacher, praktisch wartungsfreier, sehr genauer Gleichstrom-Messverstärker beschrieben, der als Betriebsgerät gedacht ist und nach dem Prinzip der automatischen Kompensation nach Lindeck-Rothe mit Nullmotor, Photozelle und Verstärkerröhre arbeitet. Die Fehlermöglichkeiten werden diskutiert.

Description d'un amplificateur de mesure à courant continu d'une grande simplicité, n'exigeant pratiquement aucun entretien et néanmoins très précis. Cet appareil destiné à l'exploitation fonctionne d'après le principe de la compensation automatique selon Lindeck-Rothe, avec moteur de compensation, cellule photoélectrique et tube amplificateur. Discussion des sources d'erreurs.

1. Verstärker mit Mitteln der Elektronik

Verstärker für kleine Wechselspannungen sind mit den normalen Mitteln der Elektronik, z. B. Übertragern, Verstärkerröhren usw., verhältnismässig leicht zu bauen, Verstärker für kleine Gleichspannungen erfordern dagegen viel mehr Aufwand. Die Gleichspannung muss erst in eine

proportionale Wechselspannung umgeformt werden. Das ist schon nicht ganz einfach. Dazu kommt die Schwierigkeit, den Nullpunkt konstant zu halten und die Anordnung so zu treffen, dass sie unabhängig von Änderungen der Röhrendaten richtig arbeitet. Derartige Gleichstromverstärker werden kompliziert und teuer, und einzelne Bauelemente,

z. B. mechanische Zerhacker, haben nur eine begrenzte Lebensdauer.

2. Verstärker auf dem Prinzip des Lindeck-Rothe-Kompensators

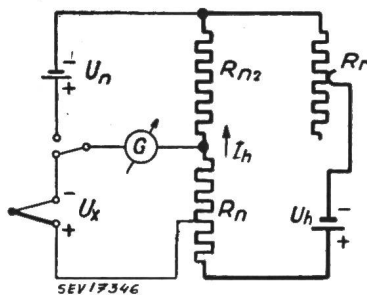
Wenn es möglich ist, der Spannungsquelle eine gewisse kleine Leistung der Grössenordnung 10^{-8} W oder mehr zu entnehmen, dann kann man mit Vorteil eine Anordnung verwenden, die nach dem Prinzip des automatischen Lindeck-Rothe-Kompensators arbeitet und die sich mit viel weniger Aufwand als ein rein elektronischer Verstärker bei wesentlich höherer Präzision und Genauigkeit aufbauen lässt.

3. Kompensationsmethoden und ihre Vorteile

In der Praxis finden zwei Arten von Kompensationsapparaten Verwendung, die nach zwei etwas verschiedenen Methoden arbeiten. Grundsätzlich stimmen beide Methoden darin überein, dass man den Spannungsabfall, den ein einer Hilfsstromquelle entnommener Strom I an einem Kompensationswiderstand R_n hervorruft, mit der zu messenden EMK oder Spannung U_x über ein Nullgalvanometer vergleicht. Beide Methoden haben also den grossen Vorteil, dass im kompensierten Zustand der Meßspannungsquelle kein Strom entnommen wird, dass man also exakt die EMK misst und unabhängig von Leitungswiderständen und deren Änderung mit der Temperatur ist.

4. Poggendorf-Kompensator

Nach Poggendorf benützt man einen konstanten Hilfsstrom I , der einen veränderlichen Kompensationswiderstand R_n durchfließt. Dabei wird der Hilfsstrom in der Weise eingestellt, dass man ihn durch einen zweiten Kompensationswiderstand fließen lässt und den an dessen Klemmen entstehenden Spannungsabfall mit der Spannung eines Normal-Elementes vergleicht. Nach dieser Methode arbeiten alle «Präzisions-Kompensatoren» für Laboratoriumsmessungen höchster Genauigkeit (Fig. 1).



