

Die Prüfung der Elektrizitäts-Zähler

Meßeinrichtungen, Meßmethoden
und Schaltungen

Von

Dr.-Ing. Karl Schmiedel
Nürnberg

Dritte
völlig neubearbeitete Auflage

Mit 160 Abbildungen im Text



Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH

ISBN 978-3-662-01876-7 ISBN 978-3-662-02171-2 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-662-02171-2

Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung
in fremde Sprachen, vorbehalten.
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1940
Ursprünglich erschienen bei Julius Springer 1940
Softcover reprint of the hardcover 3rd edition 1940

Vorwort zur dritten Auflage.

Da die zweite Auflage 1933 vergriffen war, sollte nach dem Wunsch des Verlages die neue Auflage im Jahre 1934 erscheinen. Leider war es mir nicht möglich, diesen Zeitpunkt einzuhalten, so daß eine größere Zeitspanne bis zur Neuauflage verstrichen ist. Ich hoffe aber, daß dies insofern der Neuauflage zugute gekommen ist, als dadurch die vielen gerade in den letzten Jahren bekanntgewordenen Neuerungen berücksichtigt werden konnten.

Die dritte Auflage ist gegenüber der zweiten in wesentlichen Teilen vollkommen umgearbeitet worden, wenn auch die Anlage des Buches die gleiche blieb.

Im Kapitel I wurden für die Meßgenauigkeit mehrere ausführliche Beispiele gegeben, im Kapitel II die neuesten Regeleinrichtungen beschrieben, während die veralteten fortgelassen wurden, im Kapitel III wurden die kurzen Beschreibungen der Meßgeräte durch die in den letzten Jahren hinzugekommenen Neuerungen ergänzt, im Kapitel V die Gleichlastmethode für Einphasenwechselstrom und Drehstrom neu eingefügt, im Kapitel VII wurden die sämtlichen Schaltbilder neu entworfen und ergänzt, im Kapitel VIII verschiedene neue Prüfeinrichtungen für Strom- und Spannungswandler neu aufgenommen, im Kapitel IX einige neue Verfahren und Geräte zur Messung des Reibungsmoments, zur Prüfung der Durchschlag- und Stoßspannungsfestigkeit, der thermischen und dynamischen Strombeanspruchung beschrieben.

Dem Wunsche nach Beschreibung von ausgeführten Prüfständen konnte auch bei der Bearbeitung der neuen Auflage nicht entsprochen werden, weil Prüfstände im wesentlichen die räumliche Zusammenfassung der einzelnen Regeleinrichtungen und Meßgeräte darstellen, um dem Prüfenden die Arbeit zu erleichtern, während im Rahmen des Buches nur die grundsätzlichen Prüfverfahren behandelt werden sollten. Ebenso sind die Fehlschaltungen der Zähler¹ nicht behandelt worden, weil diese zwar für die richtige Messung der Arbeit von Wichtigkeit sind, nicht aber für die Prüfung der Elektrizitätszähler.

Bisher war es Sprachgebrauch, mit dem Wort „Prüfung“ die Feststellung der Werte zu bezeichnen, die der zu prüfende Zähler im Zeitpunkt der Prüfung hat, mit „Eichung“ dagegen die Einstellung, Einregelung oder Abgleichung des Zählers auf die gewollten oder verlangten, im allgemeinen auf die geringstmöglichen Fehlerwerte. Durch Verfügung des Reichswirtschaftsministeriums² wird das Wort „Eichen“

¹ Vgl. W. BEETZ: Arch. techn. Messen 1937 J 752-6. — KRUKOWSKI, W. v.: Grundzüge der Zählertechnik. S. 441 u. 508 (H. NÜTZELBERGER). Berlin: Julius Springer 1930.

² Elektrizitätswirtsch. 1937, H. 20 S. 471.

für die eichtechnische Prüfung und Stempelung des Gegenstandes durch die zuständige Eichbehörde vorbehalten. Infolgedessen habe ich an allen Stellen, wo früher das Wort „Eichen“ stand, dieses durch andere Ausdrücke ersetzt.

Ich möchte an dieser Stelle allen den Herren, die Anregungen und Verbesserungsvorschläge gemacht haben, meinen besten Dank aussprechen. Auch den Firmen, die mir bereitwillig Bildmaterial zur Verfügung stellten, danke ich für ihre Mithilfe.

Nürnberg, im Dezember 1939.

KARL SCHMIEDEL.

Aus dem Vorwort zur ersten Auflage (1920).

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 Meßeinstrumente, wo nur eine Aufzählung möglich war. Es gibt jedoch über den Gegenstand gute Sammelwerke, in denen sich jedermann die gewünschten Auskünfte holen kann.

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.

Aus dem Vorwort zur zweiten Auflage (1924).

Bei der Bearbeitung der zweiten Auflage ist den Wünschen aus den Kreisen der Leser soweit wie möglich Rechnung getragen worden. Besonders erwähnt sei die Erweiterung des Abschnitts über die amtlichen Fehlergrenzen, die Hinzufügung des neuen Kapitels über die Prüfung der Strom- und Spannungswandler, die Umarbeitung der Eichschaltungen für Blindverbrauchszähler. Die neusten Prüfmethode und die neusten Apparate, die z. T. noch nicht durch die Literatur bekanntgeworden sind, sind aufgenommen worden. Dem Wunsche auf Hinzufügung vollständiger Schaltchemata für Eichstationen konnte nicht entsprochen werden, da das Buch sonst zu umfangreich geworden wäre. Die Abschnitte über Drehmoment- und Reibungsmessungen wurden gekürzt.

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
I. Allgemeines	1
1. Meßgenauigkeit	1
2. Der Korrektionsfaktor, der Fehler und die Korrektion	5
3. Amtlich zugelassene Fehlergrenzen.	6
a) Verkehrsfehlergrenzen	6
b) Beglaubigungsfehlergrenzen	7
Gleichstromzähler	7
Wechselstromzähler	8
Wechselstromzähler in Verbindung mit Meßwandlern	8
Blindverbrauchzähler	9
Blindverbrauchzähler in Verbindung mit Meßwandlern	9
Meßwandler	9
c) Fehlergrenzen anderer Länder	11
Einphasen-Wechselstromzähler	11
Drehstromzähler.	12
Meßwandler	12
4. Bestimmung des Fehlers	12
a) Zählwerksablesung.	12
b) Zählen der Ankerumdrehungen oder Oszillationen	13
c) SynchronEinstellung	15
d) Stroboskopische Prüfung.	15
e) Koinzidenzen bei Pendelzählern.	16
5. Die Fehlerkurve des Zählers und die mittleren Angaben für die Verrechnung mit dem Abnehmer.	16
II. Einrichtungen zur Erzeugung und Regelung der zugeführten Leistung	18
1. Sparschaltung	18
2. Stromquellen	18
a) Akkumulatorenbatterien	19
b) Gleichstromgeneratoren	20
c) Wechselstromgeneratoren. Ein Generator	21
d) Röhrengeregelte Generatoren	22
e) Mechanische Regler zur Konstanthaltung der Spannung	22
f) Doppelgeneratoren.	22
g) Periodenumformer	24
3. Vorrichtungen zur Regelung des Hauptstromes, der Spannung, der Frequenz und der Phasenverschiebung	25
a) Regelung des Hauptstromes	25
Regelwiderstände	25
Regeltransformatoren	27
Prüftransformatoren	28
b) Regelung der Spannung	28
c) Belastungs-Widerstände und -Transformatoren	29
Belastungswiderstände	29
Belastungstransformatoren	30

	Seite
d) Regelung der Frequenz	31
Polumschaltbarer Generator	31
Gebremster Asynchronmotor	31
e) Regelung der Phasenverschiebung.	32
Doppelgeneratoren.	32
Drosselspulen	32
Laufender Einphasenmotor	33
Brückenschaltung	34
Ruhender Drehstrommotor	34
Zyklische Vertauschung für Grobregelung	35
4. Ruhende Vorrichtungen zu Konstanthaltung des Stromes oder der Spannung bei Dauerschaltungen	36
a) Eisenwiderstand	36
b) Stabilisator	36
c) Spannungsgleichhalter für Wechselstrom	36
III. Meßgeräte und Hilfseinrichtungen zur Messung des wirklichen Verbrauchs	37
1. Kompensationsapparate.	37
a) Kompensationsapparat für Gleichstrom	37
b) Kompensationsapparat für Wechselstrom	41
2. Zeigermeßgeräte	42
a) Drehspul-Meßgeräte für Gleichstrom.	42
b) Dreheisen-Meßgeräte für Gleich- und Wechselstrom.	42
c) Thermische Meßgeräte (Hitzdraht-Meßgeräte) für Gleich- und Wechselstrom	43
d) Gleichrichter-Meßgeräte für Wechselstrom	43
e) Elektrostatische Spannungsmesser für Gleich- und Wechselstrom	44
f) Thermoumformer zur Messung kleiner Wechselströme	44
g) Elektrodynamische Spannungs- und Strommesser.	44
h) Elektrodynamische Leistungsmesser	45
i) Elektrodynamische Blindleistungsmesser	46
k) Eisengeschlossene elektrodynamische Leistungsmesser	47
l) Phasemesser	47
m) Zungenfrequenzmesser	48
n) Zeigerfrequenzmesser mit einem Zeiger	48
o) Zeigerfrequenzmesser mit zwei sich kreuzenden Zeigern	48
3. Verwendung der Vorrichtungen zur Erweiterung der Meßbereiche zusammen mit den Meßgeräten	49
a) Vorwiderstände	49
b) Nebenwiderstände	51
c) Strom- und Spannungswandler	52
4. Hilfsvorrichtungen zur Bestimmung der Stromrichtung und der Phase	54
a) Drehspulmeßgerät	54
b) Polreagenzpapier	54
c) Veränderliche Selbstinduktion zur Bestimmung der Phase bei Wechselstrom	54
d) Polprüfer oder Vektormesser für Wechselstrom.	56
e) Prüfschaltungen für den richtigen Anschluß von Spannungs- und Stromwandlern	57
f) Drehfeldzeiger	58

	Seite
5. Hilfsschalter zum Sparen von Meßgeräten	60
a) Spannungsmesser-Ersatzschalter	60
b) Leistungsmesser-Umschalter für Messung von Drehstromleistun- gen nach der Zweileistungsmessermethode	61
IV. Einrichtungen zur Bestimmung der Angaben	61
1. Pendeluhr und Doppelzeitschreiber oder Chronograph	62
2. Stoppuhr	62
3. Kontaktpendel nach KARTAK	64
4. Schwingungskreis und Synchronuhr	64
5. Selbsttätige Zählvorrichtungen	65
a) Vorrichtungen am Zähler	65
1. Mechanischer Kontakt	65
2. Funkenübergang zwischen Anker und Elektrode	66
3. Optische Übertragung	66
b) Vorrichtungen zum Abzählen der Umdrehungen und zur Be- tätigung der Uhr	67
1. Doppelzeitschreiber	67
2. Mechanische Zählvorrichtungen	67
3. Mechanische Zählvorrichtung in Verbindung mit Gleichlast- Prüfzähler	67
V. Prüf- oder Eichzähler	68
a) Prüfzähler mit mehreren Meßbereichen	68
b) Gleichlast-Prüfzähler für Wechselstromprüfungen	70
c) Gleichlast-Prüfverfahren für die Prüfung von Drehstromzählern	73
d) Gleichlast-Prüfverfahren für die Prüfung von Gleichstromzählern	74
VI. Prüfschaltungen	74
1. Einphasenwechselstrom	77
a) Schaltung bei getrenntem Strom- und Spannungskreis	77
Niederspannung und Niederstrom	77
Hochspannung und Hochstrom	77
b) Schaltung bei direkter Belastung	79
Niederspannung und Niederstrom	79
Hochspannung und Hochstrom	79
2. Vierleiter-Zweiphasenwechselstrom	80
a) Schaltung bei direkter Belastung	80
b) Schaltung bei getrennten Strom- und Spannungskreisen	80
3. Dreileiter-Zweiphasenwechselstrom	81
4. Vierleiter-Drehstrom, dreimeßende Systeme	81
a) Schaltung bei getrennten Strom- und Spannungskreisen	81
Niederspannung und Niederstrom	81
Hochspannung und Hochstrom	83
b) Schaltung bei direkter Belastung	83
c) Abschaltung einer Phase	84
5. Dreileiter-Drehstrom, zwei messende Systeme	85
a) Allgemeines	85
b) Schaltung bei getrennten Strom- und Spannungskreisen	87
Niederspannung und Niederstrom	87
Hochspannung und Hochstrom	88
Schaltung mit nur einem Leistungsmesser	88

	Seite
6. Vierleiter-Drehstrom, zwei messende Systeme	90
a) Allgemeines	90
b) Schaltung bei getrennten Strom- und Spannungskreisen . . .	91
Niederspannung und Niederstrom	91
Hochspannung und Hochstrom	93
c) Schaltung bei direkter Belastung	93
Niederspannung und Niederstrom	93
Hochspannung und Hochstrom	94
7. Vier- oder Dreileiter-Drehstrom, ein messendes System (sog. Drehstromzähler für gleichbelastete Phasen).	94
a) Allgemeines	94
b) Eine Hauptstromspule in einer Phasenleitung, eine Spannungsspule zwischen dieser Leitung und dem Nulleiter.	94
c) Eine Hauptstromspule in einer Phasenleitung, eine Spannungsspule zwischen dieser Leitung und einer anderen Phasenleitung	95
d) Zwei Hauptstromspulen, jede in einer Phasenleitung, eine Spannungsspule zwischen diesen beiden Leitungen	97
8. Blindverbrauchzähler	98
a) Allgemeines	98
b) Vierleiter-Drehstrom, drei messende Systeme mit 180°-Verschiebung	100
c) Vierleiter-Drehstrom, drei messende Systeme mit 90°-Verschiebung	101
d) Vierleiter-Drehstrom, drei messende Systeme mit 60°-Verschiebung	103
e) Dreileiter-Drehstrom, zwei messende Systeme mit 180°-Verschiebung	104
f) Dreileiter-Drehstrom, zwei messende Systeme mit 90°-Verschiebung	106
g) Dreileiter-Drehstrom, zwei messende Systeme mit 60°-Verschiebung	107
9. Zweileiter-Gleichstrom	108
10. Dreileiter-Gleichstrom	108
a) Zwei Hauptstromspulen, jede in einem Außenleiter, Spannungskreis zwischen beiden Außenleitern	108
aa) Allgemeines	109
ab) Schaltung bei getrennten Strom- und Spannungskreisen.	110
ac) Schaltung bei direkter Belastung in der Installation	110
b) Eine Hauptstromspule in einem Außenleiter, Spannungskreis zwischen den beiden Außenleitern.	110
c) Eine Hauptstromspule in einem Außenleiter, Spannungskreis zwischen diesem Leiter und dem Nulleiter.	111
VII. Prüfklemmen	112
1. Prüfklemme für Zweileiter-Gleich- oder Wechselstrom	112
2. Prüfklemme für Dreileiter-Drehstrom.	114
VIII. Prüfung der Strom- und Spannungswandler	115
a) Absolutes Verfahren von SCHERING und ALBERTI	115
Stromwandler	115
Spannungswandler.	117

	Seite
b) Gegenschaltungsverfahren von W. HOHLE	119
Stromwandler	119
Spannungswandler.	120
c) Gegenschaltungsverfahren von O. ZWIERINA	121
Stromwandler	121
Spannungswandler.	122
d) Gegenschaltungsverfahren mit Hilfswicklung auf dem Normalwandler	123
IX. Einrichtungen und Schaltungen für die Messung besonderer Eigenschaften und Vorgänge	123
1. Drehmoment	124
a) Kräftemesser mit Torsionsfeder.	124
b) Pendelkräftemesser	125
c) Kräftemesser nach dem Kräfteparallelogramm	126
d) Kräftemesser nach dem Waageprinzip	128
e) Selbsttätige Vorrichtung zur Aufzeichnung des Drehmoments über den ganzen Umfang, insbesondere für Amperestundenzähler	129
f) Bestimmung des Drehmoments durch Rechnung aus der elektrisch zugeführten Leistung	131
2. Reibung	131
a) Torsionswaage.	132
b) Torsionsdynamometer	134
c) Auslaufmessungen	135
Graphische Auswertung	137
Auswertung durch Differenzenbildung	138
Vereinfachte Auslaufmethode	138
Rechnerische Auswertung	139
Bestimmung des Trägheitsmoments des Ankers	139
Trennung der Verluste	141
d) Methode des geeichten Motors	141
3. Reibungskompensation	142
a) Gleichstrom-Wattstundenzähler	142
b) Wechselstrom-Induktionszähler und Gleichstrom-Amperestundenzähler	143
4. Anlauf und Leerlauf	144
5. Eigenbremsung	145
a) Auslaufmethode	145
b) Methode des geeichten Motors	146
c) Einlaufmethode	146
d) Indirekte Bestimmung der Eigenbremsung	147
6. Stoßweise Belastung	148
7. Kurvenform	151
8. Äußere Felder	151
a) Absichtliche Fälschung der Angaben	151
b) Unabsichtliche Einwirkung stromführender Leitungen	151
9. Temperatur	153
10. Kurzschlußsicherheit	155
a) Thermische Kurzschlußsicherheit	155
b) Dynamische Kurzschlußsicherheit	155
11. Isolation	156
a) Durchschlagprüfung	156
b) Stoßspannungsprüfung	157

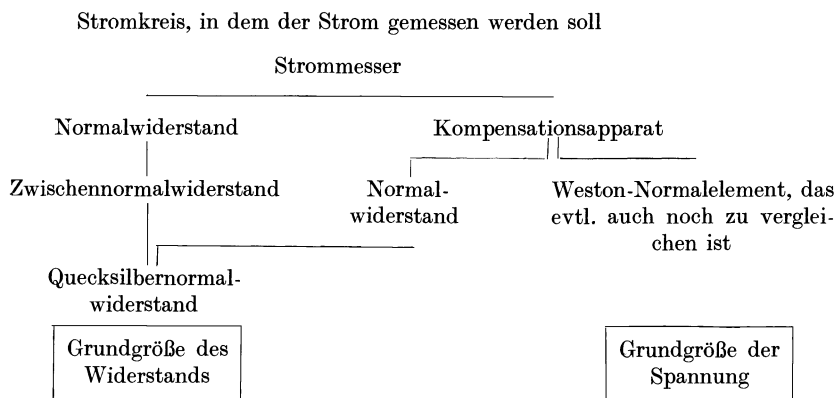
	Seite
12. Eigenverbrauch der Wicklungen	158
a) Gleichstrom	158
b) Wechselstrom	158
Elektrodynamischer Leistungsmesser	158
Elektrometer	160
Dreivoltmetermethode	160
Dreiamperemetermethode	161
Brückenmethoden	162
13. Kurzschlußwindungen	163
a) Kurzschlußprüfer nach A. TÄUBER-GRETTLER	163
b) Schlußhorcher	163
c) Brücke mit Gleichrichtermeßgerät	164
14. 90°-Verschiebung	164
a) Stillstandsmethode	165
b) Winkelmessung mit Hilfsspule	166
15. Felder	167
a) Gleichstrom	167
b) Permanente Magnete	168
Magnetmotor mit Bremsscheibe	168
Magnetmeßapparat mit Anwurf der Scheibe durch Feder	168
c) Wechselstrom	169
16. Strömung in der Scheibe	169
17. Bürsten-Übergangswiderstand bei Gleichstrom-Amperestundenzählern	170
18. Gegenelektromotorische Kraft bei Gleichstromzählern	171
19. Schiefe Aufhängung	172
Anhang	173
Namenverzeichnis	175
Sachverzeichnis	176

I. Allgemeines.

1. Meßgenauigkeit.

An die Meßgenauigkeit eines Elektrizitätszählers werden oft Anforderungen gestellt, die weit über das Maß hinausgehen, das man mit den normalen Mitteln des Laboratoriums oder des Prüfraumes erreichen kann. Wir wollen uns deshalb klarmachen, wie weit die Meßgenauigkeit mit den üblichen Mitteln getrieben werden kann.

