

**Zeitschrift:** Bulletin de l'Association suisse des électriciens  
**Herausgeber:** Association suisse des électriciens  
**Band:** 30 (1939)  
**Heft:** 9

**Artikel:** Ein Verfahren zur Messung der Lichtbogen­spannung von Mutatoren  
**Autor:** Lamm, A. Uno  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1058352>

### **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:** 13.01.2026

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

Depuis sa mise en service, le 23 décembre 1938, la sous-station Lüschtental a fonctionné chaque jour à pleine satisfaction.

En résumé, l'on peut affirmer à juste titre que cette première réalisation du couplage élastique de deux réseaux à courant triphasé de fréquences dif-

férentes à l'aide d'un seul mutateur satisfait à toutes les conditions posées lorsque cette installation fut projetée. Elle ouvre des voies nouvelles à la solution du problème du couplage élastique des réseaux à courant triphasé, tout en contribuant à le simplifier.

## Ein Verfahren zur Messung der Lichtbogenspannung von Mutatoren.

Von A. Uno Lamm, Ludvika (Schweden) <sup>1)</sup>.

621.317.32 : 621.314.65

*Es wird eine erweiterte Wattmetermethode zur Messung des Lichtbogenabfalles beschrieben. Es werden die Einzelteile der Meßschaltung zur Erreichung einer bestimmten Genauigkeit berechnet.*

*L'auteur décrit une méthode wattmétrique perfectionnée pour la mesure de la chute de tension dans l'arc, et détermine par le calcul les éléments du montage, de façon à obtenir une précision de mesure donnée.*

Bei der Bestimmung des Wirkungsgrades von Mutatoren nach der direkten Messmethode erhält man bekanntlich Ergebnisse, die auch bei Anwendung der grössten Vorsichtsmassregeln recht unbefriedigend sind. Man sucht deshalb immer mehr, dieses Verfahren zu verlassen und bestimmt die Verluste der Mutatoranlage für ihre einzelnen Teile gesondert. Für die Mutatortransformatoren gibt es dabei einfache und leicht durchzuführende Verfahren, nicht aber für die Mutatoren selbst. Unter der grossen Zahl von Vorschlägen zur Messung der Lichtbogenverluste findet sich kaum einer, der für Abnahmemessungen wirklich geeignet wäre. Die üblichste Methode ist die oszillographische, trotz der erforderlichen teuren und unhandlichen Apparatur; sie gibt aber nicht einmal theoretisch die richtigen Ergebnisse, wenn man nicht ausserdem noch den Anodenstrom aufnimmt und die Produktkurve der beiden planimetriert. Einige Vorschläge mit Trockengleichrichter und Voltmeter sind zwar bequem durchzuführen, geben aber völlig falsche Ergebnisse, sobald Ueberlappung und Zündspannungsspitzen vorkommen. Am einfachsten und richtigsten erhält man den Lichtbogenabfall mit der Wattmetermethode. Dabei liegt die Stromspule in der Anodenleitung, die Spannungsspule zwischen Anode und Kathode. So misst das Wattmeter direkt die Lichtbogenverluste; dividiert man diesen Wert durch den mittleren Anodenstrom, so erhält man den richtigen Wert für den Lichtbogenabfall.

Die allgemeine Verwendung dieser Methode stösst aber auf das Hindernis, dass es gute Wattmeter für grosse Ströme nicht gibt. Man versuchte deshalb <sup>2)</sup>, Stromwandler zwischenschalten und vermied die Gleichstrommagnetisierung des Wandlers dadurch, dass man ihm zwei Primärwicklungen gab, die von zwei verschiedenen Anodenströmen in umgekehrter Richtung durchflossen wurden. Die hier behandelte Methode verwendet einen vollkommen normalen Stromwandler und vermeidet seine Gleichstrommagnetisierung durch einen Trockengleichrichter. Dadurch wird das Verhalten der Anordnung durchsichtiger und unabhängig von zufälligen Unsymmetrien in den Anodenströmen. Das Verfahren geht auf einen Vorschlag von W. B. Bat-

ten <sup>3)</sup> zum Oszillographieren von Anodenströmen zurück.