Kompensator nach Poggendorf

U_x Meßspannung, U_n Normalelement, U_h Hilfsspannungsquelle, I_h Hilfsstrom, R_n Kompensationswiderstand, R_{n2} Kompensationswiderstand für das Normalelement, R_r Regulierwiderstand, G Nullgalvanometer

5. Lindeck-Rothe-Kompensator

Nach Lindeck-Rothe dagegen benützt man einen konstanten Kompensationswiderstand R_n und macht den Hilfsstrom I veränderlich. Diesen misst man mit einem sehr genauen Ampèremeter (Fig. 2).

Die Lindeck-Rothe-Schaltung ist also wesentlich einfacher als die Poggendorfsche und braucht

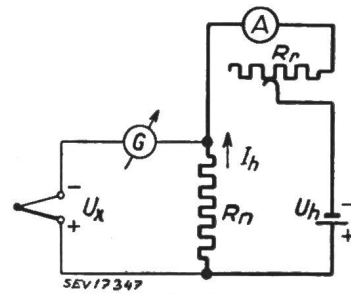


Fig. 2

Kompensator nach Lindeck-Rothe

U_x Meßspannung, U_h Hilfsspannung, I_h Hilfsstrom, R_n Kompensationswiderstand, R_r Regulierwiderstand, A Ampèremeter, G Nullgalvanometer

kein Normalelement. Auch bei der Lindeck-Rothe-Schaltung gilt natürlich die Beziehung $U_x = IR_n$ oder, da $R_n = \text{konstant}$, $U_x = \text{konstant} \cdot I$. Zwischen der zu messenden Spannung und dem Kompensationsstrom besteht also eine einfache lineare Beziehung. Man kann diese auch in der Form $I = kU$ schreiben und k den Verstärkungsfaktor der Anordnung nennen.

Die bei der Lindeck-Rothe-Schaltung erzielbare Genauigkeit hängt in erster Linie von der Genauigkeit des Ampèremeters ab. Es ist aber gar nicht schwer, ein solches Ampèremeter nach Klasse 0,2 oder, wenn es gewünscht wird, nur mit den halben Fehlern der Klasse 0,2 zu bauen. Diese Genauigkeit genügt in fast allen Fällen, die in der Praxis vorkommen, und der Lindeck-Rothe-Kompensator ist der «technische» Kompensator. Er ist ebenso genau wie die üblichen «technischen» Schleifdraht-Kompensatoren.

6. Die «Automatik» beim Lindeck-Rothe-Kompensator

Wenn man mit dem Lindeck-Rothe-Kompensator misst, ist die einzige Betätigung, die man auszuführen hat, das Verändern des Regulierwiderstandes für den Hilfsstrom. Wenn dies automatisch

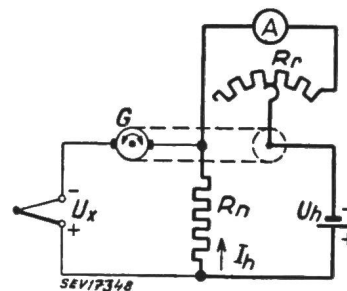


Fig. 3

Automatischer Lindeck-Rothe-Kompensator mit Nullmotor

U_x Meßspannung, U_h Hilfsspannung, I_h Hilfsstrom, R_n Kompensationswiderstand, G Nullmotor, R_r Regulierwiderstand, A Ampèremeter

erfolgen soll, so könnte man es grundsätzlich auf folgende Weise tun: Man ersetzt das Nullgalvanometer durch einen Gleichstrommotor, den man unmittelbar die Schleifbürste des Regulierwiderstandes verstellen lässt (Fig. 3).

Solange eine Spannungsdifferenz zwischen U_x und $I R_n$ besteht, dreht sich der Motor in der einen oder anderen Richtung. Dabei verändert er den Regulierwiderstand und damit I solange, bis Gleichheit der Potentiale besteht und er selbst infolge Stromlosigkeit stehen bleibt. Es ist aber ohne weiteres verständlich, dass man keine Motoren bauen kann, die bei einer Leistungsaufnahme eines Bruchteils von 10^{-8} W imstande wären, die Reibung der Bürste eines Schleifwiderstandes zu überwinden.