Zunächst müssen wir uns überlegen, daß das Messen eine vergleichende Tätigkeit ist: die zu messenden Größen werden mit den definierten Grundgrößen verglichen. Dabei sind die Meßapparate nicht die Grundgrößen selbst, sondern wiederum mit diesen verglichen worden. 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 eingestellt haben; wir haben zu diesem Zweck einen sog. 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 anderen 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:



Es ergibt sich ohne weiteres, daß sich die Fehler, die bei den verschiedenen Einstellungen auftreten, addieren können. 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 Messungen illusorisch wird. In unserem Beispiel muß man sich z. B. vergewissern, daß die Meßfehler bei der Einstellung des Strommessers verschwindend klein sind gegenüber der verlangten Meßgenauigkeit. Man muß deshalb entweder selbst die Einrichtungen zur Verfügung haben, mit denen man in der Lage ist, den Strommesser genügend genau zu messen, oder man muß ihn bei einer amtlichen Stelle, die die Genauigkeit verbürgt, prüfen lassen.

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 Einzelmessungen, 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

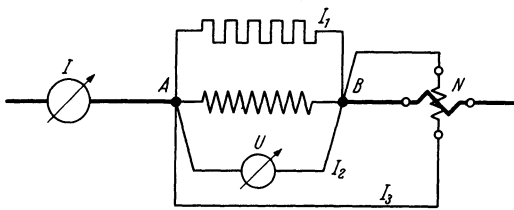


Abb. 1. Widerstand und Selbstinduktion.

der der Phasenwinkel bestimmt wurde. Als Beispiel für beide genannte Fälle sei die Anordnung nach Abb. 1 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 I_1 im reinen Widerstand soll bestimmt werden. Zur Messung braucht man einen Strommesser, einen Spannungsmesser und einen Leistungsmesser, mit denen man den Gesamtstrom I , die Spannung U zwischen den Punkten A und B und die Leistung N des gesamten Stromkreises mißt. Der Spannungsmesser und die Spannungsspule des Leistungsmessers sollen reine Ohmsche Widerstände haben, in denen die Ströme I_2 und I_3 fließen. Die Wirkkomponente des Gesamtstromes ist

$$I_w = I \cdot \cos \varphi.$$

Dabei ist $\cos\varphi$ zu bestimmen als Quotient aus der Leistung N und dem Produkt $U \cdot I$. Liegen die Verhältnisse so, wie in Abb. 2 dargestellt, so ist die am Leistungsmesser abgelesene Leistung N (proportional I_w) sehr klein. Die Meßgenauigkeit für $\cos\varphi$ ist also abhängig von der Genauigkeit, mit der man den kleinen Wert N 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 gesamten Wirkstrom $I_w = I_1 + I_2 + I_3$ ermittelt, so müssen wir von diesem noch die Summe der Ströme I_2 und I_3 im Spannungs- und im Leistungsmesser abziehen, um den gesuchten Strom I_1 zu erhalten. Hat man Meßgeräte benutzt, die einen ziemlich großen Stromverbrauch haben, so wird I_1 im Verhältnis zu $I_2 + I_3$ klein sein. Kann man I_2 und I_3 z. B. wegen der Erwärmungseinflüsse nicht sehr genau bestimmen, so leidet die Meßgenauigkeit für I_1 beträchtlich. Man muß dann entscheiden, ob nicht andere Meßgeräte oder auch andere Methoden für die Messung von I_1 anzuwenden sind.

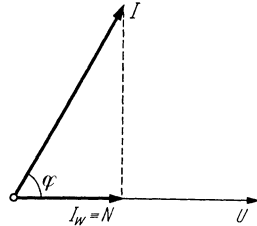


Abb. 2. Diagramm zur Schaltung Abb. 1.

Wir wollen in unser Beispiel Zahlenwerte einsetzen, um uns über die Größenordnung der erreichbaren Meßgenauigkeit ein Bild zu machen. Wir nehmen an, daß wir für die Messung Präzisionsmeßgeräte benutzen, bei denen die hohe Meßgenauigkeit von $\pm 0,1$ Teilstrich erreicht wird. Dabei setzen wir vorläufig voraus, daß die Ablesegenauigkeit unberücksichtigt bleiben kann.

	Sollwert	Ablesung in Teilstrichen	Meßgenauigkeit in Teilstrichen	
			Teilstrichen	Prozenten
U	110 V	110,0	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$
I	5 A	100,0	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$
N	110 W	22,0	$\pm 0,1$	$\pm 0,5$
$\cos\varphi = N/U \cdot I = 0,2$				$\pm 0,7$
$I_w = I \cdot \cos\varphi = 1$ A				$\pm 0,8$
I_3	0,3 A	$r_3 \pm 0,2\%$	} Genauigkeit der Widerstände	
I_2	0,5 A			$r_2 \pm 0,1\%$
$I_1 = I_w - I_3 - I_2 = 0,2$ A.				

Der Strom I_1 kann entsprechend den angenommenen Meßgenauigkeiten der Widerstände zwischen den folgenden Werten schwanken:

$$I'_1 = 1,006 - 0,2994 - 0,4995 = 0,207 \text{ A,}$$

$$I''_1 = 0,994 - 0,3006 - 0,5005 = 0,193 \text{ A.}$$

Die Genauigkeit, mit der man den Strom messen kann, liegt also zwischen $+3,5\%$ und $-3,5\%$. Führt man die Ablesegenauigkeit mit $0,1$ Teilstrich ein, so liegt die Genauigkeit der Messung in den Grenzen $\pm 6,5\%$.

Diesem Beispiel einer besonders geringen Meßgenauigkeit wollen wir ein solches gegenüberstellen, bei dem man sehr hohe Meßgenauigkeit erreicht. Bei der Prüfung von Zählern mißt man entweder die Leistung mit einem Leistungsmesser oder man errechnet bei Gleichstrom die Leistung aus dem Produkt des Stromes und der Spannung, die man mit getrennten Meßgeräten mißt. Die Zeit bestimmt man mit einer Stoppuhr (vgl. S. 62). Wir wollen die Meßgenauigkeit feststellen, die bei der Prüfung mit einem Leistungsmesser möglich ist. Die Meßgenauigkeit eines geeichten Präzisionsleistungsmessers kann mit 0,1 Teilstrichen angenommen werden; der Temperaturfehler des Leistungsmessers sei 0,1% je 10°C ; die Ablesegenauigkeit ist erfahrungsgemäß

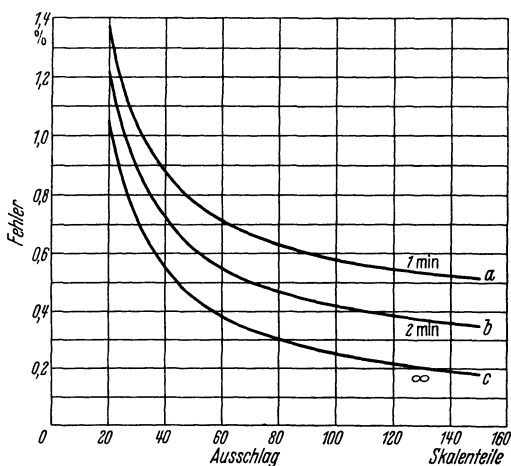


Abb. 3. Fehler bei der Messung mit Leistungsmesser und Stoppuhr.

etwa 0,1 Teilstriche. Bei einer um 5° von der Normaltemperatur abweichenden Raumtemperatur ist also bei Teilstrich 100 die Genauigkeit der Messung 0,25%. Die Genauigkeit der Stoppuhr mit 60-Sekunden-Teilung, mit der man die Zeit bestimmt, ist $\pm 0,2$ Sekunden, weil der Zeiger nicht kontinuierlich über die Skala läuft, sondern von 0,2 zu 0,2 Sekunden springt. Bei einer Beobachtungszeit von 60 Sekunden ist der mögliche Fehler also 0,33%. Hat man den Leistungsmesser bei Teilstrich 100 benutzt und 1 Minute lang gezählt, so muß man mit einem möglichen Fehler von 0,58%, rund 0,6%, rechnen. In Abb. 3 ist der mögliche Meßfehler für verschiedene Ausschläge des Leistungsmessers und für verschiedene Beobachtungszeiten dargestellt¹. Für eine Beobachtungszeit von 1 Minute gilt die Kurve *a*, für 2 Minuten die Kurve *b*; würde man die Beobachtungszeit sehr lang wählen, so würde der Fehler der Stoppuhr wegfallen und die Kurve *c* für die Genauigkeit des Leistungsmessers allein übrigbleiben. Unberücksichtigt sind dabei der Winkelfehler des Leistungsmessers, der bei Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung den Fehler noch vergrößern kann, der Fehler durch Exzentrizität des Zeigers der Stoppuhr und der individuelle Fehler der messenden Person.

Da sich die Fehler nur selten nach einer Richtung addieren, wird der Gesamtfehler meist kleiner sein als in der Abb. 3 gezeichnet. Die

¹ VOGLER, H.: ETZ 1935 S. 98.

Wahrscheinlichkeitsrechnung ergibt, daß bei der Hälfte aller Messungen der Meßfehler nur ein Drittel, bei Dreiviertel aller Messungen nur die Hälfte der in Abb. 3 angegebenen Fehler beträgt. Ausgeführte Vergleichsmessungen an verschiedenen Meßstellen bestätigen diese Rechnung¹.

Es ist schließlich noch von Interesse, festzustellen, mit welchem Meßverfahren man die geringsten Meßfehler erhalten wird. Es ist dies das später in Kap.V beschriebene Gleichlastverfahren mit Hilfe des Gleichlastprüfzählers, der eine Meßgenauigkeit von etwa 0,1% hat. Da bei dieser Methode der Fehler der Zeitmessung wegfällt und nur der individuelle Fehler übrigbleibt, wird der größte Meßfehler 0,2% nicht überschreiten.

Für die Auswertung der Messungen sei noch auf folgendes hingewiesen: Bei der Angabe der Zahlenwerte der Messung soll man nur so viele Stellen angeben, als man entsprechend der Meßgenauigkeit verantworten kann. Es hat keinen Zweck, ein mit geringer Meßgenauigkeit gewonnenes Resultat mit großer Genauigkeit auszurechnen und durch die Anzahl der Stellen sich und anderen eine Meßgenauigkeit vorzutauschen, die gar nicht vorhanden ist. Andererseits soll man aber die Meßgenauigkeit immer durch die Anzahl der angegebenen Stellen kennzeichnen. Ist die Meßgenauigkeit z. B. so groß, daß man den Fehler in den Angaben eines Zählers auf 0,1% genau angeben kann, so soll man schreiben: Fehler = 3,0% und nicht nur: Fehler = 3%.

Die wenigen Bemerkungen mögen 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 Rechenschaft über die Meßgenauigkeit zu geben².

2. Der Korrektionsfaktor, der Fehler und die Korrektion.

Bei der Prüfung eines Elektrizitätszählers muß man unterscheiden zwischen den von dem Konstrukteur beabsichtigten maschinentechnischen Eigenschaften (Drehmoment, Reibungsmoment, Eigenverbrauch, Spannungsabfall) und den meßtechnischen Eigenschaften. Beide zu messen ist bei der Entwicklung neuer Typen von 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 Korrektion oder des Fehlers aus. Besonders der Begriff des Fehlers hat sich so eingebürgert, daß man den Begriff des Korrektionsfaktors (früher auch „Konstante“ genannt) kaum mehr

¹ Die Rechnung wurde von Herrn Dr. FÖRSTER durchgeführt.

² Ausführliches über Auswertung der Beobachtungen vgl. KOHLRAUSCH: Lehrbuch der praktischen Physik, 17. Aufl., S. 14, 1935.

verwendet. Korrektionsfaktor, Fehler und Korrektion werden folgendermaßen definiert: W ist der wirkliche Verbrauch im Netz (entsprechend dem Sollwert der Umdrehungen), A sind die Angaben (entsprechend dem Hatwert der Umdrehungen) des Zählers, dann ist der Korrektionsfaktor C bestimmt durch

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

Er 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 Korrektion 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 Korrektion, auf den wirklichen Verbrauch bezogen, ist in Prozenten

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

Korrektionsfaktor 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. Amtlich zugelassene Fehlergrenzen.

a) Verkehrsfehlergrenzen.

In Deutschland sind zur Verrechnung der elektrischen Arbeit nur Zähler zugelassen, die die Verkehrsfehlergrenzen einhalten².

Für *Gleichstromzähler* ist zwischen 10% der Nennlast und der Nennlast der größtzulässige Fehler in Prozenten des jeweiligen Verbrauchs

$$\pm F = 6 + 0,6 \cdot \frac{P_H}{P}.$$

¹ Der Auffassung von SIMONS (ETZ 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 Ausführungsbestimmungen zum Gesetz, betreffend die elektrischen Maßeinheiten, vom 1. 6. 1898.

Dabei ist P_H die Höchstlast, P die jeweilige Last der Anlage. Bei 4% der Höchstlast ist noch ein einzelner Punkt vorgesehen, für den ein Fehler von $\pm 50\%$ zugelassen ist. Die Höchstlast wird durch den Anschlußwert der Anlage, deren Verbrauch der Zähler messen soll, bestimmt.

Für Leistungen unter 30 W finden die Bestimmungen keine Anwendung.

Für *Wechselstromzähler* gelten die gleichen Grenzen, nur kommt bei einer Phasenverschiebung φ zwischen Strom und Spannung noch $2 \cdot \operatorname{tg} \varphi$ hinzu, so daß der zulässige Fehler zwischen 10% der Nennlast und der Nennlast folgende Werte nicht überschreiten darf:

$$\pm F = 6 + 0,6 \cdot \frac{P_H}{P} + 2 \cdot \operatorname{tg} \varphi.$$

b) Beglaubigungsfehlergrenzen.

Die Verkehrsfehlergrenzen sind nach dem heutigen Stand der Technik sehr reichlich bemessen. Es sollen dadurch nur die Fälle des Gebrauchs unrichtiger Elektrizitätszähler begrenzt werden, die nach den Bestimmungen des Gesetzes vom 1. 6. 1898 strafbar sind. Die Stromlieferer sind dadurch nicht von der Verpflichtung befreit, richtig eingestellte Zähler zu verwenden. Als richtig in diesem Sinne gelten Elektrizitätszähler, deren Angaben mindestens die Beglaubigungsfehlergrenzen einhalten.

Zur Beglaubigung durch die Physikalisch-Technische Reichsanstalt und die ihr unterstellten Prüfämter werden nur solche Zähler zugelassen, die folgende Fehlergrenzen nicht überschreiten¹.

Gleichstromzähler.

a) Zwischen 5% der Nennlast und der Nennlast darf der Fehler in Prozenten des jeweiligen Verbrauchs nicht größer sein als

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

Dabei ist P_N die Nennlast, P die jeweilige Last des Zählers. Die Zimmertemperatur soll zwischen 15 und 20° C liegen.

Für Belastungen unter 10 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) Die kleinste Belastung, bei der der Zähler noch umlaufen muß, darf bei einem Amperestundenzähler 1%, bei einem Wattstundenzähler 2% seiner Nennlast nicht überschreiten.

¹ Prüfordnung für elektrische Meßgeräte. Berlin: Julius Springer 1933. — SCHMIDT, R.: Mitt. Elektr.-Werke 1925 S. 317.

d) Bis zu einer die Nennspannung um 10% übersteigenden Spannung darf der Vorlauf oder Rücklauf des unbelasteten Zählers nicht größer sein, als $\frac{1}{500}$ seiner Nennleistung entspricht.

Wechselstromzähler.

Zwischen 5% und 125% der Nennlast darf der Fehler nicht größer sein als

$$\pm F = 3 + 0,05 \frac{P_N}{P} + 0,5 \left(1 + 0,1 \frac{P_N}{P} \right) \operatorname{tg} \varphi$$

Prozent des jeweiligen Verbrauchs.