### Beschreibung der Schaltung. <sup>4)</sup>

Fig. 1 zeigt die Schaltung. Das Wattmeter  $P$  ist an einen normalen Stromwandler  $T$  angeschlossen. Das Gleichrichterelement  $M$  auf der Sekundärseite

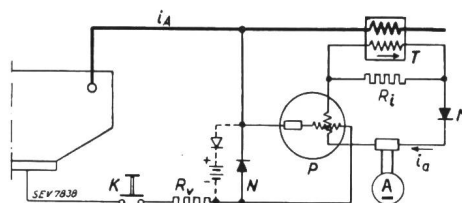


Fig. 1.

Schaltung der Messeinrichtung.

Die mit gestrichelten Linien gezeichnete Anordnung ist nur bei Messung an gittergesteuerten Mutatoren erforderlich.

lässt den Strom nur in der Richtung entgegen dem primären Wandlerstrom fliessen. Dadurch ist der Wandler zu Beginn jedes neuen Arbeitsintervalles fast strom- und feldfrei und die Amperewindungen können sich wie bei einem normalen Wandler bis auf den geringen Magnetisierungsstrom aufheben. Der Strom in der Wattmeterspule ist somit ein getreues Abbild des Anodenstromes in dem gewählten Maßstab.

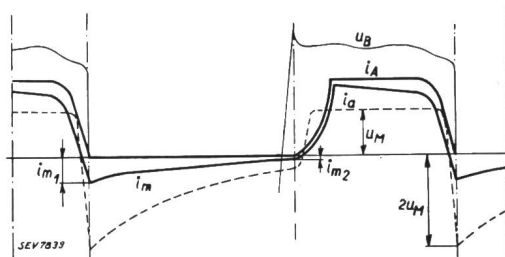


Fig. 2.

Strom- und Spannungsverlauf.

$i_A$  Anodenstrom,  $i_a$  Strom durch die Messinstrumente,  $u_B$  Lichtbogenabfall,  $i_{m1}$  Anfangswert des Rückstromes durch die Sekundärwicklung,  $i_{m2}$  Endwert dieses Rückstromes. Die gestrichelte Linie bezeichnet die Spannung an der Sekundärwicklung des Wandlers mit dem Wert  $u_M$ , während des Arbeitsintervalles.

Fig. 2 zeigt den Stromverlauf für einen Wandler mit der Uebersetzung 1 : 1. Infolge des Magnetisierungsstromes  $i_m$  verläuft der Sekundärstrom  $i_a$  unterhalb des Anodenstromes  $i_A$ .  $i_m$  steigt während

<sup>1)</sup> Zu dieser Arbeit haben meine Mitarbeiter J. Plöen, H. Forsell und K. E. Ungerholm beigetragen.

<sup>2)</sup> Brown-Boveri-Mitteilungen 1931, S. 362.

<sup>3)</sup> Electrical Journal, Oct. 1934, S. 418.

<sup>4)</sup> Siehe auch A. U. Lamm, Teknisk Tidskrift, Elektrotechnik, Febr. 1935.

des ganzen Arbeitsintervalles entsprechend der dauernden Felderhöhung im Kern, die zur Erzeugung der nötigen Sekundärspannung erforderlich ist. Am Ende des Arbeitsintervalles verbleibt somit ein gewisser Magnetisierungsstrom  $i_{m1}$ , der nicht augenblicklich verschwinden kann. Um ihn ohne grosse, für das Gleichrichterelement schädliche Ueberspannungen abklingen zu lassen, ist dem Wandler ein Widerstand  $R_i$  parallel geschaltet. Das

Drehspulinstrument zur Messung des mittleren Anodenstromes liegt mit dem Wattmeter in Serie. Dadurch wird, wie noch gezeigt wird, der Einfluss des Magnetisierungsstromes und des Stromes im Widerstand  $R_i$  eliminiert.