Dagegen ist es nicht schwer, «Motoren» zu bauen, die bei noch kleinerer Leistungsaufnahme nur ihre eigene Lagerreibung zu überwinden haben. Das tut nämlich jedes ganz normale Schalttafel-Messgerät mit Drehspul-Messwerk. Diese Geräte brauchen für Endausschlag etwa 10^{-4} W. Rechnet man einmal ungünstig, dass der Reibungsfehler allein 0,5% betragen soll, so entspricht das $0,25 \cdot 10^{-4}$ der bei Endausschlag aufgenommenen Leistung, also grössenordnungsmässig 10^{-9} W. Das gilt für Geräte mit waagrechter Achse des beweglichen Organs. Bei senkrechter Anordnung dieser Achse kann man mit noch wesentlich geringerer Leistung die Reibung überwinden.

Führt man ein solches Drehspulmesswerk «richtkraftlos» aus, das heisst, versieht man es mit den schwächst möglichen Zuführungsbändchen zur Drehspule und gibt man ihm weiter einen Spiegel oder eine Blende, mit deren Hilfe man einen Lichtstrahl aus einer Glühlampe eine Photozelle mehr oder weniger anleuchten lässt, so braucht man die Photozelle nur noch mit dem Gitter einer einfachen Dreielektroden-Verstärkerröhre zu verbinden, um auf diese Weise einen durch Gittersteuerung «veränderlichen Widerstand» zu haben, dessen Betätigung keine zusätzliche Reibungsarbeit erfordert. Mit dieser Anordnung kommt man zu der Schaltung von Fig. 4.

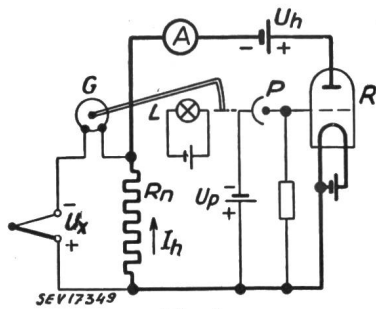


Fig. 4

Automatischer Lindeck-Rothe-Kompensator mit Photozellen-Steuerung

U_x Meßspannung, U_h Hilfsspannung, I_h Hilfsstrom, R_n Kompensationswiderstand, A Ampèremeter, G richtkraftloses Nullgalvanometer, L Glühlampe, P Photozelle, U_p Spannung für Photozelle, R 3-Elektrodenröhre

7. Der Netzanschluss

Da sowohl die Photozelle, als auch die Röhre die Eigenschaft haben, den Wechselstrom nur in einer Richtung durchzulassen, ist es ohne Zuhilfenahme eines weiteren Gleichrichters möglich, bei der Schaltung nach Fig. 4 die Speisung statt aus einer Batterie unmittelbar aus dem Lichtnetz unter

Zwischenschaltung eines Kleintransformators vorzunehmen. Diese Anordnung zeigt Fig. 5.

Da man bei dieser Schaltung einen pulsierenden Gleichstrom als Kompensationsstrom erhält,

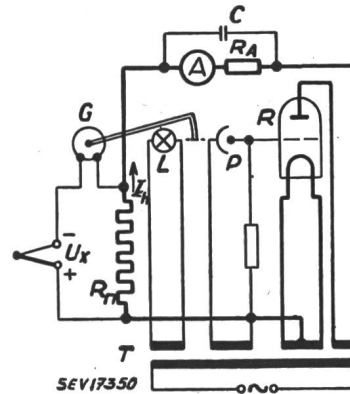


Fig. 5

Automatischer Lindeck-Rothe-Kompensator für Netzanschluss R_A Anodenwiderstand, C Glättungskondensator, T Netzanschluss-Transformator (übrige Bezeichnungen wie Fig. 4)

empfiehlt es sich, dem Ampèremeter einen Kondensator parallel zu schalten, um Zeigervibrationen zu vermeiden.