Dabei ist P_N die Nennlast, P die jeweilige Last, $\operatorname{tg} \varphi$ die trigonometrische Tangente desjenigen Winkels, dessen \cos gleich dem Leistungsfaktor ist. $\operatorname{tg} \varphi$ ist immer positiv zu setzen, gleichgültig, ob das Netz kapazitive oder induktive Belastung hat. In der folgenden Tabelle sind die $\operatorname{tg} \varphi$ und $\cos \varphi$ nebeneinander gestellt. Danach kann man sich $\operatorname{tg} \varphi$ als Funktion von $\cos \varphi$ als Kurve auf Millimeterpapier

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

zeichnen, wenn man häufiger Fehlerrechnungen vornehmen muß.

Die Zimmertemperatur soll zwischen 15 und 20° C liegen.

Alle Festsetzungen gelten für Nennfrequenz- und Nennspannung, bei Mehrphasenzählern nur für die im Schaltbild angegebene Phasen-

folge. Für Stromstärken oberhalb der Nennstromstärke gelten die Bestimmungen nur bei $\cos \varphi = 1$, für Mehrphasen- und Mehrleiterzähler außerdem nur bei symmetrischer Belastung.

Bei Mehrphasen- und Mehrleiterzählern wird der Leistungsfaktor aus dem Verhältnis der gesamten Wirkleistung zu der arithmetrischen Summe der Scheinleistungen aller Phasen oder Leiter gebildet.

Für Leistungsfaktoren unter 0,5 bei Einphasenzählern und unter 0,2 bei Mehrphasenzählern und bei Belastungen unter 10 W gelten die Bestimmungen nicht mehr.

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

Wechselstromzähler in Verbindung mit Meßwandlern.

Für Zähler, die nur in Verbindung mit Meßwandlern arbeiten sollen, darf der Fehler nicht größer sein als

$$\pm F = 2 + 0,03 \frac{P_N}{P} + 0,3 \left(1 + 0,05 \frac{P_N}{P} \right) \cdot \operatorname{tg} \varphi$$

Prozent des jeweiligen Verbrauchs.

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

Blindverbrauchsähler.

Zwischen 5% und 125% der Nennblindlast darf der Fehler nicht größer sein als

$$\pm F = 3 + 0,05 \frac{B_N}{B} + 0,5 \left(1 + 0,1 \frac{B_N}{B} \right) \text{ctg} \varphi$$

Prozente des jeweiligen Blindverbrauchs.

Dabei ist B_N die Nennblindlast, B die jeweilige Blindlast. Oberhalb der Nennstromstärke gilt die Bestimmung nur bei $\sin \varphi$ größer als 0,9. Die Fehlergrenze gilt nur für $\cos \varphi$ zwischen 0,98 und 0, d. h. für $\sin \varphi$ zwischen 0,2 und 1. Für Blindlasten unter 10 W sind keine Fehlergrenzen festgesetzt.

Im übrigen gelten die gleichen Bedingungen wie für Wirkverbrauchsähler.

Blindverbrauchsähler in Verbindung mit Meßwandlern.

Zwischen 5% und 125% der Nennblindlast darf der Fehler nicht größer sein als

$$\pm F = 2 + 0,03 \cdot \frac{B_N}{B} + 0,3 \left(1 + 0,05 \frac{B_N}{B} \right) \text{ctg} \varphi$$

Prozente des jeweiligen Blindverbrauchs.

Die übrigen Bestimmungen sind die gleichen wie die für die Blindverbrauchsähler für direkten Anschluß.

Meßwandler.

Der Stromfehler eines Stromwandlers ist bestimmt durch die Beziehung

$$F_I = \frac{K_n \cdot I_2 - I_1}{I_1} \cdot 100\% ,$$

wobei I_1 die primäre Stromstärke, I_2 die sekundäre Stromstärke, K_n der Nennwert des Übersetzungsverhältnisses ist.

Der Fehlwinkel ist die Phasenverschiebung des Sekundärstromes gegen den Primärstrom; er ist positiv bei Voreilung des Sekundärstromes.

Für den Spannungsfehler eines Spannungswandlers gilt die Beziehung

$$F_U = \frac{K_n \cdot U_2 - U_1}{U_1} \cdot 100\% ,$$

wobei U_1 die Primärspannung, U_2 die Sekundärspannung, K_n der Nennwert des Übersetzungsverhältnisses ist.

Der Fehlwinkel ist die Phasenverschiebung der Sekundärspannung gegen die Primärspannung; er ist positiv bei Voreilung der Sekundärspannung.

An die Meßgenauigkeit der Meßwandler werden je nach dem Verwendungszweck verschiedene Anforderungen gestellt¹. Für den An-

¹ Regeln für Wandler, Vorschriftenbuch des Verbandes Deutscher Elektrotechniker. ETZ 1939 S. 1283.

schluß von Zählern kommen fast nur beglaubigungsfähige¹ Wandler der Klasse 0,5 oder für sehr genaue Messungen solche der Klasse 0,2 oder 0,1 in Frage.

Wandler der Klasse 1 sollten nach dem heutigen Stand der Technik nicht mehr für Zähler verwendet werden.

Stromwandler. Die Stromfehler und Fehlwinkel sollen folgende Werte nicht überschreiten:

		10	20	100	120% des Nennstromes
Klasse 0,1	{ Stromfehler	± 0,25	± 0,2	± 0,1	± 0,1 %
	{ Fehlwinkel	± 10	± 8	± 5	± 5 Min.
Klasse 0,2	{ Stromfehler	± 0,5	± 0,35	± 0,2	± 0,2 %
	{ Fehlwinkel	± 20	± 15	± 10	± 10 Min.
Klasse 0,5	{ Stromfehler	± 1,0	± 0,75	± 0,5	± 0,5 %
	{ Fehlwinkel	± 60	± 40	± 30	± 30 Min.
Klasse 1	{ Stromfehler	± 2,0	± 1,5	± 1,0	± 1,0 %
	{ Fehlwinkel	± 120	± 80	± 60	± 60 Min.

Für beglaubigungsfähige Wandler gelten weiter folgende Bestimmungen:

Die zwischen den angegebenen Belastungen liegenden Werte werden begrenzt durch die Verbindungslinie der in der Tabelle angegebenen Werte (in graphischer Darstellung).

Die Nennbürde muß mindestens $0,2 \Omega$ bei einem Sekundärstrom von 5 A sein.

Die Werte gelten nur für den Frequenzbereich, für den der Apparat als beglaubigungsfähig erklärt wird und für alle sekundären Bürden zwischen $\frac{1}{4}$ und $\frac{1}{1}$ der Nennbürde bei einem Leistungsfaktor von 0,8. Die Raumtemperatur soll dabei 15 bis 20°C betragen.

Die Werte müssen unabhängig von der Lage der Anschlußleitungen und von der Einschaltdauer innegehalten werden.

Spannungswandler. Die Spannungsfehler und Fehlwinkel sollen folgende Werte nicht überschreiten:

Klasse	Spannungsfehler bei	Spannung	Fehlwinkel bei	Spannung
0,1	± 0,1%	0,8 ... 1,2 U_N	± 5 Min.	0,8 ... 1,2 U_N
0,2	± 0,2%	„	± 10 Min.	„
0,5	± 0,5%	„	± 20 Min.	„
1	± 1,0%	„	± 40 Min.	„

Für beglaubigungsfähige Wandler gelten folgende Bestimmungen:

Die Nennleistung des Sekundärkreises darf nicht weniger als 15 VA betragen.

Die Werte gelten nur für den Frequenzbereich, für den der Apparat als beglaubigungsfähig erklärt wird und für sekundäre Leistung zwischen $\frac{1}{4}$ und $\frac{1}{1}$ der Nennleistung bei einem Leistungsfaktor von 0,8.

Die Raumtemperatur soll dabei 15 bis 20°C betragen.

¹ Prüfvorschrift für elektrische Meßgeräte. Berlin: Julius Springer 1933 und neue Verordnungen der Phys.-Techn. Reichsanstalt.

Die Werte müssen unabhängig von der Einschaltdauer innegehalten werden.

Bei mehrphasigen Spannungswandlern müssen die Bedingungen der einphasigen Wandler für jede Phase eingehalten werden, wenn alle Phasen der Primärseite gleichzeitig erregt sind. Bei dreiphasigen Wandlern mit herausgeführtem Sternpunkt müssen die Bedingungen sowohl für die verketteten als auch für die Sternspannungen erfüllt sein.

c) Fehlergrenzen anderer Länder.

Fast alle Länder haben für die zulässigen Fehler von Elektrizitätszählern Vorschriften herausgegeben, die alle mehr oder weniger voneinander abweichen. Eine übersichtliche Zusammenfassung ist kaum möglich und würde über den Rahmen des Buches hinausgehen. Das Bestreben, eine Einheitlichkeit zu erreichen, hat die Internationale Elektrotechnische Kommission (IEC) veranlaßt, Vorschläge zu machen, deren hauptsächlichlicher Inhalt im folgenden angegeben werden soll¹.

Für alle Fehler gilt eine Toleranz von 0,5%, die aber nur in einer Richtung anzuwenden ist und nur für Ausnahmefälle gilt.

Einphasen-Wechselstromzähler.

1. Lastkurve

bei $\cos \varphi = 1$		bei $\cos \varphi = 0,5$	
Stromstärke	Fehler	Stromstärke	Fehler
5% von I_N	$\pm 2,5\%$		
10 ... 100% von I_N	$\pm 2,0\%$	20% von I_N	$\pm 2,0\%$
150% von I_N	$\pm 2,5\%$		

Anlauf bei $\cos \varphi = 1$: 0,5% von I_N .

Kein Leerlauf zwischen 90 und 110% von U_N .

2. Spannungsabhängigkeit.

Bei $\cos \varphi = 1$, Nennfrequenz f_N : von 10 bis 100% von I_N soll bei Spannungsänderung um $\pm 10\%$ von U_N der zusätzliche Fehler nicht größer sein als $\pm 1,0\%$.

3. Frequenzabhängigkeit.

Bei Nennspannung U_N und Frequenzänderung um $\pm 5\%$ von f_N :

bei $\cos \varphi = 1$		bei $\cos \varphi = 0,5$	
Stromstärke	zusätzl. Fehler	Stromstärke	zusätzl. Fehler
10% von I_N	$\pm 1,0\%$	100% von I_N	$\pm 2,0\%$
100% „ I_N	$\pm 1,0\%$		

4. Temperaturabhängigkeit.

Bei Nennspannung, Nennstrom und $\cos \varphi = 1$: 0,1% je 1°C innerhalb 0° und 40° ; bei $\cos \varphi = 0,5$: 0,15% je 1°C .

¹ International Electrotechnical Commission, Publication 43 (1931); Abänderung durch Beschlüsse der IEC in Torquay, Juni 1938.

5. Überlastung.

Keine Beschädigung und keine beträchtliche Änderung der Genauigkeit nach 30 Minuten Belastung mit doppeltem Nennstrom für Zähler bis 50 A, anderthalbfachem Nennstrom für Zähler über 50 A. Nach $\frac{1}{2}$ Sekunde langer Belastung mit 30fachem Nennstrom dürfen sich die Angaben nicht mehr als $\pm 1,5\%$ ändern. Diese Vorschrift wird voraussichtlich geändert werden.

6. Eigenverbrauch.

Der Eigenverbrauch der Spannungsspule soll bis 650 V 50 Hz nicht größer sein als 2 W; für kleinere Frequenz darf er umgekehrt proportional f größer sein als 2 W.

Drehstromzähler.

Für gleichseitige Belastung gelten die gleichen zulässigen Fehler wie für Wechselstromzähler.

Für einseitige Belastung ist für 100% von I_N und $\cos \varphi = 1$ ein größter Fehler von $\pm 2,5\%$ zugelassen.

Meßwandler.

Ebenso wie für Zähler hat die IEC auch für Wandler Vorschläge gemacht; sie stimmen in den meisten Punkten mit den neuen deutschen Regeln für Wandler überein. Die für die Klassen 0,5 und 1 vorgeschlagenen Strom- und Spannungsfehler und Fehlwinkel sind die gleichen wie in den REW vorgeschrieben.

4. Bestimmung des Fehlers.

a) **Zählwerksablesung.** Bei Motorzählern kann man durch eine Zählwerksablesung A über eine bestimmte Zeit t , während deren man die Belastung N möglichst konstant hält, den Fehler bestimmen:

$$\pm F = \frac{A - N \cdot t}{N \cdot t} \cdot 100\%.$$

Bei schnellaufenden Zählwerken, deren Anfangsrolle in 100 Teile geteilt ist, kann man bei Vollast und bei einer Ableszeit von etwa 10 Minuten den Fehler einigermaßen genau bestimmen. Einige Länder, in denen Eichzwang besteht, schreiben deshalb ein 6stelliges Zählwerk mit schneller Durchlaufzeit der Anfangsrolle vor, damit die amtliche Eichung schnell vorgenommen werden kann. Dieses Verfahren ist deshalb mühsam, weil die Leistung sehr konstant gehalten werden muß; bei schwankender Belastung muß man viele Ablesungen in gleichen Zeitabständen machen und daraus das arithmetische Mittel bilden. Außerdem haben 6stellige Zählwerke den Nachteil größerer Reibung, was aus meßtechnischen Gründen unerwünscht ist.

Einfacher und genauer ist es, die Zählwerksangaben des Prüflings mit den Zählwerksangaben eines genau eingestellten Normalzählers vom

gleichen Meßbereich des Prüflings zu vergleichen. Dabei braucht man keine Zeitablesung zu machen, auch braucht man die Leistung nicht konstant zu halten, man muß nur beide Zähler zu gleicher Zeit ein- und abschalten. Da man sowieso die Stromkreise der Zähler hintereinander, die Spannungskreise parallel schaltet, ergibt sich die Gleichzeitigkeit der Ein- und Abschaltung von selbst. Bei Motorzählern mit 5stelligem Zählwerk wird man die Prüfung über 5 bis 10 Stunden erstrecken, erreicht dann aber eine sehr hohe Genauigkeit. Diese Art der Prüfung hat außerdem noch den Vorteil, daß man bei der Dauerschaltung sehr leicht Unregelmäßigkeiten, z. B. Hemmungen im Zählwerk, falsche Übersetzungen u. a. herausfindet.

Zur Feststellung des Fehlers von Elektrolytzählern macht man meist eine Dauerablesung mit Hilfe eines Normalzählers. Je nach dem Meßbereich des Zählers braucht man bei Prüfung mit Nennstrom mehrere Tage, um einen ganzen Durchlauf des Meßrohrs zu beobachten. Z. B. braucht ein Zähler für 5 A 220 V bei einem Meßbereich von 200 kWh eine Durchlaufzeit von 182 Stunden mit Nennlast.

Für Schnellprüfung von Elektrolytzählern sind abgekürzte Methoden bekannt, die darauf beruhen, daß man den Zellenstromkreis vom Nebenschluß trennt und ihn etwa 5fach überlastet. Dabei muß man allerdings eine Korrektur anbringen, weil sich der Widerstand des Zellenstromkreises bei Überlastung erhöht. Über die Höhe der Korrektur geben die Hersteller solcher Zähler Auskunft.

Bei Doppelpendelzählern, die noch immer im Gebrauch sind, muß die Zeitdauer einer Eichung mindestens 20 Minuten = 2 Umschaltperioden betragen; zu einer sorgfältigen Eichung, besonders für kleine Belastungen, ist aber das Zwei- oder Mehrfache dieser Zeit erforderlich, weil dann die Abweichung am Zifferblatt und damit die Genauigkeit der Ablesung größer wird. Die Abweichung muß mindestens einen ganzen Umgang des am schnellsten laufenden Zeigers betragen. Dieser Eichzeiger wird zweckmäßig zur Eichung aufgesetzt, um eine genaue Ablesung zu ermöglichen.

Pendelzähler brauchen nur bei einer Belastung geeicht zu werden, weil sie über den ganzen Meßbereich durchaus proportional messen.

b) Zählen der Ankerumdrehungen oder Oszillationen. Bei rotierenden oder oszillierenden Motorzählern bestimmt man den Fehler meist aus den Umdrehungen oder Oszillationen des Ankers, der 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 Nennspan-

nung, Nennstromstärke, Nennfrequenz und anderen notwendigen Daten die Angabe des Übersetzungsverhältnisses

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

Bei einer Leistung N in Watt, die man am Leistungsmesser¹ abliest, mache der Zähleranker n Umdrehungen (oder Oszillationen) in t Sekunden. Würde der Zähler richtig zeigen, so müßte er für $N \cdot t$ Wattsekunden oder $\frac{N \cdot t}{1000 \cdot 3600}$ Kilowattstunden

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

gemacht haben. Aus dem Verhältnis zwischen dem Sollwert m und dem Hatwert n der Umdrehungen erhält man den Korrektionsfaktor des Zählers

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

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 nebeneinanderstehen.

Oft verfährt man so, daß man die Leistung N unter Berücksichtigung der bekannten Skalenfehler des Leistungsmessers auf den gewollten Wert, z. B. 10, 20, 30, 40 . . . % der Nennleistung einstellt, die zugehörnden sekundlichen Soll-Umdrehungen

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

berechnet und diese mit den durch Zählen bestimmten sekundlichen Hat-Umdrehungen n/t vergleicht. Der Korrektionsfaktor ist dann

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

und der Fehler

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

Man wählt eine durch die Anzahl der gewollten Belastungsstufen teilbare Anzahl von Soll-Umdrehungen m so, daß die sich aus dem Übersetzungsverhältnis ergebende (für alle Belastungsstufen gleiche) Sollzeit t_s in der Nähe von 60 Sekunden liegt; für die verschiedenen angenommenen Belastungsstufen bestimmt man nun die Hatzeit t_H , wobei man die Hat-Umdrehungen n den Soll-Umdrehungen m gleichsetzt. Dann geht die obige Fehlergleichung in die Form über:

$$F = \frac{t_s - t_H}{t_H}.$$

¹ Bei Gleichstrom benutzt man Spannungs- und Strommesser zur Bestimmung der Leistung.

