

Die Prüfung der Elektrizitäts-Zähler

Meßeinrichtungen
Meßmethoden und Schaltungen

Von

Dr.-Ing. Karl Schmiedel

Charlottenburg

Mit 97 Textfiguren



Springer-Verlag
Berlin Heidelberg GmbH

1921

Die Prüfung der Elektrizitäts-Zähler

Meßeinrichtungen
Meßmethoden und Schaltungen

Von

Dr.-Ing. Karl Schmiedel

Charlottenburg

Mit 97 Textfiguren



Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH

1921

ISBN 978-3-662-27440-8 ISBN 978-3-662-28927-3 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-662-28927-3

Alle Rechte,
insbesondere das der Übersetzung in fremde Sprachen, vorbehalten.
Copyright 1921 by Springer-Verlag Berlin Heidelberg
Ursprünglich erschienen bei Julius Springer in Berlin 1921
Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1921

Vorwort.

Die Literatur über Meßeinrichtungen und Meßmethoden zur Prüfung von Elektrizitätszählern ist in Zeitschriften und Büchern zerstreut. Das vorliegende Buch soll dem Zählerfachmann eine Zusammenfassung möglichst vieler dieser Angaben bringen und ihm durch Literaturangaben auch dort das Eindringen in die Materie erleichtern, wo der Gegenstand nur andeutungsweise besprochen wird.

Der Stoff konnte nicht an allen Stellen gleichmäßig ausführlich behandelt werden, da der Umfang des Buches sonst zu groß geworden wäre und die Übersichtlichkeit dadurch gelitten hätte. Dies gilt insbesondere von dem Kapitel III über Meßinstrumente, wo nur eine Aufzählung möglich war. Es gibt jedoch über den Gegenstand gute Sammelwerke, in denen sich jedermann die gewünschten Auskünfte holen kann.

Andererseits wurden manche nur noch wenig verwendeten Apparate und Schaltungen angegeben, um auch dem weniger Erfahrenen ein Bild darüber zu verschaffen, in welcher Weise die Meßeinrichtungen auf dem Zählergebiete in den letzten Jahrzehnten vervollkommen worden sind.

Besonderer Wert wurde darauf gelegt, auf die erzielbare Meßgenauigkeit und auf die richtige Anbringung von Korrekturen wiederholt hinzuweisen, da in dieser Hinsicht auch von Fachleuten mehr Fehler gemacht werden, als man im allgemeinen annehmen sollte.

Die Grundlagen der Gleich- und Wechselstromtechnik, ebenso das Wesen und die Wirkungsweise der Elektrizitätszähler sind an den Stellen, wo theoretische Betrachtungen notwendig waren, als bekannt vorausgesetzt. Wo es für das Verständnis besonderer Meßmethoden oder Schaltungen erforderlich erschien, sind Literaturhinweise gegeben worden.

Der Verfasser ist sich bewußt, daß er nicht allen Ansprüchen Rechnung tragen konnte. Er würde es deshalb besonders begrüßen, wenn von den Lesern Wünsche auf Vervollständigung, Hinweise auf nicht erwähnte Einrichtungen und Meßmethoden und anderweitige Anregungen an ihn gelangen würden.

Der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt, der Allgemeinen Elektrizitätsgesellschaft, der H. Aron-Elektrizitätsgesellschaft, den Isaria-Zählerwerken und den Siemens-Schuckertwerken möchte der Verfasser auch an dieser Stelle für die Überlassung von Abbildungen seinen besten Dank aussprechen.

Charlottenburg, im Juni 1920.

Karl Schmiedel.

Inhaltsverzeichnis.

I. Einleitung und Allgemeines.	Seite
1. Meßgenauigkeit	1
2. Die Konstante, der Fehler und die Korrektur	4
3. Amtlich zugelassene Fehlergrenzen	5
4. Bestimmung des Fehlers bei den verschiedenen Zählerarten	7
5. Die Fehlerkurve des Zählers und die mittleren Angaben für die Verrechnung mit dem Konsumenten	9
II. Einrichtungen zur Erzeugung und Regelung der zugeführten Leistung.	
1. Sparschaltung	11
2. Stromquellen	11
a) Akkumulatorenbatterien	11
b) Gleichstromgeneratoren	14
c) Gleichrichter	14
d) Wechselstromgeneratoren	15
Ein Generator	15
Doppelgenerator	15
Asynchroner Generator	19
3. Vorrichtungen zur Regelung des Hauptstromes, der Spannung, der Frequenz und der Phasenverschiebung	19
a) Regelung des Hauptstromes	19
Belastungswiderstände	20
Transformatoren	22
Transformator mit Kraftflußregelung	23
b) Regelung der Spannung	25
Zellenschalter	25
Widerstände	26
Regeltransformatoren	26
c) Regelung der Frequenz	27
Polumschaltbarer Generator	27
Gebremster Asynchronmotor	27
d) Regelung der Phasenverschiebung	28
Hinweis auf Doppelgenerator	28
Drosselspulen	28
Laufender Einphasenmotor	29
Ruhender Drehstrommotor	29
Ruhender Drehstrommotor mit Kraftflußregelung der Spannung	30
Zyklische Vertauschung zur Grobregelung	31
Ringtransformator mit Schleifbürsten	31
4. Schaltungen zur Konstanthaltung des Hauptstromes und der Spannung	32

	Seite
III. Instrumente und Hilfseinrichtungen zur Messung des wirklichen Verbrauchs.	
1. Meßinstrumente	33
a) Kompensationsapparat für Gleichstrom	34
b) Kompensationsapparat für Wechselstrom	36
c) Drehspulinstrumente	36
d) Hitzdrahtinstrumente	37
e) Thermokreuze	37
f) Elektromagnetische Instrumente	37
g) Dynamometrische Spannungs- und Strommesser	38
h) Dynamometrische Leistungsmesser	38
i) Ferrodynamische Instrumente	39
k) Phasenmesser	39
l) Zungenfrequenzmesser	40
m) Frequenzmesser mit einem Zeiger	41
n) Frequenzmesser mit zwei sich kreuzenden Zeigern	41
2. Verwendung der Vorrichtungen zur Erweiterung der Meßbereiche in Verbindung mit Instrumenten	41
a) Vorschaltwiderstände	41
b) Nebenschlußwiderstände	43
c) Strom- und Spannungswandler	45
3. Hilfsvorrichtungen zur Bestimmung der Stromrichtung, der Phase und des Drehsinnes	46
a) Drehspulinstrument	46
b) Polreagenzpapier	46
c) Veränderliche Selbstinduktion	47
d) Polprüfer für Wechselstrom	48
e) Drehfeldrichtungsanzeiger	49
4. Hilfsschalter zum Sparen von Meßinstrumenten	49
a) Voltmeterersatzschalter	49
b) Wattmeterumschalter für die Zweiwattmetermethode	50
IV. Einrichtungen zur Bestimmung der Angaben.	
1. Doppelzeitschreiber oder Chronograph	51
2. Stoppuhr	52
3. Meßskala für Eichräume	53
4. Automatische Zählvorrichtungen	54
a) Optische Methode mit Selenzelle	54
b) Stroboskopische Synchronisierung	55
c) Überspringende Funken	56
d) Mechanischer Kontakt mit Reibungskompensation	57
e) Mechanische Betätigung der Stoppuhr	59
V. Eichzähler und Registrierinstrumente.	
VI. Eichschaltungen.	
1. Einphasenwechselstrom	62
a) Getrennte Strom- und Spannungskreise	62
Niederspannung und Niederstrom	62
Hochspannung und Hochstrom	63
b) Direkte Belastung	64
Niederspannung und Niederstrom	64
Hochspannung und Hochstrom	65
c) Prüfklemmen	65

	Seite
2. Vierleiter-Zweiphasenwechselstrom	67
a) Direkte Belastung	68
b) Getrennte Strom- und Spannungskreise	68
3. Dreileiter-Zweiphasenwechselstrom	69
4. Vierleiter-Drehstrom, drei messende Systeme	69
a) Getrennte Strom- und Spannungskreise	69
Niederspannung und Niederstrom	69
Hochspannung und Hochstrom	70
b) Direkte Belastung	71
c) Abschaltung einer Phase	71
5. Dreileiter-Drehstrom, zwei messende Systeme	72
a) Allgemeines	72
b) Getrennte Strom- und Spannungskreise	74
Niederspannung und Niederstrom	74
Hochspannung und Hochstrom	75
6. Vierleiter-Drehstrom, zwei messende Systeme	76
a) Allgemeines	76
b) Getrennte Strom und Spannungskreise	77
Niederspannung und Niederstrom	77
Hochspannung und Hochstrom	78
c) Direkte Belastung	78
Niederspannung und Niederstrom	78
Hochspannung und Hochstrom	79
7. Vier- oder Dreileiter-Drehstrom, ein messendes System	79
a) Allgemeines	79
b) Eine Hauptstromspule in einer Phasenleitung, eine Spannungsspule zwischen dieser Leitung und dem Nulleiter	80
c) eine Hauptstromspule in einer Phasenleitung, eine Spannungsspule zwischen dieser Leitung und einer anderen Phasenleitung	80
d) Zwei Hauptstromspulen, jede in einer Phasenleitung, eine Spannungsspule zwischen diesen beiden Leitungen	82
8. Blindverbrauchsähler	83
a) Allgemeines	83
b) Vierleiter-Drehstrom, drei messende Systeme mit 90°-Verschiebung	84
c) Vierleiter-Drehstrom, drei messende Systeme mit 60°-Verschiebung	84
d) Dreileiter-Drehstrom, zwei messende Systeme mit 90°-Verschiebung	85
e) Dreileiter-Drehstrom, zwei messende Systeme mit 60°-Verschiebung	85
9. Zweileiter-Gleichstrom	86
10. Dreileiter-Gleichstrom	86
a) Zwei Hauptstromspulen, jede in einem Außenleiter, Nebenschlußkreis zwischen den beiden Außenleitern	86
Allgemeines	86
Getrennte Strom- und Spannungskreise	87
Direkte Belastung	88
b) Eine Hauptstromspule in einem Außenleiter, Nebenschlußkreis zwischen den beiden Außenleitern	88
c) Eine Hauptstromspule in einem Außenleiter, Nebenschlußkreis zwischen diesem Leiter und dem Nulleiter	89

	Seite
VII. Einrichtungen und Schaltungen für die Messung besonderer Eigenschaften und Vorgänge.	
1. Drehmoment	90
a) Kräftemesser mit Torsionsfeder	90
b) Pendelkräftemesser	91
c) Kräftemesser nach dem Kräfteparallelogramm	91
d) Kräftemesser nach dem Wageprinzip	95
e) Automatische Vorrichtung zur Aufzeichnung des Drehmoments über den ganzen Umfang	95
f) Bestimmung des Drehmoments durch Rechnung	97
2. Reibung	97
a) Auslaufmessungen	97
Graphische Auswertung	99
Auswertung durch Differenzenbildung	100
Vereinfachte Auslaufmethode	103
Rechnerische Auswertung	103
Bestimmung des Trägheitsmoments des Ankers	104
Trennung der Verluste	105
b) Methode des geeichten Motors	106
3. Reibungskompensation	107
a) Gleichstrom-Wattstundenzähler	107
b) Wechselstrom-Induktionszähler und Gleichstrom-Ampere-stundenzähler	108
4. Eigenbremsung	109
a) Auslaufmethode	109
b) Methode des geeichten Motors	110
c) Einlaufmethode	111
d) Indirekte Bestimmung der Eigenbremsung	111
5. Stoßweise Belastungen	113
6. Kurvenform	115
7. Äußere Felder	116
a) Absichtliche Fälschung der Angaben	116
b) Unabsichtliche Einwirkung stromführender Leitungen	116
8. Temperatur	117
9. Eigenverbrauch	118
a) Gleichstrom	118
b) Wechselstrom	119
Dynamometrischer Leistungsmesser	119
Elektrometer	120
Dreivoltmetermethode	121
10. 90°-Verschiebung	121
a) Stillstandsmethode	121
b) Winkelmessungen mit Hilfsspule	123
11. Felder	123
a) Gleichstrom	123
b) Permanente Magnete	124
c) Wechselstrom	125
12. Strömung in der Scheibe	125
13. Bürsten-Übergangswiderstand bei Gleichstrom-Ampere-stundenzählern	126
14. Gegenelektromotorische Kraft bei Gleichstromzählern	127
15. Schiefe Aufhängung	128
Anhang	129

I. Einleitung und Allgemeines.

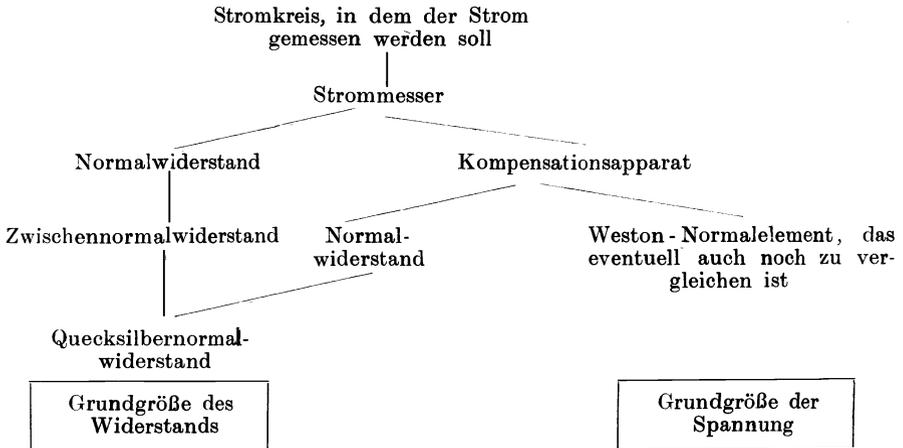
Das Messen galt bis vor kurzem in manchen Fachkreisen als eine Tätigkeit von untergeordneter Bedeutung, weil es keine produktive, sondern nur eine kritische Tätigkeit sei. In der Industrie wurden die Gesichtspunkte der kaufmännischen Kalkulation in betreff produktiver und unproduktiver Kosten auch auf die Laboratorien angewendet und so deren Einrichtungen nur ungenügend ausgebildet. Erst in neuerer Zeit hat sich die Einsicht Bahn gebrochen, daß nur die Einrichtung guter Laboratorien mit den modernsten Meßeinrichtungen eine genügende Vorbereitung künftiger Fortschritte in der Fabrikation verbürgen wird und daß nach Aufnahme der Fabrikation nur eine ebensogut eingerichtete meßtechnische Kontrolle die dauernde Güte des Fabrikats gewährleisten kann.

1. Meßgenauigkeit.

Es ist eigentümlich, wie oft man auf Fachleute trifft, die sich schon lange Jahre mit Messungen beschäftigen, denen aber der Begriff der Meßgenauigkeit noch nicht in Fleisch und Blut übergegangen ist. Es sei deshalb ein kurzer Hinweis auf die Bedeutung der Meßgenauigkeit erlaubt.

Das Messen ist eine vergleichende Tätigkeit, die zu messenden Größen werden mit den definierten Grundgrößen verglichen. Dabei sind die Meßapparate nicht die Grundgrößen selbst, sondern wiederum geeicht, d. h. mit diesen verglichen. So kommt man also immer erst auf mehr oder weniger langen Umwegen zu den Grundgrößen. Wir nehmen beispielsweise an, daß wir einen in einem Stromkreis fließenden Strom messen wollen. Dazu benutzen wir einen Strommesser, den wir in den Stromkreis einschalten. Diesen Strommesser müssen wir vorher geeicht haben; wir haben zu diesem Zweck einen sogenannten Normalwiderstand mit ihm in Reihe geschaltet, an dessen Enden wir die Spannung mit einem Kompensationsapparat gemessen haben. Der Normalwiderstand, der für den Kompensationsapparat dauernd im Gebrauch ist, muß mit einem andern Normalwiderstand, der sich z. B. bei einem staatlichen Institut in besonderer Verwahrung

befindet, dieser wieder mit einem Quecksilbernormal (z. B. bei der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt) verglichen sein. Dieses erst kann als Grundgröße angesprochen werden. Das gleiche gilt für die Widerstände des Kompensationsapparates. Schließlich müssen wir uns noch auf die Spannung des (Westonschen) Normalelements für den Kompensationsapparat als Grundgröße beziehen. So kommen wir also etwa zu folgendem Schema:



Daraus ergibt sich ohne weiteres, daß sich die Fehler, die bei den verschiedenen Eichungen auftreten, addieren. Die Summe aller dieser Fehler ist ein Maß für die Meßgenauigkeit. Erste Bedingung für alle Messungen ist also, sich von der Meßgenauigkeit dauernd zu überzeugen; man kann sonst bei Messungen zu so großen Fehlern kommen, daß der Zweck der Messung illusorisch wird. In unserem Beispiel muß man sich z. B. vergewissern, daß die üblichen Meßfehler bei der Eichung des Strommessers verschwindend klein sind gegenüber der verlangten Meßgenauigkeit. Für Zählerprüfungen kann man dies immer dann annehmen, wenn man den Strommesser bei staatlich zugelassenen Anstalten (z. B. bei der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt oder den dieser unterstellten Prüfmtern) prüfen läßt.

Die Meßgenauigkeit hängt aber weiterhin auch ab von der Art, in der man die Messung vornimmt. Mißt man z. B. eine Größe aus der Differenz zweier anderer Größen, so ist immer mit einer ziemlich hohen Meßgenauigkeit dann zu rechnen, wenn der als Differenz gemessene Wert von der Größenordnung des größeren der beiden Meßwerte ist. Ist dagegen der Differenzwert sehr klein im Verhältnis zu beiden Messungen, so hängt die Meßgenauigkeit dieses Wertes sehr stark von der Meßgenauigkeit der beiden Größen ab, aus deren Differenz man ihn errechnet hat.

Bei Wechselstrommessungen kommen nicht nur arithmetische Differenzen, sondern auch geometrische in Frage. Bestimmt man etwa einen kleinen Strom aus der Größe eines anderen Stromes und dem Phasenwinkel zwischen beiden, so hängt die Genauigkeit des kleinen Stromes außerordentlich von der Meßgenauigkeit ab, mit der der Phasenwinkel bestimmt wurde. Als Beispiel für beide genannten Fälle sei die Anordnung nach Fig. 1a angenommen.

Ein aus einer reinen Selbstinduktion und einem reinen Widerstand in Parallelschaltung bestehender Stromkreis soll an seinen Enden *A* und *B* nicht lösbar sein. Der Strom J_1 im reinen Widerstand soll bestimmt werden.

Zur Messung braucht man einen Strommesser, einen Spannungsmesser und einen Leistungsmesser, mit denen man den Gesamtstrom J , die Spannung E zwischen den Punkten *A* und *B* und die Leistung L des gesamten Stromkreises mißt. Der Spannungsmesser und die Spannungsspule des Leistungsmessers sollen reine Ohmsche Widerstände haben, in denen die Ströme J_2 und J_3 fließen. Dann ist die Wattkomponente des Gesamtstromes

$$J_w = J \cdot \cos \varphi.$$

Dabei ist $\cos \varphi$ zu bestimmen als Quotient aus der Leistung L und dem Produkt $E \cdot J$. Liegen die Verhältnisse so, wie in Fig. 1b dargestellt, so ist die am

Leistungsmesser abgelesene Leistung L (proportional J_w) sehr klein. Die Meßgenauigkeit für $\cos \varphi$ ist also abhängig von der Genauigkeit, mit der man den kleinen Wert L bestimmen kann. Mit einem gewöhnlichen Leistungsmesser kann man derartig kleine Beträge nur sehr ungenau messen. Man muß also im Notfall besondere Mittel zu Hilfe nehmen, wenn man die Meßgenauigkeit erhöhen will. Haben wir auf diese Weise den Gesamtstrom $J_w = J_1 + J_2 + J_3$ ermittelt, so müssen wir von diesem noch die Summe der Ströme J_2 und J_3 im Spannungs- und im Leistungsmesser abziehen, um den gesuchten Strom J_1 zu erhalten. Hat man Instrumente benutzt, die einen ziemlich großen Stromverbrauch haben, so wird J_1 im Verhältnis zu $J_2 + J_3$ klein sein.

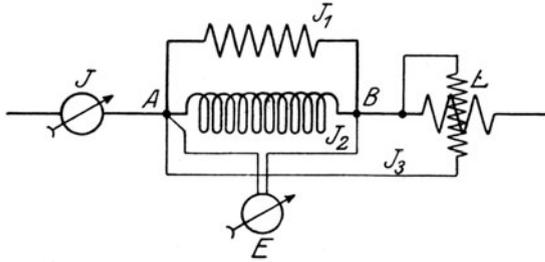


Fig. 1a. Widerstand und Selbstinduktion.

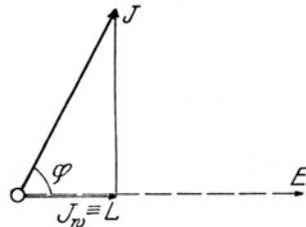


Fig. 1b. Widerstand und Selbstinduktion.

Kann man J_2 und J_3 z. B. wegen Erwärmungseinflüssen nicht sehr genau bestimmen, so leidet die Meßgenauigkeit für J_1 beträchtlich. Man muß dann entscheiden, ob nicht andere Instrumente oder auch andere Methoden für die Messung von J_1 anzuwenden sind.

Zahlenmäßig ergibt unser Beispiel etwa folgendes, wenn wir bei allen Instrumenten annehmen, daß die hohe Meßgenauigkeit von $\pm 0,1$ Teilstrich erreicht wird.

	Wirklicher Wert	Ableseung in Teilstrichen	Meßgenauigkeit in	
			Teilstrichen	Prozenten
E	110 V.	110,0	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$
J	5 A.	100,0	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$
L	110 W.	22,0	$\pm 0,1$	$\pm 0,5$
$\cos \varphi = \frac{L}{E \cdot J} = 0,2$				$\pm 0,7$
$J_w = J \cdot \cos \varphi = 1$ A.				$\pm 0,8$
J_3	0,3 A.	$r_3 \pm 0,5\%$	} Genauigkeit der Widerstände	
J_2	0,5 A.	$r_2 \pm 0,4\%$		
$J_1 = J_w - J_3 - J_2 = 0,2$ A.				+ 2,25 - 5,75

Man sieht, wie groß die Fehler werden können trotz Verwendung von vorzüglichen Präzisionsinstrumenten, die man vorher genau geeicht hat.

Die genannten Ausführungen sollen genügen, um das Wesen der Meßgenauigkeit zu veranschaulichen. Wenn damit auch nicht alle vorkommenden Fälle getroffen sind, so wird der Hinweis immerhin zeigen, wie wichtig es ist, sich bei allen Messungen Rechenhaft über die Meßgenauigkeit zu geben.

2. Die Konstante, der Fehler und die Korrektur.

Bei der Prüfung eines Elektrizitätszählers muß man unterscheiden zwischen den von dem Konstrukteur beabsichtigten maschinentechnischen Eigenschaften (Drehmoment, Eigenverbrauch, Reibungsmoment, Spannungsabfall) und seinen meßtechnischen Eigenschaften. Beide zu messen ist bei der Entwicklung neuer Typen von außerordentlicher Wichtigkeit. Ist die Type entwickelt und in die laufende Fabrikation übergegangen, so wird sich die Kontrolle in der Regel nur auf die meßtechnischen Eigenschaften zu erstrecken haben. In diesem Falle ist also die Meßgenauigkeit des Zählers zu bestimmen. Diese drückt man meist durch den Begriff der Korrektur oder des Fehlers aus. Besonders der Begriff des Fehlers hat sich so eingebürgert, daß man den früher oft gebrauchten Begriff der „Konstante“ kaum mehr verwendet. Konstante, Fehler und Korrektur werden folgendermaßen definiert: W ist der wirkliche

Verbrauch im Netz, A sind die Angaben des Zählers, dann ist die Konstante C bestimmt durch

$$W = C \cdot A, \quad C = \frac{W}{A}.$$

Sie ist also der Wert, mit dem die Angaben des Zählers multipliziert werden müssen, damit man den wirklichen Verbrauch erhält.

Der Fehler ist die Abweichung der Angaben von dem wirklichen Verbrauch:

$$W \pm F = A, \quad \pm F = A - W.$$

Bezieht man den Fehler, wie üblich, auf den wirklichen Verbrauch, so ist er in Prozenten

$$\pm F = \frac{A - W}{W} \cdot 100.$$

Der Fehler wird positiv, wenn die Angaben zu groß sind, negativ, wenn sie zu klein sind. Die Korrektur k ist an den Angaben des Zählers anzubringen, um den wirklichen Verbrauch zu finden, also

$$A \pm k = W, \quad \pm k = W - A = \mp F.$$

Die Korrektur, auf den wirklichen Verbrauch bezogen, ist in Prozenten

$$\pm k = \frac{W - A}{W} \cdot 100^1).$$

Konstante und Fehler stehen in folgender Beziehung zueinander:

$$\pm F = \frac{A}{W} - 1 = \frac{1}{C} - 1 = \frac{1 - C}{C},$$

$$C = \frac{1}{1 \pm F}.$$

3. Antlich zugelassene Fehlergrenzen.

Ein Zähler, dessen Angaben durch die Physikalisch-Technische Reichsanstalt und die ihr unterstellten Prüffämter beglaubigt werden sollen, darf bestimmte Fehlergrenzen nicht überschreiten²⁾.

Gleichstromzähler.

a) Zwischen 5⁰/₁₀ der Nennlast und der Nennlast darf der Fehler in Prozenten des jeweiligen Verbrauchs nicht größer sein als

$$\pm F = 3 \pm 0,3 \frac{P_N}{P}.$$

¹⁾ Der Auffassung von Simons, E. T. Z. 1916, S. 260, kann nicht zugestimmt werden. Er bezieht die prozentuale Korrektur auf die Angaben des Zählers und nicht auf den wirklichen Verbrauch. Seine Schlußfolgerungen sind dadurch auch hinfällig.

²⁾ Vgl. E. T. Z. 1914, S. 601. Erläuterungen dazu E.T.Z. 1920, S. 638.

Dabei ist P_N der Nennverbrauch, P der jeweilige Verbrauch des Zählers. Die Zimmertemperatur soll zwischen 15 und 20° C liegen.

Für Netzleistungen unter 15 W. gilt diese Fehlergrenze nicht mehr.

b) Bei Überlast im Hauptstromkreis gilt folgendes: Bei Überschreitung der Nennstromstärke um $x\%$ darf die Abweichung vom wirklichen Verbrauch höchstens $x/10\%$ mehr betragen als der höchste beim Nennstrom zulässige Fehler, der sich aus a) berechnet.

c) Der Zähler muß bei 1% der Nennleistung anlaufen.

d) Bis zu einer die Nennspannung um 10% übersteigenden Spannung darf der Vorlauf des Zählers nicht größer sein als $1/500$ seiner Nennleistung entspricht.

Wechselstromzähler.

Zwischen 5% der Nennlast und der Nennlast darf der Fehler nicht größer sein als

$$\pm F = 3 + 0,2 \frac{P_N}{P} + \left(1 + 0,2 \frac{J_N}{J}\right) \tan \varphi$$

Prozent des jeweiligen Verbrauchs.

Dabei ist P_N der Nennverbrauch, P der jeweilige Verbrauch, J_N die Nennstromstärke, J die jeweilige Stromstärke, $\tan \varphi$ die trigonometrische Tangente desjenigen Winkels, dessen \cos gleich dem Leistungsfaktor ist. $\tan \varphi$ ist immer positiv zu setzen, gleichgültig, ob das Netz kapazitive oder induktive Belastung hat. In der folgenden Tabelle sind die $\tan \varphi$ und $\cos \varphi$ nebeneinandergestellt. Darnach kann man sich $\tan \varphi$ als Funktion von $\cos \varphi$ als Kurve auf Millimeterpapier zeichnen, wenn man häufiger Fehlerrechnungen vornehmen muß.

$\cos \varphi$	$\tan \varphi$
1	0
0,9	0,4843
0,8	0,7500
0,7	1,021
0,6	1,333
0,5	1,732
0,4	2,291
0,3	3,179
0,2	4,899
0,1	9,950
0	∞

Bei Mehrphasen- und Mehrleiterzählern ist die jeweilige Stromstärke als arithmetischer Mittelwert der in den einzelnen Leitern mit Ausnahme des Nulleiters fließenden Stromstärken zu berechnen. Der Leistungsfaktor wird aus dem Verhältnis der gesamten wirklichen Leistung zu der arithmetischen Summe der scheinbaren Leistungen aller Phasen oder Leiter gebildet.

Für Leistungsfaktoren unter 0,2 gelten die Bestimmungen nicht mehr.

Die unter b), c) und d) für Gleichstromzähler angegebenen Bedingungen gelten gleicherweise für Wechselstromzähler. Die Bedingung für den Anlauf gilt für induktionsfreie Last.

Wechselstromzähler in Verbindung mit Meßwandlern.

Für Zähler, die nur für die Verbindung mit Meßwandlern bestimmt sind, darf der Fehler nicht größer sein als

$$\pm F = 2 + 0,2 \frac{P_N}{P} + \frac{1}{2} \left(1 + 0,2 \frac{J_N}{J} \right) \cdot \tan \varphi$$

Prozent des jeweiligen Verbrauchs.

Im übrigen sind die Bestimmungen die gleichen wie für die anderen Wechselstromzähler.

Blindverbrauchsähler.

Für Blindverbrauchsähler gelten die oben genannten Fehlergrenzen mit folgenden vorläufig festgesetzten Abänderungen: an Stelle der jeweiligen Last P tritt die Blindlast B , an Stelle von $\tan \varphi$ tritt $\cot \varphi$. Die Fehlergrenze gilt für B zwischen 5% und 100% der Nennlast und für $\cos \varphi$ zwischen 0,98 und 0, d. h. für $\sin \varphi$ zwischen 0,2 und 1. Für B kleiner als 5% der Nennlast und $\cos \varphi$ größer als 0,98 dürfen die Angaben des Zählers 1,5% des in der gleichen Zeit gemessenen Nennverbrauchs nicht überschreiten.

Fehlergrenzen anderer Länder.

Die in anderen Ländern zugelassenen Fehlergrenzen sind seinerzeit von A. Durand¹⁾ zusammengestellt worden. Wie weit diese heute noch Geltung haben, entzieht sich der Beurteilung.

4. Bestimmung des Fehlers bei den einzelnen Zählerarten.

a) Zählwerksablesungen. Bei allen Zählern kann man aus der Ablesung des Zählwerks und der Messung der Leistung über eine gewisse Zeit den Fehler bestimmen. Die Ablesung am Zählwerk entspricht den Angaben A , das Produkt aus der mittleren Leistung L und der Zeit t , während welcher gemessen wurde, dem wirklichen Verbrauch W . Der prozentuale Fehler ist dann

$$\pm F = \frac{A - Lt}{L \cdot t} \cdot 100.$$

Die letzte Scheibe bei Zeigerzählwerken und die letzte Rolle bei Rollenzählwerken ist oft so fein unterteilt, daß man bei Vollast

¹⁾ Congresso Internazionale Delle Applicazioni Elettriche. Torino, Vincenzo, Bona, 1911; Lumière Electrique, Ser. 2, Bd. 16, S. 291 (1911); L'Electricien, Ser. 2, Bd. 42, S. 356 ff.

bei einer Ablesung von etwa 10 Minuten Dauer mit einer Ablesegenauigkeit von einigen Promille rechnen kann. Die Übersetzung auf das Zählwerk ist bei modernen Zählern immer so gewählt, daß man direkt die gezählten Kilowattstunden ablesen kann. Die Leistung L mißt man am Leistungsmesser in Watt, die Zeit t mit der Stoppuhr in Sekunden. Das Produkt $L \cdot t$ muß man also noch durch $1000 \cdot 3600$ dividieren, um den wirklichen Verbrauch in Kilowattstunden zu erhalten.

Während man bei Motorzählern nur selten auf diese Art mißt, sondern gewöhnlich die Umdrehungen des Ankers selbst zählt, um die Zeit für die Messung abzukürzen, muß man bei Elektrolytzählern stets die lange Zeit zur Ablesung an der Skala des Meßgefäßes anwenden. Bei kleinen Belastungen braucht man oft eine Stunde und länger, um noch eine genügende Meßgenauigkeit zu erhalten.

b) Zählen der Ankerumdrehungen oder Oszillationen. Bei rotierenden oder oszillierenden Motorzählern bestimmt man den Fehler meist aus den Umdrehungen oder Oszillationen des Ankers, der zur zugeführten Leistung und der Zeit, während der die Umdrehungen oder Oszillationen gezählt werden. Man kann dabei für alle Belastungen bis zu den kleinsten Werten herunter mit einer Beobachtungszeit von etwa 1 Minute auskommen (vgl. auch Kapitel IV).

Auf dem Zifferblatt des Zählers oder auf einem besonders angebrachten Schild befindet sich neben den Angaben über Nennspannung, Nennstromstärke, Nennfrequenz und anderen notwendigen Daten die Angabe

$$1 \text{ Kilowattstunde} = a \text{ Umdrehungen.}$$

Hat man am Leistungsmesser eine Leistung L in Watt abgelesen und die Zeit t in Sekunden bestimmt, während der der Zähleranker n Umdrehungen (oder Oszillationen) machte, so müßte also der Zähler, wenn er richtig zeigte, in $L \cdot t$ Wattstunden oder $\frac{L \cdot t}{1000 \cdot 3600}$ Kilowattstunden

$$m = \frac{a \cdot L \cdot t}{1000 \cdot 3600} \text{ Umdrehungen}$$

gemacht haben. Da jedoch nur n Umdrehungen gezählt wurden, ist die Konstante des Zählers

$$C = \frac{m}{n} = \frac{a \cdot L \cdot t}{n \cdot 1000 \cdot 3600}.$$

Da der Fehler, wie oben gezeigt, mit C in der Beziehung steht

$$F = \frac{1 - C}{C},$$

so kann man sich eine Tabelle machen, in der ein für allemal die zu bestimmten C gehörenden F nebeneinander stehen.

Oft verfährt man so, daß man die Leistung L unter Berücksichtigung der bekannten Skalenkorrektion des Leistungsmessers auf den gewollten Wert, z. B. 10, 20, 30, 40 ... % der Nennleistung einstellt, die zugehörigen sekundlichen Umdrehungen

$$\frac{m}{t} = \frac{a \cdot L}{1000 \cdot 3600}$$

berechnet und diese mit den durch Zählen bestimmten sekundlichen Umdrehungen $\frac{n}{t}$ vergleicht. Die Konstante ist dann

$$C = \frac{m/t}{n/t}$$

und der Fehler

$$F = \frac{n/t - m/t}{m/t}.$$

Diese Methode ist bequem, aber insofern für genaue Messungen nicht verwendbar, weil man den Leistungsmesser meist nicht auf einen bestimmten Teilstrich einstellen kann, sondern seinen Zeiger auf einen Wert zwischen zwei Teilstrichen einstellen muß.

c) **Koinzidenzen bei Pendelzählern.** Zur Abkürzung der Beobachtungszeit bei Doppelpendelzählern hat Orlich¹⁾ eine Methode angegeben, um aus dem Übersetzungsverhältnis der Pendel auf das Zählwerk und den Koinzidenzen der mit verschiedenen Schwingungszahlen schwingenden Pendel die Angaben des Zählers zu bestimmen. Die Beobachtungszeit muß sich dabei auf etwa 5 bis 20 Minuten für jede Ablesung erstrecken. Die Beobachtung erfordert eine sehr gespannte Aufmerksamkeit und die Bestimmung der Übersetzungskonstanten beansprucht so viel Zeit, daß diese nur in seltenen Fällen durch den Gewinn an der Beobachtungsdauer ausgeglichen wird, der sich dabei gegenüber der Zifferblattablaesung erzielen läßt. Zudem ist die Einteilung der letzten Ziffernscheibe meist so genau, daß die Zifferblattablaesung nur wenig mehr Zeit erfordert. Der Hinweis auf diese sehr interessante Methode mag deshalb hier genügen.

5. Die Fehlerkurve des Zählers und die mittleren Angaben für die Verrechnung mit dem Konsumenten.

Nachdem wir die Bestimmung der Größe des Fehlers besprochen haben, wollen wir uns klar darüber werden, welchen praktischen Wert es für die Verrechnung mit dem Konsumenten hat, die Fehler des Zählers bei verschiedenen Belastungen, aus denen man die sogenannte Fehlerkurve des Zählers zeichnet, zu kennen.

Nehmen wir an, der Konsum eines Anschlusses schwanke nach dem Konsumdiagramm Fig. 2, die Fehlerkurve des Zählers sei durch

¹⁾ E. T. Z. 1901, S. 94—98.

Fig. 3 gegeben. Der wirkliche Verbrauch W ist im Konsumdiagramm durch die Flächen, welche von ausgezogenen Linien begrenzt werden, dargestellt, die Angaben A des Zählers sind durch die punktierten Linien begrenzt, wobei der Maßstab für die Abweichungen zwischen W und A der Deutlichkeit halber fünfmal zu groß gewählt ist. Das, was der Konsument zu viel oder zu wenig bezahlt, ist gegeben

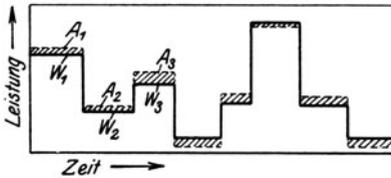


Fig. 2. Konsumdiagramm.

durch $\Sigma A = \Sigma W$, dargestellt durch die Differenz der Flächen, die die ausgezogene und die punktierte Konsumlinie mit der Abszissenachse bilden, also die Summe der in Fig. 2 schraffierten Flächen. Daraus erhält man einen mittleren Fehler

$$F_m = \frac{\Sigma A - \Sigma W}{\Sigma W} = \frac{A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n}{W_1 + W_2 + W_3 + \dots + W_n} - 1.$$

Da $A_1 - W_1 = F_1 \cdot W_1$ usw., so kann man die Gleichung auch so schreiben, daß die für die einzelnen Belastungen aus der Fehlerkurve entnommenen Fehler darin auftreten:

$$\begin{aligned} F_m &= \frac{F_1 \cdot W_1 + F_2 \cdot W_2 + F_3 \cdot W_3 + \dots + F_n \cdot W_n}{\Sigma W} \\ &= F_1 \cdot \frac{W_1}{\Sigma W} + F_2 \cdot \frac{W_2}{\Sigma W} + F_3 \cdot \frac{W_3}{\Sigma W} + \dots + F_n \cdot \frac{W_n}{\Sigma W}. \end{aligned}$$

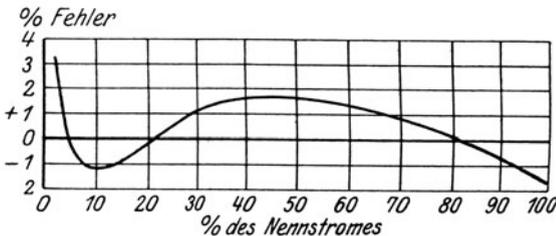


Fig. 3. Fehlerkurve.

Man ersieht hieraus, daß der mittlere Fehler F_m immer kleiner ausfallen muß, als der größte Fehler, den man aus der Fehlerkurve entnehmen kann.

Diese Überlegung ist an und für sich so selbstverständlich, daß man sie wohl für überflüssig halten könnte. Wir haben sie dennoch gemacht, um uns ganz klar darüber zu sein, worauf es im Endzweck bei der Bestimmung der Fehlerkurve ankommt. Auch taucht immer noch ab und zu die Meinung auf, daß die Fehler bei schwankender Belastung größer sind als die aus der Fehlerkurve des Zählers abgelesenen. Dabei soll nicht späteren Erörterungen über den Einfluß von oft wiederholten kurzen Stromstößen auf die Angaben von Zählern vorgegriffen werden¹⁾.

¹⁾ Vgl. S. 113.

II. Meßeinrichtungen zur Erzeugung und Regelung der zugeführten Leistung.

Wie wir oben gesehen haben, müssen wir zur Bestimmung des Fehlers einestheils den wirklichen Verbrauch im Netz, andertheils die Angaben des Zählers messen. Wir wollen vorerst die Einrichtungen und Instrumente besprechen, die wir für die Erzeugung und Regelung der zur Eichung notwendigen Leistung im Laboratorium und im Eichraum brauchen und dann erst auf die Einrichtungen eingehen, die für die Bestimmung des Fehlers selbst notwendig sind.

1. Sparschaltung.

Bei Eichungen, die man in der Installation vornimmt, hat man nur die Stromquelle zur Verfügung, die das betreffende Netz speist. Man stellt dann die gewünschte Belastung entweder durch die vorhandenen Motoren, Lampen oder sonstigen Apparate her, oder benutzt, insbesondere bei kleineren Anlagen, transportable Belastungswiderstände, wie sie weiter unten beschrieben werden.

Bei dieser Art der Belastung verbraucht man die ganze Arbeit, die vom Zähler angezeigt wird. Im Laboratorium und im Eichraum würde eine solche Belastungsweise besonders bei Zählern für große Leistungen große Stromquellen voraussetzen und eine enorme Energievergeudung bedeuten. Man trennt deshalb den Spannungskreis des Zählers elektrisch vollkommen von dem Hauptstromkreis und speist den Spannungskreis von einer Stromquelle, deren Spannung gleich der Betriebsspannung ist, den Hauptstromkreis, der sehr kleinen Widerstand hat, dagegen von einer Stromquelle niedriger Spannung, die aber großen Strom liefern kann. Diese Schaltung „mit getrenntem Strom- und Spannungskreis“ wird durchgehend angewandt. Die Anschlußklemmen aller Zähler sind heute so eingerichtet, daß man die Trennung des Spannungskreises von dem Hauptstromkreise von außen vornehmen kann, ohne in dem Zähler irgendeine Leitung lösen zu müssen.

2. Stromquellen.

Es seien nun die Stromquellen betrachtet, die man im Laboratorium und im Eichraum braucht, um die Messung in Sparschaltung bequem vornehmen zu können. Es wird dabei auch manche Einrichtung erwähnt werden, die nicht unbedingt erforderlich ist, deren Kenntnis aber dem Leser erwünscht sein mag.

Akkumulatorenbatterien. Zur Speisung des Spannungskreises von Gleichstromwattstundenzählern gebraucht man eine sogenannte „Spannungsbatterie“, die eine maximale Spannung von etwa 500 V. liefern

kann und für Ströme bis höchstens 4 A., meist aber nur bis 1 A. bemessen ist. Zähler für höhere Spannungen kommen selten vor, weil Gleichstromlichtnetze höchstens mit 220 V. arbeiten und für Motorantrieb in Dreileiternetzen demnach höchstens 440 V. angewendet wird. Nur für Straßenbahnbetrieb kommt die Spannung von 500 V., seltener 600 oder 800 V. in Frage. Für die wenigen Ausnahmefälle wird man aber eine Batterie, die für 500 V. aus 250 Elementen kleiner Kapazität bestehen muß, ungern um 150 Elemente vermehren, um 800 V. für diese Ausnahmefälle zu erhalten. Die Erhöhung der Unterhaltungskosten wird man deshalb meist vermeiden und dafür lieber die wenigen Zähler über 500 V. bei einem staatlichen Institut eichen lassen oder an Ort und Stelle prüfen.

Um sehr große Stromstärken bei kleinen Spannungen für die Speisung des Hauptstromkreises zu erhalten, richtet man die „Hauptstrombatterie“ meist so ein, daß sich ihre Elemente in mehreren

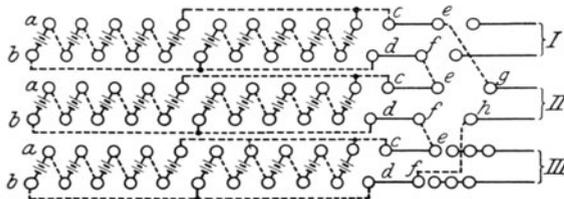


Fig. 4. Batterieschalter der Physik.-Techn. Reichsanstalt.

Gruppen auf verschieden hohe Spannungen schalten lassen. Eine mustergültige Anordnung ist die der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt; ihr Schaltbild für eine bestimmte Schaltung ist in Fig. 4, ihre Ausführung in Fig. 5 dargestellt. Zwischen den fest aufmontierten Quecksilbernäpfen *a* und *b* jeder der drei Reihen liegen 4 V. Die ausgezogenen Linien stellen feste Verbindungen zwischen den Näpfen *c*, *e* und *d*, *f* vor. Durch vier verschiedene Einsatztafeln können die Elemente so zu Gruppen geschaltet werden, daß an den Näpfen *c*, *d* jeder Reihe eine Spannung von 4 oder 8 oder 20 oder 40 V. herrscht. Die in Fig. 5 dargestellte Einsatztafel schaltet z. B. auf die Näpfe *c*, *d* 20 V., wie durch die punktierten Linien der Fig. 4 angedeutet ist. In Fig. 5 sind über der langen Einsatztafel noch zwei kleine Einsatztafeln zu sehen; deren Schaltstifte greifen durch die Schaltlöcher der langen Einsatztafel hindurch und schalten die drei Reihen entweder parallel (20 V.) oder hintereinander (60 V.), indem sie die Näpfe *e*, *f* mit den Näpfen *g*, *h* in entsprechender Folge verbinden. In Fig. 4 ist z. B. die Hintereinanderschaltung durch punktierte Linien angedeutet, wodurch nach der zum Arbeitsplatz führenden Leitung II die Spannung von 60 V. geschaltet wird. Durch andere lange Einsatz-

tafeln in Verbindung mit den beiden abgebildeten kleinen Einsatztafeln können auf die Leitung II die Spannungen 4 oder 12, 8 oder 24, 40 oder 120 V. geschaltet werden, so daß also im ganzen folgende Spannungen möglich sind: 4, 8, 12, 20, 24, 30, 40, 60, 120 V.

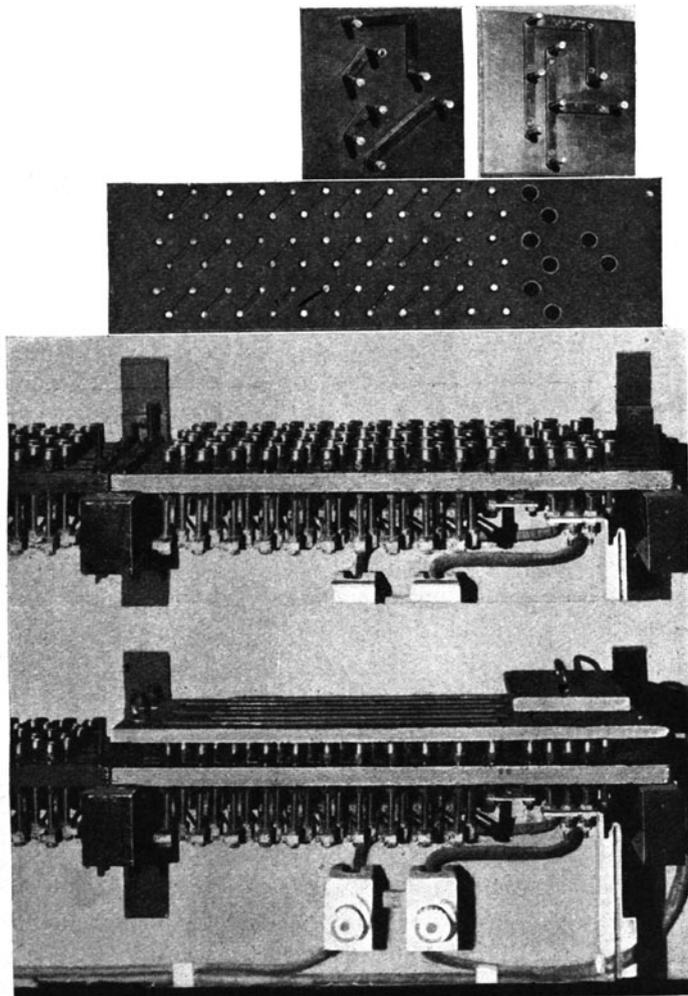


Fig. 5. Batterieschalter der Physik.-Techn. Reichsanstalt.

Die Einsatztafeln sind ferner so eingerichtet, daß auf Leitung I, die auch als Ladeleitung benutzt wird, nur 120 V. geschaltet werden kann, auf Leitung III, die aus besonders starken Kabeln besteht, nur 4 oder 8 V. Wir wollen uns mit dieser Darstellung des Prinzips begnügen, da eine nähere Beschreibung des sehr vielseitigen Schalters zu weit führen würde.

Die Elemente der Batterie sind für 27 A. Entladestromstärke bei 3 Stunden Entladedauer bemessen, so daß also bei 4 V. ein Strom von 810 A. 3 Stunden lang entnommen werden kann. Diese Entladestromstärke wird meist genügen. Für Eichräume, wo Zähler besonders hoher Stromstärken für Straßenbahn- oder Batteriebetrieb zu eichen sind, wird man entweder mehrere Batterien der beschriebenen Art parallel schalten oder wenige Elemente sehr hoher Entladestromstärke wählen. Die letztere Einrichtung bringt jedoch den Nachteil mit sich, daß man besondere Lademaschinen aufstellen muß und nicht mit der meist zur Verfügung stehenden Spannung von 120 V. laden kann.

Gleichstromgeneratoren. In Ausnahmefällen, wenn man sehr hohe Spannungen und sehr große Ströme braucht, ist es zweckmäßig, anstelle der Batterien Generatoren zu verwenden. Die Unterhaltungskosten werden zwar geringer, der Betrieb derartiger abnormaler Generatoren hat jedoch manche Schattenseiten. Vor allem wird die Stromstärke nie die gleiche Konstanz haben, wie bei einer Batterie.

Für Laboratoriumszwecke hat man schon seit längerer Zeit normale Gleichstrommaschinen kleiner Leistung für Spannungen bis etwa 1000 V. besessen. Wollte man höhere Spannungen haben, so schaltete man mehrere solcher Maschinen hintereinander; zu beachten ist dabei natürlich, daß jede einzelne Maschine für die Gesamtspannung aller Maschinen gegen Erde isoliert sein muß. Ein einziger Maschinensatz, der 10000 V. liefert, ist neuerdings von der Allgemeinen Elektrizitätsgesellschaft hergestellt worden¹⁾. Er besteht aus zwei Generatoren zu je 5000 V., deren jeder zwei Kollektoren hat. Die Isolation der Wicklung ist so gewählt, daß zwischen Wicklung und Gehäuse dauernd eine Spannung von 10000 V. bestehen darf.