8. Konstruktiver Aufbau

Der konstruktive Aufbau des als Betriebsgerät gedachten Messverstärkers ist aus Fig. 6 ersichtlich. Es wurde Wert darauf gelegt, ihn so einfach und

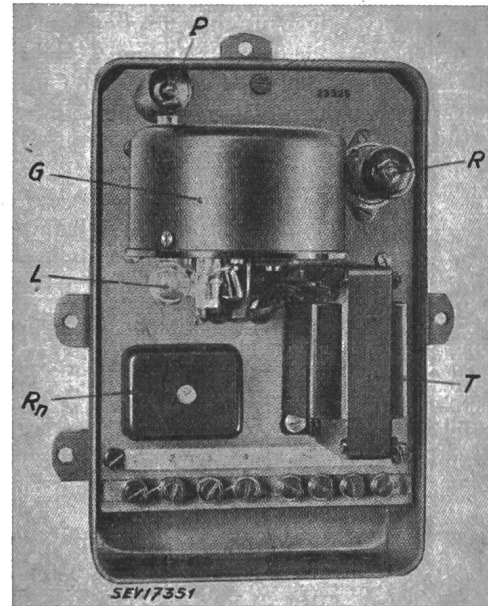


Fig. 6

Gleichstrom-Messverstärker, konstruktiver Aufbau (Deckel abgenommen)

T Netzanschluss-Transformator, R_n Kompensationswiderstand, L Glühlampe, P Photozelle, R Röhre, G richtkraftloses Nullgalvanometer

billig wie nur möglich zu gestalten, um eine möglichst breite Anwendungsmöglichkeit des interessanten und nützlichen Gerätes zu ermöglichen. Als richtkraftloses Nullgalvanometer wurde ein spitzen-

gelagertes Drehspulmesswerk mit ganz dünnen Stromzuführungsbändern verwendet. Der Netzanschlusstransformator T liefert alle benötigten Spannungen für die Röhre R , für die Photozelle P und die Glühlampe L . Glühlampe, Photozelle und Röhre, sowie das Nullgalvanometer und der Kompensationswiderstand sind auswechselbar angeordnet. Der Zeiger des Nullgalvanometers trägt eine kleine Scheibe, welche den Lichtstrom zwischen Glühlampe und Photozelle mehr oder weniger abdeckt.

9. Einflussgrößen und Fehlerquellen

a) *Schwankungen der Netzspannung und Frequenz.* Unter der Voraussetzung, dass das Nullgalvanometer (Nullmotor) völlig richtkraftlos sei, ist leicht einzusehen, dass bei einer plötzlichen Änderung der Netzspannung zwar die Kompensation für einen Augenblick gestört wird, dass aber der Nullmotor sofort zu arbeiten beginnt und den «Regulierwiderstand», bestehend aus Photozelle und Röhre, solange verändert, bis die Kompensation wieder hergestellt ist. Eine plötzliche Änderung der Netzspannung um 10% äussert sich praktisch in einem ganz kleinen, kaum merkbaren Zucken des Ampèremeterzeigers, das noch dadurch gemildert wird, dass die Trägheit dieses Messwerks wesentlich grösser ist als die des Nullmotors, so dass das Ampèremeter auf diese kleinen Zuckungen kaum reagiert. Man kann also sagen, dass die Angaben des Verstärkers praktisch unabhängig von Spannungsschwankungen des Netzes sind.

Ändert sich die Frequenz, so ändert sich an dem gleichgerichteten Strom praktisch überhaupt nichts. Der Verstärker arbeitet unabhängig von Frequenzschwankungen des Netzes.

b) *Widerstandsänderungen im Messkreis.* Da der Messkreis bei Kompensation stromlos ist, sind Änderungen des Widerstandes in ihm, beispielsweise infolge Temperaturänderung, ohne Einfluss auf das Arbeiten des Verstärkers. Nur darf der Widerstand im Messkreis nicht so gross werden, dass bei unabhäglichem Zustand der Nullmotor nicht mehr genügend Strom erhält, um die Reibung zu überwinden, das heisst also die unter Abschnitt 2 geforderten 10^{-8} W müssen unter allen Umständen noch zur Verfügung stehen.

c) *Alterung und Austausch von Röhre, Photozelle und Glühlampe.* Ändert die Röhre ihren inneren Widerstand, so ist dies für das richtige Arbeiten des Verstärkers so lange ohne Belang, als sich noch der für den vorliegenden Messbereich maximal nötige Strom I einregeln lässt. Nimmt man eine Röhre, die in neuem Zustand 5 mA hergibt, und arbeitet man aber nur mit einem Kompensations-Hilfsstrom von 3 mA, so hat man eine genügende Reserve, und es wird lange dauern, bis die Emission der Röhre so weit gesunken ist, dass sie 3 mA nicht mehr hergibt. Erfahrungsgemäss kann man mit einer Brenndauer der Röhre bei Dauerbetrieb von 1...2 Jahren rechnen.