Dieses Verfahren ist bequem, aber insofern für genaue Messungen nicht verwendbar, weil man den Zeiger des Leistungsmessers meist nicht auf einen bestimmten Teilstrich einstellen kann, sondern ihn auf einen Wert zwischen zwei Teilstrichen einstellen muß (vgl. Kap. III).

e) **Synchroneinstellung.** Bei den beschriebenen Messungen ist es lästig, daß man sowohl dauernd den Leistungsmesser beobachten und durch Regelwiderstände seine Angabe konstant halten, als auch die Umdrehungen des Prüflings zählen muß. Wenn man genaue Messungen machen will, braucht man dazu zwei Personen, sofern nicht eine Einrichtung zur Konstanthaltung der Spannung und damit auch der Leistung zur Verfügung steht. Viel einfacher ist es, wenn man die Umdrehungen des Prüflings mit den Umdrehungen eines Normalzählers vergleicht. Dieses Verfahren wird vor allem dann mit Vorzug angewendet, wenn man eine ganze Reihe von Zählern gleichen Meßbereiches einstellen will. Man schaltet die Stromkreise des Normalzählers und der Prüflinge hintereinander, die Spannungskreise parallel, schaltet aber Strom und Spannung noch nicht ein. Dann stellt man die Marken auf den Scheiben aller Zähler auf Null (z. B. nach vorn). Nun schaltet man die gewollte Belastung ein, zählt am Normalzähler eine vorher bestimmte Anzahl von Umdrehungen ab und schaltet die Belastung ab, kurz bevor die Marke auf der Scheibe des Normalzählers ganz nach vorn gekommen ist. Steht jetzt die Marke noch nicht genau vorn („auf Null“), so holt man sie durch kurzzeitiges Einschalten der Belastung in die genaue Nullstellung heran. Bei den Prüflingen, die zuwenig zeigen, hat die Marke noch nicht die Nullstellung erreicht; bei denjenigen, die zuviel zeigen, hat die Marke die Nullstellung überschritten. Der Weg, um den die Stellung der Marke von der Nullstellung abweicht, ist ein Maß für den Fehler. Mit einer am Scheibenumfang anliegenden kreisförmigen, entsprechend geteilten Skala kann man den Fehler ziemlich genau ablesen. Wenn man diese Methode zum *Einstellen* der Zähler benutzt, ist diese Feststellung natürlich überflüssig. In diesem Falle verstellt man die Regelorgane der Prüflinge nach der entsprechenden Richtung und wiederholt die Messung. Dann stellt man wieder die noch nicht richtig gehenden Zähler nach, bis alle Zähler genau synchron mit dem Normalzähler laufen. Deshalb nennt man diese Methode auch „Synchroneinstellung“ oder „Synchronprüfung“ oder „Synchroneichung“. Es sei noch bemerkt, daß man bei Zählern, die keinen Stromvorlauf haben, den Stromkreis dauernd eingeschaltet läßt und die Bewegung und den Stillstand der Zähler durch Ein- und Ausschalten der Spannung einleitet.

Eine Vervollkommnung dieses Verfahrens stellt das sog. Gleichlastprüfverfahren dar, das im Kap. V näher beschrieben ist.

d) **Stroboskopische Prüfung.** Einige ausländische Zählerhersteller versehen den Scheibenanker des Zählers mit einer größeren, über den

ganzen Scheibenrand gleichmäßig verteilten Anzahl von Strichen oder Punkten. Werden diese von Lichtschwankungen bestimmter Frequenz beleuchtet, so scheinen die Striche oder Punkte stillzustehen, wenn die Geschwindigkeit des Scheibenankers oder ein Vielfaches derselben der Frequenz der Lichtschwankung gleich ist; sie scheinen in der Drehrichtung oder ihr entgegen zu wandern, je nachdem ob der Scheibenanker schneller oder langsamer läuft. Man ändert mit den Reguliereinrichtungen des zu prüfenden Zählers dessen Geschwindigkeit in der gewollten Richtung, bis die Marken auf dem Scheibenanker stillzustehen scheinen.

Zur Erzeugung der Lichtschwankungen kann man einen Normalzähler benutzen, der die gleichen charakteristischen Eigenschaften (Fehlerkurve) hat, wie der zu prüfende Zähler. Dann kann man ebenso wie bei der Synchronprüfung eine größere Anzahl Zähler gleichzeitig prüfen. Es sind eine Anzahl guter Prüfeinrichtungen nach dem stroboskopischen Verfahren entwickelt worden, die vorwiegend in Amerika in Anwendung sind. Das Prinzip der stroboskopischen Prüfung ist von O. T. BLATHY angegeben worden¹.

e) **Koinzidenzen bei Pendelzählern.** Zur Abkürzung der Beobachtungszeit bei Doppelpendelzählern hat ORLICH² 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. Wer sich weiterhin über die Eichung und Einregelung von Pendelzählern unterrichten will, dem sei das Studium des sehr gründlichen Aufsatzes von HOMMEL³ empfohlen.

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

Nachdem wir die Bestimmung der Größe des Fehlers besprochen haben, wollen wir uns klar darüber werden, welchen praktischen Wert

¹ DRP. 294117 vom 10. 4. 1914, DRP. 359220 vom 23. 4. 1920. ETZ 1922 S. 1507. — Weitere Literatur: TENZER, G.: ETZ 1926 S. 1261 — MAURER, P.: Rev. gén. Électr. 1933 S. 79 — DRP. 607622 vom 23. 10. 1929.

² ETZ 1901 S. 94—98.

³ Über die Fehlerkurven des Pendelzählers. Arch. Elektrotechn. 1920 S. 167.

es für die Verrechnung mit dem Konsumenten hat, die Fehler des Zählers bei verschiedenen Belastungen, aus denen man die sog. Fehlerkurve des Zählers zeichnet, zu kennen.

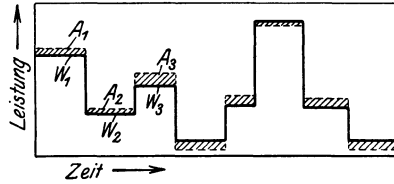


Abb. 4. Belastungsdiagramm.

Nehmen wir an, der Verbrauch eines Anschlusses schwanke nach dem Belastungsdiagramm Abb. 4, die Fehlerkurve eines Zählers älterer Bauart sei durch Abb. 5 gegeben. Der wirkliche Verbrauch W ist im Belastungsdiagramm durch die Flächen, welche von ausgezogenen Linien begrenzt werden, dargestellt, die Angaben A des Zählers sind durch die gestrichelten Linien begrenzt, wobei der Maßstab für die Abweichungen zwischen W und A der Deutlichkeit halber zehnmal zu groß gewählt ist. Das, was der Konsument zu viel oder zu wenig bezahlt, ist gegeben durch $\Sigma A - \Sigma W$, dargestellt durch die Differenz der Flächen, die die ausgezogene und die gestrichelte Belastungslinie mit der Abszissenachse bilden, also die Summe der in Abb. 4 schraffierten Flächen. Daraus erhält man einen mittleren Fehler

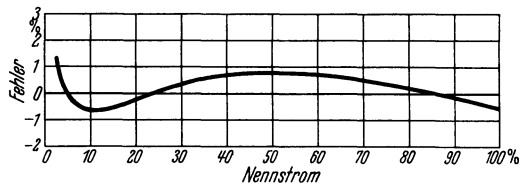


Abb. 5. Fehlerkurve eines nichtkompensierten Zählers.

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

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:

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

Man ersieht hieraus, daß der mittlere Fehler F_m immer kleiner ausfallen muß, als der größte Fehler, den man aus der Fehlerkurve entnehmen kann¹.

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

¹ Vgl. auch P. ГИНСЗУ: Graphische Fehlerbestimmung bei der Messung des elektrischen Verbrauchs. Elektrotechn. u. Masch.-Bau, Wien 1937 S. 481.

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.

II. Einrichtungen zur Erzeugung und Regelung der zugeführten Leistung.

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

1. Sparschaltung.

Bei Prüfungen, 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 Prüfraum 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“ oder „Sparschaltung“ wird durchgehend angewandt. Die Anschlußklemmen aller Zähler sind heute so eingerichtet, daß man die Trennung des Spannungskreises vom Hauptstromkreise von außen vornehmen kann, ohne im Innern des Zählers irgendeine Leitung lösen zu müssen.

2. Stromquellen.

Es seien nun die Stromquellen betrachtet, die man im Laboratorium und im Prüfraum braucht, um die Messung in Sparschaltung bequem vornehmen zu können. Es wird dabei auch manche Einrichtung er-

¹ Vgl. S. 148.

wähnt werden, die nicht unbedingt erforderlich ist, deren Kenntnis aber dem Leser erwünscht sein mag.

a) **Akkumulatorenbatterien.** Zur Speisung des Spannungskreises von Gleichstrom-Wattstundenzählern gebraucht man eine sog „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 Drei-



Abb. 6. Starkstrombatterie aus zwei großen Elementen.

leiternetzen 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 die Erhöhung der Anschaffungs- und Unterhaltungskosten meist vermeiden und dafür lieber die wenigen Zähler über 500 V bei einem staatlichen Institut prüfen lassen oder sie an Ort und Stelle prüfen.

Um sehr große Stromstärken bei kleinen Spannungen für die Speisung des Hauptstromkreises zu erhalten, kann man die „Hauptstrombatterie“ so einrichten, daß sich ihre Elemente in mehreren Gruppen auf verschieden hohe Spannungen schalten lassen. Solche Batterien aus vielen Elementen haben den Vorzug, daß man sie mit einer nor-

malen Maschine für 120 V bei Hintereinanderschaltung laden kann. Dem steht der Nachteil gegenüber, daß sich die Elemente bei Parallelschaltung ungleichartig entladen und dadurch ungleich beansprucht werden. Außerdem ist die Schaltanlage dafür nicht einfach herzustellen und instandzuhalten.

Einfacher in der Unterhaltung sind wenige Elemente großer Entladestromstärke¹. Abb. 6 zeigt eine solche Batterie aus zwei Zellen, jede für eine einstündige Entladestromstärke von 6658 A, die auf kürzere Zeit bis auf 7500 A gesteigert werden kann. Bei Parallelschaltung der beiden Zellen kann man also auf einen Strom von 15000 A bei 2 V kommen. Zum Laden einer solchen Batterie verwendet man entweder einen Gleichstromgenerator in Sonderausführung für hohe Stromstärke oder Kupferoxydulgleichrichter, die für sehr große Stromstärke bei kleiner Spannung gebaut werden können².

b) Gleichstromgeneratoren. Hochspannungsgeneratoren normaler Bauart bis 1000 V für kleine Leistung sind schon längere Zeit in Gebrauch. Generatoren, die 7000 V mit zwei hintereinandergeschalteten Kollektoren liefern, sind vor einiger Zeit gebaut worden³. Zwei solcher Maschinen für je 5000 V, die hintereinandergeschaltet 10000 V geben, sind zu einem Maschinensatz zusammengefaßt worden⁴. Neuerdings hat man auch einen Maschinensatz aus 4×5 kV-Maschinen zusammengestellt, mit dem also bei Reihenschaltung 20 kV Gleichstrom geliefert werden kann⁵. Die Antriebsmotoren dieser Maschinen sind Gleichstrommotoren, die am besten von Batterien gespeist werden, damit man genügende Konstanz der Spannung erhält. An Stelle der Batterie kann natürlich auch ein röhrengeregelter Gleichstromgenerator treten, wie er weiter unten beschrieben werden soll. Für die Erzeugung hoher Ströme kann man Gleichstromgeneratoren mit Kollektor oder Unipolarmaschinen⁶ verwenden. Diese Maschinen haben sich aber nicht gegenüber den Batterien durchsetzen können. Dies mag insbesondere darin seinen Grund haben, daß bisher mit Maschinen keine so große Konstanz zu erreichen war wie mit Batterien.

Seitdem man die Spannung der Gleichstromgeneratoren mit Hilfe von trägheitslosen Elektronenröhrenschnellreglern auf etwa $10/_{00}$ konstant halten kann, kommen sie immer mehr als Ersatz von Batterien in Frage. Vor allem verwendet man sie als Stromquellen für die Antriebsmotoren der Prüfgeneratoren⁷. Die grundsätzliche Schaltung der

¹ Siemens-Jb. 1927 S. 169.

² BAUDISCH, K., u. W. KAFKA: Siemens-Z. 1938 Nr. 5 S. 217.

³ PEDERZANI, K.: Elektrotechn. u. Masch.-Bau 1926 Heft 35 S. 625.

⁴ LINKE, H.: ETZ 1915 S. 549. ⁵ TRACHMANN, H.: AEG-Mitt., März 1938 S. 91.

⁶ NOEGGERATH, E.: Elektr. Kraftbetr. Bahn. 1908 S. 563.

⁷ MEHLHORN, H.: Siemens-Z. 1932 Nr. 12 S. 428. — BERTHOLD, R. G., u. A. v. ENGEL: Siemens-Z. 1934 Nr. 6 S. 214. — SEQUENZ, H.: Elektrotechn. u. Masch.-Bau 1936 Heft 40 S. 475.

Spannungsregelung eines Gleichstromgenerators zeigt Abb. 7. An das Drehstromnetz ist der Drehstrommotor (z. B. Synchronmotor) D angeschlossen, der den Gleichstromgenerator G und dessen Erregermaschine E antreibt. Die Spannung U des Gleichstromgenerators G soll geregelt werden. Seine Feldwicklung F ist mit einem Widerstand R in Reihe geschaltet. Parallel zu diesem Widerstand liegt das Elektronenrohr A , das einen veränderlichen Widerstand darstellt, wie aus der Kennlinie Abb. 8 zu ersehen ist. Eine Batterie liefert die Vergleichsspannung K . Nimmt die Spannung U z. B. infolge Entlastung des Generators G zu, so daß sie den Wert der Vergleichsspannung K übersteigt, so vergrößert sich die aus U und K gebildete negative Gitterspannung U_g und der Anodenstrom i_a nimmt, wie aus Abb. 8 ersichtlich, ab; damit auch der Erregerstrom in F , so daß die Spannung U wieder bis fast auf den ursprünglichen Wert sinkt. Umgekehrt nimmt, wenn die Spannung U z. B. durch Belastung abnimmt, der Strom i_a so lange zu, bis U wieder annähernd auf den ursprünglichen Wert angestiegen ist. Für die Grobeinstellung im Verhältnis zur Vergleichsspannung K dient der Spannungsteiler S . Eine so einfache Schaltung, wie die beschriebene, reicht in Wirklichkeit nicht aus, um eine Feinregelung von $1^0/_{00}$ des Spannungswertes zu erzielen, sondern es sind eine Reihe von Verstärkerstufen und die nötigen Zusatzapparate erforderlich.

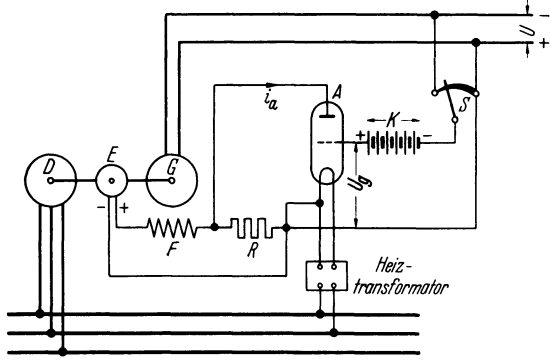


Abb. 7. Röhrenregelung eines Gleichstromgenerators.

Hat man einen Gleichstromnetzanschluß zu regeln, so wird man einen Zusatzgenerator mit der Netzleitung in Reihe schalten und dessen Erregung in Abhängigkeit von der zu regelnden Spannung beeinflussen.

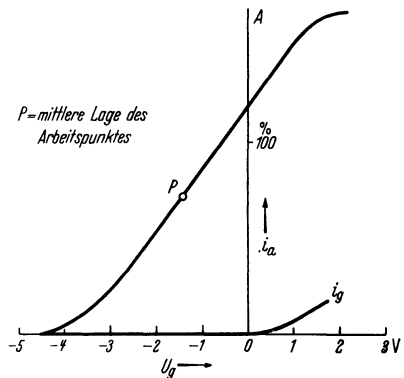


Abb. 8. Kennlinie der Elektronenröhre.

c) Wechselstromgeneratoren. Ein Generator. Hat man als Stromquelle nur einen unregelmäßigen Generator zur Verfügung, so muß man für die Sparschaltung von der Stromquelle zwei Stromkreise abzweigen

und durch Transformatoren die gewünschten Größen für den Spannungskreis und den Stromkreis herstellen. Jede Regelung in einem der beiden Stromkreise beeinflußt dabei den anderen. Man muß für jede Belastung eine vollständig neue Einstellung vornehmen. Wie lästig dies vor allem bei Drehstrommessungen ist, weiß jedermann, der einmal auf diese Art und Weise hat arbeiten müssen¹.

d) Röhrengeregelte Generatoren. Diese Schwierigkeiten kann man durch Verwendung eines röhrengeregelten Drehstromgenerators vermeiden, dessen Spannung grundsätzlich auf dieselbe Art durch Regelung der Erregung konstant gehalten wird, wie wir dies beim Gleichstromgenerator beschrieben haben. Dabei ist es möglich, den Regelpunkt an den Prüftisch oder ganz in seine Nähe zu verlegen, so daß der Spannungsabfall in den Leitungen von der Maschine bis zum Prüftisch nicht störend wirkt.

Will man die Netzspannung zum Prüfen benutzen, so kann man sie durch drei in die Leitungen eingeschaltete röhrengeregelte Zusatzgeneratoren, deren Spannungen man zu den Netzspannungen addiert, konstant halten².

e) Mechanische Regler zur Konstanthaltung der Spannung. Die normalen mechanischen Drehzahlregler eignen sich nicht für Prüfzwecke, weil sie die Spannung nicht in genügend engen Grenzen konstant halten. Der Thoma-Regler³ dagegen erlaubt es, die Spannung in Grenzen von etwa 0,3% mit genügender Geschwindigkeit zu regeln. Er besteht bei Drehstrom aus drei regelbaren Zusatztransformatoren, deren Wicklungen für Prüfzwecke z. B. als Ringtransformatoren ausgebildet sind, die auf einer gemeinsamen Achse gelagert sind und auf deren blankgemachtem Umfang Bürsten zur Stromabnahme schleifen. Als Steuerorgan dient ein empfindliches Spannungsrelais, das auf die Steuerung eines Flüssigkeit-Servomotors einwirkt. Die Regelgeschwindigkeit ist noch genügend groß, obgleich sie der röhrengeregelten Anordnungen nicht gleichkommt. Eine solche Einrichtung eignet sich auch für die Regelung der Spannung bei Dauerschaltungen, weil sie keine Wartung erfordert.

f) Doppelgeneratoren. Um bei Sparschaltung ein bequemerer Arbeiten zu haben, benutzt man meist nicht einen einzigen Generator zur Speisung des Spannungs- und des Hauptstromkreises, sondern zwei getrennte, aber miteinander gekuppelte Generatoren, die beide von einem Gleichstrommotor angetrieben werden. Der Gleichstrommotor wird von einer Akkumulatorenbatterie oder von einem Generator mit Spannungsregelung gespeist, damit man während der Messung konstante Verhältnisse erhält. Eine solche Maschine liegender Bauart ist in Abb. 9

¹ Vgl. auch ORLICH: ETZ 1901 S. 94.