Für hohe Ströme kommen nur Unipolarmaschinen in Frage²⁾. Diese können bei einer Klemmenspannung von 6 V. verhältnismäßig leicht für Stromstärken bis 10000 A. gebaut werden. Es ist dem Verfasser nicht bekannt, ob solche Generatoren für Laboratoriumszwecke verwendet wurden und ob sie sich bewährt haben.

Gleichrichter. Quecksilberdampfgleichrichter kann man direkt an ein Wechselstrom- oder Drehstromnetz anschließen; sie arbeiten ohne jede Wartung und sind jederzeit betriebsfertig. Der Gleichrichter eignet sich aber nur als Ersatz für die Hochspannungsbatterie, da sein Wirkungsgrad um so besser wird, je höher die angewendete Spannung ist. Für große Ströme bei kleinen Spannungen kann man ihn schlecht verwenden, weil der Anodenabfall 13 V. ist, so daß man unter Spannungen von 50 V. nicht heruntergehen kann. Der vom Gleichrichter gelieferte

¹⁾ H. Linke, E. T. Z. 1915, S. 549.

²⁾ Z. B.: E. Noeggerath, El. Kraftbetr. u. Bahnen 1908, S. 563.

Strom ist allerdings kein reiner Gleichstrom, sondern es sind ihm infolge der Zusammensetzung aus den Wechselstromwellen Wechselströme kleiner Frequenz überlagert. Immerhin wird die Verwendung des Gleichstroms aus Gleichrichtern zu Störungen bei der Messung kaum Anlaß geben.

Zur Erzeugung von sehr hohen Gleichspannungen kleiner Stromstärke aus niedergespanntem Wechselstrom hat Schenkel¹⁾ eine Schaltung von Kondensatoren und Vakuumventilröhren angegeben, die sich vielleicht für manche Zwecke gut eignen wird.

Kleine mechanische Gleichrichter kommen für Meßzwecke kaum in Frage, man wird sie wohl nur zum Laden der Meßbatterie verwenden.

Wechselstromgeneratoren. Ein Generator. Benutzt man als Stromquelle die Netzleitung oder hat man nur einen Generator zur Verfügung, so kann man die verschiedenen zur Eichung erforderlichen Belastungen durch verschiedenartige Stromverbraucher herstellen. Bei dieser Art der Belastung ist der Energieverbrauch sehr hoch; man wird sie deshalb nur dort anwenden, wo dies unbedingt notwendig ist, z. B. bei Prüfungen am Installationsort oder dann, wenn es sich um die Eichung von Zählern für kleine Spannungen und Stromstärken (etwa bis 220 V. und 5 A.) handelt. Bei Zählern höherer Spannungen und Stromstärken wird man von der einen Stromquelle zwei Stromkreise abzweigen und mittels Transformatoren den Spannungskreis und den Hauptstromkreis des Zählers getrennt speisen. Jede Regulierung in einem der beiden Stromkreise beeinflußt dabei den andern. Man muß für jede Belastung eine vollständig neue Einstellung vornehmen. Wie lästig dies vor allem bei Drehstrommessungen ist, weiß jedermann, der einmal auf diese primitive Art und Weise hat arbeiten müssen²⁾.

Doppelgenerator. Um ein bequemerer Arbeiten zu haben, benutzt man meist zwei getrennte Generatoren, die beide von einem Gleichstrommotor angetrieben werden. Der Gleichstrommotor wird von einer Akkumulatorenbatterie gespeist, damit man während der Messung möglichst konstante Verhältnisse hat. Hat man keine Akkumulatorenbatterie zur Verfügung, so muß man sich damit begnügen, an ihrer Stelle die Netzleitung als Stromquelle für einen Gleich- oder Wechselstromantriebsmotor zu benutzen und eventuell durch Hilfsmittel dafür zu sorgen, daß der Einfluß der Spannungsschwankungen des Netzes möglichst vermindert wird. Die Regulierung des Antriebsmotors wird in bekannter Weise vorgenommen. Man kann mit einer solchen Einrichtung ohne weiteres mit getrennten Strom- und Spannungskreisen arbeiten.

In Laboratorien und Eichräumen hat sich die Doppelmaschine

¹⁾ E. T. Z. 1919, S. 333.

²⁾ Vgl. auch Orlich, E.T.Z. 1901, S. 94.

am meisten eingeführt, die in Fig. 6 abgebildet ist¹⁾. Von einem Nebenschlußmotor, den man rechts sieht, werden zwei Wechselstromgeneratoren durch eine starre oder durch eine Lederband-Kuppelung angetrieben. Die Erregungen beider Maschinen können in weiten Grenzen geregelt werden. Die eine Maschine ist ganz normal gebaut, bei der zweiten Maschine kann der Stator vermittle eines an seinem Umfange angebrachten Zahnkranzes und einer in diesen eingreifenden Schnecke um die Drehachse der Maschine gedreht werden. Man erreicht dadurch, daß der Stator der zweiten Maschine gegenüber dem Stator der ersten Maschine beliebig räum-

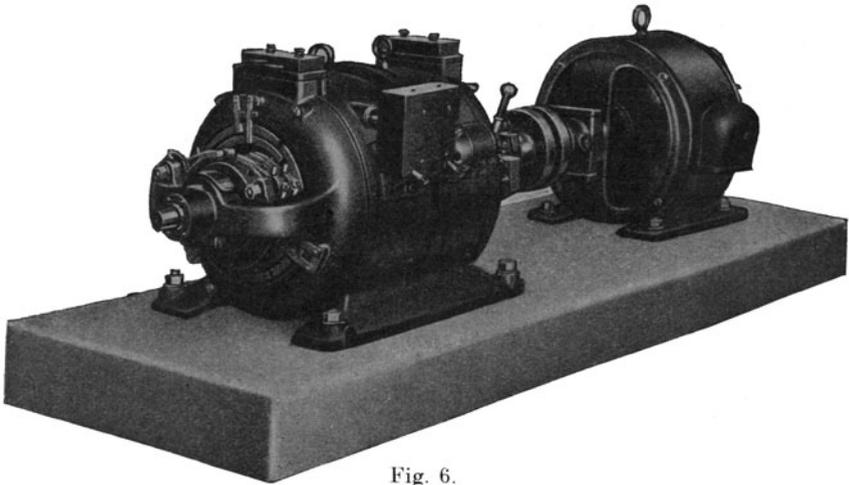


Fig. 6.
Doppelgenerator der Siemens-Schuckert-Werke.

lich verschoben werden kann. Diese räumliche Verschiebung bedingt eine zeitliche Verschiebung der den Generatoren entnommenen Ströme. Da man nicht immer an dem Generator selbst nachsehen kann, ob der Strom des einen oder anderen Generators vor- oder nachheilt, so muß man die Vor- oder Nachheilung mit Hilfe der unter III, 3c (S. 47) beschriebenen Methode bestimmen.

Wir kehren nunmehr zur Betrachtung des Doppelgenerators zurück. Die Schnecke, mit der der drehbare Stator bewegt wird, wird meist von einem kleinen Elektromotor betrieben, der durch

¹⁾ Die Doppelmaschine wurde zuerst nach Angaben der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt von den Siemens-Schuckertwerken gebaut und zu gleicher Zeit von der Union-Elektrizitäts-Gesellschaft im Jahre 1901 entwickelt, vgl. E.T.Z. 1902, S. 776, 1909, S. 436. Eine kleine Doppelmaschine von etwa 0,5 kW Leistung mit stehender Welle ist von der Elektrotechnischen Fabrik Hans Boas konstruiert worden; sie ist bequem zu transportieren, so daß sie an jede gewünschte Stelle des Eichraums gebracht werden kann.

Fernschaltung vor- und rückwärts bewegt wird, so daß man vom Arbeitsplatze aus die Phasenverschiebung beliebig regeln kann. Die Figuren 7 a und b zeigen zwei Schaltungsschemata für den Fernantrieb der Schnecke mit

einem kleinen Hauptstrom- oder Nebenschlußmotor. Mit Hilfe des Umschalters U kann man die Drehrichtung des Hilfsmotors M wechseln. An dem vom Motor angetriebenen drehbaren Stator sind zwei Ausschaltnasen N angebracht, die die Ausschalter A betätigen und den Antriebsmotor stillsetzen, wenn der begrenzte Weg zurückgelegt ist (in der Figur sind die Ausschaltnasen N auf die Achse des Antriebsmotors, anstatt auf den angetriebenen Sta-

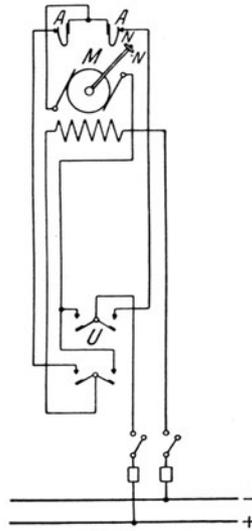


Fig. 7 a.
Schaltungsschema mit
Hauptstrommotor.

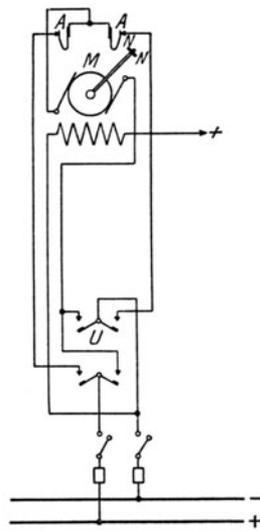


Fig. 7 b.
Schaltungsschema mit
Nebenschlußmotor.

tor aufgesetzt). Bei neueren Maschinen läßt man den Schneckenradkranz um den ganzen Stator herumlaufen und kann somit den Ausschalter sparen. Für die Schalteleitungen ergibt sich daraus noch die Vereinfachung, daß man nur 3 Leitungen anstatt 4 oder 5 braucht. Den Umschalter U richtet man meist so ein, daß man ihn mit einer Schraubzwinde an die Tischplatte des Arbeitsplatzes anklammern kann; ein zweipoliger und ein vier- oder fünfpoliger Stecker sind an den entsprechenden Punkten mit biegsamen Litzen angeschlossen. Die Arbeitsplätze werden mit entsprechenden Steckdosen versehen.

Eine etwas einfachere Ausführung zur Regelung der Phasenverschiebung zwischen zwei von einem Motor angetriebenen Generatoren stellt die Fig. 8 dar¹⁾. Dabei wird nicht der Stator der einen Maschine verdreht, sondern die Welle des Rotors eines der beiden Generatoren gegen die Welle des Rotors des anderen Generators. Die Antriebswelle hat zwei Nuten N_1 , die konaxial zur Drehachse verlaufen, die Achse des zu verstellenden Rotors dagegen zwei schraubenförmige Nuten N_2 . Eine über beide Wellen gesteckte Muffe M trägt Ansätze A , die in diese Nuten eingreifen. Verschiebt man nun die Muffe

¹⁾ Diese Vorrichtung ist im D.R.P. 213522 der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft beschrieben und wurde von Herrn Ciffrinowitsch angegeben.

in Richtung der Achsen, so werden je nach Stellung der Muffe die beiden Rotoren verschiedene räumliche Stellungen zueinander einnehmen, wodurch die zeitliche Phasenverschiebung der Ströme bedingt

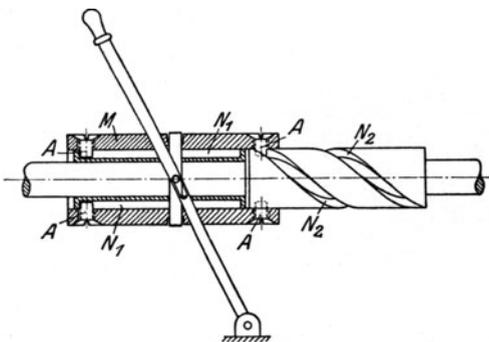


Fig. 8. Verstellvorrichtung für die Wellen eines Doppelgenerators.

wird. Derartige Maschinen sind in größerer Anzahl im Eichraum der Zählerfabrik der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft aufgestellt und haben sich sehr gut bewährt.

Neben der Phasenverschiebung der von beiden Generatoren gelieferten Ströme muß man auch ihre Spannungen regeln können. Durch Zwischenschaltung von Transformatoren, deren

Primärspannung der der Generatoren entspricht, kann man hohe Spannungen bei kleinen Strömen und große Ströme bei niedrigen Spannungen erzeugen, je nach dem für die Eichung benötigten Zwecke. Wenn man früher den einen Generator für großen Strom und kleine Spannung wickelte, so ist man später davon abgegangen, weil man im Transformator ein viel einfacheres Mittel an der Hand hat, die Spannung herunterzusetzen. Außerdem mußte man bei der älteren Ausführung dicke Leitungen benutzen und den Platz für die Eichung in die Nähe des Generators verlegen, um einen allzu großen Spannungsabfall zu vermeiden.

Schließlich muß man für Eichungen mit verschiedenen Frequenzen noch die Tourenzahl des Antriebsmotors ändern können. Braucht man nicht abnormale Frequenzen, so ist dies verhältnismäßig einfach durch Veränderung der Erregung des Antriebsmotors zu erreichen. Will man jedoch bei sehr hoher oder sehr niedriger Frequenz messen, so sind die Grenzen bald gegeben. Nach oben hin ist die Tourenzahl des Motors begrenzt durch die Massenkkräfte, man wird sie selten um mehr als 20% der normalen Tourenzahl steigern können. Will man andererseits eine sehr niedrige Frequenz haben, so wird man z. B. bei einer Maschine, die für eine normale Frequenz 50 gebaut ist, schon auf Schwierigkeiten stoßen, wenn man die Frequenz 25 haben will. Wegen der Erwärmung der Erregerspulen und der Sättigung des Eisens kann man die Tourenzahl meist nicht auf sehr kleine Werte herunterbringen; man wird deshalb Vorschaltwiderstände vor den Anker schalten müssen, um die Ankerspannung zu erniedrigen. Der Motor gibt dann aber sehr wenig Leistung ab und wird die Generatoren nur noch schwer durchziehen, wenn sie einigermaßen belastet sind; auch fängt die

Tourenzahl dabei an zu schwanken. In solchen Fällen wendet man besser einen asynchronen Generator an, wie er im folgenden beschrieben ist.

Asynchroner Generator. Reicht die Regulierung des Antriebsmotors für den Doppelgenerator nicht aus, um die Frequenz in den gewollten Grenzen zu regeln, so muß man zu andern Mitteln greifen. Ein solches ist z. B. ein asynchroner Generator, der mit einem Antriebsmotor gekuppelt wird. Den Stator oder Rotor, welche beide Drehstromwicklungen tragen, speist man mit einem normalen Drehstrom, etwa von der Frequenz 50. Bei Stillstand wirkt der Generator wie ein gewöhnlicher Transformator. Man kann also seiner Sekundärwicklung einen Strom entnehmen, der die gleiche Frequenz hat, wie der Primärstrom. Versetzt man nun aber den Rotor durch den Antriebsmotor in Umdrehung, so steigert sich die Frequenz, wenn die Drehrichtung des Rotors entgegengesetzt der Drehrichtung des Drehfeldes ist. Ist z. B. die Tourenzahl eines vierpolig gewickelten Generators entgegen dem Umlaufsinn des Drehfeldes gleich 1500 und ist die Frequenz des erregenden Drehstroms 50, so erhält man im Sekundärkreis die Frequenz 100. Umgekehrt kann man natürlich bis zur Frequenz 0 heruntergehen, wenn man die Drehrichtung des Rotors gleichsinnig mit der Drehrichtung des Drehfeldes wählt, wobei der Generator als Induktionsmotor arbeitet und durch den Antriebsmotor gebremst werden muß. Allerdings nimmt dann auch die Spannung bis auf 0 ab. Jedoch kann man auch bei kleinen Frequenzen durch Zwischenschalten eines Transformators die gewünschte Spannung erhalten, da die Leistung des Generators nicht mit der Frequenz zu sinken braucht. Anstatt eines Asynchrongenerators kann man natürlich auch zwei Asynchrongeneratoren mit dem Antriebsmotor kuppeln, wodurch man wieder mit getrenntem Strom- und Spannungskreis arbeiten kann. Einen dieser Generatoren kann man mit drehbarem Stator bauen, wie es oben beschrieben ist, so daß man die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung regeln kann. Die Drehstromerregung für beide Generatoren kann man entweder einem vorhandenen Netz oder einem Umformer von gewünschter Leistung entnehmen, dessen Gleichstromseite an eine Akkumulatorenbatterie angeschlossen wird. Es empfiehlt sich nicht, den Antriebsmotor der Doppelmaschine als Umformer zu benutzen, da er bei kleiner Tourenzahl nicht die genügende Leistung hergibt. Ein Maschinensatz der beschriebenen Art ist als Universalmaschine anzusprechen, er ist meines Wissens aber noch nicht gebaut worden.

3. Vorrichtungen zur Regelung des Hauptstromes, der Spannung, der Frequenz und der Phasenverschiebung.

a) Regelung des Hauptstromes. Wie wir schon sahen, kann man bei Wechselstrom eine Regelung des Hauptstromes z. T. durch Rege-

lung der Erregung des entsprechenden Generators erreichen. Dieser Regelung sind aber nach oben und unten Grenzen gesetzt. Man muß deshalb zur Grobregelung entweder Vorschaltwiderstände oder Stufen-
transformatoren benutzen.

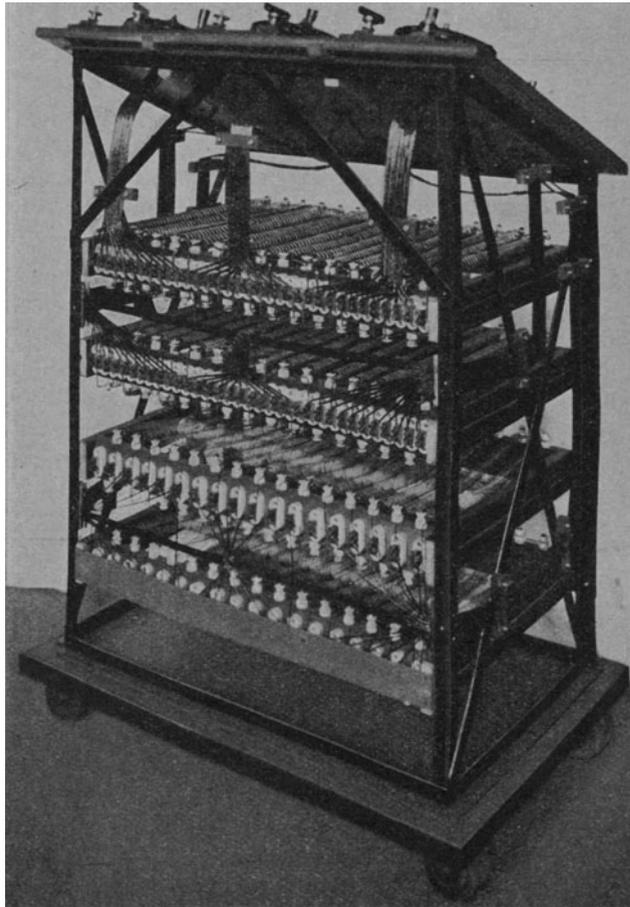


Fig. 9. Regelwiderstand der Physik.-Techn. Reichsanstalt mit 3×3 Gruppen.

Bei Gleichstrom kann man bei Verwendung von Batterien als Stromerzeuger die Grobregelung nur in gewissen Stufen vornehmen, die der Elementspannung entsprechen und die durch die oben beschriebenen umlegbaren Quecksilbernapfschalter vorgenommen werden kann. Alle anderen Regelungen muß man durch Widerstände bewirken.

Belastungswiderstände. Um bei Gleichstrom die Stromstärke genau auf das gewünschte Maß einzustellen, benutzt man vielstufige Regelwiderstände aus Konstantandraht verschiedener Ausführung.

Als vorbildlich ist die Ausführung vielstufiger Widerstände zu bezeichnen, wie sie in Fig. 9 dargestellt ist. Diese bei der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt eingeführten Widerstände haben 3 Gruppen mit je 3 Dekaden von $10 \times 0,1 \Omega$, belastbar bis 40 A., $10 \times 1 \Omega$ bis 15 A., $10 \times 10 \Omega$ bis 7 A. Die Widerstände sind vollkommen offen gebaut, so daß die Belüftung auch bei voller Belastung sehr gut ist. Die Rahmen, auf die die Widerstände aufmontiert sind, können leicht ausgewechselt werden. Parallel geschaltete Schieberwiderstände sorgen für die Feinregelung.

Für große Stromstärken sind frei ausgespannte Bandwiderstände aus Konstantanblech sehr geeignet, weil sie eine große ab-

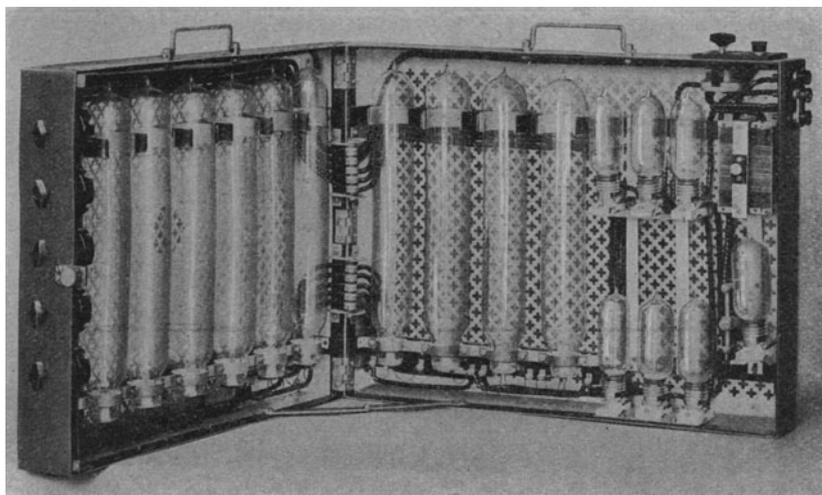


Fig. 10. Belastungswiderstand der A. E. G. aus Eisendrahtwiderständen.

kühlende Oberfläche und sehr kleinen Temperaturkoeffizienten haben. Man kann die Kühlung noch durch Anblasen mit einem Ventilator verbessern, ohne zu starke Schwankungen in der Stromstärke zu erhalten. Für Stromstärken über 1000 A. kommt man auch mit dieser Art von Widerständen nicht mehr aus; dann nimmt man wassergekühlte Konstantanrohre. Will man einen Belastungswiderstand für hohe Stromstärken improvisieren, so kann man auch ein Konstantanband direkt in einen tönernen Wasserkübel legen. Der Widerstand des Wassers ist im Verhältnis zu dem des Bandes so groß, daß er vollkommen außer acht gelassen werden kann. Natürlich muß man dafür sorgen, daß dauernd neues Kühlwasser zufließt.

Bei Wechselstrom wird man zweckmäßig die Regelwiderstände in den Primärkreis des Transformators legen und den Sekundärkreis direkt an den zu prüfenden Hauptstromkreis des Zählers anschließen.

Man hat dann die Bequemlichkeit, daß man nur verhältnismäßig kleine Ströme und niedrige Spannungen zu schalten hat, also Stufenwiderstände oder Schieberwiderstände nehmen kann.

Für Eichungen an Ort und Stelle, oder allgemein in solchen Fällen, wo man nicht mit getrenntem Hauptstrom- und Spannungskreis arbeiten kann, hat man Belastungswiderstände konstruiert, die man besonders stark überlasten kann. Bei den von Schniewindt hergestellten Gitterwiderständen, deren Widerstandsdrähte durch Asbestgewebe durchgezogen oder mit ihnen „verwebt“ sind, kommt zur Abführung der Wärme die Konvektion in Frage, bei den Lampenbatterien und den Eisendrahtwiderständen (Variatoren) wird die erzeugte Wärme außerdem noch durch Strahlung abgeführt. Die Eisendrahtwiderstände haben ferner noch den Vorteil, daß der von ihnen aufgenommene Strom innerhalb großer Spannungsschwankungen konstant bleibt (vgl. Fig. 14 Seite 25). Fig. 10 zeigt einen solchen Eisendrahtbelastungswiderstand der A.E.G. nach Angabe von Kallmann¹⁾. Alle diese Belastungswiderstände müssen nach denselben Grundsätzen gebaut werden, wie die elektrischen Heizkörper für Öfen.

Transformatoren. Wie schon oben gesagt wurde, wird bei Wechselstrom, wenn man mit getrenntem Hauptstrom- und Spannungskreis arbeitet, die Feinregelung in den Primärkreis verlegt.

Die Grobregelung erzielt man meist durch verschiedene Schaltungen der unterteilten Sekundärwicklung des Transformators. Auch Autotransformatoren wendet man an, bei denen die den hohen Strom führenden Windungen entsprechend stark dimensioniert werden. Will man die Möglichkeit haben, Zähler sehr verschiedener Stromstärken zu eichen, so kommt man mit einem umschaltbaren Transformator nicht aus, man muß mehrere mit verschiedenen Sekundär-

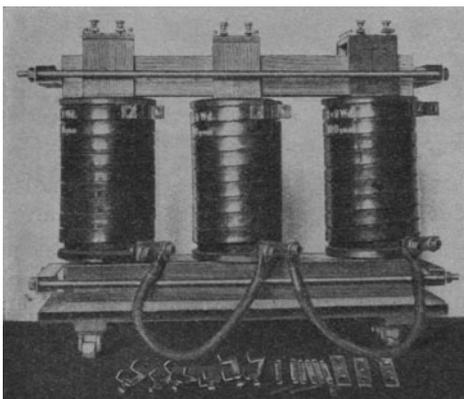


Fig. 11. Transformator der Physik.-Techn. Reichsanstalt für hohen Strom.

wicklungen oder einen solchen mit auswechselbaren Sekundärwicklungen zur Verfügung haben. Derartige Transformatoren wurden in der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt ausgeführt. Sie sind in Fig. 11 abgebildet. Die Primärspulen sind vierfach unterteilt und lassen sich

¹⁾ Vgl. E.T.Z. 1906, S. 45.

für vier verschiedene Spannungen schalten. Nach ähnlichen Grundsätzen gebaute Transformatoren sind auch im Handel zu haben.

Ob man bei Drehstrommessungen drei einzelne Transformatoren oder einen Drehstromtransformator verwendet, kommt praktisch auf das gleiche hinaus. In beiden Fällen beeinflußt man bei der Regelung einer Phase die andere; bei einiger Übung gewöhnt man sich jedoch bald an die Abgleichung aller drei Ströme auf den gleichen Betrag.

Transformator mit Kraftflußregelung. Eine spezielle Ausführung eines Transformators für Laboratoriumszwecke stellt der Transformator mit Kraftflußregelung dar, dessen Schaltung schematisch in Fig. 12 und dessen Ausführung in Fig. 13 dargestellt ist¹⁾.

Die Sekundärwicklung des Transformators von geringer Windungszahl ist stark dimensioniert; sie speist den Hauptstromkreis des Zählers. Die Primärwicklung besteht aus einer festen Wicklung und einer regelbaren Wicklung, die von einem Kern des Transformators auf den andern abgewickelt werden kann. Die regelbare Wicklung hat dieselbe Windungszahl wie die feste Wicklung; ist die regelbare Wicklung auf den einen Kern des Transformators aufgewickelt, so erzeugt sie einen Kraftfluß in gleichem

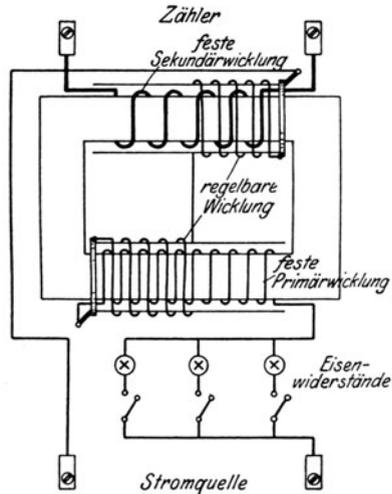


Fig. 12. Schaltungsschema des Transformators mit Kraftflußregelung.

Sinne wie die feste Wicklung. Wickelt man sie jedoch zum Teil oder vollständig auf den andern Kern auf, so erzeugt sie bei richtiger Wahl des Wicklungssinnes einen Kraftfluß, der dem von der festen Wicklung erzeugten entgegenwirkt. Hat man z. B. die ganze regelbare Wicklung abgewickelt, so hebt der von der regelbaren Wicklung erzeugte Fluß den von der festen Wicklung erzeugten vollkommen auf. Man kann also den Kraftfluß von einem Maximum bis auf Null kontinuierlich ohne jeden Sprung verändern. Damit ändert sich natürlich auch die Sekundärspannung kontinuierlich von einem Maximum bis auf Null.

In Fig. 13 ist die feste Sekundär- und die feste Primärschleife nicht sichtbar, sondern nur die regelbare; auf jedem der beiden Schenkel des Transformators ist eine drehbare Spulenhülse angebracht, auf der in der Figur sichtbare bewegliche Teil der Primärwicklung auf-

¹⁾ Vgl. D.R.P. 266780 und 292718. Ausführung der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft.

gewickelt werden kann. Die Enden der beweglichen Primärwicklung sind mit zwei rechts in Fig. 13 sichtbaren Ringen aus Manganin- oder Konstantanblech verbunden, welche so dimensioniert sind, daß die in ihnen induzierten Ströme zusammen mit dem Primärstrom keine unzulässige Erwärmung ergeben. Der Strom wird den beiden Ringen durch Kohlenbürsten zugeführt. Um nun die bewegliche Wicklung von einer Spule auf die andere zu wickeln, können die

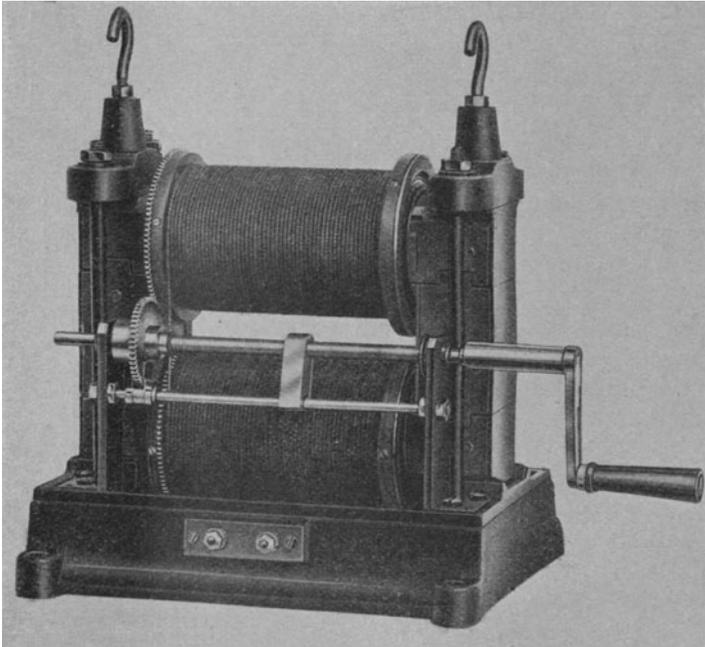


Fig. 13. Transformator mit Kraftflußregelung.

Spulenkerns vermittels der auf den Spulenflanschen angebrachten Zahnräder und eines mit der Kurbel verbundenen Zahntriebes angetrieben worden. Die Nabe des Zahntriebes besitzt eine schraubenförmige Nut und kann frei auf der Kurbelwelle gleiten. In die Nut faßt ein auf der (festgelagerten) Kurbelwelle angebrachter Stift ein. Dreht man nun die Kurbel links herum, so rutscht der Trieb so weit auf der Welle nach links, daß er in das Zahnrad der oberen drehbaren Spule eingreift, und die Wicklung auf diese aufgewickelt wird. Dreht man die Kurbelwelle nach rechts herum, so rutscht der Zahntrieb nach rechts und treibt das untere gegen das obere um einen gewissen Betrag versetzte Zahnrad an. Durch die Vorrichtung erreicht man, daß die als Litze ausgebildete bewegliche Wicklung stramm bleibt und sich glatt auf ihre Spulenhülse aufwickelt.

Würde man nun die Primärwicklung an eine konstante Spannung anschließen, so würde der Magnetisierungsstrom immer höher ansteigen, je mehr Windungen der beweglichen Spule denjenigen der festen Spule entgegengeschaltet sind. Sind alle Windungen entgegengeschaltet, so würde der Strom nur durch den Ohmschen Widerstand der Primärwicklung begrenzt werden. Die Stromaufnahme und damit die Erwärmung würde dabei viel zu groß sein. Zur Begrenzung des Stromes sind deshalb in der Anordnung der Fig. 12 vor die Primärwicklung Eisenwiderstände geschaltet, die bekanntlich eine

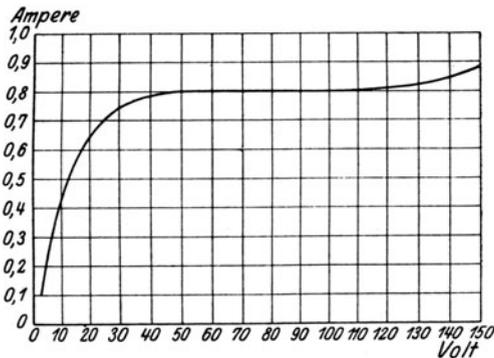


Fig. 14. Charakteristik eines Eisendrahtwiderstandes.

Charakteristik haben, wie sie Fig. 14 zeigt. Die Eisenwiderstände können gruppenweise ein- und ausgeschaltet werden, so daß man mit ihnen eine stufenweise Grobregelung vornehmen kann. Primär- und Sekundärstrom sind bei allen Stellungen der regelbaren Spule praktisch um genau 180° gegeneinander verschoben.

Der beschriebene Regeltransformator bringt noch den Vorteil mit sich, daß die Belastung der Stromquelle bei jeder beliebigen sekundären Stromentnahme konstant bleibt, da die Eisenwiderstände den Primärstrom fast auf konstanter Stärke halten. Dies gilt natürlich nur so lange, als man die Gruppenschaltung für die Eisenwiderstände nicht ändert.

b) Regelung der Spannung. Bei Gleichstrom regelt man die Spannung einer Spannungsbatterie in groben Stufen durch den Zellenwechsler, mit dem man einzelne Elemente oder Elementgruppen zu- oder abschaltet. Die Feinregelung übernehmen Schieberwiderstände oder fein unterteilte Kurbelwiderstände.

Bei Wechselstrom wird man umschaltbare Transformatoren verwenden, von denen Fig. 15 eine Ausführung zeigt, die sich in der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt gut bewährt hat. Sowohl die Primär- als auch die Sekundärspulen sind vierfach unterteilt und können für vier Spannungen geschaltet werden. Für die Feinregelung sorgen Schieberwiderstände oder fein unterteilte Kurbelwiderstände. Man kann aber auch ohne Widerstände auskommen, wenn man Regeltransformatoren verwendet. Einen sehr einfachen und doch vielseitigen Regeltransformator für Drehstrom, den die A.E.G. herstellt, zeigt Fig. 16. Durch einen Steckschalter kann man die Se-

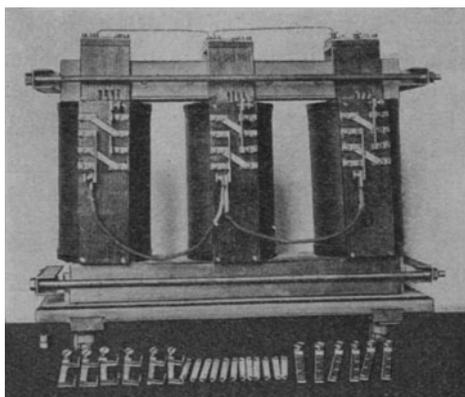


Fig. 15. Umschaltbarer Spannungstransformator der Physik.-Techn. Reichsanstalt.

abschalten und erhält eine außerordentlich feine Regelung. Bei normalem Kraftfluß erstreckt sich die Feinregelung über 70 %, so daß die Stufen der Grobschaltung reichlich ausgefüllt werden. Die Ströme, die in den von den Kohlebürsten kurzgeschlossenen Windungen fließen, führen zu keiner unzulässigen Erwärmung.

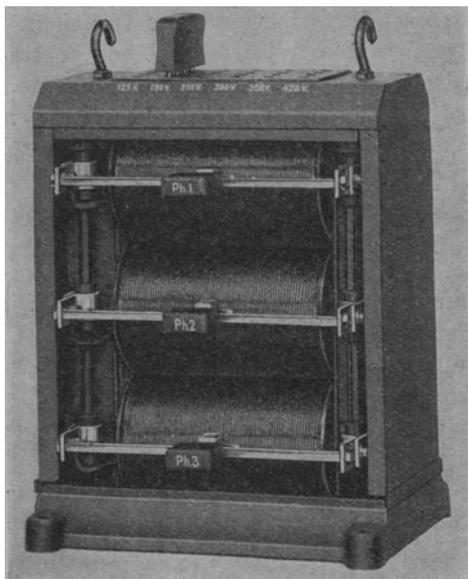


Fig. 16. Drehstrom-Regeltransformator der A.E.G.

kundärwicklung in Stufen schalten, so daß man bei normaler Primärspannung an den Sekundärklemmen die Spannungen 125, 150, 250, 300, 350 und 420 V. erhält. Auf den Sekundärspulen liegt als oberste Lage ein ziemlich starker Draht, der an einer Stelle des Spulenumfangs von der Isolation befreit ist. Auf diesen blanken Drähten schleifen Kohlebürsten, die als Stromabnehmer dienen. Mit ihnen kann man Windung um Windung zu- und

Für Einphasenwechselstrom werden diese Transformatoren in genau gleicher Weise hergestellt.

Einen Regeltransformator der Siemens-Schuckert-Werke zeigt Fig. 17.

Hat man einen Doppelgenerator zur Verfügung, so braucht man natürlich keinen Regeltransformator mit Feinregelung; man kommt dann mit einem Transformator mit unterteilter Sekundärwicklung aus (vgl. die Ausführung der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt Fig. 15.) Die Feinregelung erreicht man durch Änderung der Erregung des Spannungsgenerators. Legt man bei Mehrphasenmessungen Wert darauf, daß alle

Phasenspannungen untereinander gleich sind, so muß man zur Abgleichung noch Widerstände einschalten.

c) **Regelung der Frequenz.** Über die Regelung der Frequenz ist schon oben bei der Beschreibung des Doppelgenerators und des asynchronen Generators (Seite 18) fast alles gesagt worden. Ruhende Frequenzwandler kommen für den vorliegenden Zweck nicht in Frage. Nur noch einige weniger gebräuchliche Einrichtungen sollen der Vollständigkeit halber erwähnt werden.

Polumschaltbarer Generator. Bei jedem Wechselstromgenerator ist bei konstanter Drehzahl die Frequenz umgekehrt proportional der Polzahl der Erregerwicklung. Richtet man den Generator so ein, daß man seine Polzahl verändern kann, macht man ihn „polumschaltbar“, so kann man bei 3000 Umdrehungen in der Minute z. B. $50, 33\frac{1}{3}, 25, 16\frac{2}{3}$ P/sek herstellen, wenn man ihn mit 24 Polen versieht, die man in entsprechenden Gruppen schaltet. Eine normale Maschine kann man dazu nicht benutzen, man muß die Erregerwicklung auf einem Nutenanker aufbringen. Über zwei- bis dreifache Pol-

umschaltung wird man aber kaum hinausgehen, weil die Wicklungsanordnung und die Schaltvorrichtungen dann viel zu kompliziert werden und man auch schwerlich für alle Schaltungen eine gute Kurvenform erhalten kann. Wegen dieser Schwierigkeiten sieht man meistens von der Benutzung derartiger Maschinen ab.

Gebremster Asynchronmotor. Dem Schleifringanker eines Asynchronmotors kann man bei stillstehendem Rotor einen Strom entnehmen, der die gleiche Frequenz hat, wie der dem Stator zugeführte Strom. Bei laufendem Motor dagegen ist die Rotorfrequenz sehr klein; sie entspricht der Schlüpfung. Brems man nun den Rotor langsam durch eine Bremsvorrichtung, so kann man ihm

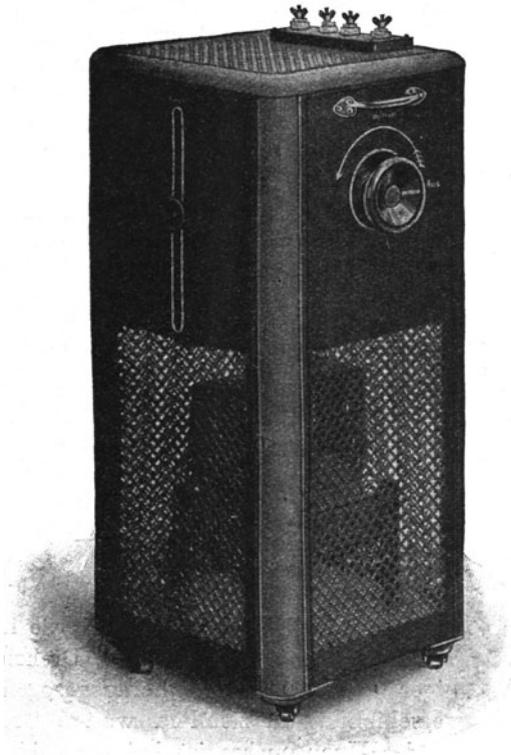


Fig. 17. Wechselstrom-Regeltransformator der Siemens-Schuckert-Werke.

Ströme beliebiger Frequenz entnehmen bis zum Höchstwert, der der Statorfrequenz entspricht. Praktisch kann man jedoch nicht sehr weit mit der Frequenz heruntergehen, weil auch die Spannung am Rotor mit der Frequenz abnimmt. Immerhin kann man bis zu 40 und 30 P/sek herunterregeln, wenn man 50 P/sek Statorfrequenz hat. Ein Nachteil dieser Methode ist, daß man dabei die abgebremste Arbeit vollständig nutzlos vernichtet; auch ist es nicht einfach, den Motor so gleichmäßig zu bremsen, daß man keine starken Frequenzschwankungen erhält. Man wird deshalb das Verfahren nur im Notfall anwenden und nur kleine Motoren dazu benutzen.

d) Regelung der Phasenverschiebung. Doppelgenerator. In solchen Laboratorien und Eichstationen, wo man Doppelgeneratoren der oben (Seite 15) beschriebenen Ausführung zur Verfügung hat, ist die Regelung der Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung ohne weiteres gegeben. Anders verhält es sich, wenn man als Stromquelle nur einen Generator oder ein vorhandenes Leitungsnetz benutzen muß; dann kommen die im folgenden beschriebenen Apparate zur Anwendung.

Drosselspulen. In Ein- oder Mehrphasennetzen kann man die Phase der Spannung gegen die des Hauptstromes ändern, wenn man, wie dies am einfachsten ist, in den Spannungskreis eine Selbstinduktion schaltet. Es ist damit natürlich der Übelstand verbunden, daß man mit der Veränderung der Phase auch die Größe der Spannung ändert. Man muß also nach jedesmaliger Veränderung der Phase die Spannung mit Widerständen nachregulieren. Bei den gebräuchlichen Drosselspulen sind die Kerne mit dem oberen Teil des Joches verbunden und können durch Drehen einer Spindel mehr oder weniger aus den Spulen herausgezogen werden, wodurch die Phasenverschiebung in ziemlich weiten Grenzen ($\cos \varphi$ bis 0,3) geändert wird. Unangenehm ist bei derartigen Drosseln, daß der Eisenkern infolge der wechselnden Magnetisierung des Eisens in Schwingungen gerät und stark brummt, wenn man nicht besondere Mittel anwendet, um diese zu dämpfen. Am einfachsten hilft man sich meist dadurch, daß man nach jedesmaliger Einstellung den beweglichen Kern mittels Holzkeilen festklemmt.

Vollständig verhindert wird das Brummen bei einer Drosselspule mit Kraftflußregelung, die genau nach demselben Prinzip gebaut ist, wie der auf Seite 23 beschriebene und in Fig. 12 und 13 abgebildete Transformator mit Kraftflußregelung. Will man diese Drossel für Drehstromschaltung verwenden, so muß man drei getrennte Apparate nehmen; dadurch hat man andererseits den Vorteil, daß man in jedem Zweig die gewünschte Phasenverschiebung getrennt einstellen kann.

Laufender Einphasenmotor. Will man Einphasenzähler für sehr weite Grenzwerte der Phasenverschiebung eichen, so genügen

Drosselspulen nicht mehr. Man hat dann in einem Asynchronmotor mit Drehstromwicklung auf dem Stator und beliebiger Wicklung, auch Kurzschlußwicklung auf dem Rotor, ein einfaches Mittel zur Herstellung beliebiger Phasen. Diesen Motor läßt man als Einphasenmotor mit Hilfswicklung anlaufen; beim Lauf bildet sich bekanntlich durch die Rückwirkung des Rotorfeldes auf die Statorwicklung in dieser ein fast symmetrisches Drehfeld aus, wenn man die Statorwicklung in Stern schaltet. An einem solchen Motor von der Nennleistung 1 kW. wurden z. B. die drei verketteten Spannungen bei einer symmetrischen Belastung von 0,5 A. pro Phase gemessen zu 188 V., 171 V., 165 V.

Um die Phasenverschiebung kontinuierlich regeln zu können, verwendet man zweckmäßig die in Fig. 18a dargestellte Schaltung¹⁾. An den Klemmen 1 und 2 der Statorwicklung des Drehstrommotors liegt die Spannung der Einphasenstromquelle, zwischen 1 und 3 und 2 und 3 sind Widerstände r_1 und r_2 eingeschaltet, auf denen die Schieber s_1 und s_2 verschoben werden können. Steht in der Fig. 18a der Schieber s_1 oben und s_2 unten, so eilt mit einer Spannung von der gleichen Phase wie die Netzspannung. Stehen beide Schieber unten, so eilt die Eichspannung um 120° gegen die Netzspannung vor, entsprechend der Spannung 2—3 im zeitlichen Diagramm der Fig. 18b.

Stehen umgekehrt beide Schieber oben, so eilt die Eichspannung der Netzspannung um 120° nach, entsprechend 3—1 im Diagramm Fig. 18b. Durch verschiedene Stellungen der Schieber kann man beliebige Vor- und Nacheilungen zwischen den beiden Grenzwerten einstellen.

Ruhender Drehstrommotor. Hat man Drehstrom zur Verfügung, so kann man einen auf Stator und Rotor mit Wicklung versehenen Drehstrommotor benutzen, wie er in Fig. 19 abgebildet

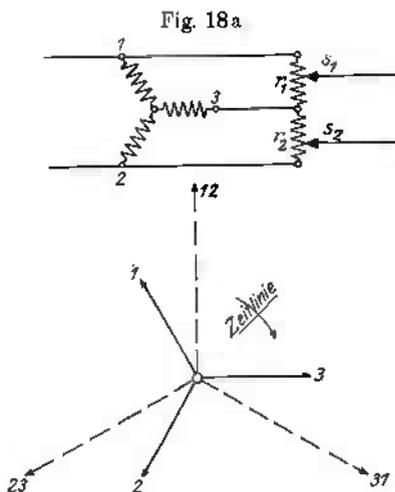


Fig. 18b
 Laufender Einphasenmotor als Phasenschieber.
 a) Schaltung. b) Diagramm.

¹⁾ Die Fig. ist dem Buche von H. W. L. Brückmann, Elektrizitätszähler für Gleich-, Wechsel- und Drehstrom, Leipzig, bei Leiner 1914, S. 180, entnommen

ist. Der Rotor dieses Drehstrommotors ist mit Schleifringen versehen und meistens so gewickelt, daß er im Ruhezustand wie ein

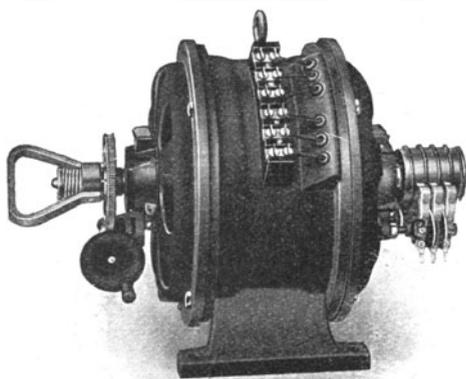


Fig. 19. Ruhender Drehstrommotor als Phasenschieber (Siemens-Schuckert-Werke).

Transformator vom Übersetzungsverhältnis 1 zu 1 arbeitet. Auf seiner Welle sitzt ein Schneckenrad, in welches eine mit Handrad versehene Schnecke eingreift. Da die Schnecke selbsthemmend ist, kann sich der Rotor nicht drehen; verstellt man nun den Rotor durch Drehen des Handrades gegenüber dem Stator, so werden in seiner Wicklung Spannungen induziert, die sich durch die Einwirkung des Statorfeldes auf die Rotorwicklung je nach Stellung

des Rotors in ihrer Phase ändern. Die Symmetrie der drei Spannungen bleibt dabei immer erhalten; man kann einen solchen Phasenschieber natürlich ebensogut für die Eichung von Einphasen- als auch von Mehrphasenzählern verwenden. Der Phasenschieber handhabt sich sehr bequem, auch ändert sich bei Veränderung der Phase die Größe der Spannung nur um ein Geringes. Ein Brummen ist nicht ganz zu vermeiden, weil die Schnecke nie ganz ohne toten Gang in das Schneckenrad eingreift.

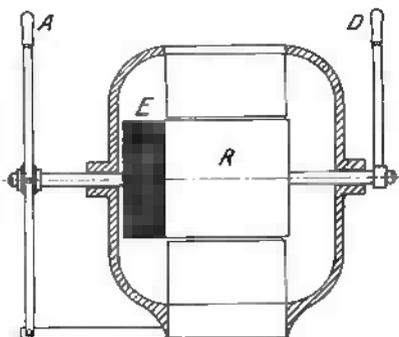


Fig. 20. Ruhender Drehstrommotor mit Spannungsregelung.

des Rotors in ihrer Phase ändern. Die Symmetrie der drei Spannungen bleibt dabei immer erhalten; man kann einen solchen Phasenschieber natürlich ebensogut für die Eichung von Einphasen- als auch von Mehrphasenzählern verwenden. Der Phasenschieber handhabt sich sehr bequem, auch ändert sich bei Veränderung der Phase die Größe der Spannung nur um ein Geringes. Ein Brummen ist nicht ganz zu vermeiden, weil die Schnecke nie ganz ohne toten Gang in das Schneckenrad eingreift.

durch axiale Verschiebung die Spannung. Die lästige Nachregelung der Spannung durch besondere Widerstände fällt dann vollkommen weg.