Die hohe negative Sperrspannung wird von der Spannungsspule des Wattmeters durch den Gleichrichter  $N$  ferngehalten.

Tabelle I.

	Schaltung für	120°-Brenndauer		60°-Brenndauer	
		<i>Allgemein:</i> Die Formeln gelten für den höchsten $I$ -Wert. Die Anordnung darf bis $\frac{1}{3}$ dieses Wertes verwendet werden	<i>Besonders empfohlen:</i> Diese Anordnung kann verwendet werden innerhalb des Bereiches $3 > \frac{I}{m \cdot n} > 1$	<i>Allgemein:</i> Die Formeln gelten für den höchsten $I$ -Wert. Die Anordnung darf bis $\frac{1}{3}$ dieses Wertes verwendet werden	<i>Besonders empfohlen:</i> Diese Anordnung kann verwendet werden innerhalb des Bereiches $2,1 > \frac{I}{m \cdot n} > 0,7$
Wattmeter $P$	Normale max. Spannung . . . . .	$U_w$	$U_w \cong 30 \text{ V}$	$U_w$	$U_w \cong 30 \text{ V}$
	Widerstand im Spannungspfad . .	$R_w$	$R_w \cong 1000 \text{ Ohm}$	$R_w$	$R_w \cong 1000 \text{ Ohm}$
	Normaler max. Strom . . . . .	$I_w$	$I_w \cong 5 \text{ A}$	$I_w$	$I_w \cong 5 \text{ A}$
	Es soll ein Wattmeter für kleinen $\cos \varphi$ verwendet werden				
Trocken- gleichrichter $M$	Belastbarkeit (Effektivwert des Stromes . . . . .	$1,7 \frac{I}{m \cdot n}$	5 A	$2,4 \frac{I}{m \cdot n}$	5 A
	Bei einem Gleichstrom in Vorwärtsrichtung von . . . . .	$3 \frac{I}{m \cdot n}$	8,5 A	$6 \frac{I}{m \cdot n}$	12 A
	misst man einen Spannungsabfall, der mit $u_M/2$ bezeichnet wird.		$u_M/2 < 2,2 \text{ V}$		$u_M/2 < 2,2 \text{ V}$
	Wird eine Gleichspannung $2 u_M$ in Sperrichtung aufgedrückt, so darf der Strom nicht überschreiten . . . . .	$0,02 \frac{I}{m \cdot n}$	0,06 A	$0,033 \frac{I}{m \cdot n}$	0,07 A
Stromwandler $T$	Uebersetzungsverhältnis . . . . .	$m \geq 1,7 \frac{I}{I_w \cdot n}$	$m \geq 0,33 \frac{I}{n}$	$m \geq 2,5 \frac{I}{I_w \cdot n}$	$m \geq 0,5 \frac{I}{n}$
	Die Leerlaufcharakteristik soll bei einem Sekundärstrom . . . . .	$i_T \leq 0,1 \frac{I}{m \cdot n}$	$i_T = 0,3 \text{ A}$	$i_T \leq 0,14 \frac{I}{m \cdot n}$	$i_T = 0,3 \text{ A}$
	eine Neigung ( $du_T/di_T$ ) haben von $>$ . . . . .	$2,2 \frac{u_M}{i_T} = X$	35 Ohm	$1,16 \frac{u_M}{i_T} = X$	18 Ohm
Widerstand $R_i$	Ohm . . . . .	$0,5 X < R_i < 0,7 X$	$20 \pm 2$	$X < R_i < 1,3 X$	$20 \pm 2$
Widerstand $R_v$	Widerstand wird möglichst hoch gewählt, doch so, dass der Wattmeterausschlag nicht zu klein wird.		ca. 2500 Ohm, wenn der Leistungsfaktor des Wattmeters für Vollausschlag 0,1 ... 0,3 ist.		ca. 2500 Ohm, wenn der Leistungsfaktor des Wattmeters für Vollausschlag 0,1 ... 0,3 ist.
	Spannung am Widerstand . . .	$1,4 \cdot U$			
Trocken- gleichrichter $N$	Belastbarkeit (Effektivwert des Stromes) . . . . .	$1,4 \frac{U}{R_v}$			
	Strom in Arbeitsrichtung bei einem Spannungsabfall $< u_w$ . .	$1,1 \frac{U}{R_v}$			
	Wird eine Gleichspannung von 30 V in Sperrichtung aufgedrückt, so darf der Strom nicht überschreiten . . . . .	$\frac{1}{R_w}$			
	Bei Spannungen über 2000 V wird an Stelle eines Trockengleichrichters besser ein Ionenventil verwendet.				