² Vgl. H. MEHLHORN: Siemens-Z. 1932 Nr. 12 S. 428.

³ GÄNGER, B.: ETZ 1938 S. 1353.

dargestellt¹. Rechts ist der Gleichstromantriebsmotor angeordnet, der von einer Batterie oder einem geregelten Gleichstromnetz gespeist wird. Starr damit gekuppelt sind die beiden Drehstromgeneratoren, links der Generator zur Speisung des Spannungskreises, in der Mitte der zur Speisung des Hauptstromkreises. Beide Generatoren sind Sonderausführungen modernster Bauart, deren Stromkurve sowohl bei kleiner als auch bei großer Last rein sinusförmig verläuft. Der Stator des in der Mitte liegenden Generators ist drehbar angeordnet und kann mit dem kleinen Steuermotor oder mit dem Handrad gegenüber dem Stator des linken Generators räumlich verdreht werden. Diese räumliche Verdrehung bedingt bei laufender Maschine eine zeitliche Verschiebung der den Generatoren entnommenen Ströme. Da man nicht immer an dem Generator selbst nachsehen kann, ob der Strom des einen oder

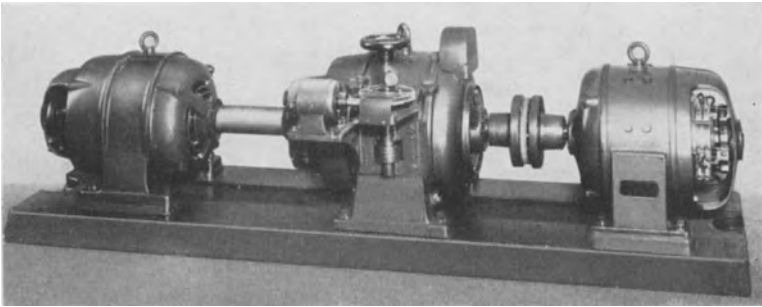


Abb. 9. Gleichstrommotor und zwei Drehstromgeneratoren.

anderen Generators vor- oder nacheilt, so muß man die Vor- oder Nacheilung mit Hilfe der unter III, 4c (S. 54) beschriebenen Methoden bestimmen. Solche Maschinen sind auch in stehender Bauart mit vertikaler Welle ausgeführt worden², damit man sie neben den Prüftischen stellen kann. Sie werden aber heute nur noch selten verwendet, weil man meist eine größere Maschine für mehrere Prüftische vorsieht und die Spannung durch eine selbsttätige Regeleinrichtung konstant hält.

Eine früher öfters angewendete Ausführung zur Regelung der Phasenverschiebung zwischen zwei von einem Motor angetriebenen Generatoren stellt die Abb. 10 dar³. 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

¹ Die erste Doppelmaschine wurde nach Angaben der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt von den Siemens-Schuckert-Werken gebaut und zu gleicher Zeit von der Union-Elektrizitäts-Gesellschaft im Jahre 1901 entwickelt, vgl. ETZ 1902 S. 776; 1909 S. 436.

² Von der Elektrotechn. Fabrik Hans Boas und von den Siemens-Schuckert-Werken.

³ DRP. 213522 der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft.

hat zwei Nuten N_1 , die coaxial zur Drehachse verlaufen, die Welle 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 in Richtung der Wellen, so werden je nach Stellung der Muffe die beiden Rotoren verschiedene räumliche Stellungen zueinander einnehmen, wodurch die zeitliche Phasenverschiebung der Ströme bedingt wird.

Neben der Phasenverschiebung der von beiden Generatoren gelieferten Ströme muß man auch ihre Spannungen in möglichst weiten Grenzen ändern können. Das Bereich, welches man durch Änderung der Erregung für die Regelung der Spannung zur Verfügung hat, genügt nicht mehr für große Spannungsänderungen. Durch Zwischenschaltung von Prüftransformatoren, deren Primärspannung der der Generatoren entspricht,

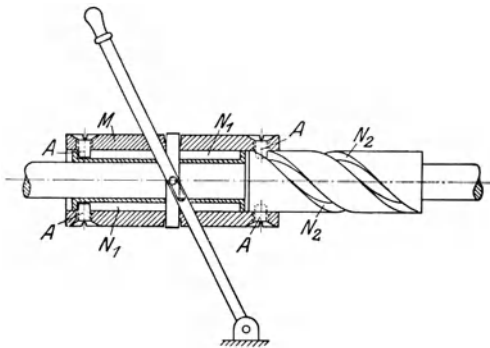


Abb. 10. Verstellvorrichtung für die Wellen eines Doppelgenerators.

kann man hohe Spannungen bei kleinen Strömen und große Ströme bei niedrigen Spannungen erzeugen, je nach dem für die Prüfung benötigten Zwecke (s. u. S. 28). Wenn man früher den einen der beiden Generatoren für großen Strom und kleine Spannung wickelte, so ist man später davon abgegangen, weil man im Transformator ein viel ein-

facheres Mittel an der Hand hat, die Spannung herunterzusetzen. Außerdem mußte man bei der älteren Ausführung dicke Leitungen benutzen und den Platz für die Prüfung in die Nähe des Generators verlegen, um einen allzu großen Spannungsabfall zu vermeiden.

Schließlich muß man für Prüfungen mit verschiedenen Frequenzen noch die Drehzahl des Antriebsmotors ändern können. Braucht man nicht abnormale Frequenzen, so ist dies verhältnismäßig einfach durch Veränderung der Erregung des Antriebsmotors zu erreichen. Auf diese Weise kann man die Drehzahl und damit die Frequenz im Verhältnis 1 : 2 ändern, also z. B. von 25 bis 50 Hz oder 40 bis 80 Hz. Nach oben kann man die Drehzahl nicht steigern, nach unten höchstens durch Einschalten von Widerständen in den Ankerstromkreis erniedrigen. Der Motor gibt dann aber sehr wenig Leistung ab und wird mit schwankender Drehzahl laufen, wenn die Generatoren belastet sind.

g) **Periodenumformer.** In Ausnahmefällen kann man einen Periodenumformer verwenden, wenn man ein sehr großes Frequenzbereich mit einer Maschine beherrschen will. Ein solcher Periodenumformer besteht grundsätzlich aus einem asynchronen Schleifringmotor, dessen Stator

vom Drehstromnetz gespeist wird, während sein Rotor von einem Gleichstrommotor regelbarer Drehzahl angetrieben wird. Steht der Antriebsmotor still, so arbeitet der Drehstrommotor wie ein Transformator, die Frequenz des Rotors ist gleich der Frequenz des den Stator speisenden Netzes. Wird der Rotor entgegen dem Drehfeld bewegt, so ist die Frequenz des ihm entnommenen Stromes um so größer, je schneller er läuft. Ist seine Drehzahl gleich der des Drehfeldes, so ist die Frequenz doppelt so groß wie die Netzfrequenz. Die dem Rotor entnommene Leistung ist gleich der Summe der dem Netz entnommenen Leistung und der mechanisch durch den Antriebsmotor zugeführten Leistung. Wird der Rotor im gleichen Sinne bewegt wie das Drehfeld des Stators, so entnimmt man dem Rotor eine kleinere Frequenz bis zu Null, wenn seine Drehzahl gleich der Drehzahl des Drehfeldes ist. Dann ist aber auch die Leistung Null. Bei den Zwischenzuständen ist die dem Rotor entnommene Leistung gleich der dem Stator zugeführten Netzleistung vermindert und die dem Rotor durch den Antriebsmotor zugeführten mechanischen Leistung. In allen Fällen ist die Leistung, die dem Rotor für die Messung entnommen werden kann, etwa proportional der Frequenz, unter der Annahme, daß dem Stator immer die gleiche Leistung zugeführt wird.

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 zum Teil durch Regelung der Erregung des entsprechenden Generators erreichen. Dieser Regelung sind aber nach oben und unten Grenzen gesetzt. Man muß deshalb zur Grobregelung entweder Vorwiderstände oder Stufentransformatoren benutzen.

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

Regelwiderstände. Um bei Gleich- oder Wechselstrom die Stromstärke genau auf das gewünschte Maß einzustellen, benutzt man vielstufige Regelwiderstände aus Konstantandraht. Die in Abb. 11 dargestellte Ausführung der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt hat drei Gruppen mit je drei 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. Zur Feinregelung bei Gleich- oder Wechselstrom werden Schiebewiderstände für Stromstärken von 0,15 A bei 8000Ω

bis zu 20 A bei $0,3 \Omega$ verwendet. Auch als Doppelwiderstände werden sie bis zum doppelten Widerstandswert hergestellt. Diese Widerstände sind bequem zu handhaben und geben gute Kontakte, wenn sie entsprechend gepflegt werden.

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

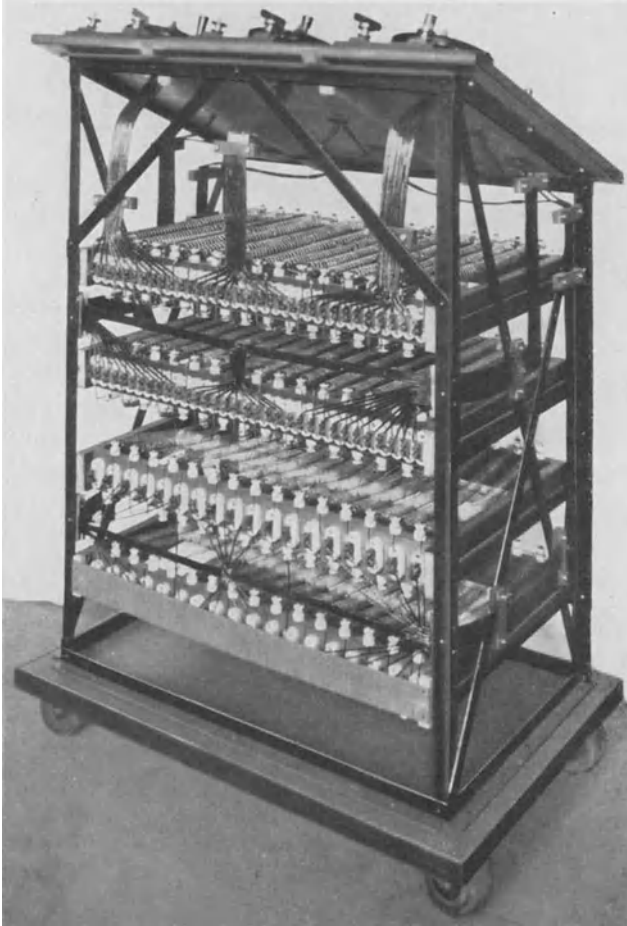


Abb. 11. Regelwiderstand der Physik.-Techn. Reichsanstalt mit 3×3 Gruppen.

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. Für die Regelung sehr hoher Stromstärken ordnet man die

Widerstände aus Konstantanband samt den zugehörigen Schaltern in einem Behälter unter Wasser an und läßt dauernd neues Kühlwasser zufließen¹. Der Widerstand des Wassers ist im Verhältnis zu dem des Bandes so groß, daß er vollkommen außer acht gelassen werden kann. Einen solchen Widerstand kann man auch improvisieren, indem man ein Konstantanband in einen tönernen Kübel mit fließendem Wasser legt.

Regeltransformatoren. Bei Wechselstrom verwendet man an Stelle von Regelwiderständen Regeltransformatoren. Abb. 12 zeigt einen solchen Transformator; er besteht aus einem ringförmigen Eisenkern mit Primär- und Sekundärwicklung (oder Sparwicklung). Die außenliegende Sekundärwicklung ist an der Abnahmestelle des Stromes für die in der Abb. 12 rechts zu sehende Gleitbürste blank gemacht. Der Strom kann auf 3 bis 5% genau eingestellt werden. Parallel zu einem Teil der Wicklung liegt ein in der Abb. 12 auf dem äußeren Umfang liegender bandförmiger Feinregler entsprechend der Schaltung Abb. 13 a; er über-

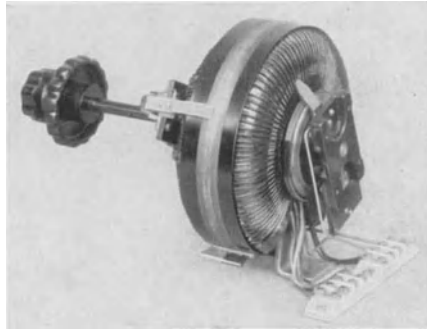


Abb. 12. Regeltransformator mit Grob- und Feinregelung.

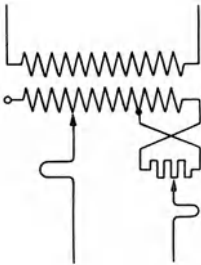


Abb. 13 a. Schaltung des Regeltransformators mit kombinierter induktiver und Widerstandsregelung.

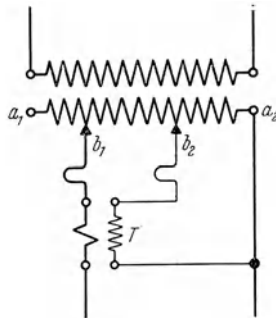


Abb. 13 b. Schaltung des Regeltransformators mit rein induktiver Regelung.

brückt eine Anzapfspannung von etwa 2%. Durch zwei konzentrisch angeordnete Knöpfe kann man die Regler bequem bedienen.

Eine neuere Schaltung des Regeltransformators zeigt Abb. 13 b. Über die blank gemachten Stirnseiten der (wie in Abb. 12 ringförmigen) Sekundärwicklung a_1 , a_2 gleiten die Bürsten b_1 und b_2 . Die von b_2 abgegriffene Teilspannung zwischen b_2 und a_2 liegt an der Wicklung mit vielen Windungen eines kleinen Transformators T , dessen Wick-

¹ Vgl. Siemens-Jb. 1927 S. 169.

lung mit wenigen Windungen in der von der Bürste b_1 abgehenden Leitung liegt. Die Grobregelung besorgt die Bürste b_1 , die Feinregelung die Bürste b_2 mit Hilfe des Transformators T . Diese Anordnung hat den Vorzug, daß die Regelung verlustarm ist und daß nur sehr wenig Erwärmung auftritt, weshalb sich die eingestellten Werte mit der Einschaltdauer nicht ändern. Als weiterer Vorteil dieser Schaltung ist zu erwähnen, daß nur eine Bürste den Hauptstrom führt. Die Grobregelung hat eine Stufigkeit von etwa 1%, die Feinregelung von etwa 0,01%¹.

Wenn man nur einen Feinregler braucht, so sind die Schiebetransformatoren nach Abb. 14, die nach dem Muster der Schiebewiderstände

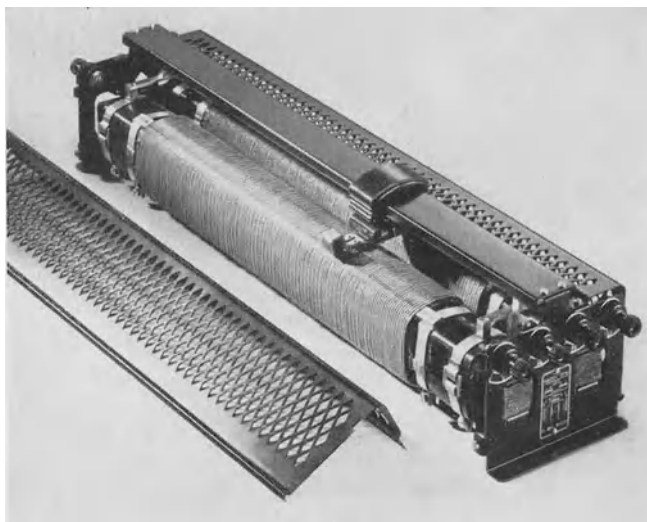


Abb. 14. Schiebetransformator.

gebaut sind, sehr bequem zu handhaben. Sie werden für Ströme von 40 bis 4 A bei Spannungen von 20 bis 220 V hergestellt.

Prüftransformatoren. Zur Anpassung der Prüfstromstärke an das Meßbereich der zu prüfenden Zähler benutzt man bei Wechselstrom Prüftransformatoren mit Sekundärwicklungen, die man in verschiedenen Gruppen schalten kann. Auch Transformatoren mit Anzapfwicklungen oder Spartransformatoren werden verwendet. Es gibt davon eine große Anzahl verschiedener Ausführungen.

b) Regelung der Spannung.

Bei Gleichstrom regelt man die Spannung einer Spannungsbatterie in groben Stufen durch den Zellenschalter, mit dem man einzelne Elemente oder Elementgruppen zu- oder abschaltet. Die Feinregelung

¹ Andere Ausführungen vgl. A. E. NÖLKE: ETZ 1938 S. 210.

übernehmen Schiebewiderstände oder fein unterteilte Kurbelwiderstände, die man auch als Spannungsteiler schalten kann.

Für Wechselstrom verwendet man zur Feinregelung Schiebewiderstände oder Schiebetransformatoren, die man in den Sekundärkreis des Prüftransformators schaltet. Dieser ist mit Abzapfungen für die verschiedenen Spannungsmeßbereiche versehen. Da man die Spannung nur über ein kleines Bereich zu regeln braucht, sind Regeltransformatoren, wie man sie für die Stromregelung braucht, nicht erforderlich.