¹⁾ Die Figur ist dem D.R.G.M. 508524 entnommen. Die Einrichtung wurde von Herrn Ciffrinowitsch angegeben. Ausgeführt wird dieser Phasenschieber von der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft.

Zyklische Vertauschung für Grobregelung. Mit einem Schalter nach Fig. 21¹⁾ kann man bei Drehstrom die Phasen zyklisch vertauschen, ohne daß sich der Drehsinn ändert. In unserer Figur treten z. B. die drei Leitungen mit der Phasenfolge 1 2 3 in den Schalter ein und verlassen ihn in der Folge 3 1 2; bei den anderen beiden Stellungen erhält man die Phasenfolge 2 3 1 und 1 2 3 für die austretenden Leitungen. Die Grobregelung geht in Sprüngen von 120° Vor- oder Nacheilung vor sich. Kann man noch die Stromrichtung umschalten (etwa durch Umschalten der Erregung des Generators), so kann man die Sprünge auf 60° verkleinern.

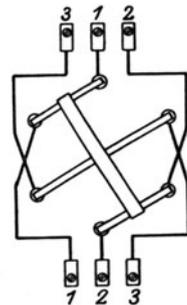


Fig. 21. Schalter für zyklische Vertauschung der Phasen.

Ringtransformator mit Schleifbürsten. Ein früher oft verwendeter Phasenschieber ist in Fig. 22 abgebildet²⁾. Er setzt voraus, daß man Drehstrom zur Verfügung hat und eignet sich nur für Einphasenmessungen. Ein Ring aus unterteiltem Eisen ist mit gleichmäßig verteilten Windungen bewickelt, die an die Lamellen einer kollektorähnlichen Kontaktbahn angeschlossen sind. Auf dieser schleifen

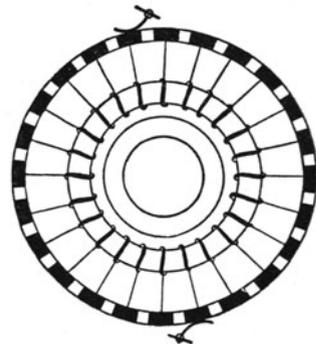


Fig. 22. Ringtransformator mit Kollektor und Schleifbürsten.

zwei diametral einander gegenüberstehende Bürsten, die an einem doppelarmigen Hebel isoliert befestigt sind. Die Wicklung ist mit drei festen Punkten an die Drehstromquelle angeschlossen. Das Drehfeld und mit ihm das Maximum der induzierten Spannung wandert um den Ring mit der Geschwindigkeit der Frequenz des Drehstromes. Je nach der räumlichen Stellung der Bürsten wird deshalb das Maximum zu verschiedenen Zeiten an den Abnahmestellen der Bürsten vorhanden sein. Die Phase des mit den Bürsten entnommenen Stromes ändert sich also je nach der Änderung der Bürstenstellung.

Um den magnetischen Widerstand für die Ringwicklung zu verkleinern, ordnet Wilkens noch einen zweiten Eisenring im Innern der Wicklung an. Anstatt eine Kontaktbahn vorzusehen, kann man auch die einzelnen Wicklungen am äußeren Umfang blank machen und darauf die Bürsten schleifen lassen. In dieser Ausführung eignet sich der Phasenschieber für solche Fälle, wo man ihn behelfsmäßig herstellen will.

¹⁾ Vgl. Orlich, E. T. Z. 1909, S. 436.

²⁾ Vgl. K. Wilkens, E. T. Z. 1896, S. 501.

4. Schaltungen zur Konstanzhaltung des Hauptstromes und der Spannung.

Für Dauerschaltungen liegt oft das Bedürfnis vor, die elektrischen Größen für längere Zeit selbsttätig auf einem konstanten Wert zu halten.

Von komplizierten Einrichtungen wird man meist absehen und sich auf die einfachsten Vorrichtungen beschränken. Am häufigsten werden zu dem genannten Zwecke Eisendrahtwiderstände (Variatoren) benutzt, die mit dem Regel- oder Belastungswiderstand in Serie geschaltet werden¹⁾. Ein solcher Widerstand in transportablem Kasten ist in Fig. 10 nach der Ausführung der Allgemeinen Elektrizitätsgesellschaft dargestellt. Die Charakteristik derartiger Eisenwiderstände (Fig. 14) ermöglicht es, auch bei recht großen Spannungsschwankungen der Stromquelle den Meßstrom und damit die Meßspannung konstant zu halten. Da sie sich gleicherweise für Gleich- und Wechselstrom eignen, haben sie ein weites Verwendungsgebiet.

Zur Konstanzhaltung des Stromes kann man sich auch der Generatoren für konstanten Strom bedienen, die man von einem an die Netzspannung angeschlossenen Motor antreibt²⁾. Jedoch wird sich die Anschaffung einer derartigen Maschine nur in solchen Fällen lohnen, wo sehr viele Dauermessungen erwünscht sind, z. B. in Eichräumen für Elektrolytzähler.

Für Wechselstrom kann man zur Aufrechterhaltung einer konstanten Spannung beim Anschluß an ein Netz schwankender Spannung die Schaltung nach Fig. 23³⁾

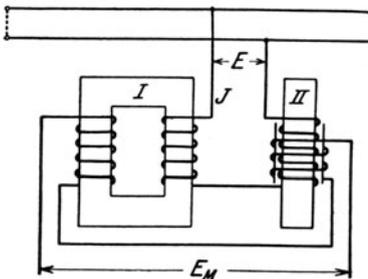


Fig. 23. Transformatorschaltung für Konstanzhaltung der Spannung.

verwenden. Die Netzspannung E erregt sowohl einen Transformator I mit geschlossenem, als auch einen mit offenem Eisenkern II . Ändert sich nun die Netzspannung und damit der Erregerstrom J , so ändert sich die Induktion im Eisenkern I und damit die Sekundärspannung, entsprechend der in Fig. 24 dargestellten Kurve E_1 ; die Sekundärspannung des Transformators II dagegen ändert sich proportional dem Strom J , entsprechend der Kurve E_2 in Fig. 24. Schaltet man die Sekundärwicklungen beider Transformatoren so hintereinander, daß die Spannung E_2 der Span-

¹⁾ Vgl. Kallmann, E. T. Z. 1906, S. 45.

²⁾ E. T. Z. 1910, S. 709.

³⁾ D. R. P. 313300 der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft.

nung E_1 entgegenwirkt, so wird die Meßspannung entsprechend der mit E_M bezeichneten Kurve verlaufen. In der Nähe der gestrichelt gezeichneten Linie wird also die Meßspannung konstant bleiben, auch wenn sich die Netzspannung sehr stark ändert.

Es gibt noch viele Möglichkeiten, um durch bestimmte Schaltungen von Widerständen und anderen Vorrichtungen den Strom und die Spannung konstant zu halten. Es mag jedoch genügen, die genannten anzugeben, weil sie für fast alle vorkommenden Fälle genügen.

Zur Erhaltung konstanter Frequenz braucht man kompliziertere Einrichtungen, die meistens darauf hinauslaufen, die Umdrehungszahl der als Stromquellen benutzten Generatoren auf einem festen Wert zu halten. Es sei hier nur der Tirillregler erwähnt. In der meßtechnischen Praxis verwendet man solche Einrichtungen nur in Ausnahmefällen.

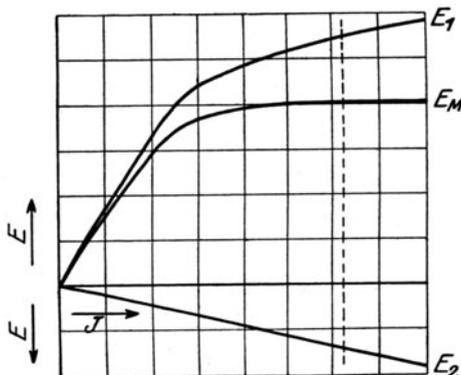


Fig. 24. Wirkungsweise der Transformator-schaltung nach Fig. 23.

III. Instrumente und Hilfseinrichtungen zur Messung des wirklichen Verbrauchs.

1. Meßinstrumente.

Es geht über den Rahmen unserer Aufgabe hinaus, die Meßinstrumente, die man zum Eichen braucht, im einzelnen zu beschreiben. Wir wollen uns deshalb damit begnügen, in kurzen Zügen eine Übersicht über diejenigen Instrumente zu geben, die den Zählertechniker am meisten interessieren und auf die Meßgenauigkeit und die möglichen Fehler hinzuweisen. Eine gute Übersicht über die modernsten Meßgeräte hat in neuester Zeit Keinath¹⁾ zusammengestellt. Im übrigen sei auf die reichhaltige Literatur über Meßgeräte hingewiesen, die auch in allen Handbüchern zu finden ist²⁾.

¹⁾ Elektrische Meßgeräte und Meßmethoden, Vortrag Hochschulkurse Essen 1919 (nicht im Handel erschienen).

²⁾ z. B. Gruhn, Elektrotechnische Meßinstrumente, Berlin, bei Springer 1920. Schmiedel, Elektrizitätszähler.

Wir wollen nun kurz die uns am meisten interessierenden Apparate betrachten.

a) Kompensationsapparat für Gleichstrom. Als Präzisionsgleichstrommeßgerät ist der in Fig. 25 dargestellte Kompensationsapparat von Feußner¹⁾ allgemein bekannt. Bei der Wichtigkeit des Apparates für Laboratoriumsmessungen sei eine etwas ausführlichere Beschreibung gestattet. Die dekadensweise unterteilten Präzisionswiderstände werden von einem konstant gehaltenen Hilfsstrom durchflossen, der von einer kleinen Akkumulatorenbatterie den Klemmen *B* zugeführt wird. Die zu messende Spannung wird an die Klemmen *X* gelegt, in Reihe damit an die Klemmen *G* ein hochempfindliches Galvanometer (gegebenenfalls mit Spiegelablesung). Zur Schonung

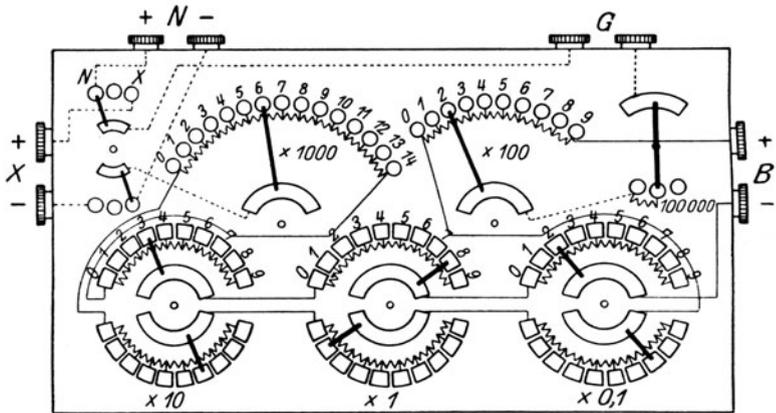


Fig. 25. Schaltung des Gleichstromkompensators.

des Galvanometers gegen Stromstöße bei nicht genauer Einstellung der Kurbeln ist am Einschalter ein Widerstand von 100 000 Ω vorgesehen. Man dreht die Kurbeln so lange, bis das Galvanometer auf Null zeigt; dann ist die durch den Hilfsstrom erzeugte Spannung gleich und entgegengesetzt der zu messenden. Bei dem in Fig. 25 dargestellten Apparat werden die Tausender- und Hunderter-Widerstände in ihrer Gesamtheit vom Hilfsstrom durchflossen, den Kurbeln dieser Widerstände wird die zu messende Spannung über das Galvanometer zugeführt. Die Widerstände für die Zehner, Einer und Zehntel sind doppelt ausgeführt und werden von Doppelkurbeln derart abgetastet, daß nur die unten liegenden Widerstände für die Messung der unbekanntenspannung benutzt werden, während die oben liegenden dazu dienen, den Gesamt-widerstand für den Stromkreis des Hilfs-

¹⁾ Ausführliche Literaturangaben vgl. Diesselhorst, Zeitschrift für Instrumentenkunde 1906, S. 173; 1908, S. 1.

stroms durch Ergänzung auf volle Dekaden konstant zu halten. Der Widerstand des Kompensators bleibt also für alle Kurbelstellungen auf dem Werte von $14\,999,9\ \Omega$. Will man Spannungen bis $1,5\ \text{V}$. messen, so stellt man den Hilfsstrom auf $0,0001\ \text{A}$. ein, so daß der abgelesene Widerstand gleich einem Zehntausendstel der zu messenden Spannung ist. Will man höhere Spannungen bis etwa $15\ \text{V}$. messen, so kann man den Hilfsstrom vergrößern bis etwa $0,001\ \text{A}$., wobei die zulässige Erwärmung der Widerstände normalerweise noch nicht überschritten wird. Für höhere Spannungen wendet man einen Spannungsteiler an, d. h. einen hohen Präzisionswiderstand, an den man die zu messende Spannung anlegt und von dem man einen kleinen Teil für die Messung mit dem Kompensator abzapft.

Zum Einstellen des Hilfsstroms braucht man ein Spannungsnormalelement, wozu man meist ein Weston-Normalelement von einer konstanten Spannung $1,0190\ \text{V}$. verwendet¹⁾. Man schließt es an die mit N bezeichneten Klemmen an und kann es mit Hilfe des Umschalters an die Stelle von X setzen. Dann stellt man mit den Kurbeln den Widerstand $10\,190,0$ ein und reguliert mittels eines Vorschaltwiderstandes den Hilfsstrom so lange, bis das Galvanometer Null zeigt. Dann ist der Hilfsstrom $0,0001\ \text{A}$. Den Apparat kann man auch zur Messung von Strömen benutzen. Dabei legt man die Klemmen X an die Enden eines Normalwiderstandes. Der gemessene Strom ist dann: Spannung, mit dem Kompensationsapparat gemessen, durch Normalwiderstand. Die Normalwiderstände sind so dimensioniert, daß an ihren Klemmen beim höchstzulässigen Strom eine Spannung von etwa $1\ \text{V}$. herrscht.

In den seltensten Fällen wird man den Kompensationsapparat dazu benutzen, Gleichstromzähler zu eichen, da für technische Messungen der Zeitaufwand zu groß ist und man nur erfahrene Personen mit seiner Handhabung betrauen kann. Dagegen ist der Kompensationsapparat dort sehr brauchbar, wo die Meßbereiche der üblichen Instrumente zur Bestimmung von kleinen Spannungen und Strömen nicht mehr ausreichen und wo man sehr kleine Spannungen ohne Stromverbrauch messen will. Vor allem aber braucht man ihn zur Überwachung der Meßgenauigkeit der Gebrauchsinstrumente.

Bei der Aufstellung des Kompensationsapparates muß man sehr auf gute Isolation aller Teile, auch der den Hilfsstrom liefernden Batterie, achten, da bei der hohen Empfindlichkeit des als Nullinstrument verwendeten Galvanometers auch nur kleine Nebenströme den Galvanometerausschlag fälschen und zu großen Meßfehlern führen können.

¹⁾ Vgl. Kohlrausch, Praktische Physik, 11. Aufl., S. 402. Clark-Elemente verwendet man wegen der starken Temperaturabhängigkeit nur noch selten.

b) Kompensationsapparat für Wechselstrom¹⁾. Der Kompensationsapparat für Wechselstrom beruht auf dem gleichen Prinzip, wie der für Gleichstrom. Als Nullinstrument benutzt man am besten ein abstimmbares Vibrationsgalvanometer²⁾. Den konstanten Strom muß man mittels eines hoch empfindlichen Strommessers einstellen. Eine besondere Einrichtung ist schließlich noch erforderlich für die Einstellung der Phasengleichheit zwischen der zu messenden Wechselspannung oder dem zu messenden Wechselstrom und dem den Apparat dauernd durchfließenden Hilfsstrom. Am einfachsten ist es, wenn man einen Doppelgenerator mit drehbarem Stator zur Verfügung hat (vgl. S. 15). Dann braucht man keine besonderen Hilfsmittel zur Einstellung der Phasengleichheit. Die Handhabung des Wechselstromkompensators ist nicht ganz so einfach, wie die des Gleichstromkompensators, da man die Abgleichung der Phasenverschiebung und der Spannung so vornehmen muß, daß man allmählich auf den Kompensationswert kommt. Ebenso wie den Kompensationsapparat für Gleichstrom benutzt man den für Wechselstrom in ganz bestimmten Fällen, z. B. zur Messung des Eigenverbrauchs und des Spannungsabfalles bei Wechselstromzählern, zur Messung der Spannung an Meßspulen für die Bestimmung der Wechselfelder, zur Messung der Strömung in der Scheibe. Da durch die neueren Arbeiten auf diesem Gebiet das Zutrauen zu der Zuverlässigkeit der Messungen mit dem Wechselstromkompensator stark gestiegen ist, sollte in keinem Zählerlaboratorium ein solcher Apparat fehlen.

c) Drehspulinstrumente für Gleichstrom. Für Präzisionsmessungen an Gleichstromzählern benutzt man zweckmäßig Drehspulinstrumente nach Deprez-d'Arsonval. Sie haben den Vorzug einer proportionalen Skala, da ihr Drehmoment durch Zusammenwirken des in der Drehspule fließenden Stromes mit dem Feld des permanenten Magnets zustande kommt. Bei vorsichtiger Behandlung bleiben sie unverändert, so daß man sie nur etwa alle Jahre zu eichen braucht. Die Meßgenauigkeit kann mit etwa $\pm 0,1$ Teilstrich angenommen werden.

Bei Spannungsmessern kann man das Meßbereich der Drehspulinstrumente durch Vorschaltwiderstände im Instrument oder außerhalb derselben bis auf etwa 1000 V. erweitern. Da die Vorschaltwiderstände sehr genau abgeglichen werden können und aus temperaturfreiem Material hergestellt sind, bleibt die Meßgenauigkeit der

¹⁾ Vgl. v. Krukowski, Vorgänge in der Scheibe eines Induktionszählers und der Wechselstromkompensator als Hilfsmittel zu deren Erforschung, Berlin, bei Springer 1920. Dort sind auch die Fehlerquellen ausführlich erörtert.

²⁾ Schering und Schmidt, Archiv f. Elektrotechnik 1912, S. 254; Zschr. für Instrumentenkunde 1918, S. 1; E. T. Z. 1918, S. 410.

Instrumente auch unter Anwendung von Vorschaltwiderständen erhalten (vgl. unten Kapitel III, 2).

Für Strommesser erhält man verschiedene Meßbereiche durch Parallelschaltung von Nebenschlußwiderständen, die für alle Stromstufen den gleichen Spannungsabfall haben. Auch diese müssen genau abgeglichen sein, damit man die gewünschte Meßgenauigkeit beibehalten kann. Die Temperaturabhängigkeit ist bei Strommessungen meist etwas größer als bei Spannungsmessungen, weil wegen des geringen Spannungsabfalles die Drehspule nur geringen Widerstand haben darf und daher aus Kupfer hergestellt sein muß. Durch Kompensationsschaltungen kann zwar der Temperatureinfluß sehr herabgedrückt werden; ganz unabhängig davon sind die Strommesser jedoch nicht herstellbar.

d) Hitzdrahtinstrumente für Gleich- und Wechselstrom. Hitzdrahtinstrumente beruhen auf der Ausdehnung eines stromdurchflossenen Drahtes infolge der Stromwärme. Sie messen für Gleich- und für Wechselstrom jeweils den quadratischen Mittelwert und haben also für beide Stromarten gleiche Skala. Wenn man sie richtig behandelt, sind sie als Präzisionsinstrumente sehr wohl geeignet und zwar sowohl als Strom- als auch als Spannungsmesser. Sie haben den Nachteil, daß der Stromverbrauch sehr groß ist und daß ihre Skala quadratisch geteilt werden muß. Eine gewisse Nachwirkung zeigt sich bei ihnen oft durch Verschiebung der Nullpunktes, jedoch kann man diese durch eine bei neueren Fabrikaten angebrachte Nullpunktstellung vor jeder Messung bequem beheben. Ein großer Vorzug der Hitzdrahtinstrumente ist der, daß sie gleicherweise für Gleich- und Wechselstrom verwendet werden können und von der Frequenz vollkommen unabhängig sind. Mit ihnen kann eine Meßgenauigkeit von etwa $\pm 0,2$ Teilstrichen erzielt werden.

e) Thermoelemente zur Messung kleiner Wechselströme. Für die Messung sehr kleiner Wechselströme kann man zweckmäßig Thermokreuze in Verbindung mit hochempfindlichen Gleichstrominstrumenten (Zeigergalvanometern) verwenden¹⁾. Sie beruhen darauf, daß durch die Stromwärme des Wechselstroms die Lötstelle eines Thermoelements erwärmt wird und der Thermostrom mit einem Gleichstrominstrument gemessen wird. Die Instrumente können mit Gleichstrom geeicht werden; ihre Empfindlichkeit ist abhängig von der Konstruktion und Anordnung der Thermoelemente, ihre Meßgenauigkeit von der des benutzten Gleichstrominstruments.

f) Elektromagnetische Instrumente für Gleich- und Wechselstrom. Elektromagnetische Instrumente eignen sich für Gleich- und Wechsel-

¹⁾ Schering, Zschr. für Instrumentenkunde 1912, S. 69 und 101; vgl. auch Gossen, E. T. Z. 1910, S. 143.

strom gleich gut, müssen aber für Wechselstrom besonders geeicht werden. Sie haben den Vorzug einer proportionalen Skala. Bei Spannungsmessern kann man das Meßbereich durch Vorschaltwiderstände erweitern. Ihre Meßgenauigkeit kann mit etwa $\pm 0,5$ Teilstrichen angegeben werden.

g) Dynamometrische Spannungs- und Strommesser für Wechselstrom.

Als Spannungs- und Strommesser haben die dynamometrischen Instrumente quadratische Skala. Will man eine Anzahl Messungen mit verschiedenen Belastungen anstellen, so muß man deshalb das Meßbereich während der Messungen oft ändern. Bei Spannungsmessern kann man das Meßbereich bis etwa 1000 V. durch Vorschaltwiderstände erweitern. Darüber hinaus benutzt man Meßwandler mit einer Spannung von etwa 150 V. an den Sekundärklemmen.

Bei dynamometrischen Strommessern ist die Verwendung von Nebenschlußwiderständen zur Erweiterung des Meßbereiches nicht möglich, weil die Selbstinduktion der Stromspule die Phase des Instrumentenstromes gegen die des Stromes im Nebenschlußwiderstand verschiebt. Man kann außer durch verschiedene Schaltungen der unterteilten Stromspule das Meßbereich nur durch Anwendung von Meßwandlern erweitern.

Die Meßgenauigkeit der dynamometrischen Instrumente kann bei großem Ausschlag etwa $\pm 0,2$ Skalenteile erreichen. Man eicht sie mit Gleichstrom, wobei man den Einfluß des Erdfeldes dadurch eliminiert, daß man für jeden zu eichenden Punkt zwei Messungen mit umgekehrter Stromrichtung macht und deren Mittelwert nimmt.

h) Dynamometrische Leistungsmesser. Dynamometrische Leistungsmesser haben eine fast proportionale Skala. Sie können für Gleichstrom nur dann verwendet werden, wenn man zwei Messungen mit entgegengesetzten Stromrichtungen im Strom- und Spannungskreise macht. Der Mittelwert aus diesen beiden Messungen ist dann der zu verwendende Wert, der unabhängig vom Erdfeld ist. Auf diese Weise eicht man die Instrumente mit Hilfe des Gleichstromkompensationsapparates.

Bei Wechselstrom geschieht die Umschaltung selbsttätig. Die dynamometrischen Leistungsmesser sind deshalb fast die einzigen Instrumente, die für Präzisionsmessungen der Leistung bei Wechselstrom verwendet werden. In Verbindung mit Wandlern benutzt man meist Apparate, die ein Meßbereich von 5 A. und 110 bis 150 V. haben. Im Spannungskreis kann man das Meßbereich natürlich auch durch Vorschaltwiderstände vergrößern. Die Instrumente messen stets den Wert $E \cdot J \cdot \cos \cdot \varphi$. Die Meßgenauigkeit kann man mit etwa $\pm 0,2$ Teilstrichen annehmen.

Zur Messung sehr kleiner Leistungen, wie z. B. des Eigenverbrauchs von Wechselstromzählern, hat man sehr empfindliche Apparate mit Fadenaufhängung für die Drehspule konstruiert. In Fig. 26 ist ein solches Instrument der Firma Siemens & Halske abgebildet. Weniger bekannt ist der astatische Leistungsmesser von Dudell, der von P. W. Paul in London ausgeführt wird. Die Drehspulen sind an einem mit einer 500teiligen Skala von großem Umfang versehenen Torsionskopf aufgehängt. Die Nullstellung wird durch Verdrehen des Torsionskopfes und Anvisieren der einen Drehspule erreicht. Die Stromspulen sind zehnfach unterteilt und können durch einen Stöpsel-

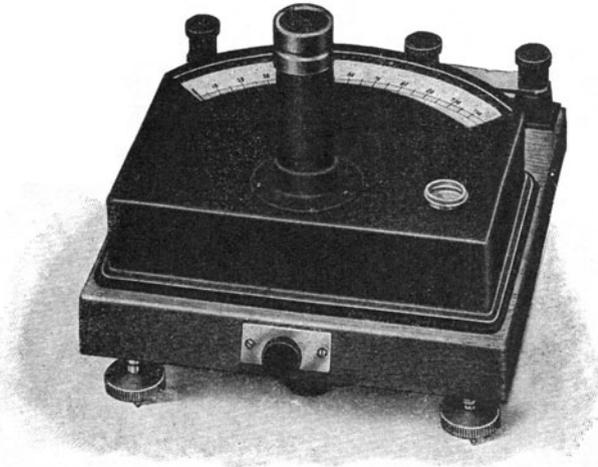


Fig. 26. Dynamometrischer Leistungsmesser von Siemens & Halske mit Fadenaufhängung der Drehspule

schalter auf die Meßbereiche 1 bis 10 A. geschaltet werden. Der Stöpselschalter ist vom Instrument räumlich getrennt und durch biegsame Kabel mit ihm verbunden. Das niedrigste Spannungsmessbereich ist 100 V. Die Meßgenauigkeit solcher Instrumente kann mit 0,1 Teilstrich angenommen werden

i) **Ferrodynamische Instrumente**¹⁾. Ferrodynamische Instrumente, die auf demselben Prinzip beruhen wie die Dynamometer, jedoch einen eisengeschlossenen magnetischen Kreis haben, sind nur für Wattmeter als Präzisionsinstrumente anzusprechen. Es wird sich mit ihnen eine Meßgenauigkeit von ungefähr $\pm 0,3$ bis $\pm 0,4$ Teilstrichen erreichen lassen.

k) **Phasenmesser**. Hat man sinusförmigen Verlauf des Wechselstromes, so kann man die Phase aus dem Leistungsfaktor ohne

¹⁾ Dolivo-Dobrowolsky, E.T.Z. 1913, S. 113.

weiteres bestimmen, den man aus dem Verhältnis der Angaben des Leistungsmessers und dem Produkt der Angaben des Strom- und Spannungsmessers errechnet. Dies ist das übliche Verfahren. Bei Drehstrommessungen mit 2 Wattmetern entnimmt man den Wert des Leistungsfaktors den Kurven der Fig. 27, deren Werte nach der bekannten Gleichung $\tan \varphi = \frac{L_1 - L_2}{L_1 + L_2} \cdot \sqrt{3}$ berechnet sind. Die Gleichung gilt nur für gleiche Belastung aller drei Phasen.

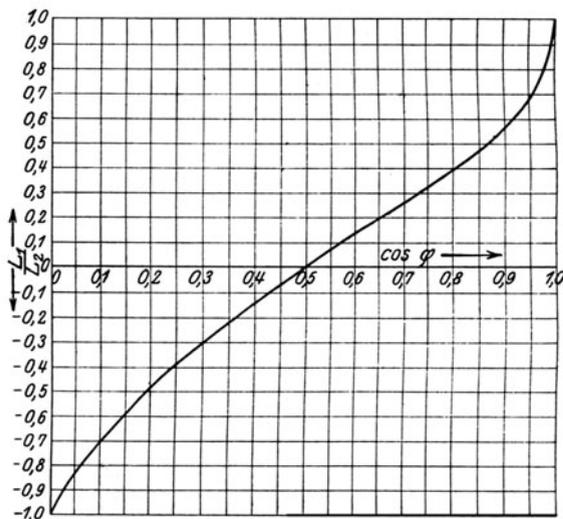


Fig. 27. Leistungsfaktor bei der Zweiwattmetermethode.

Bequemer ist es, den Leistungsfaktor direkt mit einem sogenannten Phasenmesser zu bestimmen. Die Phasenmesser bestehen meist aus mehreren auf einer Achse befestigten Drehspulen, denen Widerstände und Selbstinduktionen vorgeschaltet sind¹⁾. Die Skala derartiger Phasenmesser ist meist nicht ganz proportional und ist natürlich nur dann richtig, wenn man Wechselstrom von derselben Kurvenform mißt, mit dem der Phasenmesser vorher geeicht wurde.

1) **Zungenfrequenzmesser.** Sehr brauchbar für Laboratoriumszwecke und für Messungen an Ort und Stelle sind die Zungenfrequenzmesser, die von Hartmann & Braun und Siemens & Halske hergestellt werden. Sie beruhen darauf, daß die Eigenfrequenzen einer Reihe von Stahlzungen entsprechend den zu messenden Frequenzen abgestimmt sind. Die Stahlzungen werden durch Elektromagnete in Schwingung gebracht, die von dem zu messenden Wech-

¹⁾ Sie werden z. B. von Siemens & Halske und Hartmann & Braun hergestellt.

selbststrom erregt werden. Da die Apparate auf dem Resonanzprinzip beruhen, kann man recht genau mit ihnen messen, falls die Zungen richtig abgestimmt sind. Zur Erweiterung des Meßbereiches auf die doppelte Frequenz sind besondere Umschalter vorgesehen. Auch kann man die Apparate für verschiedene Spannungen verwenden.

m) **Zeigerfrequenzmesser mit einem Zeiger**¹⁾. Zeigerfrequenzmesser beruhen darauf, daß eine feste und eine drehbare Spule in eine Kombination von Widerständen oder Kondensatoren und Selbstinduktionen so eingefügt sind, daß der Ausschlag der beweglichen Spule von der Frequenz abhängig ist. Sie sind so eingerichtet, daß in gewissen Grenzen die Spannung keinen Einfluß auf die Angaben ausübt.

n) **Zeigerfrequenzmesser mit zwei sich kreuzenden Zeigern**²⁾. Zeigerfrequenzmesser mit zwei sich kreuzenden Zeigern sind öfters gebaut worden und beruhen darauf, daß zwei dynamometrische Instrumente, welche in bestimmten Schaltungen mit Widerständen und Selbstinduktionen verbunden sind, bei verschiedenen Frequenzen verschiedene Ausschläge geben. Der Kreuzungspunkt beider Zeiger wird dabei zur Messung der Frequenz benutzt. An Stelle der dynamometrischen Instrumente kann man auch zwei Hitzdrahtstrommesser verwenden, von denen dem einen ein Widerstand, dem anderen eine Selbstinduktion vorgeschaltet ist.

2. Verwendung der Vorrichtungen zur Erweiterung der Meßbereiche zusammen mit den Instrumenten.

a) **Vorschaltwiderstände.** Die Strom-, Spannungs- und Leistungsmesser werden meist für alle Hauptstrommeßbereiche und die gebräuchlichsten Spannungsmeßbereiche geeicht. Will man Messungen in Spannungsmeßbereichen machen, für die man das Instrument nicht zusammen mit den Vorschaltwiderständen geeicht hat, so muß man die Werte für die zur Erweiterung des Meßbereiches benutzten Vorschaltwiderstände genau kennen. Dann kann man die von der Eichung mit einem bekannten Widerstandswert im Spannungskreis her bekannten Korrekturen auf den neuen Widerstandswert umrechnen.

Bei einem Spannungsmesser sei für ein bestimmtes Meßbereich die Konstante gegeben durch die Gleichung

$$c \cdot \alpha_{max} = E_{max},$$

wobei α_{max} der maximale Zeigerausschlag und E_{max} der Sollwert der

¹⁾ Vgl. Martienssen, E. T. Z. 1910, S. 204, Elektrische Kraftbetriebe und Bahnen, S. 372; ferner Keinath, E. T. Z. 1916, S. 271.

²⁾ Joly, Compt. rend. Bd. 150, S. 826 (1910). L'Electricien, Serie 2, Bd. 39, S. 193 (1910). Ferrié, Lumière Electrique, Bd. 12, S. 427 (1910); E. T. Z. 1911, S. 474.

maximalen Spannung für das betrachtete Meßbereich ist. Für dieses Meßbereich habe der Spannungsmesser den Widerstand r_1 . Dann gilt für einen beliebigen Ausschlag

$$E = c \cdot (\alpha + k) = i \cdot r_1.$$

i ist der durch den Widerstand r_1 fließende Strom, k die Skalenkorrektur¹⁾.

Das Meßbereich wird nun dadurch vergrößert, daß man nach Fig. 28 einen Vorschaltwiderstand r_2 zu r_1 zufügt. Für den gleichen Ausschlag α fließt der gleiche Strom i durch $r_1 + r_2$. Es ist

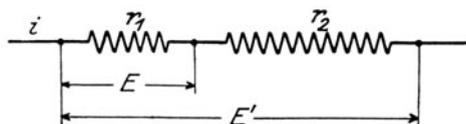


Fig. 28. Verwendung der Vorschaltwiderstände.

Es ist

$$E' = c' (\alpha + k) = i \cdot (r_1 + r_2).$$

Es folgt

$$E' = c (\alpha + k) \cdot \frac{(r_1 + r_2)}{r_1}.$$

Für das neue Meßbereich muß man also die Ablesung α erst mit der vom ersten Meßbereich bekannten Skalenkorrektur k korrigieren und dann mit der neuen Konstanten

$$c' = c \cdot \frac{r_1 + r_2}{r_1}$$

multiplizieren.

Führt man die Sollwerte R_1, R_2 für die Widerstände ein, so kann man die Sollkonstante für das neue Meßbereich schreiben

$$c_s = c \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_1};$$

dies gibt normalerweise einen runden Wert. Die Gleichung für E' kann man dann auf die Form bringen

$$E' = c_s (\alpha + k) + \delta (\alpha + k).$$

δ ist die relative Abweichung vom Sollwert für das neue Meßbereich; sie berechnet sich aus δ_1 und δ_2 , den relativen Abweichungen vom Sollwert der Widerstände R_1 und R_2 , wenn man δ_1 und δ_2 folgendermaßen definiert:

$$r_1 = R_1 (1 + \delta_1) \quad r_2 = R_2 (1 + \delta_2)$$

$$\delta = c \cdot \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{\delta_2 - \delta_1}{1 + \delta_1},$$

$1 + \delta_1$ kann man oft $= 1$ setzen.

¹⁾ Man könnte natürlich auch den Skalenfehler $F = -k$ benutzen, wir wollen uns aber der Gepflogenheit der Meßtechnik anschließen und die Korrektur k benutzen.

Zahlenbeispiel:

$$\begin{aligned}
 r_1 &= 1002 \, \Omega & R_1 &= 1000 \, \Omega & \delta_1 &= 0,2 \text{ ‰} \\
 r_2 &= 4006 \, \Omega & R_2 &= 4000 \, \Omega & \delta_2 &= 0,15 \text{ ‰} \\
 c &= 0,2 \text{ für das erste Meßbereich.} \\
 c_s &= c \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1,0 \\
 \delta &= c \cdot \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{\delta_2 - \delta_1}{1 + \delta_1} = 0,2 \cdot 4 \cdot \frac{-0,05 \text{ ‰}}{1,002} \\
 &= -0,04 \text{ ‰ für das erweiterte Meßbereich.}
 \end{aligned}$$

Bei einer Ablesung $\alpha = 122,3$ Teilstrichen sei die Skalenkorrektion $k = +0,3$ Teilstriche. Es ist

$$\begin{aligned}
 \alpha + k &= 122,6 \\
 E' &= 1,0 \cdot 122,6 - \frac{0,04}{100} \cdot 122,6 \\
 &= 122,6 - 0,05 \text{ V.}
 \end{aligned}$$

Will man die Skalenkorrektion k' für das neue Meßbereich erhalten, so kann man die Gleichung für E' auch auf die Form bringen:

$$E' = c_s (\alpha + k').$$

Die Skalenkorrektion kann man dann schreiben

$$k' = k + \frac{R_2}{R_1 + R_2} (\delta_2 - \delta_1) \cdot (\alpha + k)^1.$$

Für Leistungsmesser gilt das gleiche wie für Spannungsmesser; denn für jedes Strommeßbereich muß man bei ihnen eine gesonderte Eichung vornehmen, so daß also nur für die verschiedenen Spannungsmessbereiche eine Erweiterung durch Vorschaltwiderstände in Frage kommt.

b) Nebenschlußwiderstände. Umständlicher werden die Korrekturen für die Erweiterung des Meßbereichs eines Instrumentes durch Nebenschlußwiderstände. Die Überlegungen brauchen nur für Strommesser für Gleichstrom gemacht zu werden. Fig. 29 a zeigt das Schaltungsschema für ein Meßbereich, Fig. 29 b dasjenige für eine

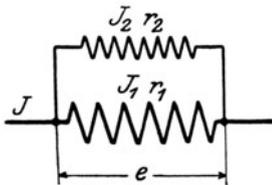


Fig. 29 a.

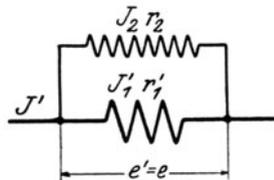


Fig. 29 b.

Verwendung der Nebenschlußwiderstände.

Erweiterung des Meßbereichs durch Ersatz des Widerstandes r_1 durch den Widerstand r_1' . Es sei wieder die Konstante definiert durch die Gleichung

$$c \cdot \alpha_{max} = J_{max}.$$

1) Vgl. Orlich, Helios 1909, S. 373.

Dies gilt für das Meßbereich, für das die Skalenkorrektion k durch Eichung bestimmt wurde.

Für ein und denselben Ausschlag α gelten in den beiden durch die Figuren 29 a und b gekennzeichneten Meßbereichen die Gleichungen

$$c \cdot (\alpha + k) = J = e \cdot \frac{r_1 + r_2}{r_1 \cdot r_2},$$

$$c' \cdot (\alpha + k) = J' = e \cdot \frac{r_1' + r_2}{r_1' \cdot r_2}.$$

$J_2 = \frac{e}{r_2}$, also auch e , ist in beiden Fällen gleich. Es folgt

$$J' = c \cdot (\alpha + k) \cdot \frac{r_1}{r_1'} \cdot \frac{r_1' + r_2}{r_1 + r_2}.$$

Bringt man die Gleichung auf die Form

$$J' = c_s (\alpha + k) + \delta (\alpha + k),$$

so ist darin

$$c_s = c \cdot \frac{R_1}{R_1'} \cdot \frac{R_1' + r_2}{R_1 + r_2},$$

wobei R_1, R_1' die Sollwerte der Widerstände bedeuten; der Sollwert R_2 ist mit r_2 identisch.

Definiert man δ_1 und δ_1' aus den Gleichungen

$$\begin{aligned} r_1 &= R_1 (1 + \delta_1) \\ r_1' &= R_1' (1 + \delta_1'), \end{aligned}$$

so erhält man, wenn man $\delta_1 \cdot \delta_1'$ gegenüber δ vernachlässigt,

$$\delta = c \cdot \left(\delta_1 \frac{R_1' + r_2}{R_1 + r_2} - \delta_1' \right) : \left[(1 + \delta_1') \left(1 + \delta_1 + \frac{r_2}{R_1} \right) \cdot \frac{R_1'}{r_2} \right].$$

Kann man $1 + \delta_1'$ und $1 + \delta_1 = 1$ setzen und ist r_2 groß im Verhältnis zu R_1 und R_1' , so vereinfacht sich die Gleichung in

$$\delta = c \cdot \frac{r_2 \cdot R_1}{R_1' (R_1 + r_2)} (\delta_1 - \delta_1').$$

Um die Skalenkorrektion k' für das neue Meßbereich zu erhalten, kann man die Gleichung für J' wieder auf die Form bringen

$$J' = c_s (\alpha + k').$$

Es ist dann

$$k' = k + \left[\left(\delta_1 - \delta_1' \frac{R_1 + r_2}{R_1'} \right) \cdot (\alpha + k) \right] : \left[(1 + \delta_1') \left(1 + \delta_1 + \frac{r_2}{R_1} \right) \frac{R_1'}{r_2} \right].$$

Zahlenbeispiel:

$$R_2 = r_2 = 10,02$$

$$R_1 = 0,5260$$

$$R_1' = 0,050227$$

$$c = 0,01$$

$$r_1 = 0,5360$$

$$r_1' = 0,05000$$

$$\delta_1 = +1,901\%$$

$$\delta_1' = -0,452\%$$

$$c_s = c \cdot \frac{R_1}{R_1'} \cdot \frac{R_1' + r_2}{R_1 + r_2} = 0,01 \cdot \frac{0,5260}{0,050227} \cdot \frac{10,07023}{10,5460}$$

$$= 0,01 \cdot 10,000 = 0,1000.$$

$$\delta = 0,01 \cdot \frac{1,901 \cdot 0,955 + 0,452}{0,9955 \cdot (1,01901 + 19,049) \cdot 0,005013} \%$$

$$= +0,01 \cdot 22,6 = +0,226\% \text{ des Ausschlages für das erweiterte}$$

Meßbereich.

Bei einer Ablesung von $\alpha = 142,4$ Teilstrichen sei die Skalenkorrektur

$$k = -0,3 \text{ Teilstriche. Es ist}$$

$$\frac{\alpha + k}{\alpha + k} = 142,1$$

$$J' = 0,100 \cdot 142,1 + \frac{0,226}{100} \cdot 142,1 = 14,21 + 0,32 = 14,53 \text{ A.}$$

und $k' = k + \frac{\delta}{c_s} (\alpha + k) = -0,3 + \frac{2,26}{100} \cdot 142,1 = -0,3 + 3,21 = +2,91$ Teilstriche.

c) **Strom- und Spannungswandler.** Bei Verwendung von Strom- und Spannungswandlern muß sowohl der Übersetzungsfehler als auch der Winkelfehler berücksichtigt werden. Folgende Definitionen sind zu beachten:

$$U = \text{Wahre Übersetzung} = \frac{\text{Primärer Wert}}{\text{Sekundärer Wert}}$$

$$= \frac{J_1}{J_2} \text{ oder } \frac{E_1}{E_2},$$

$$U_{\text{N}} = \text{Nennübersetzung} = \frac{\text{Primärer Nennwert}}{\text{Sekundärer Nennwert}}$$

$$= \frac{J_{1\text{N}}}{J_{2\text{N}}} \text{ oder } \frac{E_{1\text{N}}}{E_{2\text{N}}},$$

$$\Delta U = \text{Übersetzungsfehler} = \frac{\text{Wahrer Wert} - \text{Nennwert}}{\text{Nennwert}}$$

$$= \frac{J_2 - J_{2\text{N}}}{J_{2\text{N}}} \text{ oder } \frac{E_2 - E_{2\text{N}}}{E_{2\text{N}}},$$

$$= \frac{\text{Nennübersetzung} - \text{Wahre Übersetzung}}{\text{Wahre Übersetzung}}$$

$$= \frac{U_{\text{N}} - U}{U}, \text{ wenn } J_1 = J_{1\text{N}} \text{ und } E_1 = E_{1\text{N}}$$

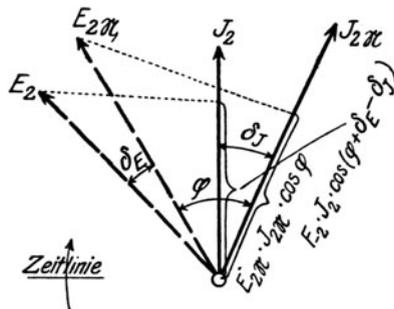
gesetzt wird.

In Fig. 30 sind die sekundären Ströme und Spannungen auf die primären bezogen worden. Die Winkel δ_J und δ_E geben die Abweichungen von der 180° Verschiebung an. Die Projektionen der Spannungsvektoren auf die Stromvektoren entsprechen den Leistungen. Die Primärleistung ist $L_1 = E_1 \cdot J_1 \cdot \cos \varphi$; auf den Primärkreis übertragen ergibt sich die sekundäre Nennleistung mit

$$L_{2\text{N}} = E_{2\text{N}} \cdot J_{2\text{N}} \cdot \cos \varphi$$

$$= \frac{E_{1\text{N}}}{U_{E\text{N}}} \cdot \frac{J_{1\text{N}}}{U_{J\text{N}}} \cdot \cos \varphi.$$

Die wahre Sekundärleistung ist, Fig. 30. Diagramm des Strom- und Spannungswandlers.



$$L_2 = E_2 \cdot J_2 \cdot \cos(\varphi + \delta_E - \delta_J)$$

$$= \frac{E_1}{U_E} \cdot \frac{J_1}{U_J} \cdot \cos(\varphi + \delta_E - \delta_J).$$

Der gesamte prozentuale Meßfehler wird, wenn man $E_1 = E_{1\mathfrak{N}}$ und $J_1 = J_{1\mathfrak{N}}$ setzt,

$$\begin{aligned} \Delta &= \frac{L_2 - L_{2\mathfrak{N}}}{L_{2\mathfrak{N}}} \cdot 100 \\ &= \left(\frac{U_{E\mathfrak{N}} \cdot U_{J\mathfrak{N}}}{U_E \cdot U_J} \cdot [\cos(\delta_E - \delta_J) - \sin(\delta_E - \delta_J) \cdot \tan \varphi] - 1 \right) \cdot 100. \end{aligned}$$

Nach einigen Umrechnungen folgt, wenn man

$$\Delta_{UE} \cdot \Delta_{UJ} = 0, \quad \cos(\delta_E - \delta_J) = 1, \quad \sin(\delta_E - \delta_J) = \frac{\pi}{10800} \cdot (\delta_E - \delta_J)$$

einsetzt, der prozentuale Meßfehler

$$\Delta = + \Delta_{UE} + \Delta_{UJ} - \frac{\pi}{108} (\delta_E - \delta_J) \cdot \tan \varphi.$$

Darin sind einzusetzen:

die Übersetzungsfehler Δ_{UE} und Δ_{UJ} in Prozenten,
die Winkel δ_E und δ_J in Minuten.

Hat man nur einen Stromwandler oder einen Spannungswandler, so bleibt natürlich nur der jeweilige Übersetzungs- und Winkelfehler zu berücksichtigen. Um bequem arbeiten zu können, trägt man sich meist für jedes Meßbereich des Wandlers die Übersetzungsfehler und die Abweichungen von der 180° -Verschiebung in Abhängigkeit von der sekundären Belastung auf Kurvenblättern auf.

Zahlenbeispiel:

$$\begin{aligned} \Delta_{UE} &= -0,55\% & \cos \varphi &= 0,5 \\ \Delta_{UJ} &= +0,32\% & \tan \varphi &= 0,866 \\ \delta_E &= +5' \\ \delta_J &= +15'. \end{aligned}$$

$$\text{Übersetzungsfehler} = +(-0,55) + 0,32 = -0,23\%,$$

$$\text{Winkelfehler} = -\frac{\pi}{108} \cdot (5 - 15) \cdot 0,866 = +0,25\%,$$

$$\Delta = -0,23 + 0,25 = +0,02\%.$$

3. Hilfsvorrichtungen zur Bestimmung der Stromrichtung und der Phase.

a) **Drehspulinstrument.** Bei Gleichstromleitungen ist man oft im ungewissen, ob man den positiven den negativen Leiter vor sich hat. Hat man ein Drehspulinstrument nach Deprez-d'Arsonval zur Hand, auf dem die Klemmen mit $+$ und $-$ bezeichnet sind, so kann man daran, daß der Ausschlag des Instruments positiv oder negativ wird, sehen, ob man die richtige oder falsche Leitung gefaßt hat.

b) **Polreagenzpapier.** Immer in der Tasche kann man sogenanntes Polreagenzpapier bei sich tragen, das streifenweise geschnittenes, mit Lackmus getränktes Fließpapier ist. Feuchtet man dieses Papier etwas an und bringt man beide Pole der Stromquelle auf seine Oberfläche, so färbt sich infolge der chemischen Zersetzung der Lackmuslösung

die Stelle, auf die der positive Pol kommt. rot, diejenige, auf die der negative Pol kommt, blau.

c) Veränderliche Selbstinduktion zur Bestimmung der Phase bei Wechselstrom. Zur Bestimmung der Vor- oder Nacheilung eines

Wechselstroms gegenüber einem anderen ist die Schaltung nach Fig. 31a sehr einfach herzustellen. Die Stromspule eines Leistungsmessers L wird vom Strom J durchflossen, die Spannungsspule vom Strom i . Außer dem Vorschaltwiderstand r schaltet man der Spannungsspule noch eine Spule mit hoher Windungszahl vor, deren Selbstinduktion man durch Einschieben eines Eisenkerns vergrößern kann. Eilt nun der Strom i in der Spannungsspule dem Strom J in der Hauptstromspule voraus, wie in Fig. 31b gezeichnet, so wird beim Einschieben des Eisenkerns in die Spule der Strom i nach i' wandern und die angezeigte Leistung wird zunehmen. Es darf dabei natürlich die Größe des Stromes i nicht wesentlich abnehmen. Ist dies zu befürchten, so muß man nicht die Spannung E , sondern den Strom i durch Nachregulieren konstant halten. Den Fall, daß die Spannung E und damit der Spannungsstrom i dem Hauptstrom J nacheilt, veranschaulicht Fig. 31c. Hier wird sich der Ausschlag des Leistungsmessers verkleinern, wenn man

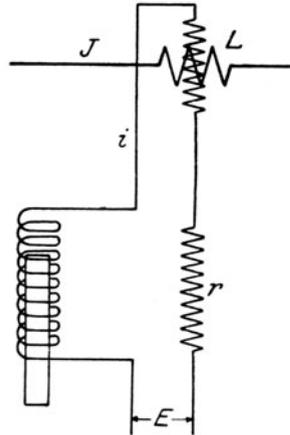


Fig. 31a. Selbstinduktions-spule zur Prüfung des Phasensinnes.