### Berechnung des Messergebnisses.

Der Lichtbogenabfall  $u_B$  ist durch die Wattmeter- ( $P$ ) und Amperemeterablesung ( $i_a$ ) gegeben zu

$$u_B = \frac{P}{i_a} \cdot \frac{R_w + R_v}{R_w},$$

wo  $R_w$  der Widerstand des Wattmeters selbst und  $R_v$  der äussere Vorwiderstand ist (Fig. 1).

Es ist nun wichtig, dass irgendwelche Korrekturen mit Rücksicht auf die verwendeten Schaltelemente nicht erforderlich sind, wenn es sich darum handelt, Ergebnisse zu erhalten, deren Genauigkeit für Abnahmen genügen. Dagegen müssen die verwendeten Schaltelemente gewisse Mindestanforderungen erfüllen, die hier behandelt werden sollen und die in Tabelle I zusammengestellt sind. Die Tabelle enthält die Werte für Schaltungen mit 60° und 120° Brenndauer.

Für jede dieser Brennzeiten gibt die Tabelle in einer Spalte die allgemeine Fassung der Forderungen; in einer zweiten Spalte sind die Forderungen für eine besonders empfohlene Anordnung angegeben, die ein Wattmeter für 5 A und 30 V vorsieht.

Die Berechnungen werden hier nur für 120° Brenndauer durchgeführt und berücksichtigen den Ueberlappungswinkel. Für andere Brennzeiten geht dies auf die gleiche Weise. Der Messfehler, der vom Stromkreis und der, der vom Spannungskreis herührt, werden getrennt behandelt.

### Stromkreis während des Vorwärtsstromes.

Ist der Lichtbogenabfall während des ganzen Arbeitsintervalles konstant, so wirkt eine Abweichung des Stromes  $i_a$  von  $i_A$  auf Watt- und Amperemeter in derselben Weise ein, ist also ohne Einfluss auf den Quotienten der beiden und damit auf das Ergebnis. Auch in der kurzen Zeit am Ende, wo  $i_a$  negativ ist, gilt dies. Die Annahme eines konstanten Abfalles ist praktisch hinreichend genau erfüllt. Man kann zeigen, dass, wenn z. B. die Spannung im ersten Teil um 30 % grösser ist als in der zweiten Hälfte und gleichzeitig der Stromfehler in der ersten Hälfte  $a$  % und in der zweiten  $(a+10)$  % ist, der Messfehler kleiner als 0,75 % wird.

### Stromkreis während des Sperrintervalles.

Im Sperrintervall entsteht aber durch den Rückstrom des Trockengleichrichters ein wirklicher Fehler, da dieser Strom den Wattmeteraussschlag erhöht — die Spannungsspule hat ja gleichzeitig eine negative Spannung —, während er den Amperemeterausschlag vermindert. Der Spannungspfad des Wattmeters sei so ausgebildet, dass die negative Sperrspannung am Instrument nicht grösser werden kann als das 1,5fache des Lichtbogenabfalles. Der Mittelwert des Rückstromes durch das Wattmeter im Sperrintervall über eine Periode sei  $i_{2m}$ , während der Mittelwert des Arbeitsstromes  $\frac{I}{m \cdot n}$  ist, mit  $I$  als Gleichstrom,  $m$  Uebersetzungsverhältnis des