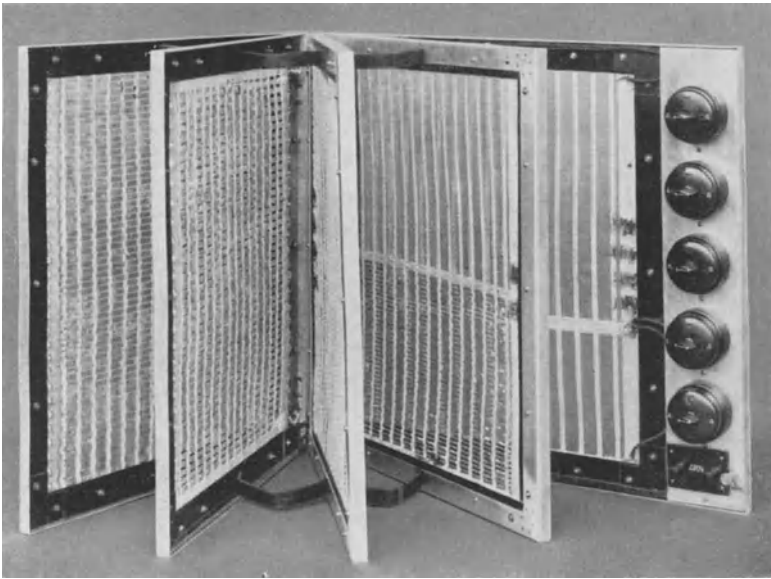


Abb. 15. Zusammenlegbarer Belastungswiderstand.

c) Belastungs-Widerstände und -Transformatoren.

Belastungswiderstände. Für die Prüfung an Ort und Stelle oder allgemein in solchen Fällen, wo man nicht in Sparschaltung arbeiten kann, sind Belastungswiderstände gebaut worden, die die ganze dem Meßbereich des Zählers entsprechende Leistung aufnehmen können. Sie bestehen aus Gitterwiderständen, die mit Asbest verwebt sind (Schniewindt-Widerstände) und werden bis zu einer Leistungsaufnahme von einigen Kilowatt hergestellt. Beim Transport sind sie zusammengelegt, für die Prüfung werden sie fächerförmig auseinandergestellt, Abb. 15. Die erzeugte Wärme wird durch Konvektion abgeführt.

Man verwendet auch wie bei Maschinenprüfungen Lampenwiderstände, insbesondere wenn man große Leistungen vernichten will; dabei wird die Wärme zum größten Teil durch Strahlung abgeführt. Ähnlich verhalten sich die Belastungswiderstände aus Eisendraht-Wider-

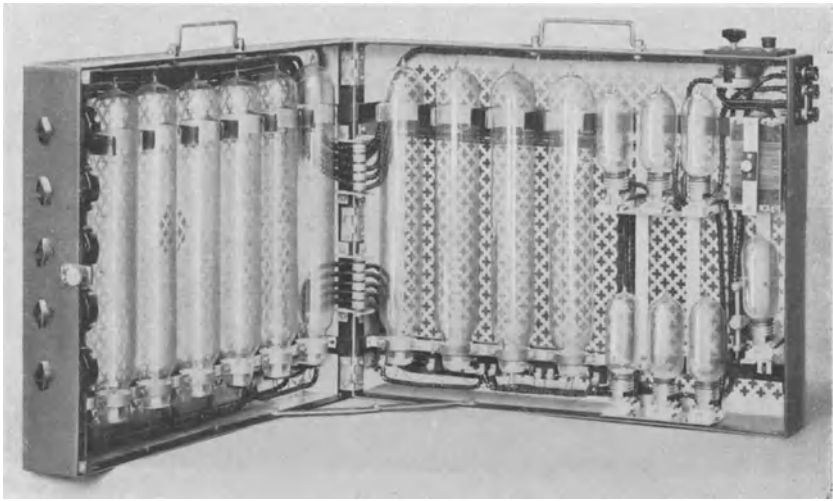


Abb. 16. Belastungswiderstand aus Eisendrahtwiderständen.

standsrohren (Variatoren), die den Vorzug haben, den einmal eingestellten Strom konstant zu halten. Einen solchen Eisendraht-Widerstand zeigt die Abb. 16.

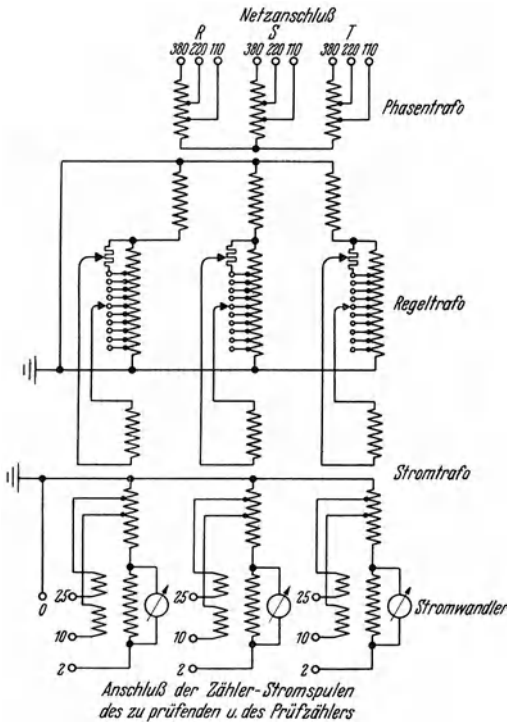


Abb. 17. Schaltung eines Belastungstransformators für Drehstrom.

Belastungstransformatoren. Für Wechsel- und Drehstrommessungen an Ort und Stelle bedient man sich besser der Belastungstransformatoren. Diese sind primär umschaltbar für 110, 220 und 380 V eingerichtet. Sekundär haben sie niedrige Spannung, so daß man die Stromspulen der zu prüfenden Zähler und die der Leistungsmesser oder Prüfzähler in Reihe an sie anschließen kann, meist haben sie Anzapfungen für verschiedene Stromstärken und für den Anlaufstrom. Der Leistungsverbrauch dieser Belastungstransformatoren ist klein, da sie nur die von den Stromspulen verbrauchte Leistung aufzubringen haben. Die Span-

nungsspulen der Zähler werden direkt an die Leitung angeschlossen. Das Schaltungsbild eines solchen Belastungstransformators für Drehstrom ist in Abb. 17 gezeichnet. Außer einem dreifachen Stromtransformator mit Anzapfungen für verschiedene Belastungen ist noch ein dreifacher Regeltransformator und drei Stromwandler zur genauen Einstellung der Stromstärken und ein Phasentransformator vorgesehen, mit dem man jede beliebige Phasenverschiebung für die Belastung einstellen kann.

d) Regelung der Frequenz.

Über die Regelung der Frequenz ist schon oben bei der Besprechung des Doppelgenerators und des Periodenumformers (S. 24) 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 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 1000 Umdrehungen in der Minute, z.B. 100, $66\frac{2}{3}$, 50, $33\frac{1}{3}$, $16\frac{2}{3}$ Hz 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 Polumschaltung 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. Bremst man nun den Rotor langsam durch eine Bremsvorrichtung, so kann man ihm 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 auf 40 und 30 Hz herunterregeln, wenn man 50 Hz Statorfrequenz hat. Ein Nachteil dieses Verfahrens 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.

e) Regelung der Phasenverschiebung¹.

Doppelgeneratoren. In solchen Laboratorien und Prüfräumen, wo man Doppelgeneratoren der oben (S. 23) 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 Drosselspule 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 nachregeln. Bei den gebräuchlichen Drosselspulen sind die Kerne mit dem oberen Teil des Joches verbunden und können durch Drehen einer Spindel mehr oder weniger in die Spulen hineingeschoben 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.

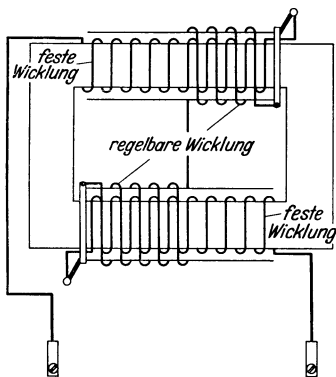


Abb. 18. Drossel mit Kraftflußregelung.

meist dadurch, daß man nach jedesmaliger Einstellung den beweglichen Kern mit Holzkeilen festklemmt.

Eine Drossel mit Kraftflußregelung nach Abb. 18 vermeidet das Brummen und gestattet eine gleichmäßige Regelung der Selbstinduktion von nahe Null bis zu einem Höchstwert. Ihr Eisenkern ist unteilbar geschlossen, die Wicklung ist in zwei gleiche Hälften geteilt. Die eine Hälfte ist auf einer fest auf dem Eisenkern sitzenden Spule, die andere Hälfte auf drehbare Spulen so aufgewickelt, daß sie teilweise gegensinnig, teilweise gleichsinnig zur festen Wicklung auf den Eisenkern wirken kann. Der Strom wird dieser regelbaren Wicklung durch Schleifringe von großem Widerstand und Bürsten zugeführt. Ist die regelbare Hälfte der Wicklung voll gegensinnig zur festen aufgewickelt, so ist die Eigeninduktivität der Drossel nahezu Null, ist sie gleichsinnig auf-

¹ POLECK, H.: Arch. techn. Messen 1935 Z 61—1 u. 2; Zusammenstellung einer Anzahl bekannter Phasenschieber.

gewickelt, so hat sie ihren Höchstwert. 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.

Beim Anschluß an Drehstrom kann man durch zyklische Vertauschung der Phasen Sprünge von 60° herstellen¹; die Drosselpulen genügen dann zur Überbrückung dieser Sprünge, so daß man jede gewünschte Phasenverschiebung erreichen kann.

Laufender Einphasenmotor.

Drosselpulen reichen aber dann nicht mehr aus, wenn man nur eine einphasige Stromquelle zur Verfügung hat und trotzdem mit sehr großen Phasenverschiebungen prüfen will.

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 Phasenlagen der Spannung.

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 Abb. 19 dargestellte Schaltung². An den Klemmen R und T der Statorwicklung des Drehstrommotors liegt die Spannung U_1 der Einphasen-Stromquelle, zwischen R und S und T und S sind Widerstände R_1 und R_2 eingeschaltet, auf denen die Schieber S_1 und S_2 verschoben werden können. An die Schieber S_1

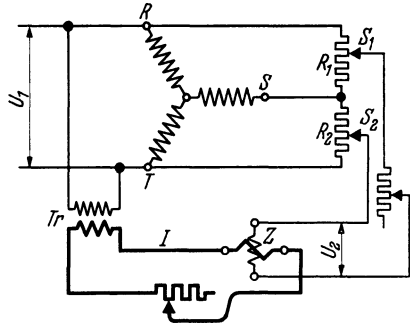


Abb. 19. Laufender Einphasen-Asynchronmotor mit Widerständen.

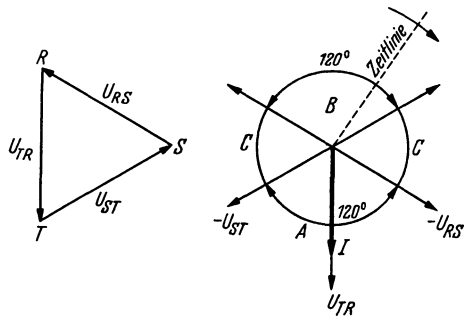


Abb. 20. Diagramm zur Schaltung Abb. 19.

¹ Vgl. S. 35.

² BRÜCKMANN, H. W. L.: Elektrizitätszähler für Gleich-, Wechsel- und Drehstrom. Leipzig: Leiner 1926 S. 294.

und S_2 wird der Spannungskreis des Zählers Z angeschlossen, sein Hauptstromkreis wird von der Spannung U_1 über den Transformator Tr gespeist. Der Strom I im Hauptstromkreis ist in Phase mit der Spannung $U_1 = U_{TR}$. Die Spannung U_2 kann durch verschiedene Stellungen

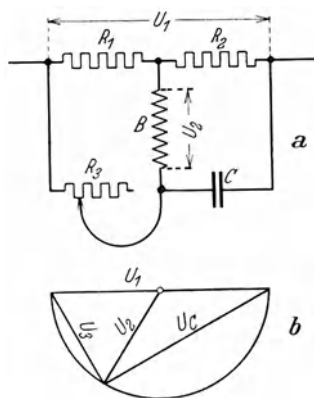


Abb. 21 a u. b. Brückenschaltung.

Brückenschaltung¹. Für kleine Belastungen bis etwa 20 VA ist die Schaltung nach Abb. 21 a brauchbar. Bei sehr kleiner Belastung B ist die Spannung U_c am Kondensator C um 90° gegen die Spannung U_3 am Regelwiderstand R_3 nach vorwärts verschoben. Man erhält dann



Abb. 22. Ruhender Drehstrommotor als Phasenschieber (Siemens-Schuckert-Werke).

Dieser ist ein festgebremster Schleifringmotor. Dem Stator wird Drehstrom zugeführt, das Drehfeld erzeugt im Rotor Spannungen

¹ DÉGUISNE: Arch. Elektrotechn. Bd. 5 (1917) S. 308. — GEYGER, M.: Helios, Lpz. 1923 S. 385. — Eine ähnliche Schaltung s. ETZ 1937 S. 324.

der Schieber S_1 und S_2 entsprechend Abb. 20 folgende Lagen einnehmen: Steht S_1 oben und S_2 unten, so ist U_2 in Phase mit U_1 , also mit U_{TR} . Schiebt man den Schieber S_2 allmählich nach oben, so durchläuft U_2 alle Phasenlagen bis $-U_{RS}$; läßt man S_2 unten stehen und schiebt S_1 allmählich nach unten, so wandert U_2 bis $-U_{ST}$. Es kann also das Bereich A durchlaufen werden, wobei U_2 von 60° Vor-eilung bis 60° Nacheilung gegenüber I verschoben werden kann. Polt man die Leitungen an S_1 und S_2 um, so kann noch das Bereich B bestrichen werden. In die Bereiche C kann die Spannung U_2 nicht kommen.

das Kreisdiagramm Abb. 21 b, wonach man sieht, daß die Phasenlage von U_2 insgesamt um 180° geändert werden kann, gegen U_1 um $\pm 90^\circ$. U_2 ändert dabei seine Größe nicht. Das Diagramm verzerrt sich, wenn B größer wird. Wählt man z. B. $R_1 = R_2 = 100 \Omega$, $C = 10 \mu F$, $R_3 = 0 \dots 600 \Omega$, so ändert sich bei konstanter Spannung U_1 und bei $B \sim 10$ VA Belastung U_2 um $\pm 10\%$ in der Größe, wenn man die Phasenlage um 90° ändert.

Ruhender Drehstrommotor.

Weitverbreitet ist der Drehstromphasenschieber nach Ab-

gleicher Frequenz, deren Phasenlage je nach der räumlichen Stellung des Rotors verschieden ist. Sie werden dem zu prüfenden Apparat durch Schleifringe und Bürsten oder durch an der Rotorwicklung befestigte Kabel, die sich mit ihr bewegen können, zugeführt. An der Achse des Rotors ist ein Handgriff angebracht, der durch eine Feder gegen einen feststehenden Ring gepreßt wird und den Rotor an der Drehung hindert. Löst man durch Anfassen des Griffes die Bremsung, so kann man den Rotor in eine beliebige Stellung bringen. Die Phasenlage der Rotorspannungen kann man um 360° gegen die der Statorspannungen ändern. Die Größe der Spannungen ändert sich je nach der Wicklungsverteilung etwas mit der Lage des Läufers.

Bei der Ausgestaltung des Phasenschiebers nach Abb. 23¹ kann man den Rotor nicht nur mit dem Griff *D* drehen, sondern auch noch axial mit dem Griff *A* verschieben. Ein unbewickeltes Eisenpaket *E* sorgt

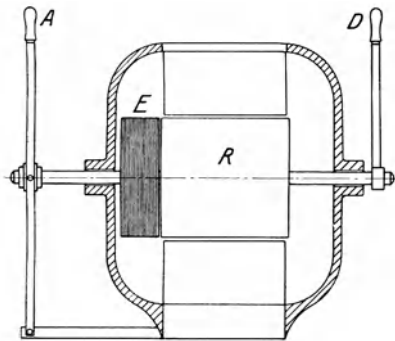


Abb. 23. Ruhender Drehstrommotor mit Spannungsregelung.

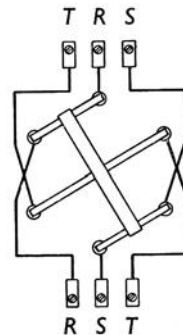


Abb. 24. Schalter für zyklische Vertauschung der Phasen.

dafür, daß das Drehfeld des Stators bei axialer Verschiebung unverändert bleibt, die Größe der im Rotor induzierten Spannung ändert sich mit der axialen Stellung und kann genau eingestellt werden.

Zyklische Vertauschung für Grobregelung. Mit einem Schalter nach Abb. 24² kann man bei Drehstrom die Phasen zyklisch vertauschen, ohne daß sich der Drehsinn ändert. In unserer Abbildung treten z. B. die drei Leitungen mit der Phasenfolge *RST* in den Schalter ein und verlassen ihn in der Folge *TRS*; bei den anderen beiden Stellungen erhält man die Phasenfolge *STR* und *RST* für die austretenden Leitungen. Die Grobregelung geht in Sprüngen von 120° Vor- oder Nach-eilung vor sich. Kann man noch die Stromrichtung umschalten (etwa durch Umschalten der Erregung des Generators), so kann man die Sprünge auf 60° verkleinern.

¹ Die Abbildung ist dem DRGM. 508524 entnommen.

² Vgl. ORLICH: ETZ 1909 S. 436.