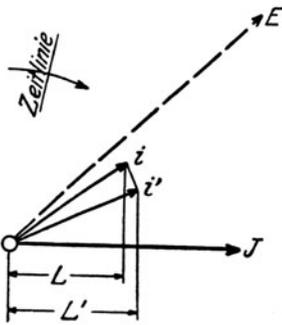


Fig. 31b. Induktive Belastung.

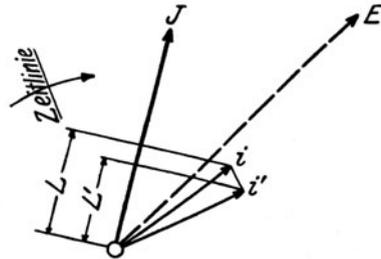


Fig. 31c. Kapazitive Belastung.

den Eisenkern in die Spule einschiebt. Je größer die Vor- oder Nacheilung ist, desto deutlicher wird die Änderung des Ausschlages werden. Die Schaltung läßt sich gut bei Sparschaltung von Zählern anwenden oder dort, wo man den Zähler über Strom- und Spannungswandler an ein Netz anschließt.

d) **Polprüfer für Wechselstrom.** Bei Wechselstrom muß man oft für richtige Ausführung der Schaltungen nicht nur die Phase, sondern auch den Richtungssinn von Strömen oder Spannungen im Vergleich zu anderen feststellen. Besonders häufig kommt dies vor, wenn man die Zähler über Strom- und Spannungswandler an das Netz anschließt. Bei manchen Leistungsmessern sind die Anschlußklemmen mit $+$ und $-$ bezeichnet, d. h. der Leistungsmesser zeigt nur dann positive Ausschläge, wenn in beiden Spulen die Ströme gleichgerichtet sind und gleichzeitig von der $+$ - zur $-$ -Klemme fließen oder umgekehrt. Mit einem solchen Instrument kann man allerdings nur feststellen, ob die Ströme um mehr als $\pm 90^\circ$ gegen einander verschoben sind. Will man noch wissen, ob die zu bestimmende Spannung gegenüber der Grundspannung vor- oder nacheilt, so muß man in den einen Kreis eine Spule veränderlicher Selbstinduktion nach Fig. 31 einschalten.

Da man aber meist den Richtungssinn zweier Spannungen gegeneinander feststellen will, so hat man Instrumente konstruiert, bei denen nicht nur die bewegliche, sondern auch die feste Spule als dünndrätige Spannungsspule ausgeführt ist, so daß man an die beiden Spulen die beiden zu vergleichenden Spannungen anschließen kann. Die Weston-Instrument-Co. hat ein Instrument auf den Markt gebracht, welches $E_1 \cdot E_2 \cdot \sin \varphi$ anzeigt¹⁾ und als sogenanntes „Synchroskop“ für das Parallelschalten von Wechselstromgeneratoren dienen soll. Es läßt sich ganz gut auch als Polprüfer verwenden. Sind die zu vergleichenden Spannungen gleich- oder gegenphasig, so zeigt das Instrument Null an. Sind beide Spannungen in der Phase gegeneinander verschoben, so erhält man positive oder negative Ausschläge. Auch hier kann man nur mit Hilfe einer in den einen Kreis eingeschalteten veränderlichen Selbstinduktion (Spule mit Eisen nach Fig. 31) einwandfrei Voreilung oder Nacheilung bestimmen.

Der Polprüfer von A. Brückmann²⁾ zeigt $E_1 \cdot E_2 \cdot \cos \varphi$ an, ist

also ein Wattmeter mit zwei dünndrätigen Spulen. Man kann den Richtungssinn deshalb genau so messen, wie mit dem normalen Wattmeter. Um aber mit dem Instrument ohne Zuhilfenahme einer veränderlichen Selbstinduktion die Phase genau feststellen zu können, ist die feste Spule in zwei Spulen zerlegt; an diese Spulen legt man zwei um 90° versetzte Spannungen

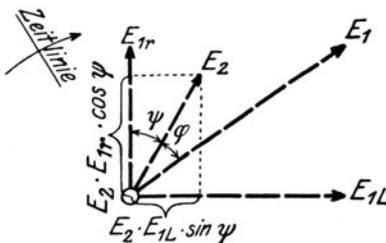


Fig. 32. Diagramm des Polprüfers nach Brückmann.

¹⁾ R. O. Heinrich, E. T. Z. 1912, S. 1147.

²⁾ E. T. Z. 1916, S. 219.

gen E_{1r} und E_{1L} , die man durch Zerlegung der Grundspannung E_1 mittels einer besonderen Schaltung erhält, Fig. 32. Die Spannung E_2 , deren Phase zu bestimmen ist, gibt dann nach dem folgenden Schema in den verschiedenen Quadranten positive oder negative Werte, je nachdem ob man sie der Spannung E_{1r} oder E_{1L} zusammenwirken läßt; aus ihnen kann man die gesuchte Lage der Spannung E_2 zur Grundspannung E_1 in das Diagramm hineinzeichnen.

	Mit E_{1r}	mit E_{1L}
1. Quadrant	+	+
2. „	+	-
3. „	-	-
4. „	-	+

e) **Drehfeldrichtungsanzeiger.** Bei Drehstrom kommt außer der Richtung noch der Drehsinn bei eindeutigen Bestimmungen für die Anschlüsse in Frage. Ein einfacher Apparat ist der in Fig. 33 abgebildete¹⁾. Drei Eisenkerne tragen Wicklungen, an die die Spannungen E_a, E_b, E_c des zu messenden Drehstroms angeschlossen werden. Über den drei Eisenkernen kann sich eine Kupfer- oder Aluminiumscheibe, die mit einer Spitze auf einem Stahllager gelagert ist, leicht drehen. Werden die drei Wicklungen erregt, so dreht sich die Scheibe langsam in derselben Richtung, in der die Phasen der Spannungen E_a, E_b, E_c zeitlich aufeinander folgen.



Fig. 33. Drehfeldrichtungsanzeiger von Siemens & Halske.

4. Hilfsschalter zum Sparen von Instrumenten.

a) **Voltmeterersatzschalter.** Bei Drehstrommessungen muß man drei gleiche Spannungsmesser haben, um die drei Phasenspannungen zu messen. Hat man nur einen Spannungsmesser zur Verfügung, so kann man mit einem Schalter auskommen, dessen Anordnung schematisch in Fig. 34 dargestellt ist. Die drei Phasen werden an die Klemmen a, b, c angeschlossen, die mit den Kontakten a, b, c verbunden sind. An die Kontakte d, e, f legt man in Dreieckschaltung den Spannungsmesser V und die Widerstände r_1 und r_2 , die möglichst genau gleich dem

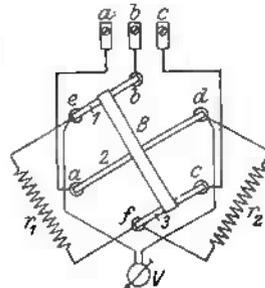


Fig. 34. Voltmeterersatzschalter.

¹⁾ Vgl. Möllinger, E. T. Z. 1900, S. 601.

Schmiedel, Elektrizitätszähler.

Widerstand des Voltmeters sind. Drei Kontaktfedern 1, 2, 3 sind durch eine isolierende Brücke *B* miteinander verbunden; diese kann mit den Kontaktfedern in verschiedene Stellungen gebracht werden, so daß das Voltmeter die Spannungen *ab*, *bc* und *ca* nacheinander mißt, in der gezeichneten Stellung z. B. die Spannung *ab*. Dabei sind in jeder Stellung des Schalters alle drei Phasen gleich belastet.

b) Wattmeterumschalter für Messung von Drehstromleistungen nach der Zweiwattmetermethode. Bei Drehstrommessungen nach der Zweiwattmetermethode (S. 72) kann man mit einem Leistungsmesser auskommen, wenn man den Wattmeterumschalter von Siemens & Halske,

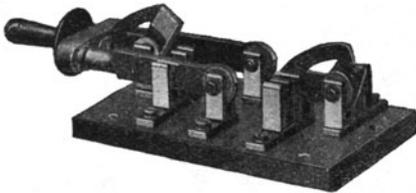


Fig. 35. Wattmeterersatzschalter von Siemens & Halske.

Fig. 35, benutzt. An die Schaltmesser legt man die Hauptstromspule des Leistungsmessers, die linken Kontaktfedern schaltet man in die eine Phase, die rechten in die andere ein. In der Mittelstellung der Schaltmesser sind sowohl die linken als auch die rechten Kontaktfedern durch

Kurzschließer geschlossen, die sich erst dann aus den Kontakten entfernen, wenn die Schaltmesser in diese eingreifen und die Hauptstromspule in die entsprechende Leitung einschalten. Ebenso schließt sich der Kurzschließer automatisch, bevor sich die Schaltmesser aus ihren Kontakten entfernen. Beim Umschalten des Leistungsmessers von einer Phase in die andere werden also die Leitungen nicht unterbrochen; auch kann man den Leistungsmesser ohne Störung des Betriebes auswechseln. Bei direkter Belastung durch das Netz kann man die Spannungsspule an das eine Schaltmesser legen und mit der Hauptstromspule umschalten, bei indirekter Belastung (Sparschaltung) muß man einen besonderen Spannungsumschalter vorsehen.

IV. Einrichtungen zur Bestimmung der Angaben.

Wie wir oben S. 7 sahen, eicht man die Zähler mit Ausnahme der elektrolytischen und Pendelzähler meist so, daß man während einer verhältnismäßig kurzen Zeit (etwa einer Minute) die Leistung im Netz konstant hält und die Umdrehungen des Zählerankers während dieser Zeit bestimmt. Man braucht im allgemeinen zwei Beobachter: Den einen, der die Leistung durch Regulierung der Spannung oder des Stromes (oder beider) konstant hält und den zweiten, der die Umdrehungen des Ankers zählt und die Zeit mißt, während welcher eine bestimmte Anzahl von Umdrehungen gezählt wurde. Im fol-

genden wollen wir die Apparate und Methoden betrachten, die der zweite Beobachter zur Ausführung seiner Tätigkeit braucht oder die seine Tätigkeit teilweise oder ganz ersetzen.

1. Doppelzeitschreiber oder Chronograph.

Der Doppelzeitschreiber wird bei allen möglichen Arten von Präzisionsmessungen benutzt. Eine einfache Ausführung der Firma Siemens & Halske zeigt Fig. 36. Ein Papierstreifen wird wie beim Telegraphenapparat mit einer gewissen Geschwindigkeit über zwei Schreibstiften bewegt. Der eine der beiden Schreibstifte wird elektro-

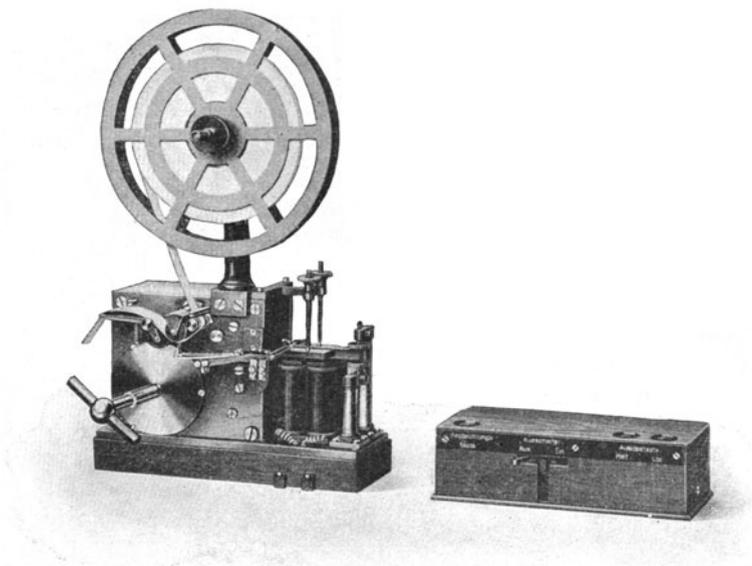


Fig. 36. Doppelzeitschreiber von Siemens & Halske.

magnetisch vermittelt einer Pendeluhr mit Sekundenkontakt jede Sekunde gegen den ablaufenden Streifen gedrückt und hinterläßt auf ihm eine Marke. Der zweite kann ebenfalls durch einen Elektromagnet betätigt werden, dessen Stromkreis man mittels eines Tasters jedesmal dann schließt, wenn eine auf der Bremsscheibe des Zählers angebrachte Marke an einer festen Marke vorbeigeht (vorbeihuscht). Bei jeder Umdrehung wird so eine Marke auf den Streifen gedrückt. Diese Marken liegen neben den Sekundenmarken. Zu jeder Umdrehungsmarke kann man also die zugehörige Zeitmarke ablesen und so die Umdrehungen pro Sekunde bestimmen.

Die Doppelzeitschreiber haben in neuerer Zeit Verbesserungen am Schreibwerk erfahren, wodurch eine genaue Ablesung sehr er-

leichtert wird. Besonders bewährt haben sich Schreibwerke, die einen fortlaufenden Farbstrich auf das Papier zeichnen, der bei jedesmaliger Betätigung des Elektromagneten durch eine Zacke unterbrochen wird. Ein großer Nachteil des Doppelzeitschreibers ist darin zu erblicken, daß nach der Arbeit des Messens noch die Arbeit des Auszählens der Streifen folgt¹⁾. Diese Arbeit nimmt meist so viel Zeit in Anspruch, daß für technische Messungen der Doppelzeitschreiber nicht in Frage kommt.

2. Stoppuhr.

In der Stoppuhr mit von $\frac{2}{10}$ zu $\frac{2}{10}$ Sekunden springendem Zeiger und Nullstellung hat man ein sehr brauchbares Mittel zur Zeitbestimmung mit direkter Ablesung. Mit Recht können allerdings gegen die subjektiven Fehler, die beim Abstoppen sehr leicht vorkommen, Einwände gemacht werden. Da aber der subjektive Fehler beim Einschalten dem beim Arretieren gleichen wird, so kann man mit einer Meßgenauigkeit von $\pm 0,2$ Sekunden rechnen, wenn verschiedene geübte Beobachter die gleiche Messung machen. Da man von der Güte der Uhr sehr abhängig ist, soll man sich nur erstklassige Fabrikate anschaffen. Man muß u. a. darauf achten, daß der Zeiger nicht exzentrisch gelagert ist, da auch kleine Abweichungen von der zentrischen Lage erhebliche Fehler hervorrufen können. Von Uhren mit zwei Arretierzeigern muß außer für Spezialfälle abgeraten werden, da diese immer zu Komplikationen Anlaß geben und meist häufigere Reparaturen notwendig machen.

Die Umdrehungen beobachtet man genau so, wie wenn man mit dem Doppelzeitschreiber arbeitet, am Vorbeigehen einer Marke der Scheibe an einer festen Marke. Beobachtungsfehler sind dabei nicht ausgeschlossen. Denn die Zeit, die vom Durchgang der Marke bis zum Abknipsen der Stoppuhr vergeht, ist von dem Beobachter abhängig. Dieser subjektive Fehler gleicht sich aber dadurch aus, daß er beim Beginn der Messung und an deren Ende groß ist. Die Beobachtung mit Stoppuhr wird demnach derjenigen mit Doppelzeitschreiber an Genauigkeit kaum nachstehen. Die Beobachtungszeit wählt man meist etwa 1 Minute lang mit Ausnahme von der Messung sehr kleiner Belastungen, wo man entsprechend längere Zeiten nimmt. Macht man bei 1 min = 60 sek einen Beobachtungsfehler von $\pm 0,2$ sek, so ist dies gleichbedeutend mit einem prozentualen Fehler von $\pm 0,33\%$. Dies ist also die erreichbare Meßgenauigkeit.

¹⁾ Gewecke und v. Krukowski benutzen als Hilfsmittel zur Auswertung der Streifen eine mit strahlenförmiger Teilung versehene Glasplatte; E. T. Z. 1918, S. 356.

3. Meßskala für Eichräume.

Die Konstante und den Fehler muß man natürlich von Fall zu Fall berechnen, wobei man sich die Arbeit durch Aufstellung geeigneter Tabellen vereinfachen kann. Ein Hilfsmittel, das man für die Einstellung der Zähler in Eichstationen besonders gut verwenden kann, ist eine Skala nach Fig. 37, bei der man die Messung etwas anders vornehmen muß als bisher beschrieben. Man berechnet sich die Zeit, die der richtig zeigende Zähler braucht, um bei einer gewissen Belastung die gewählte volle Anzahl Umdrehungen zurückzulegen. Dann schaltet man den Zähler (Hauptstrom- und Spannungskreis) genau so lange Zeit ein, wie man berechnet hat. Hat man die Marke der Scheibe vorm Einschalten auf Null eingestellt, so mißt man nach dem Ausschalten den Betrag am Umfang der Scheibe, um den die Marke den Sollwert des Weges des Ankerumfanges ($\pi \times$ Scheibendurchmesser \times gewählte volle Umdrehungen) über- oder unterschritten hat, mit einer dem Scheibenumfang angepaßten Skala, die man nach Art der Fig. 37 anlegt. Dieser Betrag, auf den Sollwert des Weges bezogen, ist gleich dem prozentualen Plus- oder Minusfehler. Die Skala kann man für Masseneichungen mit Teilstrichen versehen, an denen der prozentuale Fehler direkt abgelesen werden kann.

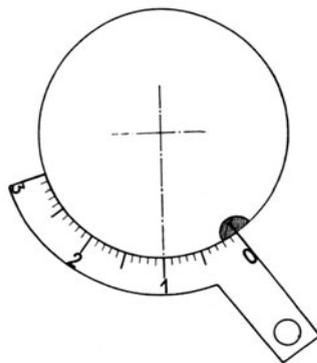


Fig. 37.
Meßskala für Eichräume.

Dieses Verfahren kann man noch vereinfachen, wenn man die zu prüfenden Zähler mit einem Normalzähler hintereinander schaltet. Die Marken der Bremsscheiben des Normalzählers und der zu eichenden Zähler stellt man auf Null. Nun schaltet man die gewünschte Belastung ein, wobei es nicht auf absolute Genauigkeit ankommt, zählt eine vorher bestimmte Anzahl von Umdrehungen und schaltet die Spannung ab, kurz bevor die Marke auf der Scheibe des Normalzählers ihre Nullstellung erreicht hat. Steht jetzt die Marke noch nicht genau auf Null, so schaltet man die Spannung kurzzeitig ein und holt so die Marke in ihre genaue Nullstellung. Nun schaltet man auch den Hauptstrom ab und mißt mit der Meßskala nach Fig. 37 die Beträge, um die die Marken der zu eichenden Zähler die Nullstellung über- oder unterschritten haben. Ist die Teilung der Meßskala mit dem Weg des Scheibenumfanges des Normalzählers richtig abgeglichen, so kann man den Fehler direkt in Prozenten des wirklichen Verbrauchs ablesen.

4. Automatische Zählvorrichtungen.

Es liegt nahe, zur Bestimmung der Umdrehungen von Zählern selbsttätige Einrichtungen zu verwenden. Es ist jedoch nicht einfach, derartige Vorrichtungen zum praktischen Gebrauch verwendbar zu machen, ohne an dem Zähler besondere Änderungen vornehmen zu müssen. Im folgenden sollen einige Anordnungen beschrieben werden, durch die die Aufgabe mehr oder weniger zufriedenstellend gelöst worden ist.

a) **Optische Methode mit Selenzelle.** In den Jahren 1909 und 1910 hat der Verfasser in der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt Versuche der folgenden Art gemacht. Ein kleiner Planspiegel, bestehend aus einem einige Zehntel Gramm wiegenden einseitig versilberten Deckplättchen aus Glas, wurde auf der Fläche der Brems-

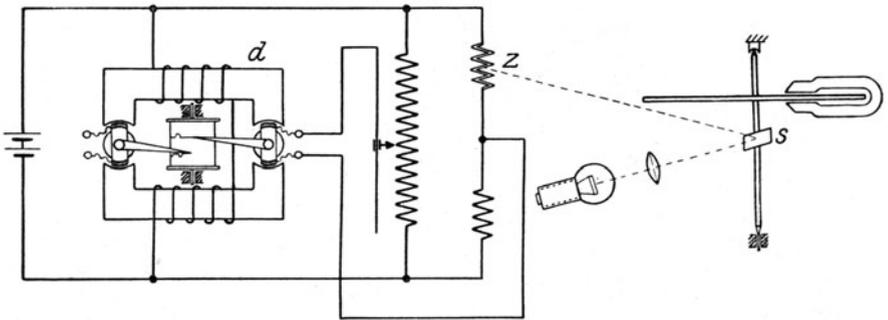


Fig. 38. Umdrehungszählvorrichtung mit optischer Übertragung und Selenzelle.

scheibe des Zählers festgekittet. Ein von einer Nernstlampe erzeugtes und durch eine Linse parallel gerichtetes Strahlenbündel wurde von dem Spiegel bei jeder Umdrehung einmal auf eine Selenzelle¹⁾ reflektiert. Die Änderung der Stromstärke in der Selenzelle infolge ihrer Widerstandsänderung wurde durch eine Brückenschaltung vergrößert. Durch ein Zwischenrelais, das aus einem Drehspulinstrument bestand, dessen Drehspule eine sehr hohe Windungszahl hatte²⁾, wurde ein Doppelzeitschreiber betätigt. Die Versuche zeitigten ein recht gutes Ergebnis, konnten aber nicht zu Ende geführt werden.

Unabhängig davon haben Gewecke und v. Krukowski dieses Verfahren ausbildet³⁾. Ihre Anordnung ist in Fig. 38 dargestellt. Der Spiegel *s* sitzt auf der Achse des Zählerankers, die Selenzelle *z*

¹⁾ Diese hatte Herr Prof. Glatzel seinerzeit zur Verfügung gestellt.

²⁾ Die Firma Siemens & Halske stellte dieses Instrument her und überließ es der P. T. R.

³⁾ E. T. Z. 1918, S. 356. Die Vorrichtung soll später von der Firma Siemens & Halske angefertigt werden.

ist als ein Zweig in einer Brückenschaltung angeordnet. Die eine Drehspule des Doppelzeitschreibers d liegt ohne Zwischenrelais an der Stelle der Brücke, wo sonst das Galvanometer angeschlossen wird. Die andere Drehspule des Doppelzeitschreibers wird von einer Sekundenuhr betätigt. Die Verfasser geben die Meßgenauigkeit mit 0.01 s. an. Bei nur 10 s. Ablesezeit würde dies einer Meßgenauigkeit von $0,1\%$ entsprechen.

Die optische Zählvorrichtung hat den Vorzug, daß man nach Aufbringen des Spiegels die Kappe wieder aufsetzen kann, ohne eine Leitung durch sie hindurchführen zu müssen. Der Spiegel muß nur so angebracht werden, daß der Lichtstrahl durch das Fenster der Kappe ein- und austreten kann. Der Spiegel ist so leicht, daß er das Gewicht des Ankers nur um einige Promille vermehrt und auf die Angaben nicht den geringsten Einfluß hat. Als Nachteil muß die Verwendung einer Selenzelle angesehen werden. Diese Zellen lassen sich schwer so herstellen, daß sie mit der Zeit an Empfindlichkeit nicht nachlassen. Nur wenn man sie ab und zu erneuert, wird man zufriedenstellend arbeiten können.

b) Stroboskopische Synchronisierung. Ohne irgendwelche besondere Vorrichtungen an Zähler anzubringen, kann man schwer eine Synchronisierung zwischen dem zu messenden Zähler und einer Normalvorrichtung (Normalelektrizitätszähler oder Normaltoureenzähler) herbeiführen. Blathy¹⁾ hat die Anordnung nach Fig. 39 angegeben. Die Scheibe des Normalapparates hat eine Reihe von Löchern L am Umfang, die Scheibe des zu messenden Apparates eine gleiche Anzahl Löcher oder auch weißer Punkte, die man von einer Lichtquelle aus hell beleuchtet. Beide Apparate ordnet man gleichachsrig übereinander an. Durch die Löcher des Normalapparats beobachtet man nun die Löcher oder die Punkte auf dem Anker des zu messenden Apparats. Sie scheinen in der Drehrichtung oder ihr entgegen zu wandern, je nachdem, ob der Anker des zu messenden Apparats schneller oder

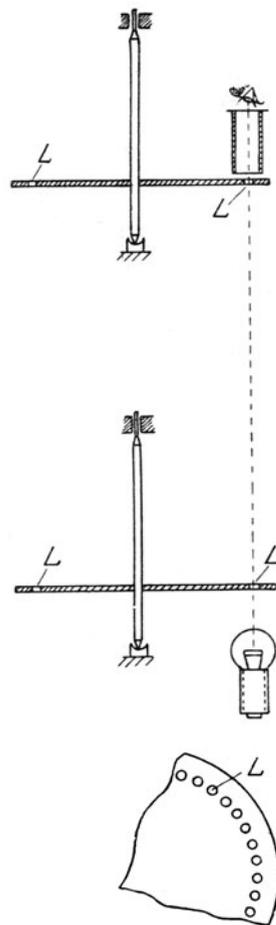


Fig. 39. Umdrehungszählvorrichtung durch optische Synchronisierung.

¹⁾ Österreich. Patentschrift 75 633/21 e vom 25. 2. 1919. (Angemeldet 9. 4. 1914.)

langsamer läuft, als der des Normalapparates. Ist Synchronismus vorhanden, so erscheinen die Punkte stillstehend. Man kann also die Tourenzahl des Normalapparats so lange ändern, bis sie mit der des zu messenden Zählers übereinstimmt. Die Vorrichtung kann man natürlich auch dazu benutzen, um die Tourenzahl des zu eichenden Zählers durch Regulierung des Bremsmagnets oder anderer Vorrichtungen auf die eingestellte des Normalapparats zu bringen. Ein Vorteil des Apparats ist die bequeme Einstellung, nachteilig ist dagegen der Umstand, daß man an dem Zähleranker besondere Löcher oder Punkte anbringen muß und außerdem ein oder mehrere besondere Fenster in der Kappe braucht, wenn man mit dieser messen will.

e) **Überspringender Funke.** Eine Anordnung, bei der ein von einer feststehenden Spitze zu einer mit dem Zähleranker umlaufenden Spitze überspringender Funke die Betätigung eines Relais einleitet, ist in Fig. 40 gezeichnet. Sie ist von G. Thompson¹⁾ angegeben und

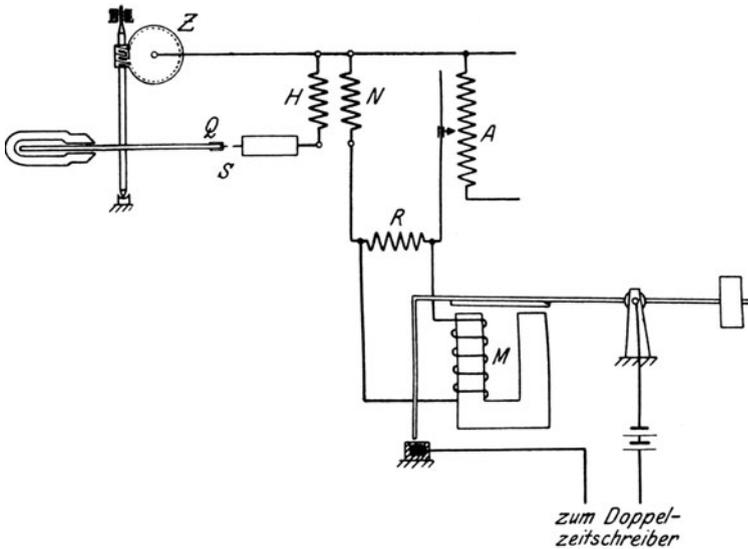


Fig. 40. Umdrehungszählvorrichtung mit überspringendem Funken.

hat nach seinen Angaben gut gearbeitet. Die Hochspannungswicklung H eines Transformators (10000 V. bei Thompson, 3000 V. bei Fitch und Huber) ist mit einem Pol über das Zählwerk Z an die Zählerachse angeschlossen, der andere Pol ist in einem stark isolierten Halter angebracht und läuft in eine Spitze S aus. Auf

¹⁾ El. World, Bd. 61, 1913, S. 246. (E. T. Z. 1913, S. 722.) Unabhängig kamen Fitch und Huber auf die gleiche Anordnung, vgl. Bulletin Bureau of Standards, Vol. 10, 1913, S. 174.

die Bremsscheibe ist ein leichter, gleichfalls mit einer Spitze versehener Reiter Q aufgesetzt. Bei jeder Umdrehung der Scheibe springt ein Funke zwischen der Spitze S und dem Reiter Q über, und es ändert sich in diesem Moment der Strom in der Niederspannungswicklung N des Transformators. In dem Kreise der Niederspannungswicklung, dessen Spannung durch einen Autotransformator A eingestellt werden kann, liegt der Widerstand R , von dem die Magnetwicklung M eines Wechselstromrelais abgezweigt ist. Das Relais betätigt den Stromkreis des einen Magnets eines Doppelzeitschreibers.

Der Umstand, daß der Funke nicht immer genau in der gleichen relativen Stellung zwischen Spitze S und Reiter Q überspringt, sondern leicht etwas früher oder später, kann nach den Angaben von Thompson nur bei weniger als drei Umdrehungen in der Minute mehr als $0,1\%$ Fehler hervorrufen. Die Beschleunigung der Scheibe durch elektrostatische Anziehung beim Nähern des Reiters gegen die Nadel wird vollständig aufgehoben durch die Verzögerung bei der Entfernung beider. Benutzt man für den Funkenstrom die gleiche Frequenz wie für den Zählerstrom, so kann der durch die Scheibe gehende Funkenstrom mit den Zählerfeldern ein positives oder negatives Drehmoment ergeben. Man muß deshalb darauf achten, daß die Spitze S so angebracht ist, daß der Funkenstrom an einer Stelle durch die Scheibe geht, wo sie nicht von Wechselfeldern durchsetzt wird. Sicher vermeidet man die störende Wirkung, wenn man dem Funkenstrom eine andere Frequenz gibt als dem Zählerstrom.

Die Vorrichtung hat sicher den Vorzug der Einfachheit und Zuverlässigkeit. Aber es wird immer unangenehm sein, mit Hochspannung zu arbeiten, wenn auch die Leistung des Transformators so klein ist, daß der Strom bei Kurzschluß nur etwa $0,008$ A. werden kann. Mit Kappe kann man aber wohl kaum die Eichung vornehmen, ohne eine besondere Hochspannungseinführung vorzusehen; denn man kann den Zuleitungsdraht nicht einfach mit geringer Isolation unterklemmen, weil der Funke dann an dieser Stelle überspringen würde, anstatt an dem Reiter.

d) Mechanischer Kontakt mit Reibungskompensation. Es erscheint absurd, einen mechanischen Kontakt an der Bremsscheibe des Zählers anzubringen. Bei allen solchen Zählern, die einen permanenten Magnet haben — und das sind die meisten —, hat man es jedoch in der Hand, die Kontaktreibung dadurch zu kompensieren, daß man den Kontaktstrom unter dem Bremsmagnet so hindurchleitet, daß sich ein treibendes Drehmoment ergibt, das das Moment der Kontaktreibung gerade aufhebt. Fig. 41 zeigt eine von F. Estel angegebene Anordnung¹⁾.

¹⁾ D. R. P. 298 753; E. T. Z. 1920, S. 269.

Auf der Zählerscheibe Z , die über das Zählwerk mit einem Pol einer Gleichstrombatterie verbunden ist, sitzt ein Reiter R ; dessen Spitze berührt bei jedesmaliger Umdrehung der Scheibe die Quecksilberkuppe Q , die über ein Relais an den anderen Pol angeschlossen ist. Der

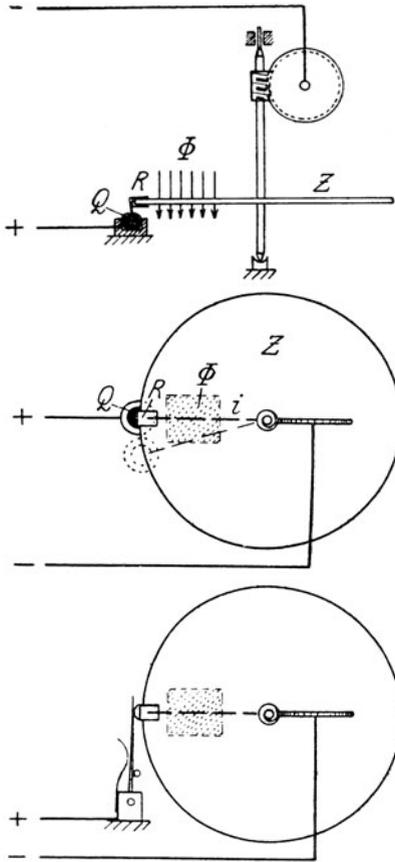


Fig. 41. Umdrehungszählvorrichtung mit mechanischem Kontakt.

durch die Scheibe fließende Strom i ergibt bei richtigem Anschluß mit dem Fluß Φ des permanenten Magnets ein vorwärtstreibendes Drehmoment, das sein Maximum erreicht, wenn die Quecksilberkuppe an der mit ausgezogenen Linien gezeichneten Stelle steht. Rückt man sie in die mit punktierten Linien gezeichnete Lage, so wird der Stromfaden nur mit einem Teil des Flusses in Verbindung treten und also ein kleineres Drehmoment ergeben. Durch Verstellen des Kontaktes hat man es in der Hand, die Kontaktreibung ganz genau zu kompensieren. Je kleiner das Zählerdrehmoment ist, desto genauer muß man die Einstellung vornehmen. Da aber der Kontakt nur auf einen Bruchteil des Ankerumfangs erfolgt, so geht seine Reibung nur mit diesem Bruchteil in die Rechnung ein.

Bei einem Durchmesser der Scheibe von 100 mm beträgt das Reibungsmoment des Kontakts etwa 0,3 cmg. Die Breite des Kontakts sei 5 mm, d. h. etwa $\frac{1}{63}$ des Scheibenumfangs. Es sei angenommen, man habe das Reibungsmoment bis

$$F = \frac{1}{63} \cdot \frac{0,015}{0,12} \cdot 100 = 0,2\%.$$

auf 0,015 cmg ($= 5\%$) genau kompensiert, wie dies leicht möglich ist. Der Zähler laufe mit nur 2% der Nennlast; er entwickelt dabei unter Annahme eines Vollastdrehmoments von 6 cmg ein Drehmoment von 0,12 cmg. Dann ist der Meßfehler infolge der nicht vollkommen kompensierten Reibung

Bei so kleinen Belastungen ist ein derartiger Meßfehler ohne Bedenken zu dulden.

An Stelle des Quecksilbernapfes kann man auch eine Bürste verwenden. Man vermeidet dadurch den Einfluß von Quecksilberdämpfen auf die Organe des Zählers. Ein solcher Bürstenkontakt ist schematisch ebenfalls in Fig. 41 dargestellt. Die Zuleitungsdrähte kann man, da sie nur sehr niedrige Spannungen führen, ohne Bedenken zwischen Gehäuse und Kappe einklemmen, so daß man auch mit aufgesetzter Kappe eichen kann. Nachdem man die Kappe aufgesetzt hat, kann man die Kompensation durch Änderung des Kontaktstromes i genau einstellen. Die Kontakteinrichtung kann natürlich ebenso wie die oben beschriebenen auf einen Doppelzeitschreiber arbeiten.

e) Mechanische Zählung der Umdrehungen und Betätigung der Stoppuhr. Estel hat nun in Verbindung mit dem mechanischen Kontakt eine Zählvorrichtung ausgearbeitet, die einen bedeutenden Fortschritt gegenüber allen anderen darstellt und die die Person vollkommen ersetzt, welche sonst das Zählen der Umdrehungen und das Abstoppen der Uhr ausführen muß. Dieser „automatische Eicher“, wie man

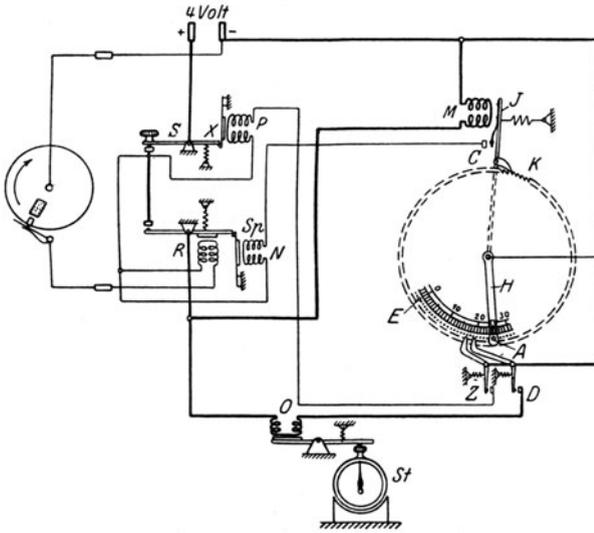


Fig. 42. Automatischer Eicher.

den Apparat nennen könnte, ist in Fig. 42 schematisch dargestellt. An einem Klinkwerk K stellt man die gewünschte Anzahl der Ankerumdrehungen ein; nach Einlegen des Schalters S arbeitet dann die Vorrichtung selbsttätig, schaltet die Stoppuhr St ein und aus und bringt die Apparatur zum Stillstand, wenn die Messung beendet ist. Die eingestellten Umdrehungen und die abgestoppte Zeit brauchen dann nur noch in die Berechnung für den Fehler eingesetzt zu werden.

Die Handhabung und Wirkungsweise sei im folgenden kurz geschildert: Man stellt den um den Mittelpunkt der Klinkscheibe drehbaren Hebel H auf die gewollte Umdrehungszahl ein, indem man den an ihm angebrachten Stift A in eines der in der Klinkscheibe befindlichen Löcher einschnappen läßt, dessen Nummer man an der zugehörigen Skala ablesen kann. Sodann dreht man von Hand die Klinkscheibe so weit, daß der beim Nullpunkt der Skala fest angebrachte Stift E kurz vor die Nase des Schalters D zu stehen kommt. Dann leitet man die eigentliche Messung durch Niederdrücken des Schalters S ein und braucht sich nun nicht mehr um den Zählapparat zu kümmern, sondern kann seine ganze Aufmerksamkeit den zur Messung der Leistung, des Stromes und der Spannung dienenden Apparaten widmen. Der Vorgang spielt sich nun selbsttätig so ab: Beim Niederdrücken des Schalters S schnappt eine Sperrklinke X ein und hält ihn in der Einschaltstellung fest. Der Kontakt am Zähler schließt bei jeder Umdrehung des Ankers mit Hilfe eines Relais R den Stromkreis des Magnets M , der das Klinkwerk betätigt. Damit bei schnellaufendem Zähler der Stromschluß nicht so kurz ist, daß die Masse des Klinkwerks nicht beschleunigt werden kann, wird der Schalter des Relais R durch eine Sperrklinke Sp so lange festgehalten, bis der Anker J des Klinkwerks seinen Hub vollendet hat und vermittelt des Kontaktes C und des Magnets N die Sperrklinke Sp auslöst. Bei jeder Klinkung wird das Klinkrad um einen Zahn, also auch um einen Teilstrich der Skala vorwärts bewegt. Zuerst berührt der Stift E die Nase des Schalters D und schaltet vermittelt des starken Elektromagnets O die Stoppuhr St ein. Der Stift E ist so kurz, daß er die Nase des Schalters Z , die aus der Bildebene heraus höher liegt, als die des Schalters D , beim Weiterbewegen des Klinkwerks nicht berührt. Nachdem die mit dem Hebel H eingestellte Anzahl von Ankerumdrehungen und also auch Klinkungen ausgeführt sind, berührt der Stift A die Nase des Schalters D und schaltet die Stoppuhr ab. Bei der nächsten Klinkung berührt der gleiche Stift A , der länger ist als der Stift E , auch die Nase des Schalters Z und löst mittels des Magnets P die Sperrung X des Hauptschalters S ; die gesamte Zählvorrichtung ist dann stromlos. Durch das Geräusch beim Herausschnappen des Schalters S aus seiner Sperrklinke wird dem Beobachter zugleich das Ende der Messung angezeigt. Man kann natürlich mit dem Schalter Z auch ein Klingelsignal verbinden.

Der Apparat kann mit jeder der Kontaktvorrichtungen, die unter a, c und d beschrieben sind, verbunden werden. Der größte Vorzug der Vorrichtung ist darin zu erblicken, daß man vollständig objektive, von allen persönlichen Einflüssen unabhängige Resultate erhält, ohne wie bei anderen Methoden viele Zeit und Mühe zum

Auszählen des Papierstreifens des Doppelzeitschreibers verwenden zu müssen. Die Fehler der Stoppuhr muß man in Kauf nehmen oder vielmehr dafür sorgen, daß man eine möglichst gute Stoppuhr benutzt.

V. Eichzähler und Registrierinstrumente.

In solchen Fällen, wo es nicht auf sehr große Genauigkeit bei der Bestimmung des Fehlers ankommt, kann man die Angaben der zu eichenden Zähler mit denen eines besonders gut eingestellten Zählers vergleichen, dessen Abweichungen vom Sollwert genau be-

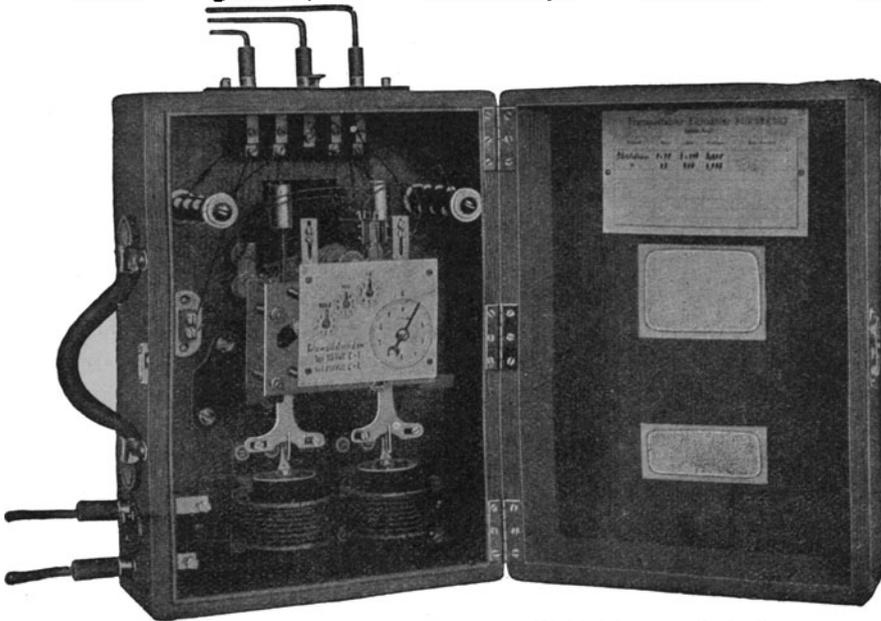


Fig. 43. Eichzähler der H. Aron Elektrizitätsgesellschaft.

kannt sind. Besonders bei Prüfungen in der Installation ist dieses Verfahren sehr bequem und erfordert keine ausgebildeten Kräfte. Die transportablen Normal- oder Eichzähler haben zumeist ein besonderes Zeigerwerk, an dem man auch kleine Leistungen noch verhältnismäßig genau ablesen kann. In Fig. 43, einem Eichzähler der Firma H. Aron nach dem Pendelprinzip, ist der Zeiger mit der genauen Teilung auf der rechten Seite des Zifferblattes zu sehen. Bei dem in Fig. 44 abgebildeten Eichzähler mit rotierendem Anker der Isaria-Zählerwerke liegt der Zeiger in dem oben



Fig. 44.
Eichzähler der
Isaria-Zählerwerke.

sichtbaren runden Fenster. Die Eichzähler sind meist für verschiedene der gebräuchlichsten Maßbereiche umschaltbar eingerichtet und mit bequem zugänglichen Anschlußklemmen versehen.

Will man das Verhalten von Elektrizitätszählern unter besonderen Betriebsverhältnissen und auf längere Dauer beobachten, so wendet man in besonderen Fällen auch Registrierinstrumente zur Eichung an. Die Auswertung der Papierstreifen solcher Instrumente ist aber so zeitraubend und auch ungenau, daß man sie meist nur zur Kontrolle der Betriebsverhältnisse benutzen wird, während man zur Eichung einen Eichzähler verwendet.

VI. Eichschaltungen.

Will man den Fehler eines Elektrizitätszählers richtig bestimmen, so muß man nicht nur den wirklichen Verbrauch und die Angaben richtig messen, sondern man muß auch den Zähler und die zur Bestimmung des wirklichen Verbrauchs benutzten Instrumente richtig schalten. Es kommt nicht selten vor, daß durch unrichtige Schaltungen erhebliche Meßfehler entstehen, die man später nicht mehr nachkontrollieren kann. Wir wollen deshalb die bei den üblichen Zählerarten vorkommenden Schaltungen systematisch betrachten. Manches Selbstverständliche wird nochmals gesagt werden müssen, einige nur noch selten vorkommende Schaltungsarten sollen auch behandelt werden. Tarifzähler und andere Spezialarten sollen nicht in die Betrachtung einbezogen werden. Bei der Zeichnung der Schaltungsschemata ist darauf Wert gelegt worden, durch dünne Linien den Spannungskreis von dem mit dicken Linien gezeichneten Hauptstromkreis zu unterscheiden. Ferner sind Leistungsmesser und Zähler durch verschiedenartige Darstellung eindeutig gekennzeichnet. Neben die Meßinstrumente sind immer die Werte geschrieben, zu deren Messung sie benutzt werden. Der Zähler ist mit Z bezeichnet. Die Strom- und Spannungswandler sind meist ohne Bezeichnungen geblieben. Der immer anzuschließende Frequenzmesser ist in allen Schemata weggelassen worden, weil er meist direkt an die von dem stromliefernden Generator kommenden Leitungen angeschlossen wird und die Messung dann nicht beeinflußt.

1. Einphasenwechselstrom.

a) Schaltung bei getrenntem Strom- und Spannungskreis.

Niederspannung und Niederstrom.

Bei Einphasenwechselstrom wird der Leistungsmesser L genau so geschaltet, wie der Zähler Z , vgl. Fig. 45. Strommesser J und Spannungsmesser E sind mit eingezeichnet. Bei der Schaltung ist nur

darauf zu achten, daß der Spannungsabfall in der Leitung zwischen den Punkten *a* und *b* verschwindend klein ist. Der Leistungsfaktor bestimmt sich aus den Ablesungen der entsprechenden Instrumente mit

$$\cos \varphi = \frac{L}{E \cdot J}.$$

Will man für gleichbleibende Spannung und Stromstärke bei verschiedenen Leistungsfaktoren messen, so ist der Leistungsfaktor proportional den Angaben des Leistungsmessers. Die Bestimmung gilt für

Ströme jeder Kurvenform. Mit einem Phasenmesser (S. 39) kann man dagegen den Leistungsfaktor nur unter Annahme von sinusförmigem Verlauf von Strom und Spannung messen.

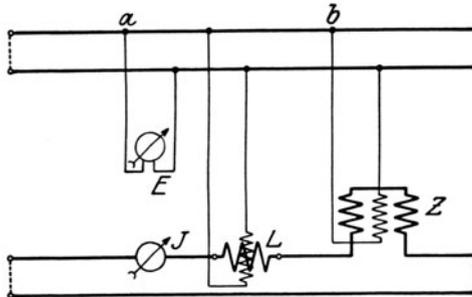


Fig. 45. Einphasenwechselstrom, getrennter Strom- und Spannungskreis, Niederspannung und Niederstrom.

Hochspannung und Hochstrom.

In Fig. 46 ist ein Schaltungsschema für Hochspannung gezeichnet, unter Weglassung der Spannungswandler gilt es auch für Hochstrom bei Niederspannung. Um richtige Angaben des Leistungsmessers zu erhalten, muß man darauf achten, daß keine störenden elektrostatischen und elektromagnetischen Felder auftreten. Zur Vermeidung von elektrostatischen Feldern kommt es vor allen Dingen für die Leistungsmessung darauf an, daß die Äquipotential-Verbindung zwischen Spannungs- und Stromspule des Leistungsmessers vorgesehen wird, damit zwischen diesen keine Potentialdifferenz besteht. Andernfalls können statische Ladungen auftreten, wodurch infolge Anziehung oder Abstoßung zusätzliche Drehmomente auf die bewegliche Spule ausgeübt werden, die in ungünstiger Lage der Spulen Ausschläge bis zu mehreren Teil-

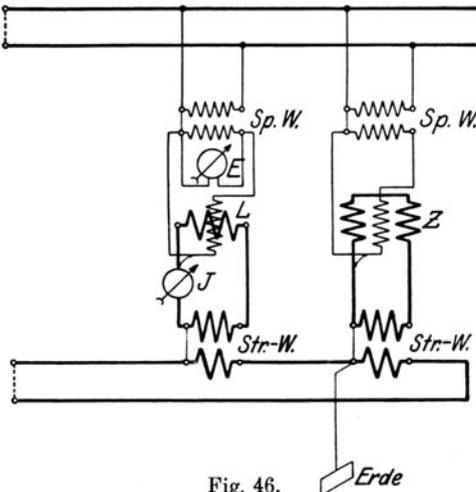


Fig. 46.

Einphasenwechselstrom, getrennter Strom- und Spannungskreis, Hochspannung und Hochstrom.

strichen hervorrufen. Zu empfehlen ist es ferner, je einen Pol der Hochspannungs- und Hochstromleitung zu erden, ebenso das Gehäuse des Zählers, da sonst über die als Kondensatoren wirkenden Wicklungen ziemlich hohe Ladungen auf das Gehäuse übergehen können. Wenn die Erdungen nicht vorgesehen werden, so kann es vorkommen, daß zentimeterlange Funken überspringen, wenn man mit der Hand oder einem anderen geerdeten Gegenstand in die Nähe des Gehäuses kommt. Wenn diese Funkenströme auch sehr klein und vollkommen unschädlich sind, so wird der betreffende Beobachter doch erschrecken und dabei leicht durch eine heftige Bewegung Schaden anrichten. Daß alle Erdverbindungen so angelegt werden müssen, daß keine Nebenschlüsse zur Meßschaltung entstehen, bedarf kaum der Erwähnung.