Wandlers und  $n$  Anodenzahl. Der grösste Wattmeterfehler ist dann

$$\frac{1,5 \cdot i_{2m} \cdot m \cdot n}{I} 100 \%$$

und der grösste Stromfehler

$$\frac{i_{2m} \cdot m \cdot n}{I} 100 \%$$

Der Fehler im Quotienten und damit im Lichtbogenabfall wird also

$$\frac{2,5 \cdot i_{2m} \cdot m \cdot n}{I} 100 \%$$

Es soll nun ein Fehler von  $F$  % zugelassen werden und es sollen die Forderungen berechnet werden, die dann an die verwendeten Schaltelemente gestellt werden müssen. Es muss dann sein

$$i_{2m} \leq \frac{0,01 F}{2,5} \cdot \frac{I}{m \cdot n}$$

Der Trockengleichrichter  $M$  kann nicht als ein reiner ohmscher Widerstand betrachtet werden, weder im Arbeits- noch im Sperrintervall. Es soll folgende Annahme gemacht werden. In der Vor-

wärtsrichtung wird er vom Strom  $3 \frac{I}{m \cdot n}$  durchflossen; dabei habe er den Spannungsabfall  $u_M$ , in den wir uns der Einfachheit halber auch gleich die anderen Abfälle im Kreis  $T-M-A-W$  eingeschlossen denken. Im Sperrintervall soll  $M$  dagegen den konstanten Widerstand  $R_M$  haben, entsprechend dem Widerstand bei der höchsten vorkommenden Sperrspannung. Mit einer solchen Annahme liegt man bekanntlich auf der sicheren Seite, um so mehr auch, als die Kontrollmessungen am Trockengleichrichter mit Gleichstrom gemacht werden, wobei bekanntlich grössere Rückströme auftreten. Ferner wählen wir — wie später noch gezeigt wird — den Widerstand  $R_i$  so klein, dass das Maximum der Sperrspannung im ersten Augenblick höchstens  $2u_m$  wird. Zur Berechnung des Stromes  $i_{2m}$  brauchen wir hier nicht den Verlauf des Rückstromes zu berechnen, sondern können davon ausgehen, dass die Sekundärspannung am Wandler keine nennenswerte Gleichstromkomponente enthalten kann. Während des Arbeitsintervalles, also während  $\frac{2\pi}{3} + \alpha$ , liegt

an ihm die Spannung  $u_M$ . Hier bedeutet  $\alpha$  den Ueberlappungswinkel. Dann wird der Mittelwert der Spannung im Sperrintervall über eine Periode

$$\frac{\frac{2\pi}{3} + \alpha}{2\pi} u_M = \frac{1}{3} \left( 1 + \frac{3\alpha}{2\pi} \right) u_M$$

und der Mindest-Sperrwiderstand

$$R_M \geq \frac{\frac{1}{3} \left( 1 + \frac{3\alpha}{2\pi} \right)}{\frac{F}{2,5} \cdot \frac{I}{m \cdot n}} u_M$$

oder beim praktisch grössten Wert von  $\alpha$ , nämlich  $\frac{\pi}{6}$ ,

$$R_M = \frac{m \cdot n \cdot u_M}{I \cdot F}$$

Diese Forderung für  $R_M$  soll also bei der höchsten Sperrspannung erfüllt sein, und erst bei deren Bestimmung spielt der Widerstand  $R_i$  und die Wandlereigenschaften überhaupt eine Rolle.

#### Dimensionierung des Widerstandes $R_i$ und des Wandlers $T$ .

Wir kommen auf die oben gemachten Voraussetzungen zurück, nämlich, dass im Sperrintervall die sekundäre Wandler Spannung auf  $2 u_M$  begrenzt sei. Es muss dazu der Verlauf von  $i_m$  näher untersucht werden, besonders die Grenzwerte  $i_{m1}$  und  $i_{m2}$ .