4. Ruhende Vorrichtungen zur Konstanthaltung des Stromes oder der Spannung bei Dauerschaltungen.

Für Dauerschaltungen, die z. B. auch während der Nacht ohne Bedienung im Betrieb sein sollen, wird man ruhende Vorrichtungen bevorzugen. Einige solche Vorrichtungen sollen kurz beschrieben werden.

a) Eisenwiderstand. Wie schon oben gesagt, sind Eisendrahtwiderstände in Wasserstoffatmosphäre (sog. Variatoren) in der Lage, den Belastungsstrom auch bei stark schwankender Spannung ($\pm 20\%$ der Nennspannung) annähernd konstant zu halten. Sie werden für Stromstärken von 0,1 bis 20 A (höchstens 240 W) gebaut und sind für Gleich- und Wechselstrom gleichermaßen verwendbar. Die Regelgeschwindigkeit ist sehr gering wegen der Wärmeträgheit des glühenden Eisendrahtes.

b) Stabilisator¹. Für genaue Gleichhaltung von Gleichspannungen bei kleinen Lasten ist eine besonders ausgebildete Glimmröhre, Stabilisator genannt, geeignet. Der Stabilisator wird meist über einen Vorwiderstand an die Gleichstromquelle angeschlossen, die Glimmstrecke ist in mehrere Stufen unterteilt, so daß man z. B. bei 220 V eine Belastung von etwa 22 W regeln kann. Der Stabilisator regelt fast trägheitslos und hält die Spannung zwischen Leerlauf und Vollast um etwa

1 bis 2% und bei 10% Spannungsschwankung um 0,1 bis 0,2% konstant.

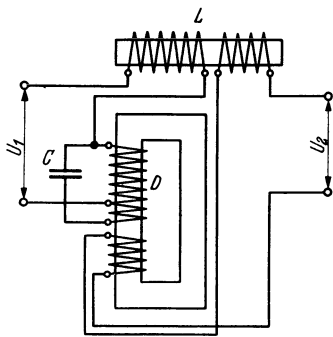


Abb. 25. Spannungsgleichhalter für Wechselstrom. Grundschaltung.

c) Spannungsgleichhalter für Wechselstrom. Eine Vorrichtung, mit der man die Spannung einer Wechselstromquelle für recht hohe Belastungen konstant halten kann, ist in Abb. 25 schematisch dargestellt. U_1 ist die schwankende Spannung der Wechselstromquelle. Sie liegt an einer Luftdrossel L und einer gesättigten Drossel D , die in Reihe geschaltet sind. Die Sekundärwicklungen beider Drosseln sind gegeneinander ge-

schaltet. Im Sättigungsgebiet, in dem die Flußkurve der hoch gesättigten Drossel geradlinig ansteigt, kann bei Vollast die Spannung an der Luftdrossel den Anstieg so gut kompensieren, daß die Spannung U_2 innerhalb eines großen Bereiches von U_1 konstant bleibt. Der Kondensator C ist im wesentlichen zur Unterdrückung allzu starker Oberwellen, die durch die gesättigte Drossel entstehen, und zur Vermeidung zu hoher Blindlast vorgesehen. Er dient aber auch zur Erweiterung des Spannungsbereiches bei Leerlauf und kleiner Last². Dadurch erreicht man

¹ KÖRÖS, L., u. R. SEIDELBACH: Helios, Lpz. Bd. 42 (1936) Nr. 34 S. 1041. — AULMANN, A.: Z. techn. Phys. 1938 Nr. 10 S. 320.

² FRIEDLÄNDER, E.: Siemens-Z. 1935 S. 177. — GEYGER, W.: Siemens-Z. 1935 S. 465. — GREINER, R.: ETZ 1936 S. 489.

die Kennlinien, die in Abb. 26 dargestellt sind. Zwischen 80 und 120% der mittleren Spannung U_{1m} regelt die Vorrichtung auf $\pm 1\%$ genau. Die Regelgeschwindigkeit ist sehr groß, sie ist fast trägheitslos. Die Kurvenform ist sehr schlecht, die dritte harmonische herrscht vor. Für Vergleichsmessungen einer großen Reihe hintereinander geschalteter Zähler wird dies aber meist nicht stören. Braucht man sinusförmige Sekundärspannung, so muß man eine Zusatzeinrichtung zum Ausbiegen der Oberwellen vorsehen. Frequenzänderungen sind von großem Einfluß; da die Netzfrequenz aber heute fast immer geregelt ist, entfällt dieser Einfluß. Die Außentemperatur hat einen verschwindend kleinen Einfluß auf die Regelgenauigkeit. Die Geräte werden für Belastungen von 10 VA bis 15 kVA gebaut, der Wirkungsgrad bei Vollast ist etwa 80%.

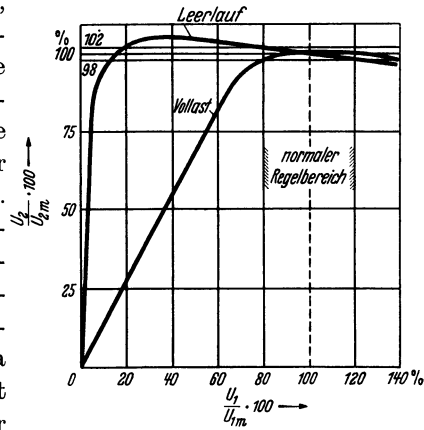


Abb. 26. Spannungsgleichhalter für Wechselstrom, Kennlinien.

III. Meßgeräte und Hilfseinrichtungen zur Messung des wirklichen Verbrauchs.

Es geht über den Rahmen unserer Aufgabe hinaus, die Meßgeräte, die man zum Prüfen braucht, im einzelnen zu beschreiben. Wer sich eingehend unterrichten will, sei auf das Studium des einschlägigen Schrifttums¹ verwiesen. Wir wollen uns damit begnügen, in kurzen Zügen eine Übersicht über diejenigen Geräte zu geben, die den Zählertechniker am meisten interessieren, und auf die Meßgenauigkeit und die möglichen Fehler hinzuweisen.

1. Kompensationsapparate.

a) **Kompensationsapparat für Gleichstrom.** Für sehr genaue Messungen, insbesondere zur Feststellung der Korrekturen der für die Prü-

¹ Verschiedene Aufsätze im Arch. techn. Messen. — PALM: Elektrische Meßgeräte und Meßeinrichtungen. Berlin: Julius Springer 1937. — SKIRL: Elektrische Messungen. Berlin u. Leipzig: Walter de Gruyter & Co. 1936. — KRÖNERT, J.: Meßbrücken und Kompensatoren. München u. Berlin: Oldenbourg 1935. — BRION u. VIEWEG: Starkstrommeßtechnik. Berlin: Julius Springer 1933. — Handbuch der Physik. Berlin: Julius Springer 1927. — KEINATH: Die Technik der elektrischen Meßgeräte. 2. Aufl. München u. Berlin: Oldenbourg 1922. — GRUHN: Elektrotechnische Meßinstrumente. 2. Aufl. Berlin: Julius Springer 1923. — Unter Bevorzugung der theoretischen Fragen: JAEGER: Elektrische Meßtechnik. Leipzig: Joh. Ambr. Barth 1922.

fung der Zähler verwendeten Meßinstrumente ist der Gleichstromkompensator ein unentbehrliches Meßgerät. Man kann mit ihm direkt Spannungen messen, Ströme nur indirekt. Die grundsätzliche Schaltung zeigt Abb. 27. B ist eine Batterie, die für den Meßwiderstand R einen konstanten Strom I , den sog. Hilfsstrom liefert, der durch den Regelwiderstand R_1 eingeregelt werden kann. Von dem Meßwiderstand R kann durch zwei Gleitkontakte ein beliebiger Teil R_x abgegriffen werden. G ist ein Galvanometer; U_N ein Weston-Normalelement (Kadmiumelement) mit verdünnter Lösung, das bei allen in Laboratoriumsräumen vorkommenden Temperaturen eine EMK. $U_N = 1,0187 \text{ V}$ hat¹. R_2 ist ein Spannungsteiler, an dem man die zu messende Spannung U_x anlegt, wenn sie größer als etwa 1,5 V ist. Kleinere Spannungen kann

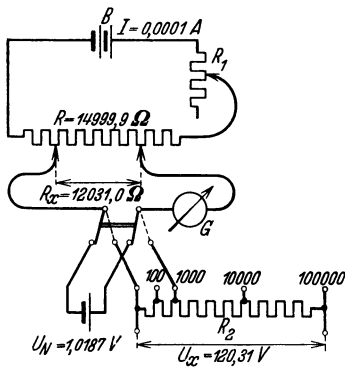


Abb. 27. Kompensator mit Spannungsteiler, Grundschiung.

man direkt kompensieren. Man verfährt folgendermaßen: Zunächst stellt man $R_x = 10187,0 \Omega$ ein, schaltet den Umschalter auf das Normalelement U_N und regelt R_1 so lange, bis das Galvanometer G Null zeigt. Der Strom in R ist dann $I = U_N : R_x = 0,1 \text{ mA}$. Nun schaltet man den Umschalter auf den Spannungsteiler, wobei in dem in Abb. 27 gezeichneten Beispiel die Spannung $U_x \cdot \frac{1000}{100000}$ an die beiden Gleitkontakte des Meßwiderstandes R zu liegen kommt. Man verschiebt die beiden Gleitkontakte auf R so lange, bis das Galvanometer G

Null zeigt und liest dann beispielsweise $R_x = 12031,0 \Omega$ ab. Dann ist die Spannung an den Gleitkontakten $R_x \cdot I = 12031,0 \cdot 0,0001 = 1,2031 \text{ V}$ und $U_x = \frac{100000}{1000} \cdot 1,2031 = 120,31 \text{ V}$.

Wenn man Ströme messen will, so legt man an die Stelle des Spannungsteilers einen Normalwiderstand R_N , der bei Durchgang des zu messenden Stromes I_x einen Spannungsabfall $U_y < 1,5 \text{ V}$ ergeben muß, damit man ihn noch kompensieren kann. Der Strom ist dann $I_x = U_y / R_N$. Normalwiderstände gibt es in allen Größen von 10000Ω bis $0,00001 \Omega$; sie dürfen bei Präzisionsmessungen höchstens bis 1 W, bei technischen Messungen bis 10 W belastet werden. Normalwiderstände neuester Ausführung kann man bis 25 W in Luft belasten. Für sehr genaue Messungen werden die Normalwiderstände in ein Petroleumbad (Temperaturausgleich) gehängt. Bei Messung von sehr großen Strömen

¹ JÄGER, W.: Elektrische Meßtechnik. S. 158. Leipzig: Joh. Ambr. Barth 1922. — SCHMIDT, R.: Arch. techn. Messen 1938 Z 41—1. — Man verwendet jetzt meist ein Normalelement mit gesättigter Lösung, weil es wesentlich konstanter ist als ein solches mit ungesättigter Lösung; es ist allerdings etwas temperaturabhängiger. Seine Spannung ist 1,0183 V.

werden höhere Belastungen zugelassen (bis zu etwa 1 kW), die entstehende Wärme muß dann durch besondere Kühlvorrichtungen abgeführt werden.

Die Leistung kann man mit dem Kompensator nur aus zwei aufeinanderfolgenden Messungen der Spannung und des Stromes bestimmen. Hat man sehr häufig Leistungsmessungen zu machen, z. B. viele Leistungsmesser für Prüfstände zu prüfen, so stellt man einen zweiten, etwas vereinfachten Kompensator auf, mit dem man nur die Spannung einstellt und konstant hält. Den normalen Kompensator benutzt man zur Messung des Stromes.

Um Kriechströme durch das Galvanometer zu vermeiden, müssen alle Teile der Meßanordnung, auch die Batterie *B*, sehr gut isoliert sein. Bei der Messung hoher Spannungen würde aber auch die beste Isolation nicht genügen, da das hochempfindliche Galvanometer schon bei sehr kleinen Strömen einen Ausschlag gibt. Man bringt deshalb die in Abb. 28 gestrichelt gezeichnete Schutzleitung an, die an die Füße aller Isolatoren angeschlossen wird und an einen solchen Punkt der Meßleitung führt, der gegen das Galvanometer nur die kleine Potentialdifferenz hat, die der zu kompensierenden Spannung entspricht. Tritt nun z. B. in der Leitung zum Spannungsteiler bei *E* ein Erdschluß auf, so kann kein Kriechstrom ins Galvanometer gelangen, weil er sich über die Schutzleitung mit dem anderen Pol der Leitung schließt.

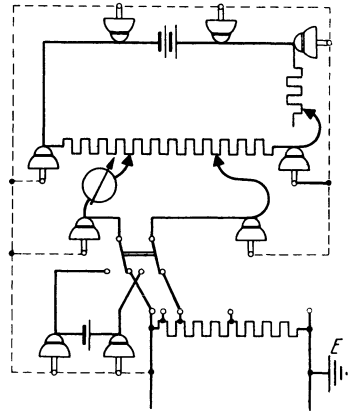


Abb. 28. Schutzleitung am Kompensator.

Eine der bekanntesten Ausführungen ist der in Abb. 29 dargestellte Kompensationsapparat von FEUSSNER¹. An *X* wird die zu messende Spannung gelegt, an *N* das Normalelement, an *G* das Galvanometer, an *B* die Hilfsbatterie. Vor das Normalelement wird zweckmäßig ein Schutzwiderstand (etwa 50 000 Ω) geschaltet, der nach der Abgleichung durch eine Taste kurzgeschlossen wird (in der Abb. nicht gezeichnet). Außer dem links sichtbaren Umschalter *U* für *N* und *X* und dem rechts zu sehenden Einschalter *S* (mit Vorwiderständen 100 000 und 10 000 Ω) für das Galvanometer ist in der Abb. 29 noch ein Taster *T*

¹ Ausführliche Literaturangaben bei DIESELHORST: Z. Instrumentenkde. 1906 S. 173, 1908 S. 1. — Außer dem Kompensationsapparat von FEUSSNER (Hersteller Otto Wolf, Berlin) sind noch andere Ausführungen bekannt, z. B. von RAPS (Siemens & Halske), RUD. FRANKE (Land- und Seekabelwerke), RUD. SCHMIDT (Hartmann & Braun), Kaskaden-Kompensator (Siemens & Halske) Arch. techn. Messen 1937 J 931—7.

vorgesehen, damit das Galvanometer nicht länger eingeschaltet bleibt, als der Beobachter zugegen ist. Der gesamte, auf 5 Dekaden verteilte Meßwiderstand beträgt nicht nur $14999,9 \Omega$, wie in Abb. 27, sondern $18999,9 \Omega$, so daß man bei einem Hilfsstrom von $0,1 \text{ mA}$ Spannungen bis etwa $1,9 \text{ V}$ kompensieren kann. Der Hilfsstrom fließt hintereinander durch den mit 100 bezeichneten Widerstand, dann durch die Kurbeln zu den unteren Teilen der mit $0,1$, 1 und 10 bezeichneten Widerstände, durch den mit 1000 bezeichneten Widerstand und die mit ihm in Reihe geschalteten Widerstände R_a und R_b , dann durch die oberen Teile der mit 10 , 1 und $0,1$ bezeichneten Widerstände zur Batterie B zurück. Durch die doppelte Anordnung der drei mit 10 , 1 und $0,1$ bezeichneten Widerstände wird erreicht, daß bei jeder

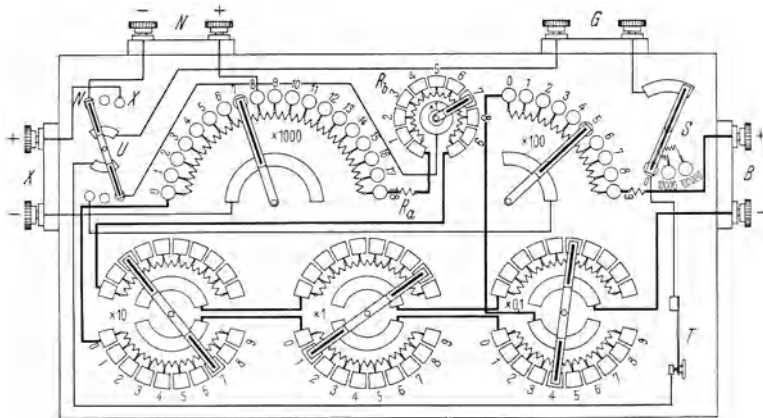


Abb. 29. Kompensator von FEUSSNER.

Kurbelstellung die oberen Teile sich zu den unteren Teilen ergänzen und somit der Gesamtwiderstand und der Hilfsstrom sich nicht ändern. Zur Kompensation dienen nur die unteren Teile der drei Widerstände und die mit 1000 und 100 bezeichneten. Letztere sind nicht doppelt ausgeführt, weil ihre Kurbeln keinen Strom führen und infolgedessen ihre Stellung den Hilfsstrom nicht beeinflußt. An die Klemmen N für das Normalelement sind bei entsprechender Stellung des Umschalters U $10 \times 1000 \Omega$ des mit 1000 bezeichneten Widerstandes, der Widerstand $R_a = 180 \Omega$ und der Kurbelwiderstand R_b in Reihe angeschlossen. Diese Widerstände dienen nur zur Einstellung des Hilfsstromes. Hat das Normalelement die Spannung $U_N = 1,0187 \text{ V}$, so stellt man die Kurbel des Widerstandes R_b auf 7 ein, der Gesamtwiderstand an N ist dann 10187Ω . Man regelt an dem nicht gezeichneten Vorwiderstand R_1 (Abb. 27) den Strom so lange, bis das Galvanometer keinen Ausschlag zeigt; dann ist der Hilfsstrom $0,1 \text{ mA}$. Diese Zusatzeinrichtung hat den Vorteil, daß man zwischen den einzelnen Messungen öfters

den Meßstrom durch Umlegen des Umschalters U auf die Stellung N überprüfen kann, ohne die Kurbelstellungen des Meßwiderstandes ändern zu müssen. Alle Widerstände müssen sehr genau abgeglichen sein (es ist dies bis auf 0,01% möglich) und ihre Werte dürfen sich nicht mit der Zeit ändern.

Als Galvanometer genügt für normale Meßzwecke ein Drehspulgalvanometer mit einer Stromkonstanten von 10^{-8} A für 1 mm Ausschlag des Lichtzeigers in 1 m Skalenabstand.