Tauscht man die Röhre gegen eine neue aus, so hat dies wiederum auf das Arbeiten des Verstärkers

keinen Einfluss; denn man ersetzt ja nur einen Regulierwiderstand durch einen anderen. Die Einregulierung auf Kompensation wird ja immer wieder von dem Nullmotor besorgt.

Ändert sich die Photozelle oder wird sie ausgetauscht, so gelten genau die gleichen Überlegungen, die eben für die Röhre durchgeführt wurden. Auch hier gibt es keinen Einfluss auf das richtige Arbeiten des Verstärkers. Ebenfalls die gleichen Betrachtungen gelten für die Alterung und den Austausch der Glühlampe, die den Lichtstrahl für die Photozelle liefert.

d) *Fehler des Kompensationswiderstandes R_n .* Aus der Beziehung $U_x = IR_n$ geht klar hervor, dass jede Änderung von R_n in ihrer vollen Grösse in das Messergebnis eingeht. R_n muss also nach den Regeln eines Präzisionswiderstandes aus gut gealtertem Manganin mit wohl definierten Spannungsabgriffen ausgeführt werden, wenn man höchste Messgenauigkeit anstrebt. Da es aber nicht schwer ist, Widerstände mit einer Genauigkeit von 0,1% herzustellen, bestehen bei diesem Bauelement keinerlei praktische Schwierigkeiten.

e) *Fehler beim Nullmotor.* Bisher wurde der Einfachheit halber angenommen, der Nullmotor sei völlig richtkraftlos. Nun haben aber auch die dünnsten Stromzuführungsbändchen eine gewisse, wenn auch kleine Richtkraft. Sie wirken wie sehr schwache Federn. Nehmen wir wieder zur Vereinfachung der Betrachtung an, diese Störrichtkraft habe ihren Nullpunkt bei der Stellung des Nullmotors, die bei normaler Betriebsspannung, neuer Glühlampe, Photozelle und Röhre der Meßspannung null und damit dem Kompensations-Hilfsstrom null entspricht. Legt man jetzt eine Meßspannung an, so setzt sich der Nullmotor in Bewegung. Er bleibt aber nicht erst stehen, wenn sein Strom Null geworden ist, sondern er wird durch die mit seinem Ausschlag immer stärker werdende Störrichtkraft schon vorher angehalten, wenn noch ein kleiner Reststrom fliesst. Dies hat zur Folge, dass beim Stillstand des Motors nun nicht mehr die Gleichung $U_x = IR_n$ erfüllt ist, sondern eine Gleichung von der Form $U_x = I(1-\delta)R_n$. Diesen Fehler δ kann man nun für die «normalen» Betriebsbedingungen eineichen, oder man kann die Anzeige des Ampèremeters dadurch korrigieren, dass man R_n abändert in $R_n(1+\delta)$. Aber bei allen Änderungen der «normalen» Bedingungen, also Änderung der Spannung, Änderung der Glühlampe, Photozelle oder Röhre ändert sich ja auch die Stellung des Nullmotors bei Kompensation. Mit der Änderung der Stellung ändert sich aber auch die Störrichtkraft und damit der kleine nicht kompensierte Reststrom. Auf diese Weise entsteht ein kleiner Fehler, der sich nicht mehr eineichen lässt.

Dieser Fehler bleibt um so kleiner, je kleiner das Störmoment im Verhältnis zum Betriebs-Drehmoment ist. Unter Betriebs-Drehmoment ist dasjenige Moment zu verstehen, das auftritt, wenn der Nullmotor mechanisch in einer bestimmten Lage festgehalten und die Messgrösse verändert wird. Dieses Betriebs-Drehmoment des Nullmotors hängt