Die Leerlaufinduktivität des Wandlers sei  $L_T$ , die Dauer des Arbeitsintervalles ist  $\left(\frac{1}{3} + \frac{\alpha}{2\pi}\right) \cdot \frac{1}{f}$  Sekunden; dann ist

$$(i_{m1} - i_{m2}) L_T = u_M \left(\frac{1}{3} + \frac{\alpha}{2\pi}\right) \frac{1}{f}$$

( $f$  = Frequenz).

Den Rückstrom im Sperrintervall können wir vernachlässigen im Vergleich mit dem wesentlich grösseren Strom durch  $R_i$  und schreiben also

$$\frac{di_m}{dt} - \frac{R_i}{L_T} i_m = 0.$$

Zur Zeit  $t=0$  ist  $i_m = i_{m1}$  und zur Zeit  $t = \left(\frac{2}{3} - \frac{\alpha}{2\pi}\right) \cdot \frac{1}{f}$  ist  $i_m = i_{m2}$ .

Dann ist

$$i_{m1} = \frac{5\pi}{6} \cdot \frac{u_M}{X_T \left(1 - e^{-\frac{7\pi}{6} \cdot \frac{R_i}{X_T}}\right)}$$

$$i_{m2} = i_{m1} \cdot e^{-\frac{7\pi}{6} \cdot \frac{R_i}{X_T}}$$

mit  $X_T = 2\pi f L_T$  und  $\alpha = \frac{\pi}{6}$ , wie schon vorher.

Grössere Ueberlappung macht nämlich  $i_m$  grösser und damit das Ergebnis ungünstiger. Aus der Forderung, dass die Spannung den Wert  $2u_M$  nicht überschreiten soll, also dass

$$R_i \cdot i_{m1} < 2u_M,$$

ergibt sich  $\frac{R_i}{X_T} < 0,7$ , womit die obere Grenze gegeben ist. Um bei der Messung auch bezüglich der Sättigungsverhältnisse des Wandlers sicher zu gehen, bestimmen wir die Reaktanz aus der Tangente an die Magnetisierungskurve bei einem Strom entsprechend  $i_{m1}$ , d. h. die Magnetisierungskurve wird mit normalem sinusförmigem Wechselstrom bei normaler Frequenz  $f$  aufgenommen und die Tangente bei einem Strom

$$i_T = \frac{i_{m1}}{\sqrt{2}}$$

bestimmt, und festgestellt, dass die so erhaltene Reaktanz die Forderungen erfüllt.

Bei der Festlegung von  $R_i$  und  $X_T$  muss man weiter darauf achten, dass auch  $i_{m1}$  nicht zu gross wird, um die Sättigung in normalen Grenzen zu halten und dadurch genügend grosse Reaktanzen  $X_T$  zu bekommen. Der Stromwandler wird für einen Effektivwert des Stromes von  $1,7 \frac{I}{m \cdot n}$  ausgelegt. Auf

Grund vorgenommener Untersuchungen erscheint es uns geeignet, vorzuschreiben, dass der Magnetisierungsstrom 8 % dieses Wertes nicht überschreiten soll, d. h. also

$$i_{m1} < 0,14 \frac{I}{m \cdot n}$$

Das bedeutet aber, nach dem, was weiter oben gesagt wurde,

$$X_T > 3,1 \frac{u_M}{i_{m1}} > 22 \frac{m \cdot n \cdot u_M}{I}$$

und damit

$$R_i > 11 \frac{m \cdot n \cdot u_M}{I}$$

Wir sahen schon, dass  $R_i < 0,7 X_T$  sein muss. Machen wir eine Vorschrift für  $R_i$ , so ist  $X_T$  nach oben keine Grenze gesetzt;  $i_{m1}$  kann dann den vorerwähnten Wert nicht überschreiten. In Tabelle I ist deshalb  $R_i$  aus der Mindestgrösse von  $X_T$  berechnet.