Elektromagnetische Felder treten um die Leiter des Spannungskreises nie in solcher Größe auf, daß man sie beachten müßte. Dagegen muß man sehr darauf achten, daß schon bei mäßigen Stromstärken die Hin- und Rückleitungen des Hauptstromkreises so nahe beieinander unter Vermeidung von Schleifenbildung verlegt werden, daß keine wesentlichen Felder entstehen können. Achtet man nicht genügend darauf, so kann man besonders bei der Verwendung von eisenlosen Instrumenten erhebliche Fehlmessungen machen. Ob die Leitungsführung genügend feldlos ist, stellt man am einfachsten dadurch fest, daß man das für die Beeinflussung in Frage kommende Instrument um 180° dreht und beobachtet, ob sich sein Ausschlag ändert oder nicht.

Der Leistungsfaktor berechnet sich genau so wie bei Niederspannung, nur muß man die Wandlerfehler berücksichtigen. Letzterer muß natürlich auch bei der Messung der Leistung berücksichtigt werden. (Vgl. S. 45.)

b) Schaltung bei direkter Belastung.

Niederspannung und Niederstrom.

Will man einen Wechselstromzähler in der Installation prüfen, so hat man nur selten die Möglichkeit, mit getrennten Strom- und Spannungskreisen zu arbeiten. Die Belastung stellt man dann ent-

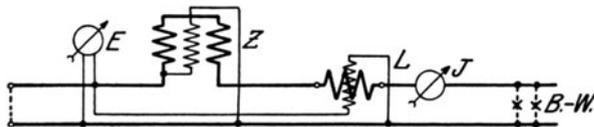


Fig. 47. Einphasenwechselstrom, direkte Belastung, Niederspannung und Niederstrom.

weder durch die Installation selbst oder durch besondere Belastungswiderstände, wie sie oben S. 21 beschrieben sind, her. Die Schaltung wird nach dem Schema der Fig. 47 ausgeführt. Eine Äquipotentialverbindung zwischen Strom- und Spannungsspule ist ohne weiteres durch die Schaltung des Zählers in der Installation gegeben.

Bei Niederspannung und Hochspannung ist der Spannungsmesser und die Spannungsspule des Leistungsmessers oder der Spannungswandler so anzuschließen, daß die in ihnen fließenden Ströme nicht durch die Stromspule des Zählers fließen, sondern vorher abgezweigt werden, wie dies aus den Fig. 47 und 48 zu ersehen ist.

Hochspannung und Hochstrom.

Bei Hochspannung darf man die eingezeichneten Äquipotential- und Erdverbindungen nicht vergessen. Beim Zähler ist meist schon an der Anschlußklemme eine solche zwischen Hauptstrom- und Spannungskreis vorgesehen, so daß die in Fig. 48 gezeichnete wegfallen kann.

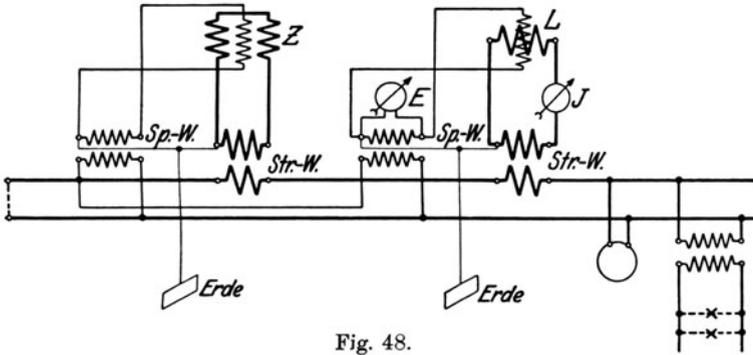


Fig. 48.

Einphasenwechselstrom, direkte Belastung, Hochspannung und Hochstrom.

Bei Hochstrommessungen muß darauf geachtet werden, daß die Zuleitungen zum Strommesser und Leistungsmesser möglichst nahe aneinander geführt werden, damit keine schädlichen Felder entstehen. Auch muß man darauf achten, daß man die Instrumente nicht zu nahe an die Leitungen der Installation heranbringt, zumal wenn diese so weit voneinander verlegt sind, daß man eine Feldbildung befürchten muß. Die Probe besteht wieder darin, daß man das betreffende Instrument in zwei um 180° gegeneinander versetzten Stellungen abliest, wobei es keine Änderung des Ausschlags zeigen darf.

c) Prüfklemmen.

Um die Instrumente für die Prüfschaltung in der Installation einbauen zu können, muß man die ganze Installation unterbrechen, wenn man keine besonderen Vorrichtungen vorsieht. Bringt man dagegen an der eigentlichen Zählerklemme eine Prüfklemme an, so kann man die Installation ganz unbehelligt lassen und trotzdem die Prüfung vornehmen. Natürlich können Prüfklemmen nur bei Niederspannung und geringen Stromstärken verwandt werden. Die Fig. 49a bis d zeigen beispielsweise eine Prüfklemme der A.E.G. für Einphasenwechselstrom- oder Gleichstromzähler, bei denen zwei Leitungen ein-

geführt werden und geben die verschiedenen Schaltungen an, die man mit der Prüfklemme vornehmen kann. Die Prüfklemme wird mit vier Stiften in die Zählerklemme eingesetzt und dauernd mit ihr verbunden. Sie hat 2×3 Anschlüsse, während die Zählerklemme nur 2×2 hat. Der mittlere dieser Anschlüsse ist mit einer Brücke fest

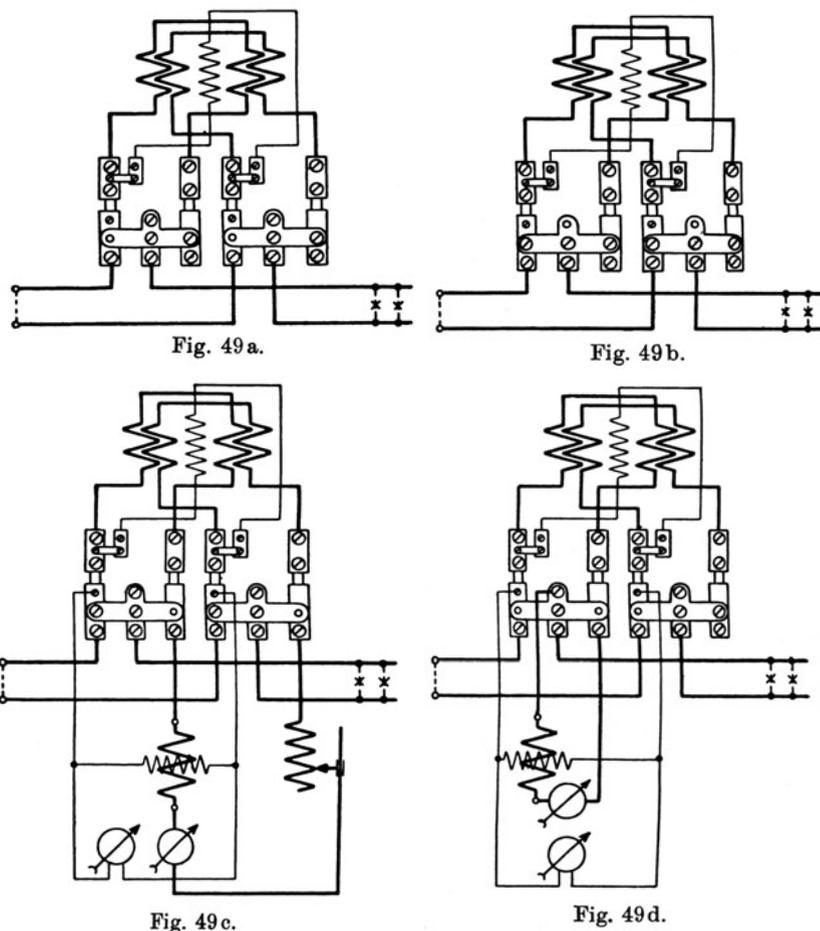


Fig. 49 a—d. Prüfklemmen der A. E. G. für Einphasenwechselstrom und Gleichstrom.

verbunden. Die Brücke ist gegen die beiden Zählerklemmen durch Zwischenlagen isoliert und kann nur durch Einschrauben der Schrauben, deren Köpfe in der Figur zu sehen sind, mit einer der beiden Zählerklemmen oder mit beiden zugleich verbunden werden. Außerdem hat die Brücke noch einen nach oben stehenden Lappen mit einer Anschlußschraube, unter die noch eine besondere Leitung geklemmt

werden kann. In den Schaltbildern ist nur dort eine Verbindung anzunehmen, wo der Schraubenkopf gezeichnet ist; wo nur ein Loch zu sehen ist, ist die Schraube entfernt und also keine Verbindung vorhanden. Für jede Brücke braucht man höchstens 3 Schrauben.

Fig. 49 a zeigt die Verbindungen bei Betriebsschaltung in der Installation. Will man den Zähler prüfen, ohne den Betrieb und die Installation zu stören, indem man einen besonderen Belastungswiderstand anwendet, so muß man über die Schaltung der Fig. 49 b, wobei die Hauptstromspule des Zählers kurz geschlossen wird, zur Schaltung nach Fig. 49 c übergehen. Die nötigen Handgriffe ergeben sich aus den Figuren und brauchen nicht besonders erläutert zu werden. Will man die Installation selbst als Belastung benutzen, so geht man über die Schaltung Fig. 49 b zur Schaltung Fig. 49 d über, ohne eine Unterbrechung der Leitung vornehmen zu müssen. Es sei noch bemerkt, daß man bei der Übergangsschaltung nach Fig. 49 b den Zähler auswechseln kann, ohne die Installation zu unterbrechen.

L. N° 4682

Schaltungsschema einer Prüfklemme zum Prüfen von Gleich-Wechselstrom 3 Leiter Zählern.

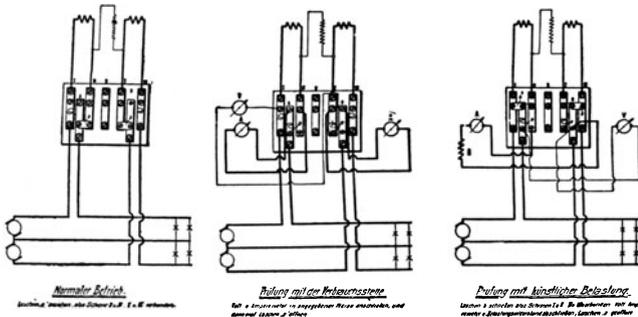


Fig. 50 a.

Fig. 50 b.

Fig. 50 c.

Prüfklemme der Isaria-Zählerwerke für Einphasenwechselstrom und Gleichstrom.

Bei anderen Ausführungen der Prüfklemmen werden umlegbare Laschen benutzt, mit denen man von einer Schaltung auf eine andere übergehen kann. Eine solche Prüfklemme der Isaria-Zählerwerke zeigt Fig. 50a bis c. Die Übergangsschaltung, bei der man die Hauptstromspulen des Zählers kurzschließt, ist dort nicht gezeichnet.

2. Vierleiter-Zweiphasenwechselstrom.

Wie Fig. 51 zeigt, sind bei Vierleiter-Zweiphasenstrom beide Phasen vollkommen unabhängig voneinander. Jede Phase wirkt auf ein Zählersystem, das von dem anderen vollkommen getrennt ist. Beide Systeme arbeiten auf eine gemeinsame Achse.

a) **Schaltung bei direkter Belastung.** Bei der Eichung in der Installation benutzt man zwei Leistungsmesser, die genau so wie die beiden Systeme des Zählers geschaltet werden, Fig. 51.

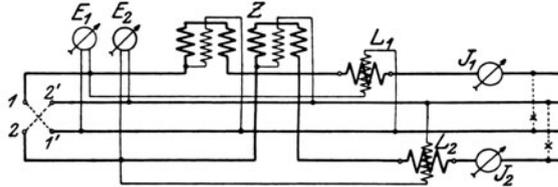


Fig. 51. Vierleiter-Zweiphasenstrom, direkte Belastung.

b) **Schaltung bei getrennten Strom- und Spannungskreisen.** Bei der Eichung mit getrennten Strom- und Spannungskreisen nimmt man meist jede Phase getrennt vor, macht also zwei Einphasenmessungen, entsprechend Fig. 52. Dabei muß nur die Spannungsspule des anderen Systems erregt sein. Es kommt nicht darauf an, daß die Phase der an dieser Spannungsspule liegenden Spannung um 90° gegenüber der verschoben ist, die an der Spannungsspule des der Messung unterworfenen Systems liegt; beide Spannungen können gleichphasig sein. Denn es kommt nur darauf an, daß die Bremsung durch den Fluß der Spannungsspule dem normalen Wert gleich ist. Nur wenn man veraltete Zähler zu eichen hat, bei denen die beiden Systeme einander beeinflussen, ist Vorsicht geboten.

Man kann auch die zwei Einphasenmessungen in den beiden Phasen zu gleicher Zeit mit zwei Leistungsmessern machen und wird die gleichen Resultate erhalten wie bei Zweiphasenwechselstrom.

Will man aus irgendwelchen Gründen mit Zweiphasenwechselstrom eichen und hat man keine Zweiphasenstromquelle zur Ver-

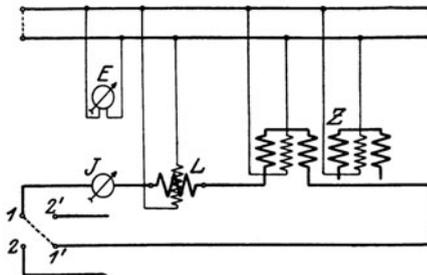


Fig. 52. Vierleiter-Zweiphasenstrom, getrennte Strom- und Spannungskreise.

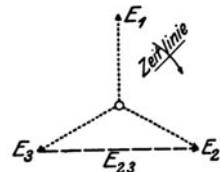


Fig. 53. Zweiphasenstrom aus Drehstrom.

fügung, so kann man sich dadurch helfen, daß man entsprechend Fig. 53 z. B. an einem Drehstromtransformator, dessen Nullpunkt zugänglich ist, die Spannungen E_1 und E_{23} abnimmt. Die Größen

der beiden Spannungen brauchen dann nur einander gleich gemacht zu werden, ihre Phasen sind um 90° gegeneinander verschoben. Für die Hauptströme kann man sich auf ähnliche Weise eine Stromquelle improvisieren. Jedoch tritt bei derartigen Anordnungen meist die Schwierigkeit auf, daß sich die Phasengleichheit zwischen den zugeordneten Strömen und Spannungen nur mit viel Geschick erreichen läßt. Man wird deshalb meist mit der oben beschriebenen Eichung mittels Einphasenstrom vorlieb nehmen.

Schaltungsschemata für Hochspannungs- und Hochstromeichungen sollen nicht angegeben werden, weil sie sich ohne weiteres aus dem früher für Einphasenstromzähler Gesagten ergeben. Es sei nur noch erwähnt, daß geerdete Äquipotentialverbindungen zwischen den Strom- und Spannungsspulen der Leistungsmesser notwendig sind; ferner verbindet man gegebenenfalls die Leitungen 1' und 2', sowohl im Spannungs- als auch im Stromkreise untereinander und mit Erde.

3. Dreileiter-Zweiphasenwechselstrom.

Bei Dreileiter-Zweiphasenstrom (verkettetem Zweiphasenstrom) gilt genau das gleiche, wie bei Vierleiter-Zweiphasenstrom. Nur werden immer die beiden Leitungen 1' und 2' in eine vereinigt.

4. Vierleiter-Drehstrom, drei messende Systeme.

a) Schaltung bei getrennten Strom- und Spannungskreisen.

Niederspannung und Niederstrom.

Bei Messung der Drehstromleistung mit drei messenden Systemen im Vierleiternetz wird im Prinzip eine Einphasenmessung dreimal wiederholt. Bei getrennten Strom- und Spannungskreisen wird man die Hauptstromspulen entsprechend Fig. 54 schalten. Hat man eine Spannungsleitung mit Nulleiter, so schaltet man sowohl die Spannungsspulen der Zähler und Leistungsmesser als auch die Voltmeter zwischen die einzelnen Phasen und den Nulleiter.

Oft wird man aber die Schaltung des Spannungskreises nach Fig. 54 machen, d. h. man wird sich ein Dreieck herstellen und dann das Dreieck so drehen, daß es zu dem Stern des Hauptstromdiagramms in die richtige zeitliche Lage kommt. Voraussetzung ist dabei nur, daß beide Enden aller drei Spannungsspulen an der Anschlußklemme des Zählers zugänglich und nicht an ihren Enden unlösbar zusammengeschlossen sind. Sind diese Enden mit 1 — 0, 2 — 0, 3 — 0 bezeichnet, so wird nach Fig. 54 verbunden:

1 — 0	mit	1 — 2
2 — 0	„	2 — 3
3 — 0	„	3 — 1

Der Nullpunkt der Spulen liegt also reihum an den Phasen 1, 2, 3. Dann erhält man die richtigen Verhältnisse, wie aus den unter Fig. 54 gezeichneten Diagrammen hervorgeht. Das linke Diagramm bezieht sich auf den in Stern geschalteten Stromkreis, das rechte auf die in Dreieck geschalteten Spannungsspulen, wenn Phasengleichheit zwischen Strom und Spannung in jedem messenden System bestehen soll.

Der Leistungsfaktor berechnet sich für jedes einzelne System genau wie bei Einphasenstrom.

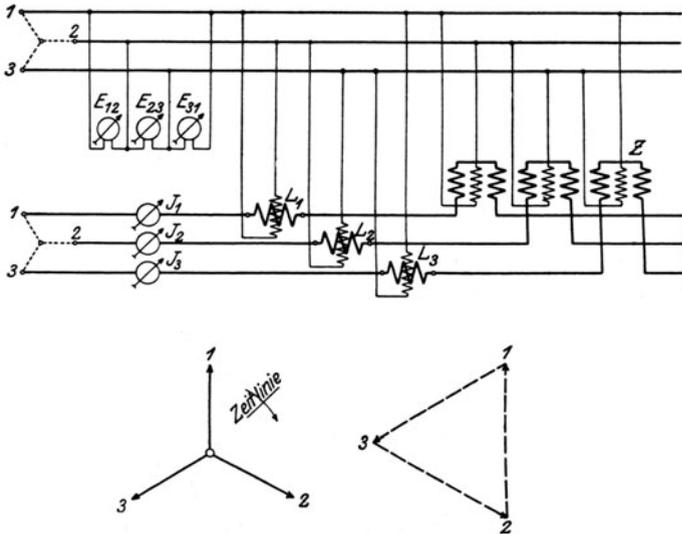


Fig. 54. Vierleiter-Drehstrom mit drei messenden Systemen, getrennte Strom- und Spannungskreise, Niederspannung und Niederstrom.

Hochspannung und Hochstrom.

Für Hochspannung ist kein besonderes Schaltschema gezeichnet, es ergibt sich aus Fig. 54, wenn man Spannungs- und Stromwandler zwischenschaltet. Dabei kann an Stelle von drei Einphasen-Spannungswandlern auch ein Drehstromwandler verwendet werden. Äquipotentialverbindungen sind an jedem einzelnen Leistungsmesser nötig, auch erdet man diese zweckmäßig. Bei Verwendung eines Drehstromwandlers kann man an Stelle dieser Verbindungen auch die Stromspulen der Leistungsmesser und den Nullpunkt des Spannungswandlers erden. Erdungsverbindungen sind ferner für die Nullpunkte der Hochspannungsleitungen erforderlich. Ist die primäre Hochspannungsleitung in Dreieck geschaltet und also kein Nullpunkt vorhanden, so kann man den Nullpunkt des stromliefernden Transformators erden. Ist auch dies nicht möglich, so schafft man am besten einen

künstlichen Nullpunkt durch drei in Stern geschaltete Widerstände oder Drosseln, wozu man einen kleinen Transformator benutzen kann, dessen Sternpunkt zugänglich ist (vgl. auch Fig. 65).

b) Schaltung bei direkter Belastung.

Fig. 55 zeigt die Schaltung für Zähler mit drei messenden Systemen und Nulleiter in der Installation bei direkter Belastung durch Lampen und Motoren. Wie bei Einphasenwechselstrom ist dar-

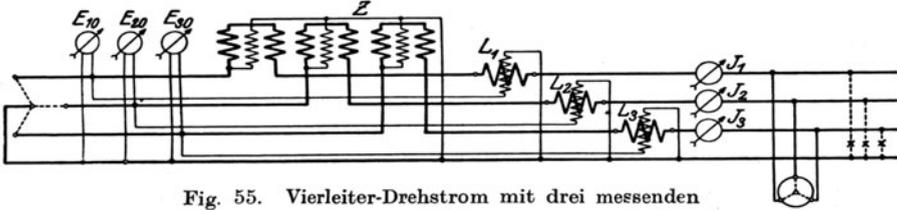


Fig. 55. Vierleiter-Drehstrom mit drei messenden Systemen, direkte Belastung, Niederspannung und Niederstrom.

auf zu achten, daß alle Spannungsleitungen vor den Zählerhauptstromspulen abgezweigt werden müssen, damit an den Meßinstrumenten die gleiche Netzspannung liegt, wie am Zähler.

Bei Hochspannungsmessungen kommen gegenüber der Messung mit getrennten Strom- und Spannungskreisen keine bemerkenswerten Änderungen in Frage.

c) Abschaltung einer Phase.

Schaltet man eine Phase, z. B. Phase 3 ab, ohne daß die Anschlüsse der Spannungsspulen geändert werden, so bleiben die Ströme in 1 und 2 unverändert, wenn die Belastungen gegen den Nulleiter geschaltet sind. Sind die Belastungen dagegen nicht an den Nulleiter angeschlossen, so ergeben sich die Verhältnisse des Diagramms Fig. 56. Im folgenden soll angenommen werden, daß die in Stern geschalteten Belastungen aller drei Zweige gleich sind und daß die Phasenspannungen untereinander gleich sind. Unter der Voraussetzung, daß die Spannungsspulen unverändert angeschlossen bleiben, ergibt sich zwischen den Phasen 1

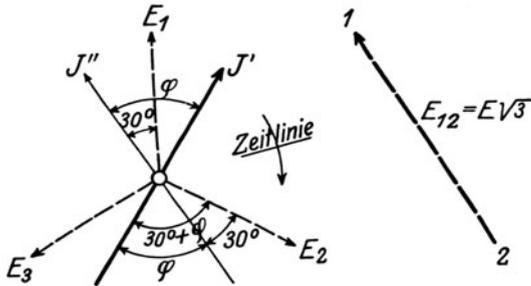


Fig. 56. Vierleiter-Drehstrom, Abschaltung einer Phase.

ergibt sich zwischen den Phasen 1

und 2 ein Strom, der bei induktionsfreier Belastung mit der verketteten Spannung $E_{12} = E\sqrt{3}$ in Phase ist und dessen Größe J'' durch den Widerstand $2r$ der zwischen den Phasen 1 und 2 liegenden Belastungen gegeben ist. Sind diese Belastungen jedoch induktiv, so ist die Lage des Stromes um den Winkel φ gegen E_{12} verschoben, wie J' in Fig. 56. Es ergibt sich folgendes Schema:

<p>Alle drei Phasen eingeschaltet.</p> $E_1 = E_2 = E_3 = E$ $J_1 = J_2 = J_3 = J = \frac{E}{r}$ <p>Leistungsmesser 1 zeigt</p> $L_1 = E_1 \cdot J_1 \cdot \cos \varphi = E \cdot J \cdot \cos \varphi$ <p>Leistungsmesser 2 zeigt</p> $L_2 = E_2 \cdot J_2 \cdot \cos \varphi = E \cdot J \cdot \cos \varphi$ <p>Leistungsmesser 3 zeigt</p> $L_3 = E_3 \cdot J_3 \cdot \cos \varphi = E \cdot J \cdot \cos \varphi$ $L = 3 \cdot E \cdot J \cdot \cos \varphi$	<p>Phase 3 abgeschaltet.</p> $E \cdot \frac{\sqrt{3}}{2r}$ $J' = \frac{E \cdot \sqrt{3}}{r \cdot 2} = J \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}$ <p>$L_1 = E_1 \cdot J' \cdot \cos(\varphi \mp 30^\circ)$</p> $= E \cdot J \cdot \frac{3}{4} \text{ für } \varphi = 0$ <p>$L_2 = E_2 \cdot J' \cdot \cos(\varphi \pm 30^\circ)$</p> $= E \cdot J \cdot \frac{3}{4} \text{ für } \varphi = 0$ <p>$L_3 = 0$</p> $L = \frac{1}{2} \cdot 3 \cdot E \cdot J \cos \varphi.$
--	---

Jeder der beiden Leistungsmesser wird bei Abschaltung einer Phase die Hälfte der Gesamtleistung zeigen. Leistungsmesser 2 zeigt ebenso positiv wie Leistungsmesser 1, weil die Stromspule in entgegengesetzter Richtung wie die des Leistungsmessers 1 vom Strom durchflossen und die Phase des Stromes also gleichsam um 180° gedreht wird. Aus dem Diagramm kann man leicht feststellen, wann die Angaben der Leistungsmesser ihr Maximum erreichen oder durch Null hindurchgehen. In den obigen Gleichungen gilt das obere Vorzeichen bei induktiver, das untere bei kapazitiver Belastung.

Der Zähler arbeitet natürlich genau so, wie die Leistungsmesser, seine Fehler werden aber wegen der abnormal großen Phasenverschiebungen zwischen Hauptstrom und Spannung nur dann in zulässigen Grenzen bleiben, wenn die 90° -Verschiebung sehr gut eingestellt ist.

5. Dreileiter-Drehstrom, zwei messende Systeme.

a) Allgemeines.

Bei Drehstromnetzen ohne Nulleiter kann man zwar mit drei Leistungsmessern messen, die Berechnung wird aber recht umständlich oder man muß sich einen künstlichen Nullpunkt herstellen. Mit der sogenannten Zweiwattmetermethode mißt man dagegen mit zwei Leistungsmessern immer die richtige Drehstromleistung. Da die Methode sehr viel angewendet wird, soll der bekannte Beweis für

ihre Richtigkeit kurz angeführt werden. In Momentanwerten ist die Leistung eines Drehstroms

$$l = e_1 i_1 + e_2 \cdot i_2 + e_3 i_3,$$

wobei e_1, e_2, e_3 die Phasenspannungen, i_1, i_2, i_3 die Ströme in den drei Leitungen sind.

Es ist nun bei Drehstrom ohne Nulleiter

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0.$$

Formen wir die erste Gleichung so um, daß die Summe der Ströme darin auftritt, so erhalten wir

$$l = i_1(e_1 - e_3) + i_2(e_2 - e_3) + e_3(i_1 + i_2 + i_3).$$

Nennen wir entsprechend dem Diagramm Fig. 57

$$\begin{array}{l} e_1 - e_3 \text{ die verkettete Spannung} \quad e_{31} \\ e_2 - e_3 \text{ " " " " " " " } \quad -e_{23}, \end{array}$$

so erhält man schließlich¹⁾

$$l = i_1 \cdot e_{31} - i_2 \cdot e_{23}.$$

Da das Integral einer Summe gleich der Summe der Integrale ist, so ergeben die beiden nach Fig. 58 geschalteten Leistungsmesser immer die richtige Leistung an, welche Belastung auch im Netz vorhanden ist. Bei gleicher Belastung aller drei Zweige und bei Gleichheit aller drei verketteten Spannungen und unter Annahme von sinusförmigem Wechselstrom ist am Leistungsmesser I

$$L_1 = J_1 \cdot E_{31} \cdot \cos(\varphi \mp 30^\circ)$$

und am Leistungsmesser II

$$L_2 = J_2 \cdot E_{23} \cdot \cos(\varphi \pm 30^\circ).$$

wobei $J_1 = J_2 = J$ und $E_{31} = E_{23} = E_v$ Effektivwerte sind und das obere Vorzeichen für induktive, das untere für kapazitive Belastung gilt. Die Summe der Ablesungen ist

$$L = L_1 + L_2 = J \cdot E_v \cdot 2 \cdot \cos 30^\circ \cdot \cos \varphi = J \cdot E_v \cdot \sqrt{3} \cdot \cos \varphi.$$

¹⁾ Vgl. Behn-Eschenberg, E.T. Z. 1892, S. 73; Aron, E.T. Z. 1892, S. 193.

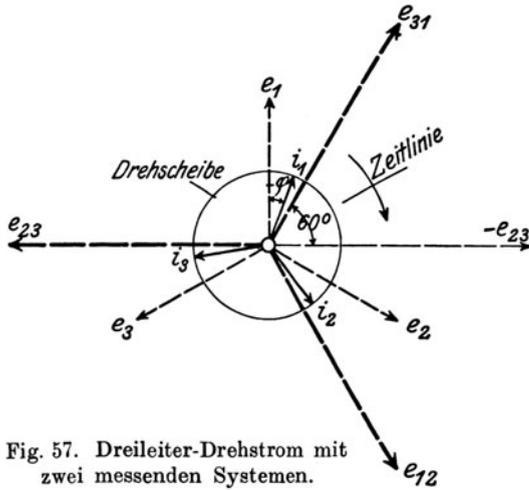


Fig. 57. Dreileiter-Drehstrom mit zwei messenden Systemen.

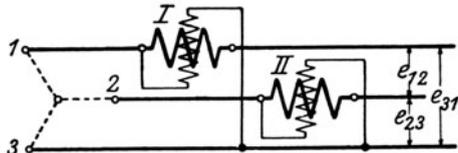


Fig. 58. Schaltung für Dreileiter-Drehstrom mit zwei messenden Systemen.

Daraus kann man den Leistungsfaktor $\cos \varphi$ berechnen, wenn man den Strom, die verkettete Spannung und die Ablesungen der Wattmeter kennt.

Man berechnet bei der Zweiwattmetermethode den Leistungsfaktor aber meist aus den Ablesungen der Leistungsmesser. Aus obigen Gleichungen ergibt sich nämlich ohne weiteres

$$\tan \varphi = \frac{L_1 - L_2}{L_1 + L_2} \sqrt{3}.$$

Es interessiert nun meist nicht $\tan \varphi$, sondern $\cos \varphi$. Deshalb berechnet man $\cos \varphi$ aus $\tan \varphi$ und trägt den so erhaltenen Wert des Leistungsfaktors als Funktion des Quotienten der beiden Ablesungen an den Leistungsmessern in Fig. 27 (S. 40) auf.

Um leicht einstellen zu können und über die Lage der einzelnen Vektoren immer ein klares Bild zu haben, zeichnet man sich die Fig. 57 auf festen Karton und macht den in der Figur mit einem Kreis umgebenen Mittelteil, auf dem die Vektoren der drei Ströme gezeichnet sind, drehbar. Diese sogenannten „Drehscheiben“ haben sich im Laboratoriumsgebrauch bewährt. An Stelle der in diesem Diagramm eingeschriebenen Momentanwerte kann man bekanntlich auch die Effektivwerte setzen.

b) Schaltung bei getrennten Strom- und Spannungskreisen.

Niederspannung und Niederstrom.

Bei Niederspannung und Niederstrom gestaltet sich die Schaltung nach der Zweiwattmetermethode sehr einfach, vgl. Fig. 59. Zähler und Leistungsmesser sind ganz gleich geschaltet.

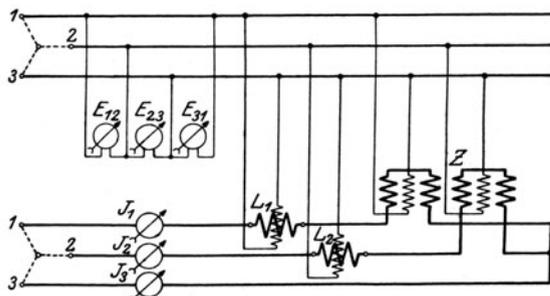


Fig. 59. Dreileiter-Drehstrom mit zwei messenden Systemen, getrennte Strom- und Spannungskreise, Niederspannung und Niederstrom.

Schaltet man eine der Phasen ab, so zeigt bei Abschaltung der Phase 1 nur der Leistungsmesser L_2 an, bei Abschaltung der Phase 2 nur der Leistungsmesser L_1 . Es ergibt sich also in diesen Fällen eine einfache Einphasenmessung. Schaltet man dagegen Phase 3 ab, so zeigen beide Leistungsmesser an. In Fig. 60 ist das Diagramm der Ströme und Spannungen für diesen Fall gezeichnet.

Bei induktionsfreier Belastung stellt sich der Strom J''_{12} ein, bei induktiver Belastung verschiebt sich der Strom in die durch eine dick ausgezogene Linie gezeichnete Lage J'_{12} . Die Leistungsmesser zeigen an

$$L_1 = J'_{12} \cdot E_{31} \cdot \cos(60^\circ - \varphi),$$

$$L_2 = J'_{12} \cdot E_{23} \cdot \cos(60^\circ + \varphi).$$

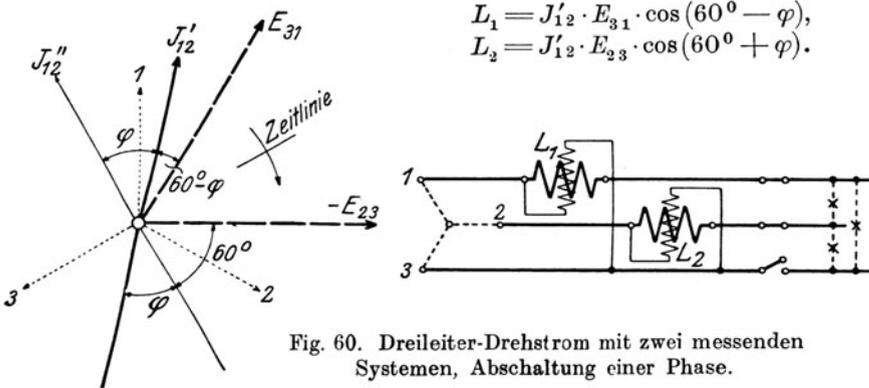


Fig. 60. Dreileiter-Drehstrom mit zwei messenden Systemen, Abschaltung einer Phase.

Kann man $E_{31} = E_{23} = E_v$ setzen, so wird

$$L = L_1 + L_2 = J_{12} \cdot E_v \cdot \cos \varphi.$$

d. h. die Summe der an den beiden Leistungsmessern abgelesenen Leistungen zeigt die richtige Leistung im Wechselstromkreis an.

Hochspannung und Hochstrom.

Zu dem Schaltungsschema Fig. 61 für Hochspannung ist nur zu bemerken, daß niederspannungsseitig Äquipotentialverbindungen

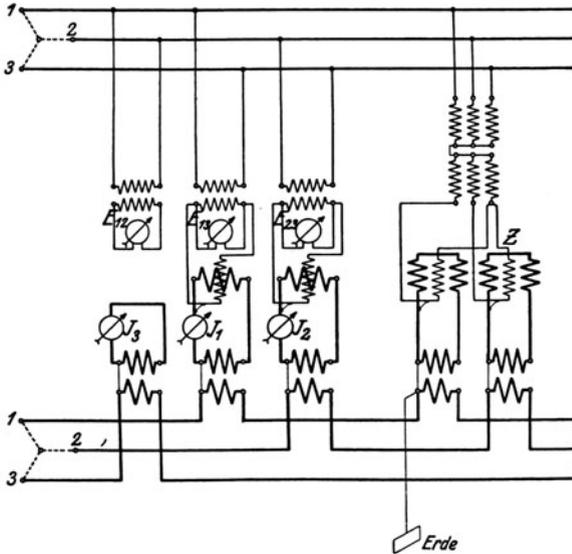


Fig. 61. Dreileiter-Drehstrom mit zwei messenden Systemen, getrennte Strom- und Spannungskreise, Hochspannung und Hochstrom.

zwischen den Strom- und Spannungsspulen der Leistungsmesser notwendig sind. Man kann auch bei Verwendung eines Drehstromwandlers die Hauptstromspulen mit dem Nullpunkt der Niederspannungswicklung des Wandlers verbinden und diesen erden. Auch der Primärkreis der Hauptstromleitung wird zweckmäßig geerdet. Im Spannungskreis wird man hochspannungsseitig nur einen vorhandenen Nullpunkt (z. B. den des rechts gezeichneten Spannungswandlers für den Zähler) oder einen künstlich geschaffenen erden; andere Erdungen sind nicht zulässig. Für direkte Belastung ändert sich gegenüber den Schaltungen Fig. 59 und 61 nur das eine, daß die beiden Leitungssysteme in eines zusammengelegt werden.

6. Vierleiter-Drehstrom, zwei messende Systeme.

a) Allgemeines.

Eine besondere Schaltungsart zur Messung der Leistung in Vierleiter-Drehstromnetzen durch Zähler mit nur zwei messenden Systemen zeigt Fig. 62. Ein System trägt zwei Hauptstromwicklungen, die in

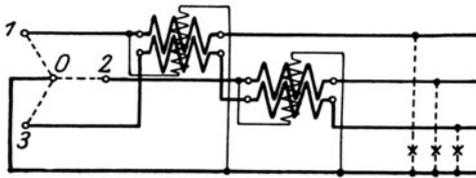


Fig. 62. Vierleiter-Drehstrom mit zwei messenden Systemen, direkte Belastung, Niederspannung und Niederstrom.

die Phasen 1 und 3 eingeschaltet sind, das andere ebenfalls zwei Hauptstromwicklungen, die in die Phasen 2 und 3 eingeschaltet sind. An der Spannungswicklung des ersten Systems liegt die Spannung 1 — 0, an der des zweiten Systems die Spannung 2 — 0. Beide Systeme arbeiten wie beim normalen Drehstromzähler mit zwei messenden Systemen auf die gleiche Achse.

Die Wicklungen sind in solchem Sinne aufgebracht, daß der Momentanwert der Leistung wird

$$l = (i_1 - i_3)e_1 + (i_2 - i_3)e_2.$$

Der Zähler zeigt richtig für alle Belastungen und alle Phasenverschiebungen, wenn die Bedingung erfüllt ist

$$e_1 + e_2 + e_3 = 0.$$

Hat dagegen diese Summe einen bestimmten Wert, so daß

$$e_1 + e_2 + e_3 = e_0,$$

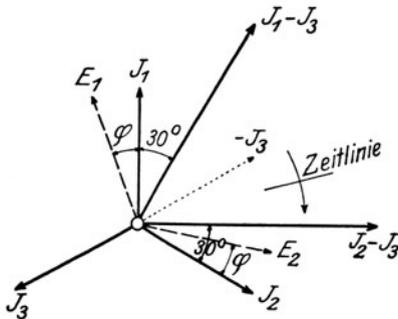


Fig. 63. Diagramm zu Fig. 62.

so ist die Leistung im Netz¹⁾

$$l = (i_1 - i_3) \cdot e_1 + (i_2 - i_3) e_2 + i_3 e_0.$$

Der Wert $i_3 \cdot e_0$ wird vom Zähler nicht mitgezählt. Da nun aber, wie Orlich¹⁾ nachgewiesen hat, die Spannung e_0 bei nicht sinusförmigem Wechselstrom oder bei Verzerrung des Nullpunkts beträchtliche Werte annehmen kann, sind so geschaltete Zähler zur Messung in Drehstrom-Vierleiternetzen nur bedingt geeignet.

Unter Einsetzung der Effektivwerte ergibt sich aus Fig. 63 die Leistung bei induktiver Belastung:

$$L = (J_1 - J_3) \cdot E_1 \cdot \cos(30^\circ + \varphi) + (J_2 - J_3) \cdot E_2 \cdot \cos(30^\circ - \varphi).$$

Sind die Belastungsströme und die Spannungen untereinander gleich, so wird

$$L = 3 \cdot E \cdot J \cdot \cos \varphi.$$

b) Schaltung bei getrennten Strom- und Spannungskreisen.

Niederspannung und Niederstrom.

Für die Eichung mit Vierleiter-Drehstrom bei getrennten Strom- und Spannungskreisen müßte man sowohl die Phasen- als auch die verketteten Spannungen untereinander genau gleich halten. Dies läßt sich aber kaum erreichen, weil bei der Regulierung der einen Spannung immer die anderen mit beeinflußt werden. Man kann nur entweder die verketteten Spannungen oder die Phasenspannungen untereinander gleich einstellen. In keinem der beiden Fälle ist Gewähr dafür geboten, daß dann die Phasenspannungen bzw. die verketteten Spannungen um 120° gegeneinander verschoben sind. Dies ist aber Bedingung dafür, daß das Störungsglied $i_3 e_0 = 0$ wird.

Man hilft sich dadurch, daß man ähnlich wie oben beim Vierleiter-Drehstromzähler nur drei Leitungen benutzt und die verketteten Spannungen dieses Systems sinngemäß mit den Spannungsspulen des Zählers und der Wattmeter verbindet. In Fig. 64 ist die Eichschaltung angegeben. Zur Schaltung des Hauptstromkreises ist nichts zu bemerken. Diejenige Spannungspule des Zählers, die in der Installation an 1 — 0 zu liegen kommt, wird an 1 — 2 gelegt, ebenso die Spannungspule, die in der Installation an 2 — 0 liegt, an 2 — 3. Einmal ersetzt also die Phase 2 den Nulleiter, das andere Mal die Phase 3. Der Zähler muß so eingerichtet sein, daß man die Enden der Spannungsspulen, die in der Installation am Nullpunkt liegen, für die Eichschaltung lösen kann. Ist die Lösung nicht möglich, so muß man auf irgendeine Weise einen künstlichen Nullpunkt bilden, z. B. durch einen Drehstromtransformator oder -motor mit zugänglichem Nullpunkt. Die Leistungsmesser können natürlich nicht ebenso

¹⁾ Die Gleichung läßt sich aus der von Orlich, E. T. Z. 1907, S. 71 angegebenen Gleichung 11 durch einige Umformungen ableiten.

wie der Zähler geschaltet werden, sondern in jeder Phase muß ein Leistungsmesser liegen. Dabei werden die Spannungsleitungen folgendermaßen verbunden:

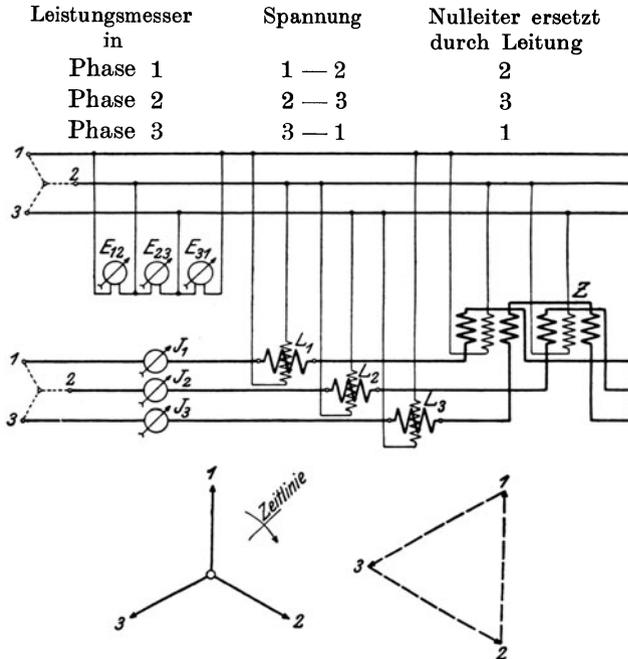


Fig. 64. Vierleiter-Drehstrom mit zwei messenden Systemen, getrennte Strom- und Spannungskreise, Niederspannung und Niederstrom.

Hochspannung und Hochstrom.

Für Hochspannung und Hochstrom wird nach Fig. 65 geschaltet. Die Schaltung der drei Leistungsmesser ist ganz normal, Besonderheiten zeigen sich nur bei der Schaltung der Hauptstromkreise des Zählers.

Entweder benutzt man einen normalen Zähler mit 2 Wicklungen auf jedem System, wozu man 3 Stromwandler braucht, oder man verkettet, wie in der Figur rechts gezeichnet, die Ströme in zwei Stromwandlern, die primär zwei, sekundär eine Wicklung tragen, wobei der Zähler nur eine Wicklung auf jedem System hat. Die Erdungen sind so vorzunehmen, wie in Fig. 65 angegeben. Wenn der die Hochspannung liefernde Transformator keinen für die Erdung zugänglichen Nullpunkt hat, muß man einen künstlichen Nullpunkt etwa durch eine Drosselspule herstellen.

c) Schaltung bei direkter Belastung.

Niederspannung, Niederstrom.

Bedeutend einfacher als für die Eichung mit getrennten Strom- und Spannungskreisen gestaltet sich die Schaltung für direkte Eichung

in der Installation. Fig. 66 bedarf keiner Erläuterung. Es ist durch Messung der verketteten und der Phasenspannungen festzustellen, ob

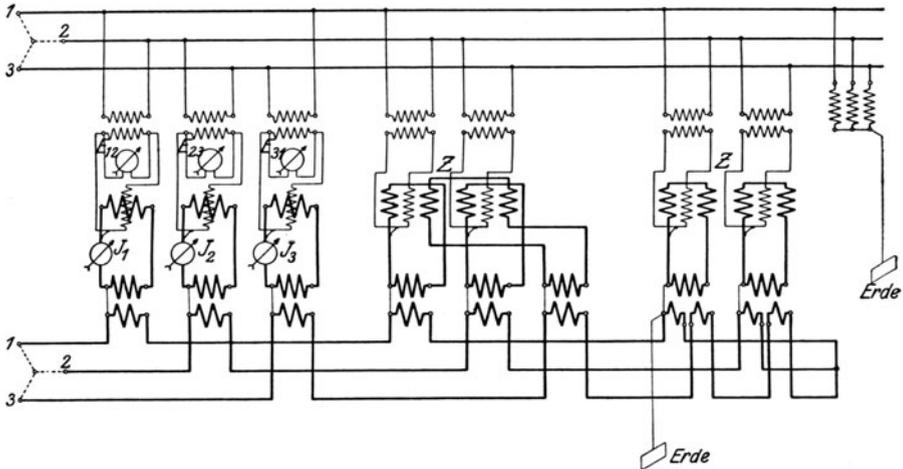


Fig. 65. Vierleiter-Drehstrom mit zwei messenden Systemen, getrennte Strom- und Spannungskreise, Hochspannung und Hochstrom.

das Glied e_0 nicht auf die Angaben des Zählers einwirkt. Die Leistung des Netzes wird natürlich durch die drei Leistungsmesser immer richtig gemessen.

Hochspannung und Hochstrom.

Für Hochspannung und Hochstrom wird der Spannungskreis unter Zwischenschaltung von Spannungswandlern genau so geschaltet wie in Fig. 66, die Schaltung des Hauptstromkreises ist genau gleich der in Fig. 65. Äquipotential- und Erdverbindungen müssen sinn gemäß hergestellt werden.

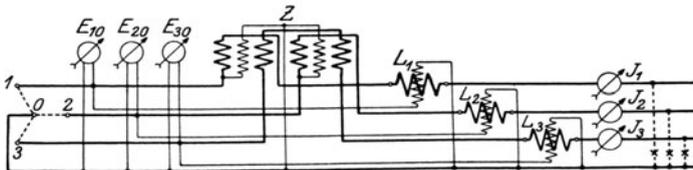


Fig. 66. Vierleiter-Drehstrom mit zwei messenden Systemen, direkte Belastung, Niederspannung und Niederstrom.

7. Vier- oder Dreileiter-Drehstrom, ein messendes System (sogenannte Drehstromzähler für gleichbelastete Phasen).

a) **Allgemeines.** Alle Drehstromzähler mit nur einem messenden System zeigen nur dann richtig, wenn alle Phasen gleich belastet sind. Meist ist diese Voraussetzung nicht erfüllt. Bei größeren Ungleich-

heiten in der Belastung oder gar bei Abschaltung einer Phase zeigen sie vollständig falsch; es kann sogar bei induktiver oder kapazitiver Belastung der Fall eintreten, daß sie rückwärts laufen¹⁾. Derartige Zähler sind deshalb von der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt nicht mehr zur Beglaubigung zugelassen. Trotzdem werden diese Zähler in Niederspannungsnetzen oft noch verwendet, weil sie bedeutend billiger sind als Drehstromzähler. Sie werden immer mit Einphasenstrom geeicht, wenn man mit getrenntem Strom- und Spannungskreis arbeitet. Im folgenden sollen die drei gebräuchlichsten Schaltungen kurz behandelt werden.

b) Eine Hauptstromspule in einer Phasenleitung, eine Spannungsspule zwischen dieser Leitung und dem Nulleiter. Fig. 67.

Der Zähler mißt an und für sich $L_1 \cdot t = J_1 \cdot E_1 \cos \varphi \cdot t$, seine Zählwerksübersetzung ist jedoch so gewählt, daß das Dreifache angezeigt wird:

$$L_1 \cdot t = 3 \cdot J_1 \cdot E_1 \cdot \cos \varphi \cdot t.$$

Ebenso ist die auf dem Zählerschild angegebene Konstante so gewählt, daß die aus den Umdrehungen berechneten Angaben die Drehstromarbeit ergeben. Man eicht den Zähler sowohl für Nieder-

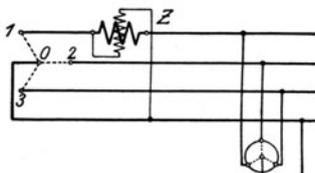


Fig. 67. Drehstrom mit einem messenden System, J_1 und E_1 .

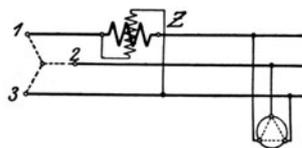


Fig. 68. Drehstrom mit einem messenden System, J_1 und E_{31} .

spannung als auch für Hochspannung als Einphasenzähler. Die Angaben des zur Eichung verwendeten Leistungsmessers müssen also bei der Berechnung des Fehlers mit 3 multipliziert werden.

c) Eine Hauptstromspule in einer Phasenleitung, eine Spannungsspule zwischen dieser Leitung und einer anderen Phasenleitung. Fig. 68.

Der Zähler mißt an und für sich $L \cdot t = J_1 \cdot E_{13} \cdot \cos \varphi \cdot t$, wenn der von der Spannungsspule erzeugte magnetische Fluß der Spannung um 60° nacheilt (anstatt wie beim Einphasenzähler um 90°), wie aus dem Diagramm Fig. 69a ersichtlich ist.

Die Zählwerksübersetzung ist so gewählt, daß seine Angaben das $\sqrt{3}$ fache betragen:

$$L \cdot t = \sqrt{3} \cdot J_1 \cdot E_{13} \cdot \cos \varphi \cdot t = 3 \cdot J \cdot E \cdot \cos \varphi \cdot t.$$

Entsprechend ist die Konstante auf dem Zählerschild so angeben,

¹⁾ Vgl. Schmiedel, E.T.Z. 1913, S. 53.

daß die aus den Umdrehungen berechneten Angaben die Drehstromarbeit ergeben.