Das  $I$  in obiger Formel soll den grössten Gleichstromwert bezeichnen, bei dem der Wandler mit der Uebersetzung  $m$  noch Verwendung findet. Für eine gegebene Anordnung ist aber  $i_{m1}$  unabhängig vom Belastungsstrom  $I$ , so dass die Anordnung auch für kleinere Ströme verwendet werden kann. Mit Rücksicht aber auf die Abbildung des Stromes im Arbeitsintervall, darf  $i_{m1}$  nicht über etwa 15 % des

Wertes des Gesamtstromes  $i_a = 3 \frac{I}{m \cdot n}$  ansteigen, d. h.

$$i_{m1} < 0,45 \frac{I}{m \cdot n},$$

wo  $I$  hier den tatsächlichen Gleichstrom bei der Messung bedeutet.

*Die Anordnung soll also nicht verwendet werden bei Gleichströmen, die unter  $\frac{1}{3}$  des Wertes liegen, für die  $R_i$  und  $X_T$  berechnet wurden.*

#### Die Messgenauigkeit.

Man kann leicht Trockengleichrichter, z. B. Kupferoxydulgleichrichter, finden, die bei einem Vorwärtstrom von  $1,7 \frac{I}{m \cdot n}$  einen Sperrwiderstand

$$R_m > 35 \frac{m \cdot n \cdot u_M}{I}, \text{ bzw. einen Rückstrom von weni-}$$

ger als  $0,06 \frac{I}{m \cdot n}$  bei einer Sperrspannung  $2u_M$

haben. In Tabelle I ist der Wert  $0,02 \frac{I}{m \cdot n}$  eingesetzt

mit Rücksicht darauf, dass  $I$  dort den höchsten Wert angibt, während der Strom tatsächlich auf  $\frac{1}{3}$  des Wertes sinken darf.



Unter Verwendung des weiter oben angegebenen Zusammenhanges zwischen  $R_M$  und der Messgenauigkeit  $F$  folgt

$$F < \frac{1}{35} = 0,03$$

Wir haben also gesehen, dass bezüglich des *Wattmeterstromkreises* der Fehler nicht grösser werden kann als 3 %, und zwar liegt dieser Fehler immer so, dass der wirkliche Lichtbogenabfall kleiner ist. Die zur Erreichung dieser Genauigkeit erforderlichen Bedingungen für die Schaltelemente sind, wie schon erwähnt, in Tabelle I zusammengestellt.

#### Braucht man überhaupt den Widerstand $R_i$ ?

Fehlt  $R_i$ , so tritt an seine Stelle  $R_M$  in die Formel für  $i_{m1}$ . Die Forderung

$$R_M < 35 \frac{m \cdot n \cdot u_M}{I}$$

gilt weiter, und setzen wir z. B.

$$X_T > \frac{R_M}{0,7}$$

so wird

$$i_{m1} < 0,05 \frac{I}{m \cdot n}$$

Der ganze Strom muss als Rückstrom durch den Trockengleichrichter  $M$ . Das entspricht etwa 3 % des Vorwärtstromes und das ist doch recht viel. Wenn wir andererseits mit 5 A Sekundärstrom rechnen, wird  $X_T > 80$  Ohm, und das begrenzt uns in der Wahl des Wandlers.

Deshalb scheint es zweckmässig, in den Dimensionierungsregeln einen Wert von  $R_i$  anzugeben, was aber nicht hindert, ihn auch gelegentlich fortzulassen, wenn geeignete Wandler und Trockengleichrichter verfügbar sind.

#### Der Spannungspfad des Wattmeters.

Hier muss der Widerstand  $R_v$  und der Trockengleichrichter  $N$ , der den Strom in der Sperrperiode führen soll, so bestimmt werden, dass einerseits der Rückstrom durch  $N$  in der Arbeitsphase keinen zu grossen Fehler verursacht, andererseits  $R_v$  nicht so gross wird, dass das Wattmeter nicht mehr ordentlich ausschlägt. Normale Wattmeter werden mit Spannungsspulen nicht unter 30 Volt ausgeführt. Da nun der Bogenabfall im allgemeinen kleiner ist, ist der Widerstand  $R_v$ , vom Wattmeter aus gesehen, ganz unnötig vorgeschaltet. Das Wattmeter soll für möglichst kleinen  $\cos \varphi$  gewählt werden und zweckmässig atastisch sein.