Bei der Eichung mit getrenntem Strom- und Spannungskreis schaltet man Zähler und Leistungsmesser genau so wie bei Einphasenmessungen, wobei an den Spannungsspulen eine Spannung

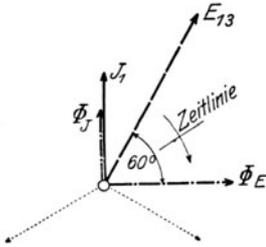


Fig. 69a. Zähler.

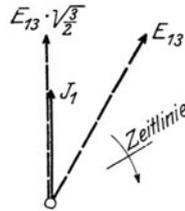


Fig. 69b. Leistungsmesser.

Diagramme zu Fig. 68.

von der Größe der verketteten Spannung liegen muß. Bei induktionsfreier Belastung für den Zähler muß der Leistungsmesser entsprechend Fig. 69 b anzeigen $J_1 \cdot E_{13} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}$, also 0,866 seines maximalen Ausschlags bei Phasengleichheit zwischen Strom und Spannung. Bei der Berechnung des Fehlers muß also die Angabe des Leistungsmessers mit 2 multipliziert werden, um die Drehstromleistung entsprechend den Angaben des Zählers zu erhalten:

$$L = 2 \cdot J_1 \cdot E_{13} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = J_1 \cdot E_{13} \sqrt{3} = 3 \cdot E \cdot J.$$

Will man den Zähler für induktive Last eichen, so muß man bedenken, daß der Leistungsmesser $J_1 \cdot E_{13} \cdot \cos(30^\circ - \varphi)$ zeigt, während der Zähler mit einer Geschwindigkeit läuft, die $J_1 \cdot E_{13} \cdot \sqrt{3} \cdot \cos \varphi$ proportional ist. Deshalb stellt man sich am besten die folgende Tabelle auf, die die Ausschläge des Leistungsmessers für eine Anzahl von Leistungsfaktoren im Netz in Prozenten des maximalen Ausschlags des Leistungsmessers bei den jeweiligen Werten des Hauptstroms und der Spannung angibt. In der letzten Spalte ist schließlich der Faktor k angegeben, mit dem man bei verschiedenen Phasenverschiebungen die Angaben des Leistungsmessers multiplizieren muß, um die der Einrichtung des

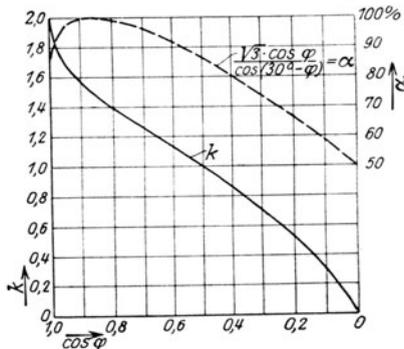


Fig. 70. Korrektur k für den Leistungsmesser in Fig. 68.

Zählers entsprechende Leistung für die Berechnung des Fehlers zu erhalten. Die Faktoren sind in Abhängigkeit von $\cos \varphi$ in Fig. 70 aufgetragen.

Leistungsfaktor im Netz $\cos \varphi$	Phasenwinkel φ	Ausschlag des Leistungsmessers %	Faktor, mit dem die Leistung zu multiplizieren ist
1	0	86,6	2,000
0,9	25° 50'	99,7	1,565
0,866	30°	100,0	1,500
0,8	36° 50'	99,3	1,394
0,7	45° 30'	96,4	1,260
0,6	53° 10'	91,9	1,130
0,5	60°	86,6	1,000
0,4	66° 25'	80,5	0,861
0,3	72° 30'	73,7	0,705
0,2	78° 25'	66,4	0,521
0,1	84° 15'	58,4	0,296
0	90°	50,0	0

Die Tabelle gilt für induktive Last, kapazitive Last kommt für derartige Zähler nicht in Frage.

d) Zwei Hauptstromspulen, jede in einer Phasenleitung, eine Spannungsspule zwischen diesen beiden Leitungen. Fig. 71.

Bei dem Zähler nach Fig. 71 sind die beiden Phasenströme auf ein und denselben Eisenkern gewickelt. Der von ihnen erzeugte magnetische Fluß wird von gleicher Größe und von gleicher Phase, wie wenn sich die beiden Ströme J_1 und J_2 entsprechend dem Diagramm der Fig. 72 a zu einem resultierenden Strom $J_1 - J_2$ verbänden. Der Zähler gibt dann an

$$A = (J_1 - J_2) \cdot E'_{12} \cdot \cos \varphi \cdot t.$$

Er zeigt also bei allen Phasenverschiebungen dann die Drehstromarbeit richtig an, wenn alle Phasen gleich belastet sind.

Fig. 71. Drehstrom mit einem messenden System, $J_1 - J_2$ und E_{12} .

Man kann den Zähler als Einphasenzähler eichen, wobei man nur darauf zu achten hat, daß man die Stromspulen richtig hintereinanderschaltet. Es ist nämlich gleichgültig, ob man zwei um 60° gegeneinander verschobene Ströme J_1 und $-J_2$ durch die Spulen leitet oder zwei phasengleiche Ströme, von denen jeder die Größe $J_1 \frac{\sqrt{3}}{2}$ hat. Bei Bestimmung der Höhe der Belastung ist der Zahlenwert zu berücksichtigen. Im übrigen kann man die Angaben des Zählers direkt mit denen des Leistungsmessers vergleichen.

Will man in der Installation mit Drehstrom prüfen, so kann

man in jede Phase einen Leistungsmesser schalten. Entsprechend dem Diagramm der Fig. 72b ergibt die Summe der Ablesungen der beiden Leistungsmesser bei induktiver Last:

$$L = J_1 \cdot E'_{12} \cos(30^\circ + \varphi) + J_2 \cdot E'_{12} \cos(30^\circ - \varphi).$$

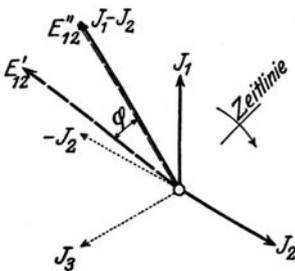


Fig. 72a.
Zähler.

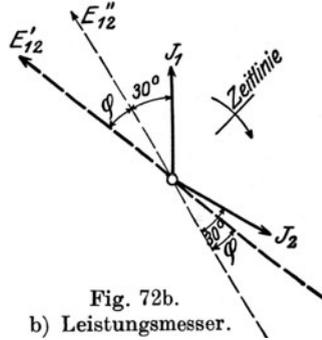


Fig. 72b.
b) Leistungsmesser.

Diagramme zu Fig. 71.

Setzt man unter Annahme gleicher Belastung der 3 Zweige $J_1 = J_2$, ferner $J_1 - J_2 = J_1 \sqrt{3}$, so erhält man

$$\begin{aligned} L &= L_1 + L_2 = J_1 \cdot \sqrt{3} \cdot E'_{12} \cos \varphi \\ &= (J_1 - J_1) \cdot E'_{12} \cos \varphi. \end{aligned}$$

Die Summe der Angaben der beiden Leistungsmesser entspricht also den Angaben des Zählers.

Es sei noch darauf aufmerksam gemacht, daß es keineswegs richtig ist, einen der erwähnten Zähler mit nur einem messenden System dadurch eichen zu wollen, daß man durch eine richtige Drehstromschaltung der Leistungsmesser die Netzleistung bestimmt. Dies wäre nur dann zulässig, wenn alle Ströme und Spannungen untereinander genau gleich wären. Trifft dies nicht zu, so mißt man zwar die Netzleistung mit den Leistungsmessern richtig und kann die Ungleichheiten, die zu falschen Angaben des Zählers führen, feststellen, dagegen kann man nicht prüfen, ob der Zähler richtig eingestellt war.

8. Blindverbrauchszähler¹⁾.

a) Allgemeines.

Während alle bisher besprochenen Wechselstromzähler die im Netz verbrauchte Arbeit $\int E \cdot J \cdot \cos \varphi \cdot dt$ messen sollen und daher auch die Leistungsmesser so geschaltet sein müssen, daß sie die

¹⁾ Vgl. „Richtlinien“ der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt über Blindverbrauchszähler (Umdruck); ferner Zschr. für Instrumentenkunde 1919, S. 111 und 1920, S. 137.

Leistung (genauer: Wirkleistung) messen, dienen die Blindverbrauchsmesser dazu, $\int E \cdot J \cdot \sin \varphi \cdot dt$ zu messen. Man bezweckt damit, in Netzen mit kleinem Leistungsfaktor die Verluste durch Stromwärme in den Netzleitungen, welche bei der Arbeitsmessung um so weniger berücksichtigt werden, je kleiner der Leistungsfaktor ist, dem Verbraucher in Rechnung zu stellen. Da solche Zähler nur für große Leistungen in Frage kommen, werden sie bisher nur für Drehstrom gebaut.

b) Vierleiter-Drehstrom, drei messende Systeme mit 90°-Verschiebung.

Bei Blindverbrauchszählern für Vierleiter-Drehstrom, deren Systeme ebenso wie die der Wirkverbrauchszähler für 90°-Verschiebung eingerichtet sind, werden die Spannungsspulen in derselben Art geschaltet, wie bei den Wirkverbrauchszählern, nur werden die Anschlüsse an die Netzleiter in folgender Weise gegenüber den in Fig. 55 gezeichneten vertauscht:

$$\begin{array}{l} \text{An Stelle von } E_{10} \text{ tritt } E_{23}, \\ \text{'' '' '' } E_{20} \text{ '' } E_{31}, \\ \text{'' '' '' } E_{30} \text{ '' } E_{12}. \end{array}$$

Die Spannungsspulen des Zählers müssen natürlich für diese Spannungen richtig bemessen sein. Ebenso muß die Zählwerksübersetzung so gewählt sein, daß der Blindverbrauch am Zählwerk angezeigt wird. An den Leistungsmessern nimmt man bei direkter Belastung die gleichen Vertauschungen vor, muß aber die abgelesene Leistung noch durch $\sqrt{3}$ dividieren, um den richtigen Blindverbrauch zu erhalten.

Bei der Messung mit getrennten Strom- und Spannungskreisen kann man die Phasen der drei Spannungen beliebig verschieben und kann entweder die verketteten oder die Sternspannungen an Zähler und Leistungsmesser anschließen. Nur muß man dafür sorgen, daß die Größe entsprechend der Aufschrift auf dem Zähler richtig gewählt ist und daß die Angaben der Leistungsmesser wieder durch $\sqrt{3}$ dividiert werden.

c) Vierleiter-Drehstrom, drei messende Systeme mit 60°-Verschiebung.

Man kann die Blindverbrauchszähler für Vierleiter-Drehstrom auch so einrichten, daß jedes der drei messenden Systeme für 60°-Verschiebung eingerichtet ist. Es werden dann folgende Vertauschungen gegenüber der Schaltung Fig. 55 für Wirkverbrauchszähler gemacht:

$$\begin{array}{l} \text{An Stelle von } E_{10} \text{ tritt } - E_{20}, \\ \text{'' '' '' } E_{20} \text{ '' } - E_{30}, \\ \text{'' '' '' } E_{30} \text{ '' } - E_{10}. \end{array}$$

Die Stromspulen der Leistungsmesser werden ebenso wie die des Zählers geschaltet, ihre Spannungsspulen dagegen so, wie unter b) beschrieben ist. Zu dem Zwecke muß bei der Schaltung mit getrennten Strom- und Spannungskreisen der Spannungskreis als Vierleiter-Drehstromkreis ausgebildet werden. Das Diagramm der verketteten und Sternspannungen muß sowohl bei direkter Belastung als auch bei getrennten Strom- und Spannungskreisen ein gleichseitiges Dreieck mit dem Mittelpunkt in seiner Ebene sein. Da dies nur sehr schwer zu erreichen ist, werden die Zähler mit 60° -Verschiebung von der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt vorläufig zur Beglaubigung nicht zugelassen.

d) Dreileiter-Drehstrom, zwei messende Systeme mit 90° -Verschiebung.

Bei Blindverbrauchszählern, deren beide Systeme entsprechend der Zweiwattmeterschaltung eingerichtet sind und mit 90° -Verschiebung arbeiten, fällt die Schaltung sehr einfach aus, wenn ein Nullleiter vorhanden ist oder für den Spannungskreis ein künstlicher Nullpunkt hergestellt wird; bei Hochspannungszählern kann man dies an der Niederspannungsseite der Spannungswandler leicht bewerkstelligen. Gegenüber dem Schaltungsschema Fig. 61 und dem Diagramm Fig. 57 ergeben sich dann für den Spannungskreis des Zählers und der Leistungsmesser folgende Vertauschungen:

$$\begin{array}{l} \text{An Stelle von } E_{31} \text{ tritt } -E_2, \\ \text{ " " " } -E_{23} \text{ " } E_1. \end{array}$$

Für $\cos \varphi > 0,866$ ist die Differenz der Ausschläge der beiden Leistungsmesser zu nehmen, für $\cos \varphi < 0,866$ die Summe. Diese Werte muß man noch mit $\sqrt{3}$ multiplizieren, um den richtigen Wert für die Blindleistung zu erhalten.

Die Spannung E_3 legt man zweckmäßig an einen Leistungsmesser, dessen Stromspule man vom Strom J_3 durchfließen läßt. Wenn die drei Spannungen und die drei Ströme untereinander gleich sind, ist der Leistungsfaktor in diesem Leistungsmesser gleich dem der Netzbelastung.

Die Schaltung gilt gleicherweise für direkte Belastung wie für getrennte Strom- und Spannungskreise.

e) Dreileiter-Drehstrom, zwei messende Systeme mit 60° -Verschiebung.

Wenn die beiden in der Zweiwattmetermethode geschalteten Systeme des Blindverbrauchszählers mit 60° -Verschiebung arbeiten, so werden an deren Spannungsspulen in Abänderung der Figuren 59 und 61 folgende Vertauschungen vorgenommen (vgl. auch Fig. 57):

$$\begin{array}{l} \text{An Stelle von } E_{31} \text{ tritt } -E_{12}, \\ \text{ " " " } -E_{23} \text{ " } E_{31}. \end{array}$$

Die Leistungsmesser müssen jedoch genau so geschaltet werden, wie unter d). Die verketteten Spannungen müssen also ein gleichseitiges Dreieck bilden, der Nullpunkt muß genau im Mittelpunkt der Ebene des Dreiecks liegen. Im übrigen gilt das unter d) Gesagte. Sind die Spannungen untereinander nicht gleich, so ergeben sich Abweichungen in der gemessenen Leistung, deren Größenordnung aus den von Schering, Schmidt und Scheld angegebenen Zahlen zu ersehen ist¹⁾.

Zum Schluß sei noch bemerkt, daß eine zyklische Vertauschung der Phasen bei den Blindverbrauchszählern ebenso statthaft ist, wie bei den Wirkverbrauchszählern, ohne daß die Schaltung geändert zu werden braucht. Wird jedoch der Drehsinn geändert, so müssen andere Anschlüsse gemacht werden.

9. Zweileiter-Gleichstrom.

Sowohl bei der Eichung mit getrennten Strom- und Spannungskreisen, als auch bei direkter Belastung werden die gleichen Schaltungen benutzt wie für Einphasenwechselstrom (Fig. 45 und 47). Der Frequenzmesser und der Leistungsmesser kommen natürlich in Fortfall. Die Leistung ist stets gleich dem Produkt aus Strom und Spannung. Als Instrumente benutzt man meist Drehspulinstrumente nach Deprez-d'Arsonval.

10. Dreileiter-Gleichstrom.

a) Zwei Hauptstromspulen, jede in einem Außenleiter, Nebenschlußkreis zwischen den beiden Außenleitern. Fig. 73.

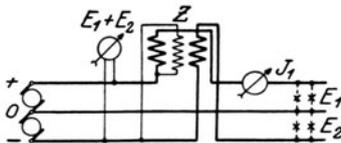


Fig. 73. Dreileiter-Gleichstrom mit zwei Hauptstromspulen, Außenleiterspannung.

aa) Allgemeines. Nach der Theorie der Gleichstromzähler entsprechen die Angaben dem Produkt aus dem magnetischen Fluß Φ_J , den die festen Spulen erzeugen, und dem Fluß Φ_E , den die bewegliche Ankerwicklung erzeugt. In unserm Fall ist der von den festen Spulen erzeugte Fluß proportional der Summe der

beiden Außenleiterströme, der von der beweglichen Ankerwicklung hervorgerufene der Summe der beiden Einzelspannungen. Es sind also die Angaben

$$\begin{aligned} A &= c_1 \cdot \Phi_J \cdot \Phi_E \cdot t = c_2 \cdot (J_1 + J_2) (E_1 + E_2) \cdot t \\ &= c_2 \cdot (J_1 \cdot E_1 + J_2 \cdot E_2 + J_1 \cdot E_2 + J_2 \cdot E_1) \cdot t. \end{aligned}$$

Die Zählwerksübersetzung wird so gewählt, daß $c_2 = 1/2$ ist. Der wirkliche Verbrauch im Netz ist

$$W = (J_1 \cdot E_1 + J_2 \cdot E_2) \cdot t.$$

¹⁾ Zschr. für Instrumentenkunde 1920, S. 137.

Sind die Ströme und die Spannungen unter sich gleich, so wird bei richtig einreguliertem Zähler $A = W$. Auch wenn die Ströme untereinander gleich sind und die Spannungen verschieden oder die Spannungen untereinander gleich und die Ströme verschieden, zeigt der Zähler richtig. Sind jedoch die Ströme und die Spannungen ungleich, dann wird der Fehler

$$F = \frac{A - W}{W} = \frac{J_1 \cdot E_2 + J_2 \cdot E_1 - (J_1 \cdot E_1 + J_2 \cdot E_2)}{2(J_1 \cdot E_1 + J_2 \cdot E_2)}$$

Grenzfälle:

$$E_1 = 0, \text{ also auch } J_1 = 0 : F = -\frac{1}{2} = -50\%$$

$$E_2 = 0, \text{ " " } J_2 = 0 : F = -\frac{1}{2} = -50\%$$

$$J_1 = 0, \text{ alle anderen beliebig : } F = \frac{1}{2} \cdot \frac{E_1}{E_2} - \frac{1}{2}$$

$$J_2 = 0, \text{ " " " : } F = \frac{1}{2} \cdot \frac{E_2}{E_1} - \frac{1}{2}$$

Allgemein:

$$J_1 > J_2, \quad E_1 > E_2 : F = -$$

$$J_1 > J_2, \quad E_1 < E_2 : F = +$$

$$J_1 < J_2, \quad E_1 > E_2 : F = +$$

$$J_1 < J_2, \quad E_1 < E_2 : F = -$$

Zahlenbeispiel:

$$J_1 = 50 \text{ A.}, \quad J_2 = 25 \text{ A.}, \quad E_1 = 110 \text{ V.}, \quad E_2 = 100 \text{ V.}, \quad t = 1 \text{ Stunde.}$$

$$A = 7,875 \text{ kWh}, \quad W = 8,000 \text{ kWh}, \quad F = -1,6\%$$

Für verschiedene Verhältnisse $J_1 : J_2$ und $E_1 : E_2$ sind die Fehlerwerte in Fig. 74 in Kurvenform dargestellt.

Aus diesen Betrachtungen ergibt sich, daß man nur mit 2 Gleichstromzählern, deren Spannungsspulen zwischen den Außenleitern und dem Nullleiter liegen, die Arbeit im Dreileiter-Netz einwandfrei messen kann.

ab) Schaltung bei getrennten Strom- und Spannungskreisen. Für die Eichung mit getrennten Strom- und Spannungskreisen läßt man den Nulleiter weg und benutzt eine Zweileiterschaltung, wobei man den gleichen Strom durch beide Hauptstromspulen

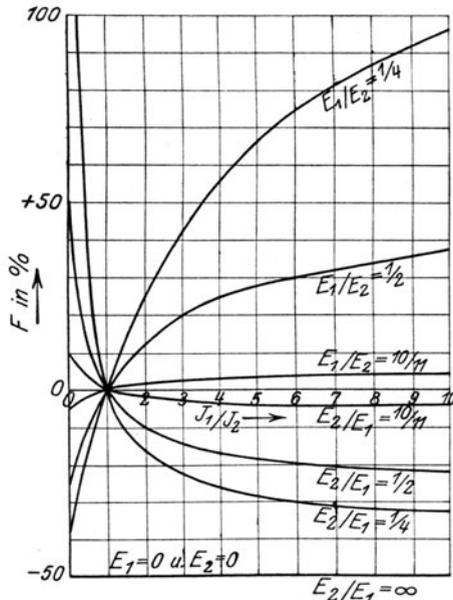


Fig. 74. Kurven der Fehler für Schaltung nach Fig. 73 bei verschiedenen $J_1 : J_2$ und $E_1 : E_2$.

schickt, so daß sich deren magnetische Flüsse addieren. Als Spannung wählt man eine solche, deren Größe der Außenleiterspannung entspricht.

a) Schaltung bei direkter Belastung in der Installation. Bei der Eichung mit direkter Belastung in der Installation schaltet man die Strommesser genau wie die Hauptstromspulen des Zählers, den Spannungsmesser genau wie den Spannungskreis des Zählers, Fig. 73. Aus den Ablesungen erhält man:

$$W' = (J_1 + J_2)(E_1 + E_2).$$

Da der Zähler eine solche Zählwerksübersetzung und Eichkonstante hat, daß seine Angaben nur der Hälfte dieses Wertes entsprechen, so muß man bei der Berechnung des Fehlers auch den Wert W' durch 2 dividieren.

Mißt man die Leistung im Netz mit 2 Strom- und 2 Spannungsmessern, so gibt die Summe aller $E \cdot J$ zwar die Leistung im Netz richtig an, ist aber nur dann mit den Angaben des Zählers zwecks Eichung vergleichbar, wenn die beiden Ströme oder die beiden Spannungen untereinander gleich sind.

b) Eine Hauptstromspule in einem Außenleiter, Nebenschlußkreis zwischen den beiden Außenleitern.

Die Angaben des nach Fig. 75 geschalteten Zählers entsprechen

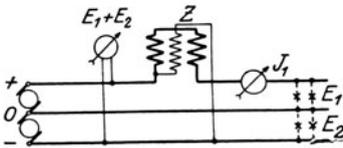


Fig. 75. Dreileiter-Gleichstrom, eine Hauptstromspule, Außenleiterspannung.

$$A = J_1 \cdot (E_1 + E_2) \cdot t = (J_1 E_1 + J_1 E_2) \cdot t.$$

Der wirkliche Verbrauch im Netz ist

$$W = (J_1 E_1 + J_2 E_2) \cdot t.$$

Also ist der Fehler in den Angaben des Zählers bei Ungleichheiten in den Spannungen und den Belastungsströmen:

$$F = \frac{(J_1 - J_2) \cdot E_2}{J_1 E_1 + J_2 E_2} = \frac{J_1/J_2 - 1}{J_1/J_2 \cdot E_1/E_2 + 1}.$$

Grenzfälle.

$$\begin{aligned} J_1 = 0 \text{ oder } J_1 \text{ und } E_1 = 0 : F &= -1 = -100\%, \\ J_2 = 0 : F &= E_2/E_1 \quad (\text{Stillstand}). \end{aligned}$$

Allgemein:

$$\begin{aligned} J_1 > J_2, \text{ alle anderen beliebig : } F &= + \\ J_1 < J_2, \text{ " " " : } F &= - \end{aligned}$$

Bei der Eichung wird sowohl bei getrennten Strom- und Spannungskreisen, als auch bei direkter Belastung in der Installation der Strommesser genau so wie die Hauptstromspule, der Spannungsmesser genau so wie der Spannungskreis des Zählers geschaltet.

c) Eine Hauptstromspule in einem Außenleiter, Nebenschlußkreis zwischen diesem Leiter und dem Nulleiter.

Die Arbeit nur des einen Zweiges des Dreileitersystems wird gemessen, wenn man den Zähler wie einen Zweileiterzähler nach Fig. 76 schaltet. Sein Zählwerk muß so eingerichtet sein, daß es den doppelten Betrag der gemessenen Arbeit anzeigt:

$$A = 2 \cdot J_1 \cdot E_1 \cdot t.$$

Der wirkliche Verbrauch im Netz ist

$$W = (J_1 E_1 + J_2 E_2) \cdot t.$$

Der Fehler bei Ungleichheiten in den Spannungen und Belastungsströmen wird

$$F = \frac{J_1 E_1 - J_2 E_2}{J_1 E_1 + J_2 E_2}.$$

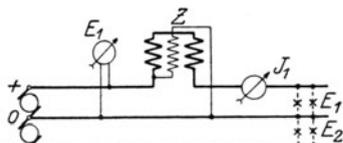


Fig. 76. Dreileiter-Gleichstrom, eine Hauptstromspule, Nulleiterspannung.

Bleibt die Spannung E_1 aus, wird also der Strom $J_1 = 0$, so steht der Zähler, $F = -100\%$. Bleibt die Spannung E_2 aus, wobei auch $J_2 = 0$ wird, dann zeigt der Zähler den doppelten Betrag des Netzverbrauchs an, $F = +100\%$. Zwischen diesen beiden Grenzwerten können die Angaben bei Ungleichheiten in den Belastungen schwanken.

Bei der Eichung schaltet man den Strommesser genau so wie die Hauptstromspule, den Spannungsmesser genau so wie den Spannungskreis des Zählers.

VII. Einrichtungen und Schaltungen für die Messung besonderer Eigenschaften und Vorgänge.

Wir haben uns bisher nur mit den verschiedenen Einrichtungen und Schaltungen befaßt, die man zur Messung des wirklichen Verbrauchs im Netz und der Angaben des Zählers geschaffen hat, um im Laboratorium, im Eichraum oder in der Installation die Zähler auf die Richtigkeit ihrer Angaben zu prüfen. Es gibt aber außer den meßtechnischen Eigenschaften noch eine große Zahl anderer Eigenschaften, die für die Beurteilung der Güte eines Zählers in mechanischer, magnetischer und elektrischer, und daher insbesondere wirtschaftlicher Hinsicht untersucht werden müssen. Solche Untersuchungen werden in den meisten Fällen auf das Laboratorium beschränkt bleiben, da sie verhältnismäßig viel Zeit und besondere Einrichtungen erfordern. Bei der Wichtigkeit des Gegenstandes erscheint es angebracht, ausführlich darauf einzugehen.

1. Drehmoment.

a) **Kräftemesser mit Torsionsfeder** (Federdynamometer). Das Federdynamometer nach Angabe von Stern¹⁾ wird wohl am häufigsten zur Messung des Drehmoments angewendet. Es ist in Fig. 77 dargestellt. Das eine Ende einer Spiralfeder ist an einem in Spitzen gelagerten Hebel befestigt, das andere an der Achse eines mit Reibung auf einer Skalenscheibe gelagerten Zeigers. Der mit einem geränderten Knopf versehene Zeiger ist in der Figur oben zu

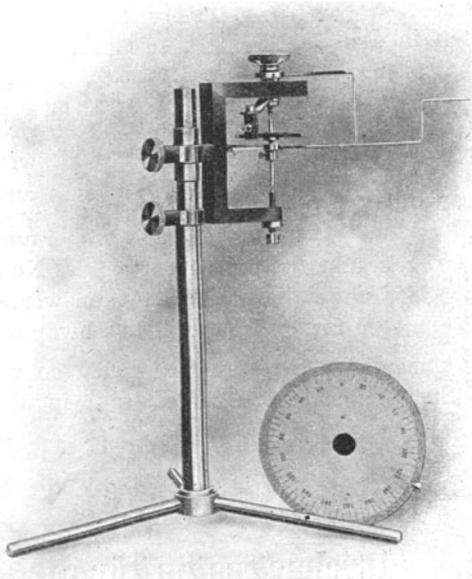


Fig. 77. Federkräftemesser.

sehen, die Skala, auf deren Teilstriche er eingestellt werden kann, ist in der Figur von ihrem Platze weggenommen und rechts unten zu sehen. Der in Spitzen gelagerte Hebel greift mit seinem Ende direkt am Umfang der Zählerbremsscheibe vermittels eines auf diese aufgesetzten Reiters oder indirekt vermittels eines um die Zählerscheibe sich herumlegenden Fadens an. Mit einer an ihm angebrachten Spitze spielt er über der Skala. Vor der Messung steht sowohl diese Spitze als

auch der vorhin genannte Reibungszeiger auf dem Nullpunkt der Skala. Wirkt die zu messende Kraft auf den Hebel, so dreht man den Reibungszeiger solange, bis die Hebelspitze auf den Nullpunkt der Skala zeigt. Der Reibungszeiger gibt auf der Skala den Torsionswinkel der Spiralfeder an, dem die gemessene Kraft proportional ist. Das Instrument muß mit einem Normaldynamometer oder durch Gewicht geeicht werden. Man mißt mit dem Instrument die am Umfang der Zählerbremsscheibe auftretende Zugkraft. Diese multipliziert man mit dem halben Durchmesser der Zählerscheibe und erhält so das Drehmoment des Zählers bei der jeweiligen Belastung.

¹⁾ E. T. Z. 1902, S. 777.

Eine Abart dieses Instruments mit horizontal liegender Drehachse stellen die S. S. W. her¹⁾).

b) Pendel-Kräftemesser. Auf dem Prinzip des Kräfteparallelogramms beruht das Dynamometer von Agnew²⁾, Fig. 78. Ein 1 m langer feiner Faden ist über die verstellbare Brücke *B*, die eine Schneide *P* zur genauen Festlegung des Aufhängepunkts trägt, zu einem mit Reibung im Gestell befestigten Knebel *A* geführt, durch dessen Drehung der Faden verlängert und verkürzt werden kann. Am langen Ende des Fadens hängt ein Gewicht *G*, das an seinem unteren Ende eine feine Spitze trägt, die über der Kugelfläche *S* spielt. Die Kugelfläche ist mit konzentrischen Kreisen versehen, deren Teilung der Tangente des Winkels α entspricht, den der Faden mit der Senkrechten bildet. Denn nach dem Kräfteparallelogramm ist die das Gewicht *G* von der Senkrechten um den Winkel α ablenkende Kraft

$$K = G \cdot \tan \alpha.$$

Das Gewicht *G* kann durch verschiedene Zusatzgewichte von 0,5 auf 1, 2, 5, 10, 20 g gebracht werden.

Eine Eichung des Instruments ist nicht nötig, wenn die Länge des Fadens von dem Aufhängepunkt *P* bis zum Angriffspunkt der Kraft *K* genau 1 m gemacht und vor der Messung die Spitze des Gewichts auf dem Nullpunkt der sphärischen Skala eingestellt wird.

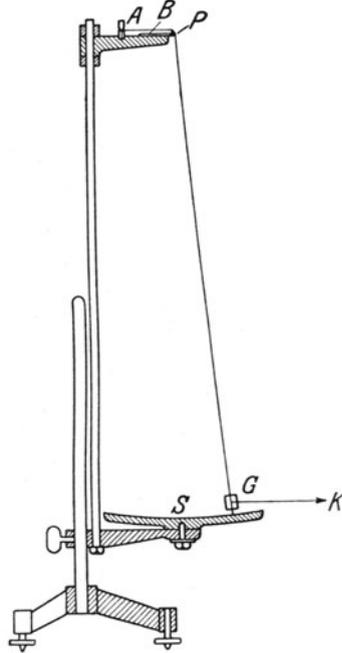


Fig. 78. Pendelkräftemesser.

c) Kräftemesser nach dem Kräfteparallelogramm. Ein Dynamometer nach dem Kräfteparallelogramm mit Rückführung auf die Nullstellung ist in Fig. 80 abgebildet³⁾, das Prinzip zeigt Fig. 79. Die drei Fäden *a*, *b*, *c* sind in dem Punkt *A* miteinander verknüpft. Am Faden *a* greift die zu messende Kraft *K* an, am Faden *b* hängt das Gewicht *G*; der Faden *c*, welcher die resultierende Reaktion *R*

¹⁾ Es ist bei H. W. L. Brückmann, Elektrizitätszähler, Leipzig, bei Leiner, 1914, S. 193, abgebildet.

²⁾ Bulletin of the Bureau of Standards, Vol. 7, Nr. 1 (1910); El. Review, Chicago, Bd. 57, S. 375.

³⁾ Schmiedel, Zeitschrift für Instrumentenkunde 1913, S. 373. Der Apparat wird von den mechanischen Werkstätten E. Marawske, Berlin C 54, Linienstr. 214, hergestellt.

aufnimmt, kann mit seinem Ende B auf einer Kreisbahn verschoben werden. Bei richtiger Einstellung soll der Punkt A mit dem Mittelpunkt M dieser Kreisbahn zusammenfallen. Wenn K und G rechtwinklig aufeinander stehen, ist

$$K = G \cdot \tan \alpha.$$

Die ausgezogenen Linien der Fig. 79 zeigen diese Stellung. Ändert sich nun die Kraft K in K' , so bewegt sich der Punkt A nach A' , wenn man dasselbe Gewicht G beibehält. Man verstellt dann B so lange auf der Kreisbahn, bis A' mit M zusammenfällt, was dann geschieht, wenn B bis B' gewandert ist. Dann erhält man $K' = G \cdot \tan \alpha'$.

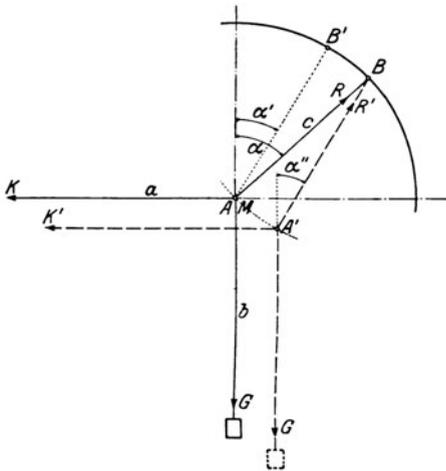


Fig. 79. Kräfteparallelogramm.

Der in der Fig. 79 eingezeichnete Winkel α'' deckt sich mit α' , wenn der Angriffspunkt der Kraft K oder K' so weit von M entfernt ist, daß bei den vorkommenden Verschiebungen der Faden a praktisch horizontal bleibt.

Die in Fig. 80 dargestellte praktische Ausführung hat einige Besonderheiten, die noch beschrieben werden sollen. Wie im Schema Fig. 79 greift die zu messende Kraft K am horizontalen Faden a an, am Faden b hängt die Schale d , die etwa 1 g wiegt und auf die beliebige Gewichte aufgelegt werden

können. Der Faden c ist an dem Teil g mittels einer Klemmvorrichtung e befestigt, deren Maul mit der Schraube f geöffnet und geschlossen werden kann. Man kann mit Hilfe dieser Vorrichtung den Faden c verlängern oder verkürzen, so daß der Knotenpunkt A bei radialer Stellung des Fadens c genau mit dem Mittelpunkt M zusammenfällt. Ein auf der Rückseite sichtbarer Hebel l , mit dem der Teil g starr verbunden ist, sorgt für zentrische Führung des Teiles g zum Mittelpunkte M , wenn man ihn mit dem Handgriff h auf der Kreisbahn k bewegt. Der Ablesezeiger m kann nach Lösen der Befestigungsschrauben n ein wenig gegenüber dem Teil g verschoben und richtig eingestellt werden. Um Parallaxe zu vermeiden, ist der Zeiger als schmaler, flacher Streifen ausgebildet. Der Mittelpunkt M wird durch den Schnittpunkt zweier feiner in den kleinen Spiegel s eingetzter Striche festgelegt. Bei der Einstellung des Knotenpunktes A auf den Mittelpunkt M wird durch Spiegelung Parallaxe vermieden. Die Skala ist so geteilt, daß man an ihr die Tangente des Winkels α (Fig. 79)

direkt ablesen kann. Ihr Nullpunkt ist ein wenig gegen die Vertikale verschoben, damit der Zeiger nicht durch den Faden *c* verdeckt wird. Sie ist zweiseitig ausgebildet, so daß man sowohl links als auch rechts angreifende Kräfte messen kann. Zur richtigen Einstellung der Skala in die vertikale Richtung mit Hilfe der drei Fußschrauben

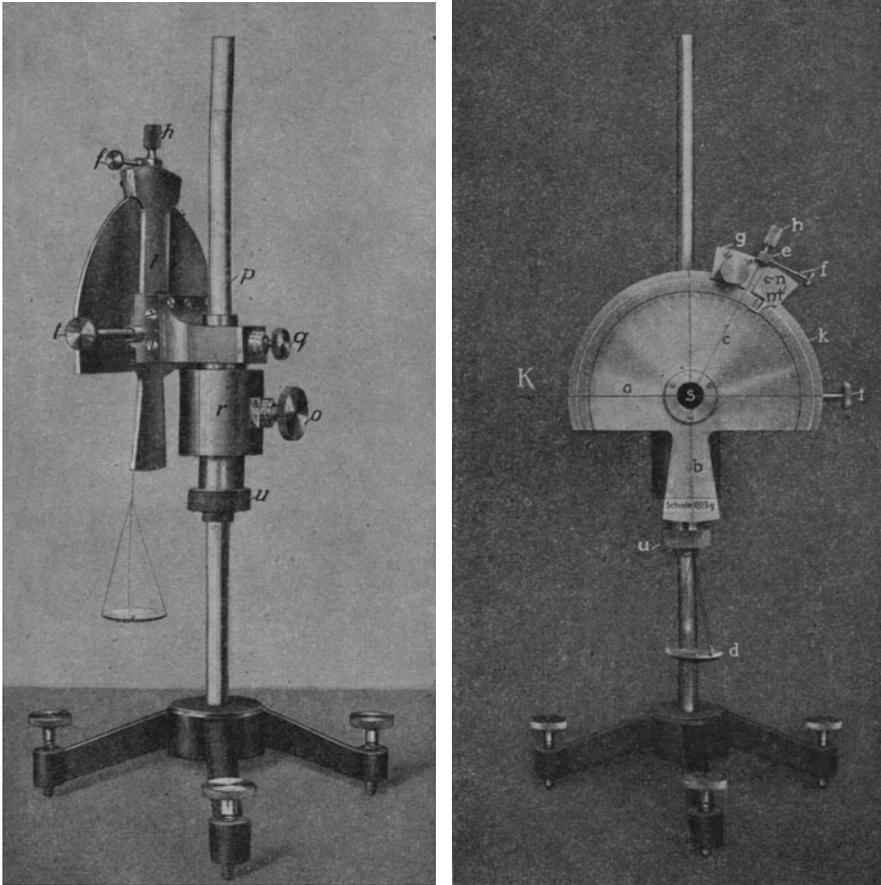


Fig. 80. Kräftermesser nach dem Kräfteparallelogramm.

ist in die die Skala tragende Scheibe eine vertikale Linie eingerissen. Nachdem man den ganzen Apparat ungefähr in die richtige Stellung gebracht hat, stellt man seinen Halter *r* an der Stange *p* mittels der Schraube *o* fest und richtet die vertikal eingerissene Linie nach dem als Lot dienenden Faden *b* aus. Nach Lösen der Schraube *q* kann man den Apparat um die Achse der Stange *p* drehen, mit Hilfe der

Schraube t kann man ihn horizontal, mit Hilfe der Mutter u vertikal ganz genau einstellen.

Eine Eichung ist bei diesem Apparat nicht notwendig. Man muß vor Beginn der Messung nur dafür sorgen, daß die Länge des Fadens c richtig eingestellt ist und daß bei der Nullstellung des Zeigers die

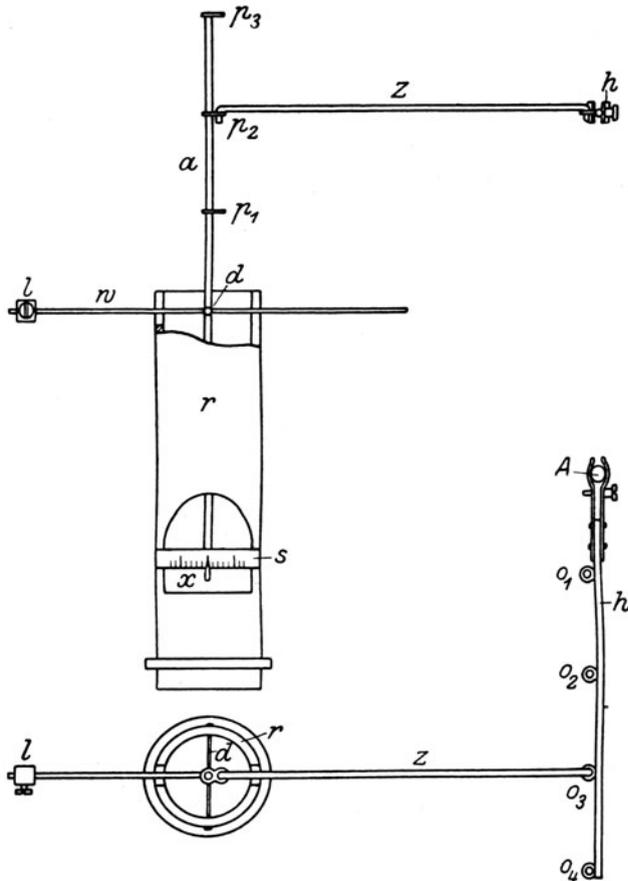


Fig. 81. Kräftemesser nach dem Wageprinzip.

in die Senkrechte fallenden Fäden c und b mit der auf der Skalen-
scheibe eingerissenen Linie genau zusammenfallen.

Es bleibt nun nur ein Hinweis darauf, wie man das Gewicht der Wagschale mitsamt dem des Fadens b mit dem Instrument selbst bestimmen kann. Man läßt an dem Faden a beide Male dieselbe Kraft K angreifen und legt in die Schale zwei verschiedene Gewichte G_1 und G_2 ; dann erhält man, wenn X das Gewicht der Wagschale mit den Fäden ist, die beiden Messungen:

also

$$\begin{aligned} 1. K &= (X + G_1) \cdot \tan \alpha_1, \\ 2. K &= (X + G_2) \cdot \tan \alpha_2, \\ X &= \frac{G_2 \cdot \tan \alpha_2 - G_1 \cdot \tan \alpha_1}{\tan \alpha_1 - \tan \alpha_2}. \end{aligned}$$

Zahlenbeispiel:

$$\begin{aligned} G_1 &= 1,0 \text{ g} \quad \tan \alpha_1 = 1,10, \\ G_2 &= 2,0 \text{ g} \quad \tan \alpha_2 = 0,75, \\ X &= \frac{2,0 \cdot 0,75 - 1,0 \cdot 1,10}{1,10 - 0,75} = 1,14 \text{ g}. \end{aligned}$$

Die Meßgenauigkeit beträgt bei der Messung von Kräften von 0,2 bis 50 g etwa $1^0/0$.

d) Kräftemesser nach dem Wageprinzip. Es sei noch ein Kräftemesser erwähnt, der auf dem Prinzip der Wage beruht und der den Vorzug hat, daß er zusammenlegbar ist und in einer verhältnismäßig kleinen Hülse transportiert werden kann. Er ist von der General Electric Company herausgebracht worden¹⁾. Wie Fig. 81 zeigt, wird an der Zählerwelle *A* ein Hebel *h* festgeklemmt, der in gleichen Abständen mit Ösen o_1, o_2, o_3, o_4 versehen ist. Diese werden durch ein an den Enden mit Haken versehenes Zwischenstück *z* mit der Wägevorrichtung verbunden. Die Wägevorrichtung besteht aus einem Rohr *r*, in dem eine Drehachse *d* mit dem Wagebalken *w* angebracht ist. Mit derselben Achse ist ein senkrecht zum Wagebalken *w* stehender Arm *a* fest verbunden, der an dem aus dem Rohr herausragenden Ende mit Ösen p_1, p_2, p_3 versehen ist, in die der Haken des Zwischengliedes *z* eingehängt werden kann. Am unteren in das Rohr *r* hineinragenden Ende läuft er in eine Zeigerspitze *x* aus, die über einer fest mit dem Rohr *r* verbundenen Skala *s* spielen kann. Zur Veränderung des Meßbereichs kann man das Zwischenglied *z* in verschiedene Ösen *o* oder *p* einhaken. Das Laufgewicht *l*, das gegen andere ausgewechselt werden kann, dient zum annähernden Abgleichen. Zur genauen Ablesung dient die Skala *s*. Das Instrument ist so gebaut, daß alle Teile in dem Rohr *r* untergebracht und leicht transportiert werden können.

e) Automatische Vorrichtung zur Aufzeichnung des Drehmoments über den ganzen Umfang, insbesondere für Amperestundenzähler. Bei Gleichstrom-Amperestundenzählern schwankt das Drehmoment bei verschiedenen Ankerstellungen sehr erheblich. Besonders in den Wendepunkten der Drehmomentkurve hält es schwer, eine stabile Einstellung des Drehmomentenmessers zu erhalten. Alberti²⁾ hat deshalb eine Vorrichtung geschaffen, die es gestattet, in jeder Anker-

¹⁾ Portable torque balance, Bulletin Nr. 4331, June, 1903.

²⁾ E. T. Z. 1916, S. 285. Dort sind auch eine größere Anzahl von mit dem Apparat aufgenommenen Kurven wiedergegeben.

stellung das Drehmoment nicht nur zu messen, sondern auch selbsttätig aufzuzeichnen. Fig. 82 zeigt das Prinzip der Anordnung. Um die Bremsscheibe *b* des Zählers *g* wird ein feiner Faden *f* gelegt, der mit dem Hebel *h* eines Federdynamometers verbunden wird. Die Feder ist einerseits mit dem Hebel *h*, andererseits mit dem Zahnrad *z* fest

verbunden; beide können sich frei um die Achse *a* drehen. Der Ausschlag des Hebels *h* wird durch zwei Kontakte *q₁* und *q₂* begrenzt. Das Zahnrad *z* greift einerseits in eine Zahnstange *st* ein, die mit einer Schreibfeder *sch* verbunden ist, andererseits kann es mittels des Schneckentriebs *t* von dem Motor *m* in Drehung versetzt werden. Der Gleichstromzähler *g* kann auf einer Gleitbahn *c* bewegt werden. Mit seiner Bewegung gekuppelt ist die Bewegung des Papier-

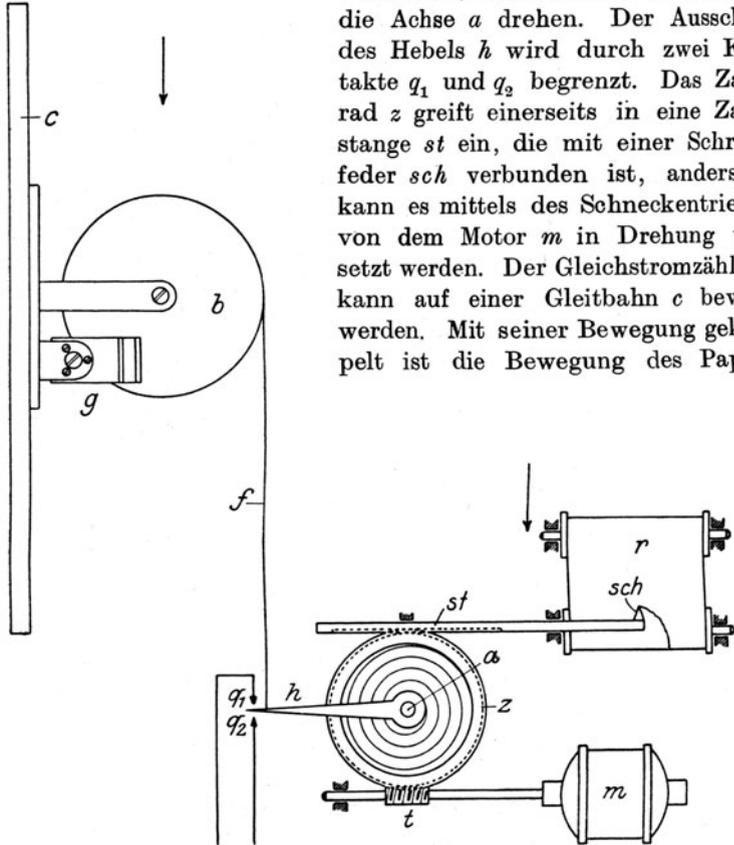


Fig. 82. Automatische Zugkraftmessung.

streifens des Registrierwerkes *r*. Der Vorgang bei der Messung spielt sich folgendermaßen ab: Man schaltet den Strom des Zählers *g* ein, die Scheibe *b* fängt an, sich zu drehen. Der Faden *f* wird angezogen oder losgelassen, je nachdem ob die Umfangskraft an der Scheibe *b* größer oder kleiner ist als die Federkraft am Hebel *h*. Berührt dieser den Kontakt *q₁*, so wird der Motor *m* derart gesteuert, daß er das Zahnrad *z* in einer solchen Richtung antreibt, daß die Federkraft vergrößert wird; berührt er den Kontakt *q₂*, so wird der Motor umgesteuert und verkleinert die Federkraft. Ist in einer der beiden

Richtungen das Gleichgewicht zwischen den Zugkräften erreicht, so pendelt der Hebel h zwischen den beiden Kontakten q_1 und q_2 hin und her. Je kleiner die Entfernung der Kontakte ist, desto geringer sind die Pendelbewegungen des Zeigers h und damit des Schreibstiftes sch . Bewegt man nun den Zähler g langsam auf seiner Gleitbahn c und damit das Registrierwerk r , so wird auf dessen Papierstreifen der Verlauf des Drehmoments in Abhängigkeit von der Ankerstellung als Zickzackkurve aufgezeichnet, deren Zacken um so kleiner sind, je geringer die Pendelbewegung des Hebels h ist.

f) **Bestimmung des Drehmoments durch Rechnung aus der elektrisch zugeführten Leistung.** Bei Gleichstrom-Amperestundenzählern kann man nach v. Krukowski¹⁾ das mittlere Drehmoment bei Bewegung und Stillstand aus der elektrisch zugeführten Leistung bestimmen. Die dem Anker zugeführte elektrische Leistung ist der mechanischen Leistung gleich:

$$E_a \cdot J_a = D \cdot 2\pi n \cdot 10^{-7} \text{ W.}$$

Dabei ist E_a die Gegen-EMK des Ankers in Volt, die man aus der Differenz der Klemmenspannung und dem Ohmschen Spannungsabfall berechnen kann; J_a der Ankerstrom in Ampere; n die zu den elektrischen Größen gehörende sekundliche Umdrehungszahl. Diese drei Größen bestimmt man und kann daraus das Drehmoment D in Dyn cm finden. Um es in gcm zu erhalten, dividiert man noch durch 981, die Beschleunigung durch die Erdschwere in $\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$. Von dem so gemessenen Drehmoment muß man noch das Reibungsmoment abziehen²⁾.

Das im Bewegungszustande gemessene Drehmoment ist wegen der gegenelektromotorischen Kraft etwas kleiner als das mit den oben beschriebenen Methoden bei Stillstand gemessene. Und zwar ist das mittlere Drehmoment bei Stillstand im Verhältnis $J_0 : J_a$ größer als das bei Bewegung gemessene. Dabei bedeutet J_0 den Ankerstrom bei Stillstand und der gleichen Klemmenspannung, bei der der Ankerstrom J_a bei Bewegung vorhanden ist.

2. Reibung.

a) **Auslaufmessungen.** Die Kenntnis der Reibung der Lager, des Zählwerks und der Bürsten ist bei allen Zählern von großer Wichtigkeit. Es hängt davon nicht nur die Gestalt der Fehlerkurve bei neuen Zählern ab, sondern auch die Größe des Verschleißes. Die Untersuchungen werden sich daher nicht nur auf neue Modelle zu erstrecken haben, sondern auch auf Zähler, die längere Zeit unter bestimmten äußeren Verhältnissen im Betriebe waren.

¹⁾ Möllinger, Wirkungsweise der Motorzähler und Meßwandler, Berlin, bei Springer, 1917, S. 42.

²⁾ S. folgendes Kapitel.

Zur Bestimmung der Reibung eignet sich besonders die im Maschinenbau oft angewandte Auslaufmethode¹⁾. Sie hat den Vorzug, daß man die Reibung direkt als solche messen kann. Bei der Messung geht man folgendermaßen vor: Man entfernt die Bremsmagnete und macht den Zähler stromlos, damit keine Dämpfungen durch induzierte Ströme entstehen können. Letzteres ist auch bei dynamometrischen Gleichstromzählern zu beachten, deren Anker geschlossene Wicklungen haben. Nun bringt man den Anker des Zählers durch Anstoßen mit einem feinen Haarpinsel oder durch Anblasen mit einem Luftstrahl auf eine Tourenzahl, die etwas über der Vollasttourenzahl liegt und läßt ihn auslaufen. Während des Auslaufs wird beim jedesmaligen Vorbeigehen einer auf der Zählerbremsscheibe angebrachten Marke an einer feststehenden Marke der Taster eines Doppelzeitschreibers (S. 51) niedergedrückt, wodurch auf dessen in Bewegung befindlichem Papierstreifen eine Marke entsteht. Läuft der Anker sehr rasch, so wird man nach je zwei oder vier Durchgängen der beweglichen an der festen Marke den Taster niederdrücken. Der Papierstreifen des Doppelzeitschreibers zeigt dann nebeneinander die Sekundenmarken der Normaluhr und die Umdrehungsmarken. Die Auswertung wird in der weiter unten geschilderten Art vorgenommen. Hat man genügende Übung, so kommt man auf diese einfache Weise zu brauchbaren Resultaten. Bequemer ist es, wenn man eine der oben (S. 54) beschriebenen automatischen Zählvorrichtungen zur Verfügung hat. So haben z. B. Fitch und Huber²⁾ bei ihren Reibungsmessungen an amerikanischen Zählern die Methode der überspringenden Funken mit gutem Erfolg benutzt.

Will man aus den so gewonnenen Auslaufkurven, die die Umdrehungen als Funktion der Zeit, $u = f(t)$ darstellen, das Drehmoment der Reibung berechnen, so hat man noch die im folgenden beschriebenen Überlegungen zu machen. Es gilt die Beziehung: Drehmoment der Reibung = Trägheitsmoment der rotierenden Ankermasse \times Winkelverzögerung

$$D_R = K \cdot 2\pi \cdot \frac{d^2 u}{dt^2} \cdot \frac{1}{981} \text{ gcm}^3).$$

Man muß also die zweite Ableitung der aufgenommenen Kurve $u = f(t)$ nach der Zeit bilden und das Trägheitsmoment des Ankers

¹⁾ Schmiedel, Verhandlungen des Vereins zur Beförderung des Gewerbeleißes 1910, S. 571, 655; 1911, S. 111. Elektrotechnik und Maschinenbau, Wien 1911, S. 955, 978.

²⁾ Bulletin of the bureau of standards, Vol. 10, 1913.

³⁾ 981 ist die Beschleunigung durch die Erdschwere in $\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$, die eingesetzt werden muß, weil das Trägheitsmoment in $\text{cm}^2 \times g$ Masse bestimmt wird.

bestimmen. Außerdem muß man die erste Ableitung $\frac{du}{dt}$ kennen, weil man die Abhängigkeit des Drehmoments der Reibung von den sekundlichen Umdrehungen des Ankers $\frac{du}{dt}$ sucht.

Man kann die Auslaufkurven auch dadurch aufnehmen, daß man bei abgenommenem Bremsmagnet den Zähler durch Erregung des Hauptstrom- und Spannungskreises auf verschiedene konstante Tourenzahlen bringt, diese zählt, dann den Strom in beiden Kreisen abschaltet und die Zeit vom Abschalten bis zum Stillstand des

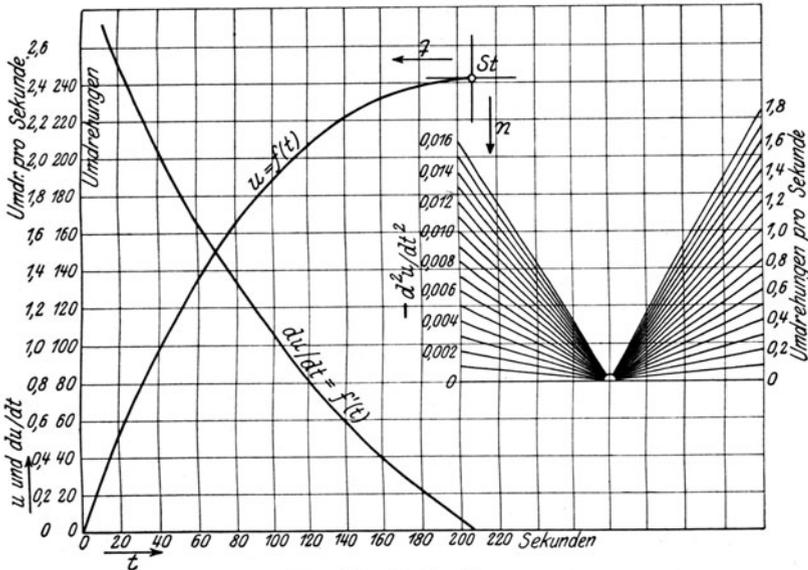


Fig. 83. Auslaufkurve.

Ankers mißt. Diese von H. W. L. Brückmann¹⁾ angegebene Methode hat jedoch den Nachteil, daß sowohl die konstante Tourenzahl als auch der Stillstandspunkt nicht sehr exakt bestimmt werden kann. Immerhin hat man bei ihr den Vorteil, daß man sofort die sekundlichen Umdrehungen als Funktion der Zeit erhält.

Graphische Auswertung. Rein graphisch kann man die Auslaufkurven $u = f(t)$ folgendermaßen auswerten: Man zeichnet die aufgenommene Kurve $u = f(t)$ in möglichst großem Maßstab auf Millimeterpapier; dabei sollte man darauf achten, daß der Maßstab so gewählt wird, daß die Steigung der Kurve in dem meist interessierenden Teil um 45° gegen die Abszissenachse geneigt verläuft, Fig. 83. Dann zieht man eine Schar von strahlenförmigen Geraden

¹⁾ Elektrot. Zeitschr. 1910, S. 861.

so, daß die trigonometrischen Tangenten ihrer Winkel α mit der Abszissenachse bestimmten Werten der sekundlichen Ankerumdrehungen entsprechen:

$$k \cdot \tan \alpha = \frac{du}{dt} = 0,1, 0,2, 0,3 \dots$$

Durch Parallelverschiebung eines Lineals findet man die Berührungspunkte der Tangenten mit der gezeichneten Kurve $u = f(t)$ und daraus die den Tangenten zugeordneten Abszissenwerte t . Nun zeichnet man die gleichfalls in Fig. 1 ersichtliche Kurve $du/dt = f'(t)$ und wiederholt das beschriebene graphische Verfahren, so daß man — $d^2u/dt^2 = f''(t)$ erhält. Diese Werte multipliziert man mit $2\pi K : 981$ und trägt sie als Funktion der zugeordneten du/dt auf. So erhält

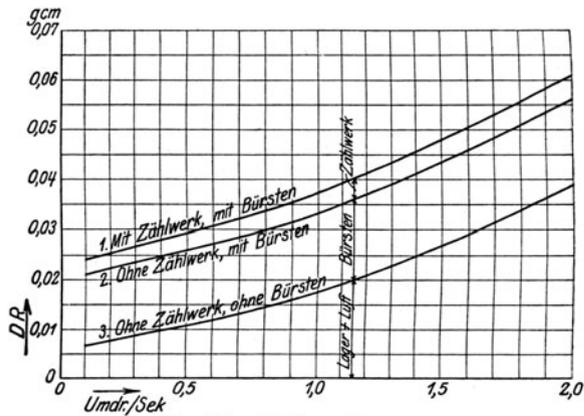


Fig. 84. Reibungskurven.

man die Reibungskurve $D_R = f(du/dt)$, Fig. 84. Die Methode hat den Nachteil, daß sie sehr mühsam ist, wenn man gute Resultate erzielen will. Die Kurven müssen sehr sorgfältig gezogen werden. Die Bestimmung der Berührungspunkte der Tangenten erfordert viel Geduld und Übung.

Auswertung durch Differenzenbildung. Greift man einen kleinen Teil der Kurve $u = f(t)$ zwischen den Werten u_a und u_b heraus und nimmt man zwischen diesen Werten einen geradlinigen Verlauf an, so ist zwischen diesen Werten die Geschwindigkeit

$$\frac{du}{dt} \sim \frac{\Delta u}{\Delta t} = \frac{u_b - u_a}{t_b - t_a},$$

wobei t_b und t_a die den Ordinaten u_b und u_a zugeordneten Abszissen sind¹⁾.

¹⁾ Eingehende Beweisführung siehe Schmiedel, Verhandl. d. Vereins z. Bef. des Gewerbfl. 1910, S. 574.

Dem gefundenen du/dt ordnet man einen mittleren Wert

$$t_m = \frac{t_a + t_b}{2}$$

zu. Bei der praktischen Anwendung der Methode wählt man die Abstände der einzelnen u so, daß die Δu übereinandergreifen. Die so gewonnene Kurve $du/dt = f'(t)$ wertet man in gleicher Weise aus, indem man für bestimmte als geradlinig betrachtete Stücke $\Delta \left(\frac{du}{dt} \right)$

die zugehörigen Abszissen t bestimmt und $\frac{d^2 u}{dt^2} \sim \frac{\Delta(du/dt)}{\Delta t}$ findet.

Man multipliziert wieder mit $2\pi K : 981$ und trägt das so gewonnene Reibungsmoment D_R als Funktion von du/dt auf. Diese Art der Auswertung geht sehr rasch vor sich, wenn man sich ein Schema nach folgender Art anlegt:

Auswertung der Kurve $u = f(t)$.

	t Sekunden	Δt für			$\frac{\Delta u}{\Delta t} \sim \frac{du}{dt}$ Umdrehungen pro sek
		$\Delta u = 16$	$\Delta u = 8$	$\Delta u = 4$	
← für je 4 Umdreh. →	3,0				
	4,4	5,7			2,81
	5,9	6,0			2,67
	7,4	6,1			2,63
	9,0	6,0			2,67
		·			·
		·			·
		·			·
← für je 2 Umdreh. →	91,9				
	93,7		6,8		1,18
	95,3		7,3		1,10
	97,2		7,3		1,10
← für je 1 Umdreh. →	158,2				
	160,7			10,2	0,39
	163,3			10,7	0,38
	166,0			11,4	0,35

Auswertung der Kurve $\frac{du}{dt} = f'(t)$

$$D_R = K \cdot 2\pi \cdot \frac{\Delta\left(\frac{du}{dt}\right)}{\Delta t} \cdot \frac{1}{981} \text{ gcm.}$$

$\frac{du}{dt}$ Umdrehungen pro sek	t Sekunden	Δt für		D_R in gcm
		$\Delta\left(\frac{du}{dt}\right) = 0,2$	$\Delta\left(\frac{du}{dt}\right) = 0,1$	
·	·	·	·	·
·	·	·	·	·
1,7	57,6	10,8	·	0,059
1,6	63,2	11,8	·	0,053
1,5	69,4	12,6	·	0,050
1,4	75,8	13,0	·	0,049
1,3	82,4	13,5	·	0,047
·	·	·	·	·
·	·	·	·	·
·	·	·	·	·
·	·	·	·	·
·	·	·	·	·
·	·	·	·	·
·	·	·	·	·
·	·	·	·	·
0,3	170,5	·	11,3	0,028
0,25	176,3	·	11,7	0,027
0,2	182,2	·	12,0	0,026
0,15	188,3	·	12,8	0,025
0,1	195,0	·	12,7	0,025
·	·	·	·	·
·	·	·	·	·
·	·	·	·	·

Die Zahlen im Schema schreibt man in gleichen Abständen auf passend liniertes (kariertes) Papier untereinander. Schneidet man sich eine in dem Schema angedeutete Schablone aus starkem Papier, so kann man die Differenzen bequem bilden, ohne daß man durch die vielen Zahlen verwirrt wird. Um nicht jedesmal von neuem aus dem so gefundenen Δt die $\Delta u/\Delta t$ berechnen zu müssen, legt man sich eine Tabelle in folgender Form an:

Δt	$\Delta u/\Delta t \sim du/dt$ für		
	$\Delta u = 16$	$\Delta u = 8$	$\Delta u = 4$
4,0	4,00	2,00	1,00
4,1	3,91	1,96	0,98
4,2	3,82	1,91	0,96
4,3	3,72	1,86	0,93
4,4	3,64	1,82	0,91
·	·	·	·
·	·	·	·
·	·	·	·
·	·	·	·
·	·	·	·
15,0	1,07	0,54	0,27
15,5	1,03	0,52	0,26
16,0	1,00	0,50	0,25

Unter Benutzung dieser kleinen Hilfsmittel kann man mit einiger Übung in wenigen Stunden sämtliche Auslaufkurven eines Gleichstromzählers auswerten.

Vereinfachte Auslaufmethode. Multipliziert man die Bewegungsgleichung des auslaufenden Ankers $D_R = K \cdot \frac{d\omega}{dt}$ auf beiden Seiten mit ω , so kann man sie in eine Arbeitsgleichung verwandeln¹⁾:

$$D_R \cdot \omega \cdot dt = K \cdot \omega \cdot d\omega \cdot \frac{1}{981}.$$

Da man die linke Seite der Gleichung nicht integrieren kann, weil die gesetzmäßige Abhängigkeit des Drehmoments D_R und der Winkelgeschwindigkeit von der Zeit nicht bekannt ist oder zum mindesten zu einer komplizierten Darstellung führen würde, so ersetzt man das Produkt $D_R \cdot \omega$ durch das Produkt aus dem mittleren Reibungsmoment M_R und der mittleren Winkelgeschwindigkeit ω_m und kommt so auf die Gleichung

$$M_R \cdot \omega_m \cdot dt = K \cdot \omega \cdot d\omega \cdot \frac{1}{981}.$$

Die Integration ergibt

$$M_R \cdot \omega_m \cdot t = K \cdot \frac{\omega_1^2}{2} \cdot \frac{1}{981} \text{ gcm.}$$

ω_1 ist dabei diejenige Winkelgeschwindigkeit, die der Anker zu Beginn des Auslaufversuches hat, t die gesamte Auslaufzeit. Die Gleichung bedeutet, daß die gesamte Reibungsarbeit während des Auslaufversuches gleich der kinetischen Energie des Ankers bei Beginn des Auslaufversuches ($t=0$) ist.

Wählt man ω_1 nicht zu groß, so kann man die gering gekrümmte Auslaufkurve durch eine gerade Linie ersetzen und $\omega_m = \frac{\omega_1}{2}$ schreiben. Es ist dann

$$M_R = \frac{K \cdot \omega_1}{t} \cdot \frac{1}{981} \text{ gcm.}$$

Dieser Wert gibt ein gutes Maß für die Größenordnung des Reibungsmomentes. Auch kann man die Trennung der Verluste mit ziemlicher Genauigkeit vornehmen.

Rechnerische Auswertung. Fitch und Huber²⁾ haben es mit Erfolg versucht, die Auslaufkurve $u = f(t)$ in eine Gleichung zu bringen und diese Gleichung durch Differentiation rein rechnerisch auszuwerten. Sie betrachten die Auslaufkurve zu dem Zweck von „rückwärts“, d. h. sie setzen den Fall, daß der Zähler vom Stillstand

¹⁾ Hommel, E. u. M. Wien 1920, S. 81.

²⁾ Vgl. oben S. 98.

aus sich bis zu einer bestimmten Umdrehungszahl beschleunigt. Die gewollte Kurve ergibt sich z. B. aus Fig. 83, wenn man den Stillstandspunkt St als Koordinatenanfangspunkt betrachtet und das Buch umdreht, so daß die bei richtiger Lage des Buches auf dem Kopf stehenden Ordinatenbezeichnungen u und t aufrecht zu stehen kommen. Diese Kurve soll sich durch die Gleichung

$$u = a \cdot t^2 + bt^4$$

ausdrücken lassen. Um die Konstanten a und b zu finden, muß man die zwei verschiedenen Umdrehungszahlen der Kurve entsprechenden Gleichungen lösen:

$$\begin{aligned} u_1 &= at_1^2 + bt_1^4 \\ u_2 &= at_2^2 + bt_2^4. \end{aligned}$$

Es ergibt sich:

$$\begin{aligned} a &= \frac{u_1 t_2^4 - u_2 t_1^4}{t_1^2 t_2^4 - t_1^4 t_2^2} \\ b &= \frac{u_2 \cdot t_1^2 - u_1 t_2^2}{t_1^2 t_2^4 - t_1^4 t_2^2}. \end{aligned}$$

Die sekundlichen Umdrehungen sind

$$\frac{du}{dt} = 2at + 4bt^3$$

und das Drehmoment ergibt sich zu

$$D_R = K \cdot 2\pi \cdot \frac{d^2 u}{dt^2} \cdot \frac{1}{981} = \frac{2\pi K}{981} (2a + 12bt^2) \text{ gcm.}$$

Bestimmung des Trägheitsmoments des Ankers. Das Trägheitsmoment des Ankers bestimmt man am einfachsten durch zwei Schwingungsversuche. Man hängt den Anker vermittels einer das obere Achsenende umfassenden Klemmvorrichtung an einen etwa 2 m langen Stahldraht von etwa 0,2 mm Durchmesser auf und mißt einmal die Schwingungsdauer des Ankers allein, das andere Mal unter Zufügung eines Zusatzringes von bekanntem Trägheitsmoment, den man konzentrisch zur Drehachse auf die Bremsscheibe des Zählers auflegt. Sind r_i und r_a der innere und äußere Radius des Ringes in cm, m seine durch Wägung bestimmte Masse in g, so ist das Trägheitsmoment des Ringes

$$K_R = \frac{1}{2} \cdot m (r_i^2 + r_a^2) \text{ gcm}^2.$$

Die Schwingungsdauer des Ankers allein sei τ_1 , die mit Zusatzring τ_2 . Das Trägheitsmoment des Ankers berechnet sich dann zu

$$K = K_R \cdot \frac{\tau_1^2}{\tau_2^2 - \tau_1^2}.$$

Ist das Trägheitsmoment der Klemmvorrichtung nicht zu vernachlässigen, so muß man noch einen dritten Schwingungsversuch mit

der Klemmvorrichtung allein machen, wobei sich die Schwingungsdauer τ_3 ergibt. Dann ist

$$K = K_R \cdot \frac{\tau_1^2 - \tau_3^2}{\tau_2^2 - \tau_1^2}.$$

Kann man aus irgendeinem Grunde den Anker nicht aus dem Zähler entfernen, so macht man zwei Auslaufversuche unter folgenden Bedingungen: An den Spannungskreis des Zählers legt man eine Spannung, die etwa den fünften Teil der Nennspannung beträgt. Die Vorrichtungen zur Kompensation der Reibung macht man zweckmäßig unwirksam. Den Hauptstromkreis erregt man einmal mit einem Strom, der etwa ein Zehntel des Nennstroms beträgt, das andere Mal etwa ein Zwanzigstel des Nennstroms. Bei Wechselstromzählern sollen diese Ströme J_1 und J_2 gleichphasig mit der Spannung sein. Die Stromkreise werden so geschaltet, daß die entstehenden Drehmomente bremsend wirken. Als Resultat der beiden Auslaufversuche erhält man

$$\left(\frac{d^2 u}{dt^2}\right)_1 = f_1 \left(\frac{du}{dt}\right) \text{ für } J_1 \text{ beim Drehmoment } D_1$$

und

$$\left(\frac{d^2 u}{dt^2}\right)_2 = f_2 \left(\frac{du}{dt}\right) \text{ für } J_2 \text{ beim Drehmoment } D_2.$$

Es gilt die Beziehung

$$K \cdot \frac{2\pi}{981} \cdot \left[\left(\frac{d^2 u}{dt^2}\right)_1 - \left(\frac{d^2 u}{dt^2}\right)_2 \right] = D_1 - D_2.$$

Im allgemeinen kann man in den kleinen betrachteten Intervallen Proportionalität zwischen Drehmoment und Produkt aus Strom und Spannung annehmen. Annähernd gilt dies bis zum Drehmoment D_n bei Nennstrom J_n und Nennspannung E_n . Also

$$\frac{D_1 - D_2}{D_n} = \frac{(J_1 - J_2) \cdot E}{J_n \cdot E_n}.$$

Das Drehmoment D_n kann man in bekannter Weise¹⁾ messen. Aus den beiden letzten Gleichungen erhält man:

$$K \cdot \frac{2\pi}{981} \cdot \left[\left(\frac{d^2 u}{dt^2}\right)_1 - \left(\frac{d^2 u}{dt^2}\right)_2 \right] = D_n \cdot \frac{(J_1 - J_2) \cdot E}{J_n \cdot E_n}.$$

In dieser Gleichung sind alle Größen mit Ausnahme des Trägheitsmoments K bekannt²⁾.

Trennung der Verluste. Um die Zählwerks-, Bürsten- und Lager-plus Luftreibung voneinander zu trennen, macht man bei ab-

¹⁾ Siehe oben S. 90.

²⁾ Über mögliche Fehlerquellen siehe Verhandlungen des Vereins zur Beförd. d. Gewerbfließes 1910, S. 658.

genommenem Bremsmagnet¹⁾ und abgeschalteten Stromkreisen mehrere Auslaufversuche:

1. Mit gekuppeltem Zählwerk und anliegenden Bürsten.
2. Mit abgenommenem Zählwerk und anliegenden Bürsten.
3. Ohne Zählwerk und Bürsten.

Jeder Versuch wird einzeln ausgewertet und die Reibungskurven werden in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit aufgezeichnet, Fig. 84. Die Differenz zwischen Kurve 1 und 2 ergibt die Zählwerksreibung, die zwischen 2 und 3 die Bürstenreibung. Meist wird man darauf verzichten, die Lagerreibung und Luftreibung, die man in Kurve 3 zusammen mißt, voneinander zu trennen.

Der Vollständigkeit halber sei die Methode von Fitch und Huber (l. c.) zur gesonderten Bestimmung der Luftreibung angegeben. Sie hängen den Anker an einem dünnen Draht frei auf und lassen den sonst feststehenden Teil des Zählers um den Anker rotieren. Das Torsionsmoment des Drahtes ist dann proportional dem Drehmoment der Luftreibung des Ankers.

Die Luftreibung kann man natürlich auch dadurch messen, daß man außer dem Auslaufversuch 3 unter normalem Luftdruck noch einen solchen in einem luftleer gemachten Raum vornimmt und die Differenz der beiden Reibungskurven bildet.

b) Methode des geeichten Motors. Entfernt man bei einem Gleichstromzähler die Bremsmagnete und legt an seinen Anker eine kleine Spannung E_k , so erhöht sich seine Tourenzahl so lange, bis Gleichgewicht zwischen der mechanischen Reibungsleistung und der dem Anker zugeführten elektrischen Leistung besteht²⁾:

$$D_R \cdot 2\pi \cdot \frac{du}{dt} \cdot 10^{-7} = E_a \cdot J_a \text{ Watt.}$$

Dabei ist J_a der den Anker durchfließende Strom, E_a die durch Rotation des Ankers im feststehenden Felde induzierte EMK. Man mißt du/dt , J_a und E_k und berechnet $E_a = E_k - J_a R_a$ aus dem Ankerwiderstand R_a . Da $E_a : du/dt$ ein konstanter Wert ist, so erhält man aus obiger Gleichung $D_R = c \cdot J_a$ in Dyn cm. Um das Reibungsmoment in gcm zu erhalten, muß man noch durch 981 dividieren.

Die Methode ist für alle Gleichstrommotorzähler mit rotierendem Anker anwendbar. Die Trennung der Bürstenreibung von der Lager- und Luftreibung ist dabei natürlich nicht möglich.

¹⁾ Ist der Luftspalt zwischen Bremsmagnet und Bremscheibe sehr klein, so ersetzt man den Bremsmagnet durch einen diamagnetischen Körper mit gleichgestalteten Polflächen. Meist kann man davon absehen.

²⁾ Siehe v. Krukowski, Vorgänge in der Scheibe eines Induktionszählers usw., Berlin, bei Springer, 1920.

3. Reibungskompensation.

a) **Gleichstrom-Wattstundenzähler.** Bei Gleichstrom-Wattstundenzählern kompensiert man die Reibung meist durch die sogenannte Kompensationsspule, die mit dem Anker in Reihe geschaltet ist und vom Strome des Spannungskreises durchflossen wird. Ihr Fluß ist konaxial mit dem Fluß der Hauptstromspulen. Macht man einen Auslaufversuch bei ausgeschaltetem Hauptstromkreis, aber eingeschaltetem Spannungskreis und wertet die Auslaufkurven aus, so erhält man das Drehmoment der Reibung weniger das Drehmoment der Reibungskompensation. Ein solcher Versuch ist deshalb lästig, weil man zu sehr langen Auslaufzeiten kommt. Auch bestimmt man durch ihn nur die Reibungskompensation am Aufhängungsort, die durch das Erdfeld beeinflusst wird. Will man das Erdfeld eliminieren, so muß man auf andere Weise vorgehen.

Der motorisch wirksame Fluß der Kompensationsspule ist proportional dem Strom im Spannungskreis, also auch der Klemmenspannung E . Der motorisch wirksame Fluß des Ankers ist gleichfalls proportional der Klemmenspannung. Also ist das Kompensationsmoment $D_k = c_k \cdot E^2$. Die mit dem Fluß der Kompensationsspule konaxial verlaufende Komponente des Erdfelds erzeugt ein Drehmoment $D_H = c_H \cdot E$. Je nach der Aufhängung des Zählers ist dieses Drehmoment dem Kompensationsmoment zuzuzählen oder von ihm abzuziehen¹⁾):

$$D_k' = D_k \pm D_H = c_k \cdot E^2 \pm c_H \cdot E.$$

Die Konstante c_k ist abhängig von der Ausführung der Kompensationsspule und ihrer Lage im Zähler, c_H kann verschieden sein, je nach der Stellung der Kompensationsspule im Erdfeld. Die Konstanten c_k und c_H kann man leicht durch zwei Auslaufversuche bestimmen, wobei man entweder die Lage des Zählers oder die Klemmenspannung verändert.

Änderung der Lage des Zählers. Erster Auslaufversuch: Der Spannungskreis ist normal geschaltet, nur in der Kompensationsspule ist die Stromrichtung umgeschaltet, so daß das von ihr erzeugte Drehmoment bremsend wirkt. Die Klemmenspannung ist die normale, die Bürsten liegen am Kollektor an, Bremsmagnet und Zählwerk sind entfernt, der Hauptstromkreis ist abgeschaltet. Der Auslaufversuch ergibt nach Abzug des bekannten Drehmoments der Reibung:

$$D_{k1} = c_k \cdot E^2 + c_H \cdot E.$$

Einen zweiten Auslaufversuch macht man unter sonst gleichen Bedingungen, nachdem man den Zähler um 180° um seine vertikale

¹⁾ Vgl. E. u. M., Wien 1911, S. 978; ferner Schmiedel, Wirkungsweise und Entwurf der Motorelektrizitätszähler, Stuttgart, bei Enke, 1916, S. 113.

Achse gedreht aufgehängt hat. Dieser Auslaufversuch ergibt nach Abzug des bekannten Drehmoments der Reibung:

$$D_{k2} = c_k \cdot E^2 - c_H \cdot E.$$

Die Konstanten c_k und c_H und damit den reinen Wert des Kompensationsmoments kann man dann berechnen. Man erhält:

$$c_k = \frac{D_{k1} + D_{k2}}{2 \cdot E^2} \quad \text{und} \quad c_H = \frac{D_{k1} - D_{k2}}{2 \cdot E}.$$

Änderung der Spannung. Anstatt die Lage des Zählers für die beiden Auslaufversuche verschieden zu wählen, kann man auch unter Beibehaltung der Lage des Zählers bei zwei verschiedenen Spannungen messen. Man erhält dann die beiden Drehmomente

$$D_{k1} = c_k \cdot E_1^2 \pm c_H \cdot E_1,$$

$$D_{k2} = c_k \cdot E_2^2 \pm c_H \cdot E_2$$

und daraus

$$c_k = \frac{D_{k1} - D_{k2} \cdot \frac{E_1}{E_2}}{E_1^2 - E_1 \cdot E_2} \quad \text{und} \quad c_H = \frac{-D_{k1} \cdot E_2^2 + D_{k2} \cdot E_1^2}{E_1 \cdot E_2 (\pm E_1 \mp E_2)}.$$

b) Wechselstrom-Induktionszähler und Gleichstrom-Amperestundenzähler. Bei Wechselstrom-Induktionszählern erzeugt man zur Kompensation der Reibung meist durch Unsymmetrien am Spannungseisen ein von der Klemmenspannung abhängiges Zusatzdrehmoment¹⁾. Man kann dieses Zusatzdrehmoment nicht gesondert messen, wie beim Gleichstrom-Wattstundenzähler, da es nur dann zur Wirkung kommt, wenn der Spannungskreis voll erregt ist und also auch die Eigenbremsung, die um ein Vielfaches größer ist, in die Erscheinung tritt. Es ist jedoch möglich, das Kompensationsmoment indirekt aus zwei Fehlermessungen zu bestimmen. Das Kompensationsmoment wirkt immer in der gleichen Drehrichtung auf den Anker ein. Bestimmt man nun bei konstant gehaltenen elektrischen Größen den Fehler des Zählers einmal für Vorwärtslauf bei einer Phasenverschiebung φ , das andere Mal für Rückwärtslauf bei einer Phasenverschiebung $180^\circ + \varphi$ zwischen Hauptstrom und Klemmenspannung, so ist die Fehlerdifferenz $F_1 - F_2$ proportional dem Kompensationsmoment. Seine Größe findet man unter Zugrundelegung der bekannten Fehlergleichung mit

$$D_k = \frac{(F_1 - F_2)}{2} \cdot \frac{D_0}{K} \cdot \frac{J}{J_0} \cdot \cos \varphi.$$

Dabei ist D_0 der Nennwert des treibenden Drehmoments, J_0 der Nennstrom, J der Strom, bei dem die Messung gemacht ist, K eine Konstante, deren Wert in der Nähe von 1,1 liegt. Voraussetzung ist

¹⁾ Vgl. z. B. Schmiedel, Wirkungsweise und Entwurf, S. 88; Möllinger, Wirkungsweise der Motorzähler, S. 87.

ferner, daß bei Nennspannung und Nennfrequenz gemessen wurde. Die Genauigkeit, mit der man D_k bestimmen kann, ist etwa $\pm 20\%$, was in praktischen Fällen genügen wird. Die gleiche Methode kann man natürlich auch für Gleichstrom-Wattstunden- und Ampere-stundenzähler anwenden. Bei Gleichstrom-Ampere-stundenzählern ist sie die einzig anwendbare, weil dort eine Reibungskompensation nur wirksam sein kann, wenn der Bremsmagnet vorhanden ist.

4. Eigenbremsung.

Die Eigenbremsung wird bei Wechselstrom-Induktionszählern durch Bewegung der Scheibe in den Wechselfläßen des Hauptstrom- und Spannungskreises hervorgerufen. Sie beträgt bei Vollast meist mehrere Prozente des treibenden Drehmoments. Bei dynamometrischen Zählern kann eine Eigenbremsung bei geschlossener Schaltung der Ankerwicklung auftreten, jedoch ist sie wegen des meist recht hohen Ankerwiderstandes nicht erheblich. Nur bei Wattstunden-Quecksilbermotorzählern kann die Eigenbremsung durch den Fluß des Spannungskreises eine beachtenswerte Größe erreichen, weil der Widerstand der Ankerscheibe klein ist. Bei Ampere-stundenzählern spielt die Eigenbremsung keine Rolle, weil das feststehende Feld des permanenten Magnets konstant ist und die Eigenbremsung daher ebenso wie die Gesamtbremsung proportional der Tourenzahl steigt.

Man kann die Eigenbremsung mit den gleichen Meßmethoden bestimmen wie die Reibung; um die Eigenbremsung allein zu erhalten, muß man in allen Fällen natürlich die Reibung abziehen. Jedoch gibt es auch noch einige andere Möglichkeiten, die Eigenbremsung zu bestimmen, wie im folgenden gezeigt werden wird.

a) **Auslaufmethode.** Bei Wechselstrom-Induktionszählern ist die Eigenbremsung durch die Flüße des Hauptstrom- und insbesondere des Spannungskreises so groß, daß es meist nicht möglich ist, bei deren Nennwerten Auslaufversuche zu machen, weil der Zähleranker schon nach einigen wenigen Umdrehungen stillsteht. Man mißt deshalb besser bei solchen Werten, die erheblich unter dem Nennwert liegen und extrapoliert auf diesen. Um eine geradlinige Extrapolation anwenden zu können, stellt man folgende Überlegung an: Nach den Gesetzen der Eigenbremsung kann man mit genügender Genauigkeit setzen:

$$D_J = c_J \cdot \frac{du}{dt} J^2,$$

wobei D_J das Drehmoment der Eigenbremsung des Hauptstromflusses, c_J eine Konstante, $\frac{du}{dt}$ die sekundlichen Umdrehungen und J der Hauptstrom ist. Aus mehreren Auslaufversuchen bei verschiedenen Stromstärken (wobei die Bremsmagnete und das Zählwerk abgenommen

sind, der Spannungskreis ausgeschaltet ist) greift man die zu gleichen du/dt gehörenden Werte des Drehmoments D_J heraus und trägt die Quadratwurzeln von D_J als Funktion von J auf. Die so erhaltenen Geraden kann man bis zum

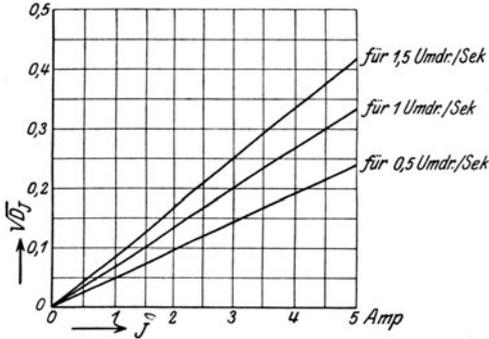


Fig. 85. Eigenbremsung durch den Hauptstromfluß.

Nennwert J_0 ziehen. Ein Beispiel für eine solche Extrapolation zeigt Fig. 85.

In gleicher Weise verfährt man bei der Auswertung der Auslaufversuche für die Eigenbremsung des Spannungsflusses, für die die analoge Beziehung gilt:

$$D_E = c_E \cdot \frac{du}{dt} \cdot E^2.$$

Da D_J , D_E und du/dt aus den Auslaufmessungen bestimmt, J und E bekannt sind, kann man die Bremskonstanten c_J und c_E berechnen.

b) Methode des geeichten Motors. Die Methode des geeichten Motors, die durch v. Krukowski¹⁾ angewendet wurde, um systematische Versuche über die Eigenbremsung von Wechselstromzählern anzustellen, eignet sich nicht für Messungen an Zählern, wie sie aus der Fabrikation kommen. Des Interesses halber sei sie aber kurz erwähnt. Auf die verlängerte Achse des Induktionszählers setzt man einen Gleichstromantriebsmotor. Dieser besteht aus einer Scheibe aus Isoliermaterial, welche die Wicklung eines Amperestundenzählers trägt, und zwei permanenten Magneten, in deren Luftspalt die Wicklung rotieren kann (ungedämpfter Flachankerzähler). Die dem Motor zugeführte elektrische Leistung ist gleich der durch die Eigenbremsung und die Reibung vernichteten Leistung:

$$J_a \cdot E_a = (D_B + D_R) \cdot 2\pi \cdot \frac{du}{dt} \cdot 10^{-7} \text{ W.}$$

J_a ist der Ankerstrom, E_a die Gegen-EMK des Gleichstromantriebsmotors. Mißt man diese beiden Größen und bestimmt noch die sekundlichen Umdrehungen, so erhält man direkt das zu diesen gehörende Drehmoment $D_B + D_R$. Die Reibung bestimmt man, wie oben beschrieben²⁾, auf gleiche Weise, zieht sie von dem gefundenen Werte ab und erhält dann die Eigenbremsung allein.

¹⁾ Vorgänge in der Scheibe eines Induktionszählers, S. 55.

²⁾ Siehe oben S. 106.

c) **Einlaufmethode.** Für Wechselstrominduktionszähler hat H. W. L. Brückmann¹⁾ folgende Methode zur Bestimmung der Eigenbremsung angegeben. Man beseitigt den Bremsmagnet und das Zählwerk, erregt z. B. den Spannungskreis mit der vollen Nennspannung, den Hauptstromkreis mit einem passend kleinen Strom bei $\cos \varphi = 1$ und läßt den Zähler so lange laufen, bis er eine konstante Geschwindigkeit annimmt. Für diese Geschwindigkeit ist das treibende Drehmoment gleich den bremsenden Drehmomenten:

$$D = D_E + D_J + D_R.$$

Nimmt man an, daß das treibende Drehmoment D proportional dem Produkt aus Strom und Spannung ist und daß D_J und D_R im Verhältnis zu D_E zu vernachlässigen sind, so ist

$$D = D_0 \cdot \frac{E \cdot J}{E_0 \cdot J_0} = D_E.$$

Hat man das Nenndrehmoment D_0 gemessen, so kann man aus einer solchen einfachen Messung, da die Nennspannung E_0 und der Nennstrom J_0 bekannt sind, die Eigenbremsung D_E annähernd bestimmen. In gleicher Weise verfährt man bei der Messung der Eigenbremsung des Hauptstromkreises. Auf die Feinheiten der Messung und die möglichen Fehlerquellen soll hier nicht weiter eingegangen werden sie sind in der angezogenen Literatur behandelt.

d) **Indirekte Bestimmung der Eigenbremsung.** Den durch die Eigenbremsung hervorgerufenen Fehler kann man nach Genkin und Schillès²⁾ durch folgendes Verfahren feststellen. Man bestimmt z. B. für einen kleinen Strom J'' und die Nennspannung E_n das Drehmoment D'' bei Stillstand des Zählers; sodann läßt man den Zähler mit abgenommenem Bremsmagnet laufen und mißt die Geschwindigkeit $\left(\frac{du}{dt}\right)''$, die sich für die gleichen Werte von Strom und Spannung einstellt. Die gefundenen Werte trägt man in einem rechtwinkligen Koordinatensystem auf der Ordinatenachse und der Abszissenachse ab. Rechnerisch und experimentell kann der Nachweis geführt werden, daß alle zwischen Stillstand und Einlaufgeschwindigkeit liegenden Werte auf einer die beiden markierten Punkte verbindenden Geraden liegen müssen. Bei einer Anzahl von Spannungen, für die man den Einfluß der Eigenbremsung kennen lernen will, macht man entsprechende Messungen bei gleichem Hauptstrom. In Fig. 86 sind für einen Zähler, dessen Nennspannung 500 V. war, die Werte für 450, 500 und 550 V. eingetragen. Um nun die Geschwindigkeit zu finden, die sich beim

¹⁾ E. T. Z. 1910. S. 859; vgl. auch Schmiedel, E. und M. Wien, 1911, S. 980; ferner ebenda 1912, Heft 7, S. 156.

²⁾ Lumiere Electrique, 1911, Ser. 2, Bd. 15, S. 7; E. und M. Wien, 1911, S. 704.

Nenn Drehmoment einstellen würde, muß man folgende Überlegung machen: Es gilt die Bedingung:

$$D_n = D' + D'' = c \cdot (J' + J'') \cdot E_n = D_B + D_E.$$

Dabei bedeutet D_n das treibende Drehmoment, das proportional dem Strom $J_n = J' + J''$ und der Spannung E_n ist. D' ist ein Drehmoment von der Größe, daß es zusammen mit D'' das Nenn Drehmoment D_n ergibt. D_B ist das Bremsmoment des Bremsmagnets, der Reibung und der Eigenbremsung durch den Hauptstromfluß, D_E das Drehmoment der Eigen-

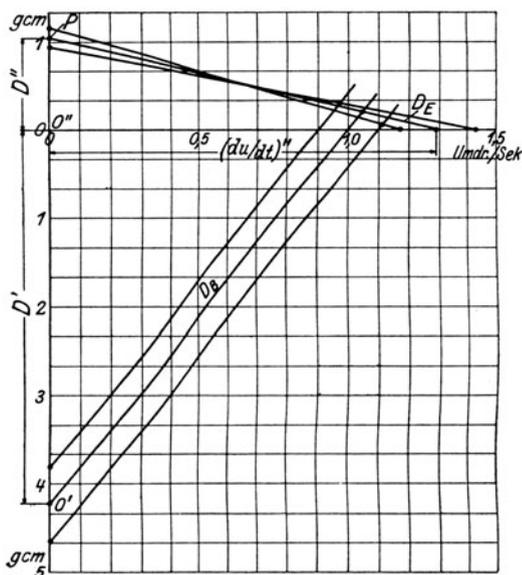


Fig. 86. Indirekte Methode zur Bestimmung der Eigenbremsung.

bremsung durch den Spannungsfluß. Das Bremsmoment D_B ist bekanntlich proportional der Geschwindigkeit; man kann also die Neigung der Geraden, die seinen Verlauf darstellt, leicht in die Figur einzeichnen. Wählt man als Koordinatenanfangspunkt für diese Gerade den Punkt O' , der um $D' = c \cdot J' \cdot E_n$ unter O'' (oder um $D = c \cdot J_n \cdot E_n$ unter P) liegt (s. Fig. 86), so ist für den Schnittpunkt der beiden Geraden

$$D_B = f' \left(\frac{du}{dt} \right) \text{ und } D_E = f'' \left(\frac{du}{dt} \right)$$

die obige Bedingung erfüllt, daß

$$D_n = D' + D'' = D_B + D_E.$$

In Fig. 86 ist die Konstruktion für die beiden Spannungen 450 und 550 V. in gleicher Weise wie für die Nennspannung 500 V. durchgeführt; J'' ist für alle drei Fälle zu 20% des Nennstroms J_n eingesetzt. Die Schnittpunkte der zugehörigen Geraden $D_B = f' \left(\frac{du}{dt} \right)$ und $D_E = f'' \left(\frac{du}{dt} \right)$ ergeben die Geschwindigkeiten 0,965 für 450 V., 1,042 für 500 V., 1,100 für 550 V. Die entsprechenden Sollgeschwindigkeiten unter der Annahme, daß die Angaben proportional der Spannung sind, ergeben sich für 450 V. und 550 V. zu

$$1,042 \cdot \frac{450}{500} = 0,938 \text{ und } 1,042 \cdot \frac{550}{500} = 1,144$$

und die Abweichungen gegenüber den Angaben des Zählers bei 500 V. zu

$$\frac{0,965 - 0,938}{0,938} = + 2,9\% \text{ für } 450 \text{ V.},$$

$$\frac{1,100 - 1,144}{1,144} = - 3,8\% \text{ für } 550 \text{ V.}$$

Hat der Zähler eine so große Eigenbremsung, daß man auch beim Nennstrom die Einlaufgeschwindigkeiten noch bestimmen kann, so fallen die Punkte O' und O'' zusammen und man hat für D_B nur eine einzige Gerade durch den gemeinsamen Koordinatenanfangspunkt zu ziehen¹⁾. Die Eigenbremsung des Hauptstromkreises stört bei den Messungen nicht, da sie immer die gleiche ist.

In analoger Weise kann man die Änderung der Eigenbremsung bei der Änderung der Frequenz oder des Hauptstromes bestimmen.

5. Stoßweise Belastungen.

Stromstöße und Spannungstöße wirken nur auf solche Motorzähler ein, bei denen die bremsenden Drehmomente beim Anwachsen des Stromes oder der Spannung größer sind, als beim Abnehmen der elektrischen Größen. Es kann infolgedessen nur der Fall eintreten, daß ein Motorzähler bei stoßweiser Belastung zu viel zeigt²⁾. Bei dynamometrischen Zählern und bei Magnetmotorzählern mit Bremsung ist auch bei geschlossener Ankerwicklung der Unterschied der Bremsmomente bei stoßweiser Belastung so klein, daß die Beeinflussung nicht merkbar ist³⁾. Bei Pendelzählern kann nur dann, wenn die Belastungsstöße in Resonanz mit den Pendelschwingungen sind, eine sehr wesentliche Beeinflussung der Angaben eintreten⁴⁾.

Zur Prüfung des Einflusses von Belastungsstößen unterbricht man meist den Strom vollständig und schaltet ihn dann mit seinem Höchstwert ein, da man andernfalls auch bei Wechselstromzählern so kleine Abweichungen vom Sollwert erhält, daß diese nur schwer nachzumessen sind. Als Zeitdauer der Unterbrechung und der Einschaltung wählt man meist 1 Sekunde. Um ein allmähliches Anwachsen des Stromes zu erhalten, kann man bei der Prüfung von Gleichstromzählern einen variablen elektrolytischen Widerstand⁵⁾ verwenden; für die Prüfung von Wechselstromzählern benutzt man die im folgenden beschriebenen Anordnungen.

¹⁾ Vgl. Fig. 10 der obengenannten Arbeit von Genkin und Schillès.

²⁾ Vgl. Schmiedel, E. und M. Wien, 1911, S. 555; Robertson, The Institution of Electrical Engineers, Sept. 1, 1911.

³⁾ Vgl. Orlich und G. Schulze, E. und M. Wien, 1909, S. 801.

⁴⁾ Vgl. Robertson, l. c.

⁵⁾ Vgl. Orlich und G. Schulze, l. c.

Die zu prüfenden Zähler schaltet man hintereinander und vergleicht ihre am Zählwerk abgelesenen Angaben über eine genügend lange Zeitdauer mit den Angaben eines ebenso geschalteten, von Stromstößen unbeeinflussbaren Zählers. Bei Gleichstrom nimmt man dazu zweckmäßig einen Elektrolytzähler oder ein Voltmeter¹⁾, bei Wechselstrom einen Pendelzähler, dessen Eigenschwingung nicht in

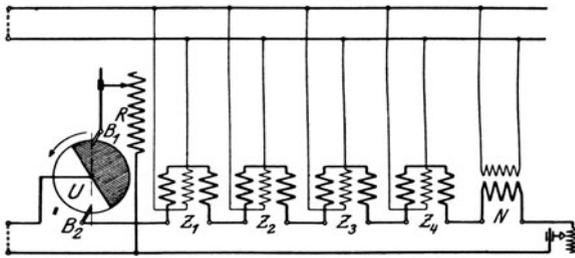


Fig. 87. Schaltung für stoßweise Belastung mit Normalzähler.

Resonanz mit der Periode der Unterbrechungen ist²⁾. Die Schaltung macht man nach Fig. 87. Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 sind die zu untersuchenden Zähler, N der zum Vergleich dienende Normalzähler. R ist ein Widerstand, der an Stelle der Zähler eingeschaltet wird, wenn diese abgeschaltet werden.

Der mit etwa $\frac{1}{2}$ Umdrehungen in 1 Sekunde rotierende Umschalter U ist zur einen Hälfte aus Metall, zur anderen aus Isoliermaterial; die Bürsten B_1 und B_2 liegen genau diametral einander gegenüber.

Hat man mehrere gleiche Zähler zur Verfügung und will man den Einfluß der Belastungsschwankungen nur für diesen einen Typ prüfen, so ist die Schaltung nach Fig. 88 mit Vorteil zu verwenden³⁾.

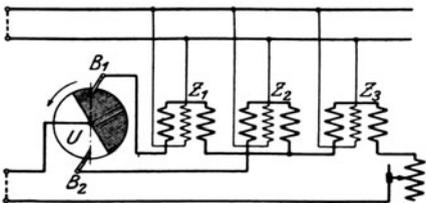


Fig. 88. Schaltung für stoßweise Belastung mit Auswechseln der Zähler.

Die Zähler Z_1 und Z_2 werden durch den Umschalter U stoßweise belastet, der Zähler Z_3 dagegen gleichmäßig. Hat man die drei Zähler vorher für den Strom, mit dem man stoßweise belasten will, auf genau gleiche Summe der Angaben $A_1 + A_2$

der Zähler Z_1 und Z_2 gleich den Angaben A_3 des Zählers Z_3 sein, wenn die Angaben durch Stromstöße nicht beeinflusst würden. Man liest aber an den Zählwerken der Zähler Z_1 und Z_2 die Angaben A_1' und A_2' ab. Der durch Stromstöße hervorgerufene Fehler ist

$$F = \frac{(A_1' + A_2') - (A_1 + A_2)}{A_1 + A_2} = \frac{A_1' + A_2' - A_3}{A_3} = \frac{A_1' + A_2'}{A_3} - 1.$$

¹⁾ Vgl. Orlich und G. Schulze, l. c.

²⁾ Vgl. Schmiedel, l. c.

³⁾ Möllinger und v. Krukowski, E.T.Z. 1917, S. 332.