Will man mindestens  $1/4$  Vollausschlag erhalten, so muss

$$\frac{q \cdot m \cdot n \cdot I_w \cdot U_w}{I} \cdot \frac{R_w + R_v}{R_w} = 100.$$

Dabei ist  $I_w$  und  $U_w$  der grösste Strom bzw. Spannung, für die die Wattmeterspulen ausgelegt sind,  $R_w$  der Widerstand zwischen den Wattmeterspan-

nungsklemmen und  $q$  der  $\cos \varphi$  für Vollausschlag bei  $U_w$  und  $I_w$ .

Der Trockengleichrichter  $N$  muss einen Strom  $\frac{1,4U}{R_v}$  in seiner Arbeitsrichtung führen, wenn  $U$  die Gleichspannung ist. Zur Vermeidung von Ueberlast für das Wattmeter im Sperrintervall, infolge des Abfalls am Trockengleichrichter  $N$ , muss er bei einem Strom  $\frac{1,1U}{R_v}$  einen kleineren Abfall haben, als die höchstzulässige Spannung  $U_w$  beträgt. Der Rückstrom in seiner Sperrichtung bei einer Gleichspannung von ca. 30 V darf nicht grösser sein als  $\frac{1}{R_w}$ .

Das bedeutet, dass der Trockengleichrichter einen mehr als 30mal grösseren Sperrwiderstand hat als für den inneren Wattmeterwiderstand beträgt; das entspricht einem Fehler von 3,3 %. Dieser Fehler liegt in umgekehrter Richtung wie der Fehler im Strompfad, also in Richtung auf zu kleine Bogenabfälle, wodurch sich diese beiden Fehlerquellen teilweise aufheben.

#### Messung am gittergesteuerten Mutator.

Die Schaltung nach Fig. 1 ist nur verwendbar für ungesteuerte oder ganz wenig gesteuerte Mutatoren. Bei weiterer Steuerung wird die positive Sperrspannung so gross, dass die Spannungsspule überlastet wird. Mit einfachen Mitteln kann aber die Schaltung auch dafür erweitert werden, wie es in Fig. 1 gestrichelt angedeutet ist, wo nämlich parallel zum Trockengleichrichter  $N$  ein Kreis mit einer Batterie von etwa 40 Volt und einem Trockengleichrichter gelegt ist. Auf diese Weise ist ein Umgehungsweg auch in der anderen Richtung offen, allerdings nur, wenn die Spannung positiver ist als normalerweise der Bogenabfall.

Der oben berechnete Fehler im Spannungskreis wird durch diese Anordnung vermindert, weshalb man ohne weitere Rechnung die Messgenauigkeit für unverändert ansehen kann, wenn man nur den neuen Trockengleichrichter nach denselben Grundsätzen auslegt wie den früheren und er auch qualitativ gleichwertig ist.

#### Ausgeführte Messungen.

Die Schaltung wurde bei vielen Gelegenheiten im Prüffeld und auf Anlagen angewendet und die Ergebnisse bei mittleren Strömen mit einem direkt in den Anodenstromkreis eingeschalteten Wattmeter und bei höheren Strömen mit oszillographischen Aufnahmen und sorgfältiger Planimetrierung verglichen. Das Ergebnis entsprach den Berechnungen. Ferner erwies sich das Verfahren besonders einfach im Gebrauch. Die Apparatur ist dieselbe für alle Gleichrichtergrössen, nur der Stromwandler ändert sich. Die Trockengleichrichter blieben gut konstant, und die Kontrollmessungen in dieser Richtung nach jeder Prüfung erwiesen sich bald als eine völlig unnötige Formalität. Diese einfache und genaue Durchführungsmöglichkeit war die Veranlassung, diese Methode als Standardmessung für den Lichtbogenabfall in die schwedischen Stromrichterregeln aufzunehmen.