Die Schaltung kann man auch für Zähler verschiedener Typen mit gleichem Meßbereich benutzen, wenn man den bei Z_3 eingeschalteten Zähler als Normalzähler benutzt. Jeder der drei Zähler muß bei drei aufeinanderfolgenden Messungen an die Stelle eines der zwei anderen treten. Man erhält so nacheinander die Messungen

$$\frac{F_1 + F_2}{2} = \frac{A_1' + A_2'}{A_3} - 1, \quad \frac{F_1 + F_3}{2} = \frac{A_1' + A_3'}{A_2} - 1, \quad \frac{F_2 + F_3}{2} = \frac{A_2' + A_3'}{A_1} - 1$$

Man macht die drei Messungen über genau gleiche Zeiträume und stellt die Zähler vorher für den Strom, mit dem man stoßweise belasten will, gleich ein¹⁾, so daß also

$$A_1 = A_2 = A_3.$$

Dann erhält man, wenn die Ausschaltzeit des Stromes gleich der Einschaltzeit ist,

$$F_1 = \frac{A_1' - A_1/2}{A_1/2} = \frac{2A_1' - A_1}{A_1} = \frac{2A_1'}{A_1} - 1.$$

Ebenso

$$F_2 = \frac{2A_2'}{A_2} - 1 \quad \text{und} \quad F_3 = \frac{2A_3'}{A_3} - 1.$$

6. Kurvenform.

Bei Wechselstromzählern kann die Kurvenform auf die Angaben einwirken, weil die Spannungsspule nicht wie eine reine Induktivität wirkt²⁾. Die Angaben werden aber nur bei sehr flachen oder sehr spitzen Kurvenformen wesentlich gegenüber den Angaben bei sinusförmiger Kurvenform geändert. Diese abnormen Kurvenformen stellt man dadurch her, daß man entweder den stromliefernden Generator mit auswechselbaren Polschuhen ausrüstet oder zwei Generatoren verwendet, von denen einer die sinusförmige Grundwelle, der andere eine Welle dreifacher Frequenz erzeugt. Verändert man sowohl die Amplitude der dritten Oberschwingung als auch ihre Phasenverschiebung gegen die Grundwelle, so kann man fast jede gewünschte Kurvenform darstellen. Ausführliche Untersuchungen mit derartigen Anordnungen haben zu dem Resultat geführt, das nur in ganz besonderen Fällen die Kurvenform die Angaben beeinflußt³⁾.

¹⁾ Man kann auch die Angaben auf den Sollwert korrigieren, wenn man von der genau gleichen Einstellung absehen will.

²⁾ Vgl. Rogowski und Vieweg, Zeitschrift für Instrumentenkunde 1913, S. 122.

³⁾ Rosa, Lloyd und Reid, Bulletin of the Bureau of Standards, Bd. 1, Nr. 3, S. 421; Referat E.T.Z. 1906, S. 635. — Ratcliff und Moore, Journal of Electrical Engineers, Bd. 47, 1911, S. 3 (insbes. S. 41–43); Referat Electrician Bd. 66, 1911, S. 938; vgl. auch die Bemerkungen von Irwin, Electrician, Bd. 67, 1911, S. 9.

7. Äußere Felder.

a) Absichtliche Fälschung der Angaben. Durch Nähern eines starken permanenten Magnets kann man fast alle Zähler, deren Kappe nicht aus Eisenblech ist, von außen beeinflussen.

Bei Wechselstrominduktionszählern ist die Beeinflussung am geringsten, weil der Luftspalt des Bremsmagnets sehr klein ist und die magnetischen Wechselfelder nicht beeinflußt werden.

Von den Magnetmotorzählern sind diejenigen der Flachankertypen meist weniger durch böswillige Näherung eines permanenten Magnets zu beeinflussen, als die mit Trommelanker, weil bei den ersteren der magnetische Kreis besser geschlossen ist. Mit einem starken Hufeisenmagnet von der Maulweite 70 mm, einer gesamten Eisenlänge von 200 mm und einem Eisenquerschnitt von 10×40 mm kann man die Angaben der auf dem Markt befindlichen Flachankerzähler um etwa $+2\%$, die der Trommelankerzähler um etwa $+6\%$ beeinflussen.

Sehr stark beeinflussen lassen sich die Gleichstromwattstundenzähler, zumal wenn sie Eisen im beweglichen System haben. Je kleiner das Feld der Hauptstromspulen ist, desto empfindlicher sind sie.

b) Unabsichtliche Einwirkung stromführender Leitungen. Wechselstrominduktionszähler werden durch äußere Wechselstromfelder so gut wie nicht beeinflußt, weil ihr Eisenkreis bis auf den kleinen Luftspalt für die Triebsscheibe vollkommen geschlossen ist.

Gleichstrommagnetmotorzähler sind ebenso fast störungsfrei in dieser Hinsicht.

Dynamometrische Wattstundenzähler dagegen sind von äußeren Feldern ebenso zu beeinflussen, wie die dynamometrischen Wattmeter. Man muß deshalb darauf achten, daß sie nicht in der Nähe von starke Ströme führenden Leitungen aufgehängt werden. Bei Zählern für große Stromstärken müssen die Zuleitungen möglichst eng beieinander liegen, damit die um die Hin und Rückleitung entstehenden Felder nach außen unwirksam werden.

Bei dynamometrischen Gleichstromzählern genügt schon das Erdfeld, um so große Fehler hervorzurufen, daß sie bei kleinen Belastungen, also kleinem Hauptstromfeld, nicht mehr vernachlässigt werden können ($+1$ bis 2% für $\frac{1}{10}$ des Nennstromes bei marktgängigen Ausführungen). Bei der Installation solcher Zähler muß man diesem Umstande Rechnung tragen¹⁾.

Das Maß der Beeinflußbarkeit eines dynamometrischen Zählers durch äußere Felder drückt man zweckmäßig durch die „Beeinflussungskonstante“¹⁾ aus. Sie ist definiert durch die Gleichung

$$\Delta F = \frac{c \cdot N_A \cdot J_A}{a \cdot N \cdot J}$$

¹⁾ Vgl. Schmiedel, E. und M. Wien 1911, S. 955; Wirkungsweise und Entwurf, S. 114.

Darin bedeutet ΔF die Fehlerdifferenz, die sich für einen Zähler ergibt, wenn der beeinflussende Strom einmal in der einen Richtung, das andere Mal in der entgegengesetzten Richtung fließt; $N \cdot J$ sind die Amperewindungen der Hauptstromspulen, bei denen ΔF gemessen wird, J_A ist der äußere, beeinflussende Strom, N_A die Leiterzahl dieses Stromes (meist = 1), a der Abstand des beeinflussenden Stromleiters von der Ankerachse des Zählers, c die Beeinflussungskonstante. Zu deren Bestimmung braucht man also nur folgende Größen zu messen: den Hauptstrom J , den beeinflussenden Strom J_A , seine Entfernung a vom Zähler und die Fehler F_1 und F_2 für zwei Stromrichtungen von J_A . Die Windungszahl N der Hauptstromwicklung muß bekannt sein. Es ist dann die Beeinflussungskonstante

$$c = \Delta F \cdot a \cdot \frac{N \cdot J}{N_A \cdot J_A}.$$

Bei marktgängigen Ausführungen von dynamometrischen Gleichstromwattstundenzählern liegt die Beeinflussungskonstante zwischen 1 und 4.

8. Temperatur.

Zur Messung der Raumtemperatur außerhalb des Zählers genügt ein gewöhnliches Quecksilberthermometer. Innerhalb der Kappe des Zählers kann man meist kein Quecksilberthermometer anbringen. Man verwendet deshalb am besten ein Thermoelement Eisen-Konstantan, dessen Drähte man durch eine kleine Öffnung der Kappe einführen kann. Ein solches Thermoelement kann man sich leicht selbst herstellen, indem man zwei etwa einen Meter lange Drähte aus Eisen und Konstantan an einem Ende mit Weichlot zusammenlötet und sie auf ihrer Länge gegeneinander isoliert zusammendreht. Am anderen Ende jeden Drahtes lötet man einen Kupferdraht an. Diese Lötstellen hält man dauernd auf konstanter Temperatur, indem man sie z. B. in ein mit Eis gefülltes Gefäß steckt. Man eicht das so hergestellte Thermoelement zusammen mit dem Zeigergalvanometer, das man an die freien Enden der Kupferdrähte anschließt. Die Temperatur der Eisenteile und die Außentemperatur der Wicklungen kann man damit ebensogut bestimmen wie die Temperatur des Innenraumes des Zählers.

Die Eigentemperatur der Wicklungen bestimmt man am besten durch Widerstandsmessungen. Ist r_0 der Widerstand einer Wicklung bei $t_0 = 0^\circ$, so ist bei der Temperatur t_1 , z. B. bei der Zimmertemperatur, der Widerstand der Wicklung

$$r_1 = r_0 (1 + \alpha t_1).$$

Erwärmt sich nun die Wicklung auf t_2 , so wird ihr Widerstand

$$r_2 = r_0 (1 + \alpha t_2).$$

Hat man für r_1 die Zimmertemperatur t_1 gemessen, so kann man die erhöhte Temperatur berechnen als

$$t_2 = \frac{r_2 - r_1}{\alpha \cdot r_1} + \frac{r_2}{r_1} \cdot t_1.$$

Dabei ist angenommen, daß der Temperaturkoeffizient α des Materials der Wicklung auf $t_0 = 0^\circ$ bezogen ist. Bezieht man ihn auf die Zimmertemperatur, so wird

$$t_2 = \frac{r_2 - r_1}{\alpha \cdot r_1} + t_1$$

oder die Temperaturerhöhung

$$t_2 - t_1 = \frac{r_2 - r_1}{\alpha \cdot r_1}.$$

Da die Zimmertemperatur meist sehr nahe bei 18°C liegt, wird man praktischerweise die bei dieser Temperatur liegenden Temperaturkoeffizienten benutzen. Man kann α bei 18°C für verschiedene Materialien aus den Handbüchern entnehmen. Die wichtigsten Werte von α für den Zählerbau sind¹⁾:

Kupfer	0,0040
Aluminium . . .	0,0036
Nickel	$\sim 0,006$
Eisen	$\sim 0,006$
Konstantan . .	$- 0,0003$ bis $+ 0,0005$
Manganin . . .	$\sim + 0,00003$.

Bei Gleichstromzählern mißt man den Widerstand am einfachsten durch Strom- und Spannungsmessung während des Betriebes. Bei Wechselstrom baut man einen Umschalter ein, mit dem man die Wicklung, deren Widerstand bestimmt werden soll, einmal in den Betriebsstromkreis einschaltet, das andere Mal an den Meßkreis der Meßbrücke oder der Anordnung für die Strom- und Spannungsmessung mit Gleichstrom anschließt.

9. Eigenverbrauch der Wicklungen.

a) Gleichstrom. Bei Gleichstrom kommt nur der Kupferverlust der Wicklungen in Betracht, man kann also aus einfachen Strom- und Spannungsmessungen den Eigenverbrauch bestimmen. Man benutzt dabei für die Messung des Eigenverbrauchs im Spannungskreis die Schaltung nach Fig. 89, da man bei dieser die Nennspannung, für die man ihn kennen will, ohne weiteres einstellen kann. Der Eigenverbrauch ist dann

$$L = i \cdot E = (i_1 - i_V) \cdot E = \left(i_1 - \frac{E}{R_V} \right) \cdot E.$$

¹⁾ Vgl. z. B. Kohlrausch, Praktische Physik.

Dabei ist i_1 der am Strommesser A abgelesene Strom, E die Spannung, für die man den Eigenverbrauch kennen will, R_V der Widerstand des Spannungsmessers V .

Für die Messung im Hauptstromkreis ist die Schaltung nach Fig. 90 geeigneter. Man stellt mit dem Strommesser A den Strom J

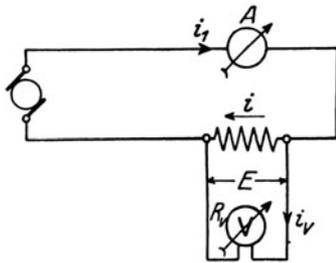


Fig. 89. Eigenverbrauchsmessung für den Spannungskreis bei Gleichstrom.

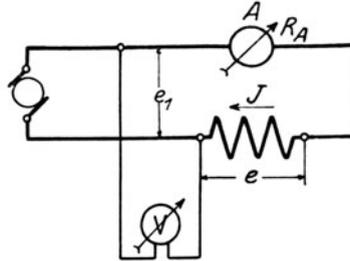


Fig. 90. Eigenverbrauchsmessung für den Hauptstromkreis bei Gleichstrom.

ein, bei dem man messen will, und liest die Spannung e_1 am Spannungsmesser V ab. Die Spannung an den Zählerklemmen ist dann

$$e = e_1 - J \cdot R_A,$$

wobei R_A den Widerstand des Strommessers bedeutet. Der Eigenverbrauch ist

$$L = J \cdot e = J \cdot (e_1 - J \cdot R_A).$$

Falls der Widerstand des benutzten Strommessers von der Temperatur abhängig ist, muß man die dadurch erforderliche Korrektur berücksichtigen. Stößt man dabei auf Schwierigkeiten, so ist die erstere Methode zu verwenden.

b) Wechselstrom. Dynamometrischer Leistungsmesser. Bei Wechselstromzählern muß man zur Messung des Eigenverbrauchs einen Leistungsmesser verwenden. Fig. 91 a zeigt die Schaltung unter Verwendung eines dynamometrischen Leistungsmessers zur Messung des Eigenverbrauchs im Spannungskreis. Die Nennspannung E_n stellt man mit dem Spannungsmesser ein; hat man Interesse daran, den Strom im Spannungskreis zu kennen, so mißt man mit einem hochempfindlichen Hitzdraht- oder Thermokreuzstrommesser (s. S. 37) den Strom i_1 , der sich aus dem Strom i_n in der Spannungswicklung und den Strömen i_V und i_L in dem Spannungs- und dem Leistungsmesser zusammensetzt. Die Widerstände dieser beiden

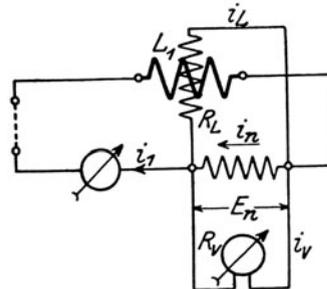


Fig. 91 a. Eigenverbrauchsmessung bei Wechselstrom. Schaltung.

Kreise sind meist als rein Ohmsche zu betrachten; ihr Gesamtwiderstand ist also

$$R = \frac{R_V \cdot R_L}{R_V + R_L}.$$

Ist L_1 die am Leistungsmesser abgelesene Leistung, so ergibt sich der Eigenverbrauch im Spannungskreis zu

$$L = L_1 - \frac{E_n^2}{R};$$

den Strom im Spannungskreis findet man unter Benutzung des Diagramms Fig. 91b und des Kosinussatzes als

$$i_n = \sqrt{i_1^2 + i_R^2 - 2i_1 \cdot i_R \cdot \cos \varphi_1},$$

wobei

$$i_R = i_V + i_L = \frac{E_n}{R}$$

ist. Ferner ist

$$L_1 = i_1 \cdot E_n \cdot \cos \varphi_1, \quad \text{also} \quad i_1 \cos \varphi_1 = \frac{L_1}{E_n} = \frac{L_1}{i_R \cdot R},$$

daher

$$i_n = \sqrt{i_1^2 + \frac{E_n^2}{R^2} - 2 \cdot \frac{L_1}{R}}.$$

Den Leistungsfaktor findet man dann zu

$$\cos \varphi = \frac{L}{E_n \cdot i_n}.$$

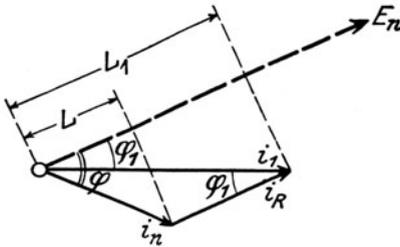


Fig. 91b. Eigenverbrauchsmessung bei Wechselstrom. Diagramm.

Schaltung an, da unter Benutzung einer Schaltung ähnlich der Fig. 90 der scheinbare Widerstand und der Selbstinduktionskoeffizient des Strommessers bekannt sein müßte, wenn man die Korrekturen richtig einsetzen wollte. Die Anbringung dieser Korrekturen wäre außerdem sehr lästig. Deshalb ist eine solche Schaltung nur dann zu empfehlen, wenn diese Korrekturen vernachlässigt werden können. Zur Spannungsmessung an den Hauptstromklemmen muß man ein hochempfindliches Hitzdraht- oder Thermokreuzinstrument, das als Spannungsmesser geeicht ist, verwenden. Hat man einen Wechselstromkompensationsapparat zur Verfügung, so arbeitet es sich mit diesem natürlich weit angenehmer.

Die Leistungsmessung erfordert sowohl bei der Bestimmung des Eigenverbrauchs im Hauptstromkreise als auch im Spannungskreise besonders empfindliche Instrumente¹⁾.

Elektrometer. Sehr genau kann man mit dem Elektrometer den Eigenverbrauch messen. Es ist zu bedauern, daß das Elektro-

¹⁾ Vgl. Seite 39.

meter von Hugo Schultze¹⁾ aus dem Grunde nicht mehr Eingang in die Laboratorien gefunden hat, weil es wegen seiner großen Empfindlichkeit eine vollständig erschütterungsfreie Aufstellung verlangt. Es soll deshalb davon abgesehen werden, hier auf die Messungen mit dem Elektrometer näher einzugehen. Wer sich dafür näher interessiert, sei auf die Arbeit von Orlich²⁾ verwiesen.

Dreivoltmetermethode. Die Dreivoltmetermethode, die nur noch sehr selten angewandt wird, gestattet, die in einem induktiven Widerstand verbrauchte Leistung auf folgende Art zu messen: Man schaltet mit dem induktiven Widerstand einen induktionslosen Widerstand r in Serie und mißt mit einem statischen Spannungsmesser oder mit einem an einen dreiteiligen Voltmeterersatzschalter³⁾ angeschlossenen dynamometrischen Spannungsmesser die Spannungen E_1 an dem unbekanntem induktiven Widerstand, E_3 an dem bekannten induktionslosen Widerstand r und E_2 an den Enden beider hintereinandergeschalteter Widerstände (Summenspannung). Dann ist die im unbekanntem induktiven Widerstand verbrauchte Leistung

$$L = \frac{1}{2r} (E_3^2 - E_1^2 - E_2^2).$$

Will man genaue Resultate erhalten, so muß man sehr genau messen, weil man die Leistung aus Differenzenbildung ermittelt.

10. 90°-Verschiebung.

Sollen Wechselstrominduktionszähler auch bei Phasenverschiebungen im Netze richtig zeigen, so muß die Bedingung erfüllt sein, daß sich der Winkel φ zwischen Netzstrom und Netzspannung mit dem Winkel ψ zwischen dem Hauptstromfeld und dem Spannungsfeld des Zählers zu 90° ergänzt, $\psi \pm \varphi = 90^\circ$ ⁴⁾.

a) Stillstandsmethode. Ist die genannte Bedingung erfüllt, so muß, wenn $\varphi = 90^\circ$ ist, die mit dem Leistungsmesser gemessene Leistung $L = E \cdot J \cdot \cos \varphi = 0$ sein. Dann müßte zugleich auch das Drehmoment des Zählers, welches proportional $\sin \psi$ ist, Null werden, denn ψ müßte dann $= 0^\circ$ sein. Nun ist aber, vor allem bei Spannungs- und Frequenzänderung, $\psi \pm \varphi$ meist nicht genau $= 90^\circ$, sondern weicht um einen kleinen Winkel δ von 90° ab: $\psi \pm \varphi = 90^\circ \pm \delta$.

¹⁾ Ztschr. f. Instrumentenkunde 1907, S. 65.

²⁾ E.T.Z. 1909, S. 435, 466. Besonders in Betracht kommen die Fig. 9, 10 u. 11, S. 438.

³⁾ Vgl. Seite 49.

⁴⁾ Das obere Vorzeichen gilt für induktive, das untere für kapazitive Last. Ausführliche Theorie der 90°-Verschiebung siehe Schmiedel, Wirkungsweise und Entwurf, S. 15 ff.

Stellt man also den Zähler auf Stillstand ein, so zeigt der Leistungsmesser, da

$$\pm \varphi = 90^\circ - \psi + \delta \quad \text{und} \quad \psi = 0: \\ L = E \cdot J \cdot \cos(90^\circ + \delta).$$

Hier kommt nur das positive Vorzeichen in Frage, weil $\cos(+\varphi)$ und $\cos(-\varphi)$ beide positiv sind. Nun ist

$$\cos(90^\circ + \delta) = -\sin \delta,$$

also wird

$$L = -E \cdot J \cdot \sin \delta$$

und

$$\delta \sim \sin \delta = -\frac{L}{E \cdot J}.$$

Den Bogen δ kann man, da er meist sehr klein ist, $\sin \delta$ gleichsetzen. Will man δ in Winkelgraden erhalten, so muß man schreiben

$$\delta = -\frac{L}{E \cdot J} \cdot \frac{180}{\pi} \text{ Winkelgrade.}$$

δ wird negativ, wenn L positiv ist. Dies tritt ein, wenn der Fluß des Spannungskreises Φ_E der Spannung E um weniger als 90° nach-eilt. In dem Diagramm Fig. 92a ist dieser Fall dargestellt. Es ist dabei der Einfachheit wegen angenommen, daß der Fluß Φ_J des

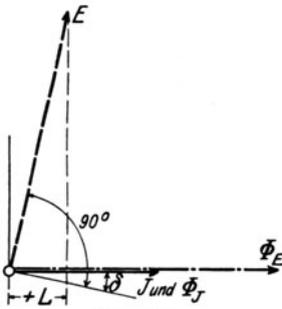


Fig. 92a.

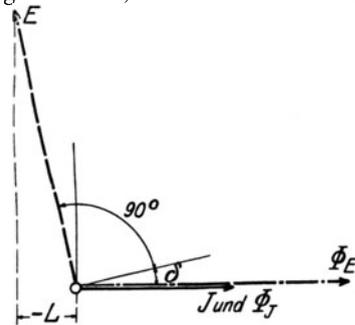


Fig. 92b.

Stillstandsmethode zur Bestimmung von δ .

Hauptstromkreises mit dem Hauptstrom J in Phase ist. Φ_E und Φ_J fallen zusammen, $\psi = 0$, der Zähler steht still. Der Leistungsmesser zeigt dagegen nicht auf Null, sondern zeigt die kleine positive Leistung

$$L = E \cdot J \cdot \cos(90^\circ - \delta)$$

an. δ wird dagegen positiv, wenn der Fluß des Spannungskreises um mehr als 90° der Spannung nach-eilt, wie in Fig. 92b dargestellt ist. Der Leistungsmesser zeigt dann die negative kleine Leistung

$$-L = E \cdot J \cdot \cos(90^\circ + \delta).$$

Es sei darauf hingewiesen, daß man auf die geschilderte Art und Weise nur dann den wahren Winkel δ mißt, wenn kein störendes vorwärtstreibendes Drehmoment, wie man es zur Kompensation der

Reibung benutzt, vorhanden ist. Wird dieses nicht beseitigt, so mißt man den „wirksamen“ Winkel δ . Dieser ist es aber meist, den man sucht, weil er für die Angaben des Zählers bei Phasenverschiebung im Netz ausschlaggebend ist.

Zu beachten ist bei der Messung, daß man zur Bestimmung von δ am besten so vorgeht, daß man erst den Zähler vorwärtslaufen läßt, dann die Phase der Spannung mit dem Phasenschieber so lange gegen die Phase des Stromes verschiebt, bis der Zähler gerade stillsteht und die Leistung am Leistungsmesser abliest, dann schiebt man im gleichen Sinne weiter, bis der Zähler deutlich rückwärts läuft und kehrt erst dann die Richtung um. Man schiebt die Phase der Spannung dann so lange nach rückwärts, bis der Zähler vom Rückwärtslauf gerade auf Stillstand kommt und liest wieder die Leistung am Leistungsmesser ab. Das Mittel aus beiden Ablesungen am Leistungsmesser benutzt man zur Berechnung von δ . Die Spannung E und der Strom J müssen natürlich für beide Messungen genau gleich bleiben. Zur Erhöhung der Genauigkeit der Messung entfernt man den Bremsmagnet.

Ferner muß jede Unsymmetrie im Hauptstromkreise, durch welche ein Leerlauf des Zählers bei unerregtem Spannungskreise auftritt, sorgfältig vermieden werden. Man muß dies vor jeder Messung nachprüfen¹⁾.

Eine erhebliche Verfeinerung der Messung erreicht man, wenn man die Triebsscheibe mit ihrer Achse an einem feinen Manganindraht aufhängt und ihre Nullage durch gegenseitiges Verschieben von Strom und Spannung in der beschriebenen Weise herbeiführt²⁾. Dadurch, daß man den Stillstand einmal bei Voreilung, das andere Mal bei Nacheilung der Spannung gegen den Hauptstrom bestimmt und das Mittel aus beiden Messungen nimmt, kann man den Einfluß eines etwaigen Triebes durch Unsymmetrie des Hauptstromflusses beseitigen.

b) Winkelmessungen mit Hilfsspule. Will man den wahren Winkel δ messen, so kann man sich auch der Messung mittels Hilfsspule bedienen. Man kann damit sowohl die Phasenverschiebung zwischen der Spannung E und dem motorisch wirksamen Fluß Φ_E , als auch die zwischen dem Hauptstrom J und dem motorisch wirksamen Fluß Φ_J bestimmen. Dazu ist jedoch eine genaue Konstruktion des Zählerdiagramms erforderlich. Da eine solche Messung nur Interesse für wissenschaftliche Untersuchungen hat, soll sie hier nur erwähnt werden³⁾.

¹⁾ Vgl. E. u. M., Wien 1912, Heft 7, S. 156. Schlußbemerkungen.

²⁾ Schering und Schmidt, Zeitschr. f. Instrumentenkunde 1920, S. 138.

³⁾ Vgl. z. B. Schmiedel, Wirkungsweise u. Entwurf, S. 37. — Möllinger, Wirkungsweise der Motorzähler, S. 186.

11. Felder.

a) **Gleichstrom.** Die Verteilung des Hauptstromfeldes kann man bei dynamometrischen Wattstundenzählern durch Rechnung finden, wenn man die darüber vorhandene Literatur benutzt¹⁾. Man muß dazu allerdings die Abmessungen und die Windungszahlen der Hauptstromspulen kennen.

Experimentell kann man das Feld entweder mit einer geeichten Wismutspirale, die man entweder mit einem hochempfindlichen Galvanometer in einem Stromkreis hintereinanderschaltet oder deren durch das Feld hervorgerufene Widerstandsänderung man in einer Brückenschaltung mißt, feststellen. Die Messung ist aber recht schwierig, weil die Widerstandsänderungen sehr klein sind und der Einfluß der Temperatur genau berücksichtigt werden muß.

Hat man dagegen ein hochempfindliches Gleichstromgalvanometer zur Verfügung, so kann man die ballistische Methode zur Feldmessung verwenden. Man bringt eine kleine Spule, deren Windungszahl und Abmessungen genau bekannt sind, an die Stelle, an der man das Feld messen will und schließt sie über einen passend bemessenen Vorschaltwiderstand an das Galvanometer an. Beim Ein- oder Ausschalten der Hauptstromspulen des Zählers entsteht dann an den Enden der Meßspule eine Spannung $e = \xi \cdot q \cdot n$, worin ξ die gesuchte Feldstärke, q den mittleren Windungsquerschnitt und n die Windungszahl der Meßspule bedeutet. Ist r der Gesamtwiderstand des Schließungskreises (Galvanometer + Vorschaltwiderstand + Meßspule), so ist die durch das Galvanometer fließende Elektrizitätsmenge

$$Q = \frac{\xi \cdot q \cdot n}{r} = C \cdot \alpha.$$

C ist die sogenannte „ballistische“ Galvanometerkonstante, die man durch Eichung mit einer Normalspule bestimmt hat²⁾, α der „ballistische“ Ausschlag des Galvanometers. Es wird also die Feldstärke

$$\xi = \frac{C \cdot \alpha \cdot r}{q \cdot n}.$$

So kann man an jeder Stelle die Feldstärke bestimmen. Will man einen größeren Galvanometerausschlag erhalten, so kommutiert man den Hauptstrom von $+J$ auf $-J$.

Will man das Ankerfeld auf die gleiche Art messen, so macht man die Meßspule so groß, daß sie den ganzen Anker eng umschließt und verfährt auf die gleiche Weise. Man mißt dabei das mittlere Ankerfeld.

b) **Permanente Magnete.** Um den Kraftfluß im Luftspalt eines permanenten Magnets (Bremsmagnets) zu messen, benutzt man eine

¹⁾ Schmiedel, l. c., S. 141 ff.

²⁾ Vgl. z. B. Gumlich, Leitfaden der magnetischen Messungen, Braunschweig, bei Vieweg, 1918, S. 57 ff.

flache Spule, deren Windungen den zu messenden Kraftfluß umfassen. Den die Spule durchsetzenden Kraftfluß bringt man zum Verschwinden, indem man den Magnet schnell über die Spule wegzieht oder umgekehrt die Spule durch den Luftspalt des Magnets. Die Enden der Spule sind an ein ballistisches Galvanometer angeschlossen. In gleicher Weise, wie unter a) beschrieben, kann man aus dem ballistischen Ausschlag den gesamten Kraftfluß bestimmen.

Zu Vergleichsmessungen zwecks Abgleichung der Bremsmagnete auf die richtige Stärke benutzt man meist eine durch einen kleinen Motor mit konstantem Drehmoment in Drehung versetzte Bremscheibe und läßt auf diese den Bremsmagnet einwirken. Die Feldstärke des Bremsmagnets ist dann proportional der Umdrehungszahl in der Zeiteinheit. Als Motor dient z. B. ein Amperestundenzähler ohne Bremsung¹⁾; die Umdrehungszahl bestimmt man entweder mechanisch oder elektrisch durch Messung der Spannung an den Enden einer Hilfswicklung, die man auf den Ankerkern des Motors gewickelt hat.

Man kann schließlich auch eine drehbar gelagerte flache Spule, die von einem konstanten Strom durchflossen wird, durch die zu vergleichenden Magnete beeinflussen. Ihr vermittels Zeiger und Skala gemessener Ausschlag ist ein Maß für die Feldstärke²⁾.

e) **Wechselstrom.** Wechselfelder kann man mit einer Meßspule messen, an deren Enden man die Spannung mit dem Wechselstromkompensator oder mit dem Elektrometer bestimmt. Auch mit einem stromverbrauchenden Instrument kann man die Messung vornehmen, wenn man die nötigen Korrekturen anbringt. Hat die Meßspule n Windungen und einen Windungsquerschnitt q , so ist die von der maximalen Induktion \mathfrak{B} in ihr hervorgerufene EMK

$$e = 4,44 \cdot \nu \cdot \mathfrak{B} \cdot q \cdot n \cdot 10^{-8} \text{ V.}$$

4,44 ist dabei $4 \cdot \frac{\pi}{2\sqrt{2}}$, wo $\frac{\pi}{2\sqrt{2}}$ der Formfaktor unter Annahme von sinusförmigem Verlauf der Spannung ist, ν die Frequenz des Wechselstromes. Daraus berechnet sich

$$\mathfrak{B} = \frac{e}{4,44 \cdot \nu \cdot q \cdot n} \cdot 10^8 \text{ Gauß.}$$

12. Strömung in der Scheibe.

Die Strömung in der Scheibe selbst, die bei ihrer Bewegung in Wechsel- oder Gleichfeldern oder durch Induktion ruhender Wechselfelder hervorgerufen wird, ist bisher an praktisch ausgeführten Zählern noch nicht gemessen worden. Man würde dazu so empfindliche Apparate brauchen, daß man nur unter Beachtung außerordentlicher

¹⁾ Vgl. oben S. 110.

²⁾ Apparate von Siemens & Halske, Hartmann & Braun.

Vorsichtsmaßregeln brauchbare Resultate erlangen kann. Den Verlauf der Strömung hat Bäuml¹⁾ dadurch bestimmt, daß er unter Benutzung der Analogie zwischen elektrischen und magnetischen Strömungen die Wechselfelder durch stromdurchflossene Leiter ersetzt und das entstehende Kraftlinienbild durch auf ein Kartonblatt gestreute Eisenfeilspäne festlegt.

13. Bürsten-Übergangswiderstand bei Gleichstrom-Ampere-stundenzählern.

Bei Gleichstrom-Ampere-stundenzählern führt der Bürsten-Übergangswiderstand oft zu großen Beanstandungen. Zumal nach längerem Betrieb wächst er durch Oxydation des Materials des Kollektors und der Bürsten und durch Verschmutzung infolge mechanischen Verschleißes zu beträchtlichen Werten an. Es ist also immer von großem Interesse, ihn zu kennen. Man kann ihn bestimmen durch Messung des gesamten Widerstandes zwischen den Abzweigungen vom Nebenschlußwiderstand (Shunt) und des reinen Ankerwiderstandes. Die Differenz beider ergibt den Bürsten-Übergangswiderstand. Bei der Messung des reinen Ankerwiderstands muß man dabei besondere Kontakte an die Kollektorlamellen anlegen, was immer eine

mißliche Sache ist, da man leicht an die Bürsten anstößt und den Berührungszustand ändert.

Die im folgenden beschriebene Methode ermöglicht es, die Messung nur an den Enden des von dem Nebenschlußwiderstand gelösten Ankerstromkreises vorzunehmen.

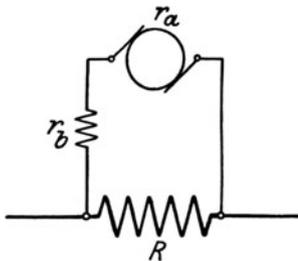


Fig. 93. Bürstenübergangswiderstand, Ersatzschaltung.

Der reine Ankerwiderstand r_a und der Bürsten-Übergangswiderstand r_b können wie zwei hintereinandergeschaltete Widerstände entsprechend dem Schema der Fig. 93 betrachtet werden.

Nun bringt man den Anker in eine solche Stellung, daß die Bürsten wie in Fig. 94 a gezeichnet, je eine Lamelle berühren. Dabei mißt man den Gesamtwiderstand $r_1 = r_a + r_b$. In dieser Lage ist $r_a = 2r$, wenn jeder Zweig der Ankerwicklung den Widerstand r hat. Berührt nun eine Bürste zwei Lamellen, entsprechend Fig. 94 b, so tritt an Stelle von r_a der Wert $\frac{3}{4} r_a = 1,5r$ und es wird $r_2 = \frac{3}{4} r_a + r_b$. Aus beiden Messungen erhält man also den reinen Ankerwiderstand

$$r_a = 4(r_1 - r_2),$$

und den Bürstenübergangswiderstand

$$r_b = 4r_2 - 3r_1.$$

¹⁾ Vgl. v. Krukowski, l. c., S. 18.

Für offene und geschlossene Schaltung eines dreiteiligen Ankers sind die Werte die gleichen, wie sich aus Fig. 95 a und b ergibt.

Um die Größenordnung des Bürsten-Übergangswiderstandes zu verdeutlichen, sei im folgenden ein Zahlenbeispiel angeführt, das für



Fig. 94 a.

Offene Ankerschaltung
Bürsten auf je
einer Lamelle.



Fig. 94 b.

Eine Bürste auf
zwei Lamellen.



Fig. 95 a.

Geschlossene Ankerschaltung
Bürsten auf je
einer Lamelle.

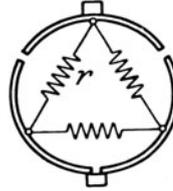


Fig. 95 b.

Eine Bürste auf
zwei Lamellen.

einen Flachankerzähler nach Dauerschaltung von einigen Monaten ausgeführt wurde. Es wurde bei drei verschiedenen Strömen i gemessen.

i	r_1	r_2	r_a	r_b
0,0151 A.	17,6 Ω	13,44 Ω	16,64 Ω	0,96 Ω ,
0,0082 A.	17,57 Ω	13,43 Ω	16,56 Ω	1,01 Ω ,
0,00439 A.	17,55 Ω	13,42 Ω	16,52 Ω	1,03 Ω .

Als Mittelwert ergibt sich demnach etwa 1 Ω Bürsten-Übergangswiderstand.

14. Gegenelektromotorische Kraft bei Gleichstromzählern.

Die Klemmenspannung an den Enden des Ankerkreises einschließlich des Vorschaltwiderstandes ist

$$E_K = i(r_a + r_v) + E,$$

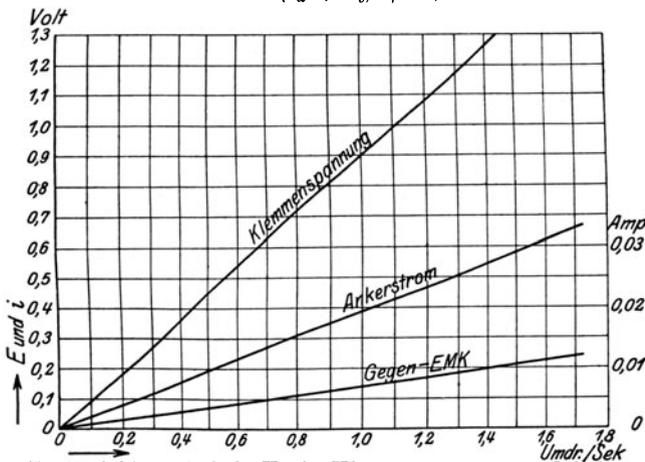


Fig. 96. Gegenelektromotorische Kraft, Klemmenspannung und Ankerstrom.

r_a ist dabei der reine Ankerwiderstand, r_v der Vorschaltwiderstand, i der Ankerstrom, E die Gegen-EMK des Ankers.

Bei Wattstundenzählern ist der Vorschaltwiderstand r_v meist so groß, daß die Gegen-EMK des Ankers zu vernachlässigen ist. Bei Amperestundenzählern mit Bremsung ist sie jedoch ziemlich beträchtlich, da sie aber proportional der Geschwindigkeit wächst, stört sie die Angaben nicht. Immerhin hat man meist Interesse daran, ihren Wert zu kennen. Man mißt einmal den Ankerstrom und die Klemmenspannung bei Stillstand und erhält

$$E_{K_1} = i(r_a + r_v).$$

Das andere Mal mißt man beim gleichen Strom die Klemmenspannung bei einer bestimmten Umdrehungszahl in der Sekunde und erhält

$$E_{K_2} = i(r_a + r_v) + E.$$

Es ist also

$$E = E_{K_2} - E_{K_1}.$$

Für einen Amperestundenzähler sind die gemessenen Werte in Fig. 96 zahlenmäßig aufgetragen.

Es sei bemerkt, daß man den Ankerwiderstand für die Stellung der Bürsten nehmen muß, wo jede Bürste nur eine Kollektorlamelle berührt. Denn bei der Bewegung des Ankers berühren die Bürsten nur kurzzeitig zwei Lamellen, so daß diese Stellung vernachlässigt werden kann.

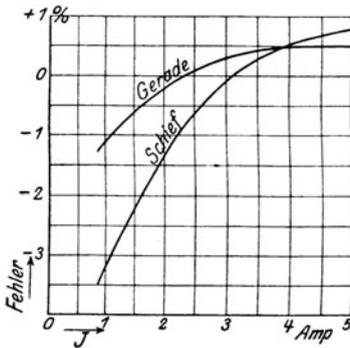


Fig. 97. Schiefe Aufhängung.

15. Schiefe Aufhängung.

Schiefe Aufhängung der Zähler kann die Angaben erheblich beeinflussen, auch wenn sie nur einige Winkelgrade beträgt. Bei Zählern mit schwerem Anker, insbesondere bei Amperestundenzählern, ist die Reibung im Oberlager, das fast immer als Halslager ausgebildet wird, von dem wachsenden seitlichen Druck abhängig. Man bringt deshalb bei den Amperestundenzählern zweckmäßig Pendellote an, um bei der Montage auf die Notwendigkeit richtiger Aufhängung hinzuweisen. In Fig. 97 ist der Einfluß einer um 5° schiefen Aufhängung, die man noch mit dem Auge feststellen kann, auf die Angaben eines Amperestundenzählers gezeigt.

A n h a n g.

Prüfungen, die zur vollständigen Beurteilung eines Elektrizitätszählers erforderlich sind.

Zur vollständigen Beurteilung der Eigenschaften eines Wechselstromzählers sind folgende Prüfungen erforderlich:

1. a) Annähernde Feststellung, ob die Angabe auf dem Zähler-schild: 1 Kilowattstunde = a Umdrehungen, mit den wirklichen Verhältnissen übereinstimmt.
b) Annähernde Feststellung, ob die Übersetzung vom Anker auf das Zählwerk richtig ist.
c) Messung der Isolation der Spulen gegen Gehäuse und gegeneinander.
2. Einstellung des Zählers nach besonderer Eichvorschrift, wenn es sich um Untersuchung eines neuen Apparates handelt.
3. Messung des Anlaufstromes bei Nennspannung. Der Anlaufstrom soll höchstens 1% des Nennstroms sein (vgl. I, 3). Dies ist meist nur mit hochempfindlichen Strommessern möglich (vgl. III).
4. a) Feststellung des Vorlaufs bei einer die Nennspannung um 10% übersteigenden Spannung. Der Vorlauf soll nicht größer sein, als $\frac{1}{500}$ der Nennleistung des Zählers entspricht (vgl. I, 3).
b) Feststellung, ob bei abgeschaltetem Spannungskreis, aber eingeschaltetem Hauptstromkreis ein Vorlauf oder Rücklauf stattfindet.
5. Fehlermessungen (vgl. I, 3).
 - a) Fehler in Abhängigkeit vom Hauptstrom zwischen 5% und 150% des Nennstroms. Die Nennwerte der Spannung und Frequenz sind dabei konstant zu halten, der Leistungsfaktor ist 1.
 - b) Fehler in Abhängigkeit vom Leistungsfaktor, einmal beim Nennstrom, das andere Mal bei der Hälfte des Nennstroms. Dabei Nennspannung und Nennfrequenz konstant.
 - c) Fehler bei 10% über und 10% unter der Nennspannung liegender Spannung, wobei Nennstrom und Nennfrequenz konstant, der Leistungsfaktor 1 und 0,5 ist.

- d) Fehler bei 10⁰/₀ über und 10⁰/₀ unter der Nennfrequenz liegenden Frequenz, wobei Nennstrom und Nennspannung konstant, der Leistungsfaktor 1 und 0,5 ist.
 - e) Fehler bei einer um etwa 20⁰ höheren und 20⁰ niedrigeren Temperatur als die Zimmertemperatur (18⁰ C).
 - f) Bei Mehrphasenzählern muß man noch den Einfluß einseitiger Belastung und ungleicher verketteter oder Sternspannungen prüfen. Ebenso ist der Einfluß des Drehsinns festzustellen.
6. Feststellung des Eigenverbrauchs im Hauptstrom- und Spannungskreis, des Spannungsabfalles am Hauptstromkreis und des Stromes im Spannungskreis (vgl. VII, 9).
 7. Feststellung des Drehmoments (vgl. VII, 1).
 8. Feststellung der Temperaturerhöhung bei einstündiger Überlastung mit einem 50⁰/₀ den Nennstrom übersteigenden Strom (evtl. auch bei einige Minuten lang den Nennstrom um 100⁰/₀ übersteigenden Strom) (vgl. VII, 8)¹⁾.
 9. Feststellung des Einflusses einer dauernden Belastung über 1 bis 2 Monate mit der Vollast oder einer wechselnden Last auf die Angaben.
 10. Feststellung des Einflusses eines oder mehrerer Kurzschlüsse mit einer Sicherung, die für den Nennstrom und die Nennspannung bemessen ist, auf die Angaben des Zählers.
 11. Feststellung der Reibung vor und nach der Dauereinschaltung (vgl. VII, 2).

Will man die elektrischen und magnetischen Eigenschaften gesondert feststellen, so macht man noch folgende Prüfungen:

12. Abweichung von der 90⁰-Verschiebung (vgl. VII, 10).
 - a) Winkel δ in Abhängigkeit vom Hauptstrom.
 - b) " " " " von der Spannung.
 - c) " " " " " Frequenz.
13. Bremsung durch die magnetischen Flüsse des Hauptstrom- und Spannungskreises (vgl. VII, 4).

Der Einfluß von stoßweisen Belastungen und der Kurvenform (vgl. VII, 5 und 6) ist meist so klein, daß man von der Feststellung desselben absehen kann.

Bei Gleichstromzählern macht man entsprechende Messungen und fügt gegebenenfalls noch die unter VII, 11, 13, 14 und 15 beschriebenen hinzu.

¹⁾ Vgl. E. T. Z., 1920, S. 537.

Elektrotechnische Meßkunde. Von Dr.-Ing. **P. B. Arthur Linker.**
Dritte, völlig umgearbeitete und erweiterte Auflage. Mit 408 Textabbildungen.
Gebunden Preis M. 54,—.

Elektrotechnische Meßinstrumente. Ein Leitfad. Von Oberingenieur **Konrad Gruhn** in Frankfurt a. M. Mit 321 Textabbildungen.
Preis M. 17,—; gebunden M. 23,—.

Messungen an elektrischen Maschinen. Apparate, Instrumente, Methoden, Schaltungen. Von **Rud. Krause.** Vierte, gänzlich umgearbeitete Auflage von Ingenieur **Georg Jahn.** Mit 256 Textabbildungen und einer Tafel.
Gebunden Preis M. 28,—.

Meßgeräte und Schaltungen für Wechselstromleistungsmessungen. Von Oberingenieur **Werner Skirl.** Mit 215 Abbildungen.
Gebunden Preis M. 26,—.

Ein neues Benutzungsstunden-Zählverfahren. Eine neue Methode zur angenäherten Bestimmung der von einem Abnehmer in Anspruch genommenen Werkskilowatt und darauf aufgebaute Tarife. Von Dr.-Ing. **Karl Laudien,** Oberlehrer der höheren Maschinenbauschule Breslau. Mit 15 Textabbildungen.
Preis M. 2,40.

Wirkungsweise der Motorzähler und Meßwandler. Für Betriebsleiter von Elektrizitätswerken, Zählertechniker und Studierende. Von Direktor Dr.-Ing. **I. A. Möllinger.** Mit 87 Textfiguren.
Gebunden Preis M. 5,80.

Isolationsmessungen und Fehlerbestimmungen an elektrischen Starkstromleitungen. Von **F. Ch. Raphael.** Autorisierte deutsche Bearbeitung von Dr. **Richard Apt.** Zweite, verbesserte Auflage. Mit 122 Textabbildungen.
Gebunden Preis M. 6,—.

Lehrbuch der elektrischen Festigkeit der Isoliermaterialien. Von Professor Dr.-Ing. **A. Schwaiger** in Karlsruhe. Mit 94 Textabbildungen.
Preis M. 9,—; gebunden M. 10,60.

Die Materialprüfung der Isolierstoffe der Elektrotechnik. Herausgegeben von Oberingenieur **Walter Demuth,** Prüffeldvorstand der Gesellschaft für drahtlose Telegraphie in Berlin, unter Mitarbeit von **Kurt Bergk** und **Hermann Franz,** Ingenieuren derselben Gesellschaft. Mit 76 Textabbildungen.
Preis M. 12,—; gebunden M. 14,40.

Hilfsbuch für die Elektrotechnik. Unter Mitwirkung namhafter Fachgenossen bearbeitet und herausgegeben von Dr. **K. Strecker**, Berlin. Neunte, umgearbeitete Auflage. Mit 552 Textabbildungen. Gebunden Preis M. 70,—.*

Kurzes Lehrbuch der Elektrotechnik. Von Dr. **Adolf Thoma**len, a. o. Professor an der Technischen Hochschule Karlsruhe. Achte, verbesserte Auflage. Mit 499 Textabbildungen. Gebunden Preis M. 30,—.*

Kurzer Leitfaden der Elektrotechnik für Unterricht und Praxis in allgemeinverständlicher Darstellung. Von Ingenieur **Rudolf Krause**. Vierte, verbesserte Auflage, herausgegeben von Professor **H. Viweg**er. Mit 375 Textfiguren. Gebunden Preis M. 20,—.*

Elektrische Starkstromanlagen, Maschinen, Apparate, Schaltungen, Betrieb. Kurzgefaßtes Hilfsbuch für Ingenieure und Techniker sowie zum Gebrauch an technischen Lehranstalten. Von Dipl.-Ing. **Emil Kosack**, Studienrat an den Staatl. Vereinigten Maschinenbauschulen zu Magdeburg. Fünfte, durchgesehene Auflage. Mit 294 Textabbildungen. Gebunden Preis M. 32,—

Die Berechnung von Gleich- und Wechselstromsystemen. Neue Gesetze über ihre Leistungsaufnahme. Von Dr.-Ing. **Fr. Natalis**. Mit 19 Textfiguren. Preis M. 6,—.*

Die asynchronen Wechselfeldmotoren. Kommutator- und Induktionsmotoren von Professor Dr. **Gustav Benischke**. Mit 89 Abbildungen im Text. Preis M. 16,—.*

Zur Vereinheitlichung von Installations-Material für elektrische Anlagen. Von **W. Klement** und **C. Paulus**. Erster Teil: Haus- und Wohnungsanschlüsse. Mit 450 Textfiguren. Preis M. 8,—; gebunden M. 10,—.*

Telephon- und Signal-Anlagen. Ein praktischer Leitfaden für die Errichtung elektrischer Fernmelde- (Schwachstrom-) Anlagen. Von Oberingenieur **Carl Beckmann**. Zweite, verbesserte Auflage. Mit 426 Abbildungen und Schaltungen und einer Zusammenstellung der gesetzlichen Bestimmungen für Fernmeldeanlagen. Gebunden Preis M. 8,60.*

Die Nebenstellentechnik. Von **Hans B. Willers**, Oberingenieur und Prokurist der Akt.-Ges. Mix & Genest, Berlin-Schöneberg. Mit 137 Textabbildungen. Gebunden Preis M. 26,—.*

* Hierzu Teuerungszuschläge

Berichtigung:

Seite 125, Zeile 11—14. Die Worte „Die Feldstärke des Bremsmagnets z. B. ein Amperestundenzähler ohne Bremsung“ werden ersetzt durch:

„Die Umdrehungszahl in der Zeiteinheit ist dann ein Maß für die Feldstärke des Bremsmagnets. Verwendet man als Antriebsmotor z. B. einen Amperestundenzähler ohne Bremsung, so ist die Feldstärke des geprüften Bremsmagnets proportional der Quadratwurzel aus dem reziproken Wert der Umdrehungen in der Zeiteinheit.“