Als Normalelement empfiehlt sich die Ausführung nach v. KRUKOWSKI, bei der das Normalelement in eine Thermosflasche eingesetzt ist, die den Wechsel der Außentemperatur vom Element fernhält; dadurch ist eine sehr große Konstanz seiner Spannung gewährleistet.

b) Kompensationsapparat für Wechselstrom. Von den vielen Vorschlägen und Ausführungen für Wechselstromkompensatoren¹ soll hier nur derjenige kurz beschrieben werden, der auf dem gleichen Prinzip beruht wie der Gleichstromkompensator². Bei ihm benutzt man als Nullinstrument am besten ein abstimmbares Vibrationsgalvanometer³. Den konstanten Hilfsstrom muß man mit einem hoch empfindlichen elektrodynamischen oder Hitzdrahtstrommesser einstellen. Schließlich ist noch ein Phasenschieber erforderlich für die Einstellung der Phasengleichheit zwischen der zu messenden Wechselspannung oder dem zu messenden Wechselstrom und dem den Apparat dauernd durchfließenden Hilfsstrom. Die Handhabung des Wechselstromkompensators ist nicht ganz so einfach wie die des Gleichstromkompensators, da man die Abgleichung der Phasenverschiebung und der Spannung wechselseitig 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 Spannungsabfalls bei Wechselstromzählern, zur Messung der Spannung an Meßspulen für die Bestimmung der Wechselfelder, zur Messung der Strömung in der Scheibe.

¹ GEYGER, W.: Wechselstromkompensatoren. Arch. techn. Messen 1932—1938 J 94—1 bis J 94—14.

² v. KRUKOWSKI, W.: Vorgänge in der Scheibe eines Induktionszählers und der Wechselstromkompensator als Hilfsmittel zu deren Erforschung. Berlin: Julius Springer 1920. Dort sind auch die Fehlerquellen ausführlich erörtert.

³ SCHERING u. SCHMIDT: Arch. Elektrotechn. 1912 S. 254—Z. Instrumentenkde. 1918 S. 1 — ETZ 1918 S. 410. Im Prinzip gleiche Instrumente werden von Hartmann & Braun und Siemens & Halske hergestellt. — RUMP u. SCHMIDT: DRP. 625272. Bei diesem Galvanometer ist die Weicheisennadel durch eine hochmagnetisierte Stahlnadel ersetzt, wodurch die Empfindlichkeit sehr gesteigert wird (160 mm Ausschlag für 10^{-6} A bei 1 m Skalenabstand).

2. Zeiger-Meßgeräte¹.

a) **Drehspul-Meßgeräte für Gleichstrom.** Für Präzisionsmessungen an Gleichstromzählern benutzt man zweckmäßig Drehspul-Meßgeräte. Sie haben den Vorzug einer proportionalen Skala, da ihr Drehmoment durch Zusammenwirken des in der Drehspule fließenden Stromes mit dem homogenen Feld des permanenten Magnets zustande kommt. Bei vorsichtiger Behandlung bleiben sie unverändert, so daß man sie nur etwa alle Jahre nachzuprüfen braucht.

Bei Spannungsmessern kann man das Meßbereich durch Vorwiderstände im Instrument oder außerhalb desselben bis auf etwa 1000 V erweitern. Da die Vorwiderstände sehr genau abgeglichen werden können (auf etwa $\pm 0,05\%$) und aus temperaturfreiem Material hergestellt sind, bleibt die Meßgenauigkeit auch unter Anwendung von Vorwiderständen erhalten (vgl. unten Kap. III, 3).

Für Strommesser erhält man verschiedene Meßbereiche durch Parallelschaltung von Nebenwiderständen, die für alle Stromstufen den gleichen Spannungsabfall haben. Auch diese müssen genau abgeglichen sein, damit man die gewünschte Meßgenauigkeit beibehalten kann.

Nach den Regeln für Meßgeräte des VDE ist für Drehspulmeßgeräte ein Höchstfehler von 0,2% vom Endwert des Meßbereichs und für getrennte Vor- und Nebenwiderstände ein Höchstfehler von 0,1% zugelassen. Gewöhnlich prüft man das Meßgerät über die ganze Skala mit dem Gleichstromkompensator auf 0,1 Teilstrich genau und gibt ihm eine Korrektions-tabelle bei.

Die Beeinflussung durch äußere magnetische Felder muß man bei der Messung beachten. Man kann sie z. B. dadurch feststellen, daß man das angeschlossene Meßgerät um 180° dreht und feststellt, ob sich der Ausschlag gegenüber der Normallage geändert hat. Auch muß man bei Messung mit mehreren Geräten diese weit genug voneinander aufstellen, damit sie sich nicht gegenseitig beeinflussen.

Die Temperaturabhängigkeit ist bei Spannungsmessern wegen der Verwendung von Vorwiderständen aus temperaturfreiem Material sehr klein, bei Strommessern wird durch Kompensationsschaltungen der Temperatureinfluß fast vollkommen beseitigt.

b) **Dreheisen - Meßgeräte für Gleich- und Wechselstrom.** Bei den Dreheisen-Meßgeräten wirkt das Feld einer stromdurchflossenen Spule auf ein drehbar gelagertes, besonders geformtes Eisenstück aus einer hochwertigen Eisenlegierung ein, das mit einem Zeiger versehen ist. Dreheisen-Meßgeräte werden überwiegend als Schalttafelgeräte gebaut, können aber heute auch als Präzisionsinstrumente für Laboratorien

¹ Über die zulässigen Anzeigefehler vgl. Regeln für Meßgeräte. ETZ 1922 S. 290 u. 858. Neuer Entwurf ETZ 1938 S. 481. Endgültige Fassung ETZ 1938 S. 1211 u. 1225. — Vgl. auch H. B. BROOKS: Amer. Inst. Electr. Engrs. Febr. 20, 1920.

mit fast linearer Skala hergestellt werden. Sie sind gleicherweise für Gleich- und Wechselstrom und als Strom- und Spannungsmesser verwendbar. Zu beachten ist bei Gleichstrom der Hysteresefehler (bei guten Instrumenten 0,1%); der Frequenzeinfluß bei Wechselstrom ist infolge der Verwendung der hochwertigen Eisenlegierung bei neueren Meßgeräten zu vernachlässigen. Der Fremdfeldeinfluß ist bei ungeschirmten Meßgeräten groß, bei Präzisionsmeßgeräten wird er durch astatistische Meßwerke oder Schirmung fast vollkommen beseitigt; der Temperatureinfluß ist gering bei Strommessern, weil die Spule ohne Anschluß an Nebenwiderstände direkt vom Meßstrom durchflossen wird, bei Spannungsmessern muß der Vorwiderstand groß sein im Verhältnis zur Kupferwicklung.

e) Thermische Meßgeräte (Hitzdraht-Meßgeräte) für Gleich- und Wechselstrom. Thermische Meßgeräte 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 des Nullpunktes, jedoch kann man diese durch eine bei neueren Fabrikaten angebrachte Nullpunktstellung vor jeder Messung bequem beheben. Ein großer Vorzug der Hitzdraht-Meßgeräte ist der, daß sie gleicherweise für Gleich- und Wechselstrom verwendet werden können und von der Frequenz vollkommen unabhängig sind, solange sie keine hohen Werte erreicht. Hitzdraht-Meßgeräte, die große Ströme direkt messen, sind wegen der großen Eigenfelder frequenzabhängig. Gegen nicht zu starke Fremdfelder sind Hitzdraht-Meßgeräte unempfindlich; gegen den Einfluß der Raumtemperatur sind sie mit einer Kompensationseinrichtung versehen. Man kann mit einem Anzeigefehler von etwa 0,4% des Endwertes des Meßbereiches rechnen.

d) Gleichrichter-Meßgeräte für Wechselstrom. Vier Kupferoxydul-(Kuprox-) Gleichrichter sind in der GRAETZschen Doppelwegschaltung in einer Brücke zusammengebaut, in deren Diagonale ein hoch empfindliches Drehspulmeßgerät liegt. Die beiden Halbwellen des Wechselstromes wirken daher auf das Drehspul-Meßgerät in gleicher Richtung. Die Empfindlichkeit der mit Wechselstrom zu prüfenden Geräte ist sehr groß (Meßbereich von 1 mA an für Strommesser, von 0,1 V an für Spannungsmesser). Gegen äußere Felder sind sie wegen der verwendeten Drehspul-Meßgeräte empfindlich, der Temperaturfehler muß beachtet werden (etwa 1,5% je 10° C Temperaturänderung). Die Wellenform normaler Wechselströme beeinflußt die Angaben so gut

wie gar nicht. Der Anzeigefehler beträgt etwa 1% vom Endwert des Meßbereiches.

e) **Elektrostatische Spannungsmesser für Gleich- und Wechselstrom.** Eine feststehende Platte wird mit dem einen Potential, eine bewegliche, mit einem Zeiger versehene, mit dem anderen Potential einer Leitung verbunden. Die zwischen beiden Platten auftretende Kraft stellt den Zeiger ein. Elektrostatische Spannungsmesser sind für Laboratoriumszwecke oft deshalb sehr geeignet, weil sie so gut wie keinen Stromverbrauch haben (in der Größenordnung von 10^{-6} A bei Vollausschlag und 50 Hz) und vollkommen frequenzunabhängig sind. Der tragbare elektrostatische Spannungsmesser von H. & B.¹ hat von 10 bis 150 V eine geradlinige Skala. Da die Kräfte, die auf das bewegliche Organ einwirken, sehr klein sind, ist dieses meist an einem dünnen Metallband aufgehängt. Während des Transports muß das bewegliche Organ festgestellt werden. Vor elektrischen Fremdfeldern muß man die Geräte natürlich schützen. Gegen Temperatureinflüsse sind sie unempfindlich. Der Meßfehler kann sehr klein gehalten werden.

f) **Thermoumformer zur Messung kleiner Wechselströme.** Für die Messung sehr kleiner Wechselströme kann man zweckmäßig Thermokreuze in Verbindung mit hochempfindlichen Gleichstrominstrumenten (Zeigergalvanometern) verwenden². Sie beruhen darauf, daß durch die Stromwärme des Wechselstromes die Lötstelle eines Thermoelements erwärmt wird und der Thermostrom mit einem Gleichstrominstrument gemessen wird. Die Instrumente prüft man am besten mit Wechselstrom, indem man sie mit einem hohen induktionsfreien Widerstand hintereinanderschaltet. Die Wechselspannung an den freien Enden mißt man mit einem Präzisionsspannungsmesser und berechnet den Strom im Thermoelement nach dem Ohmschen Gesetz³. Prüft man mit kommutiertem Gleichstrom, so muß man die durch Peltiereffekt entstehenden kleinen Fehler mit in Kauf nehmen. Die Empfindlichkeit ist abhängig von der Konstruktion und Anordnung der Thermoelemente, die Meßgenauigkeit auch von der des benutzten Gleichstrominstrumentes.

g) **Elektrodynamische Spannungs- und Strommesser.** Eine bewegliche, mit einem Zeiger verbundene Spule befindet sich in dem Feld einer feststehenden Spule und wird bei Stromdurchgang durch elektrodynamische Wirkung aus ihrer Nullage abgelenkt. Durch eine an der beweglichen Spule angebrachte Torsionsfeder wird dem elektrodynamischen Drehmoment das Gleichgewicht gehalten, so daß der Zeiger bei einem bestimmten Ausschlagwinkel stehenbleibt.

¹ PALM, A.: Z. techn. Phys. Bd. 15 (1934) S. 117.

² SCHERING: Z. Instrumentenkde. 1912 S. 69 u. 101. — Vgl. auch GOSSEN: ETZ 1910 S. 143. — KÖHLER, J. W. L.: Arch. techn. Messen 1938 J 712—4.

³ Vgl. auch W. HOHLE u. W. RUMP: Phys. Z. 1938 S. 169.

Beim Spannungsmesser sind beide Spulen, die feste und die bewegliche, hintereinander geschaltet, beim Strommesser ist die bewegliche Spule an einen Widerstand im Stromlauf der festen Spule angeschlossen. Für beide Meßgeräte ist der Skalenverlauf quadratisch. Der Anzeigefehler ist etwa 0,2% vom Endwert des Meßbereiches. Der Fremdfeld-einfluß ist zu beachten und kann dadurch festgestellt werden, daß man hintereinander zwei Messungen mit um 180° in seiner horizontalen Lage gedrehtem Meßgerät macht.

Will man Gleichspannungen oder Gleichströme messen, so muß man zwei Messungen hintereinander mit verschiedenen Stromrichtungen machen und den arithmetischen Mittelwert des Ausschlages nehmen (Erdfeld). Auf diese Weise prüft man diese Meßgeräte auch mit dem Gleichstromkompensationsapparat.

Beim Spannungsmesser werden zur Beseitigung der Frequenz- und Temperaturabhängigkeit temperaturunabhängige Widerstände vor die Spulen geschaltet. Das kleinste Spannungsmessbereich ist etwa 15 V, am meisten werden die Spannungsmesser für zwei Meßbereiche 150 und 300 V verwendet. Für die Messung von höheren Spannungen kann man Vorwiderstände benutzen, heute verwendet man aber meist Spannungswandler mit einer Niederspannung von 100 oder 110 V (s. S. 52).

Strommesser mit direkter Stromzuführung werden am besten nur für Meßbereiche bis 5 A verwendet, weil bei höheren Stromstärken die Felder der Zuleitungen leicht stören können, wenn diese nicht eng beieinander liegen. Für die Messung höherer Stromstärken verwendet man Stromwandler.

h) Elektrodynamische Leistungsmesser. Die Anordnung der Spulen ist die gleiche wie bei den Spannungs- und Strommessern, die feste Spule wird vom Hauptstrom, die bewegliche von einem der Spannung proportionalen Strom durchflossen. Der Ausschlagwinkel ist proportional der Leistung, die Skalenteilung ist eine lineare.

Die elektrodynamischen Leistungsmesser älterer Bauart, die weder ein astatisch geschaltetes Doppelmeßwerk haben noch magnetisch geschirmt sind, können für Gleichstrom nur dann verwendet werden, wenn man zwei Messungen mit entgegengesetzten Stromrichtungen im Strom- und Spannungskreis macht. Der arithmetische Mittelwert aus diesen beiden Messungen ist dann der zu verwendende Wert, der unabhängig vom Erdfeld ist. Auf diese Weise prüft man die Instrumente mit Hilfe des Gleichstromkompensationsapparates.

Bei Wechselstrom mißt man mit ihnen die effektive Leistung $E \cdot J \cdot \cos \varphi$. Störende äußere Felder muß man vermeiden. Die Temperaturabhängigkeit ist durch Verzweigungsschaltungen im Spannungskreis beseitigt. Der durch die Eigeninduktivität der Spulen auftretende Fehlwinkel zwischen Strom und Spannung ist bei neueren Geräten kompensiert, bei älteren Ausführungen muß man ihn gegebenenfalls

berücksichtigen, wenn man den Leistungsmesser mit Gleichstrom geprüft hat. Es empfiehlt sich dann immer noch ein Vergleich bei Wechselstrom mit einem anderen Leistungsmesser, von dem man sicher ist, daß er keinen Fehlwinkel hat. Die elektrodynamischen Leistungsmesser sind 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 100 bis 150 V haben. Im Spannungskreis kann man das Meßbereich natürlich auch durch Vorwiderstände vergrößern. Den Anzeigefehler kann man mit höchstens 0,2% des Endwerts des Meßbereichs annehmen.



Abb. 30. Astaticher Leistungsmesser.

Astatiche Leistungsmesser, bei denen zwei gleiche Meßwerke übereinander sitzen, wobei sowohl Strom- als auch Spannungsspulen in entgegengesetzter Richtung von den Strömen durchflossen werden, sind von äußeren homogenen Feldern unabhängig. Sie werden heute vielfach verwendet (Abb. 30).

Astatiche Leistungsmesser werden auch als Torsionsgeräte¹ mit Fadenaufhängung der Spannungsspulen ausgebildet und sind als Promille-Wattmeter

bezeichnet worden. Wenn man die nötige Sorgfalt anwendet, kann man mit ihnen sehr genaue Messungen machen.

Zur Messung sehr kleiner Leistungen, wie z. B. des Eigenverbrauchs von Wechselstromzählern, hat man sehr empfindliche Geräte mit Fadenaufhängung für die Drehspule bis zu einer Empfindlichkeit von 0,03 W für einen Skalenteil gebaut. Da diese Meßgeräte gegen äußere Felder sehr empfindlich sind, kann man sie kaum mit Gleichstrom prüfen. Man nimmt die Prüfung besser mit Wechselstrom vor, indem man die Stromspule mit einem sehr hohen induktionsfreien Widerstand von bekannter Größe in Reihe schaltet und die Kombination an die Spannungsspule und einen Präzisionsspannungsmesser anschließt. Diese Meßgeräte sind durch solche mit Spannbandaufhängung der Drehspule verdrängt worden; durch astatiche Bauart wird der Fremdfeldeinfluß beseitigt.

i) Elektrodynamische Blindleistungsmesser. Elektrodynamische Blindleistungsmesser haben die gleiche Anordnung des Meßwerks wie die beschriebenen Wirkleistungsmesser, jedoch sind besondere Mittel vorgesehen, damit der Strom in der Spannungsspule nicht phasengleich

¹ Arch. techn. Messen 1933 F 29, J 741—8.

mit der Spannung ist, sondern ihr um 90° nacheilt¹. Die Abgleichung stimmt nur für eine Frequenz. Besonders empfindlich gegen Änderung der Frequenz ist das Meßgerät bei großem Leistungsfaktor, weil sich dann die Winkeländerung zwischen der Spannung und dem Strom in der Spannungsspule bemerkbar macht. Die Einschaltdauer des Spannungskreises muß lang genug gewählt werden. Der Einfluß der Außentemperatur kann durch ähnliche Mittel wie beim Wirkleistungsmesser kompensiert werden.

k) Eisengeschlossene elektrodynamische Leistungsmesser. Die eisengeschlossenen Leistungsmesser² sind grundsätzlich genau so geschaltet wie die eisenlosen. Der magnetische Kreis der Hauptstromspule ist aber zum großen Teil in Eisen geschlossen. Diese Meßgeräte haben den großen Vorzug, daß sie von äußeren, auch inhomogenen Feldern nicht beeinflusst werden können, dagegen erreicht man mit ihnen nicht die Genauigkeit der eisenlosen Geräte, weil der Winkelfehler und der Fehler durch die Krümmung der Magnetisierungskurve nicht ganz beseitigt werden kann.

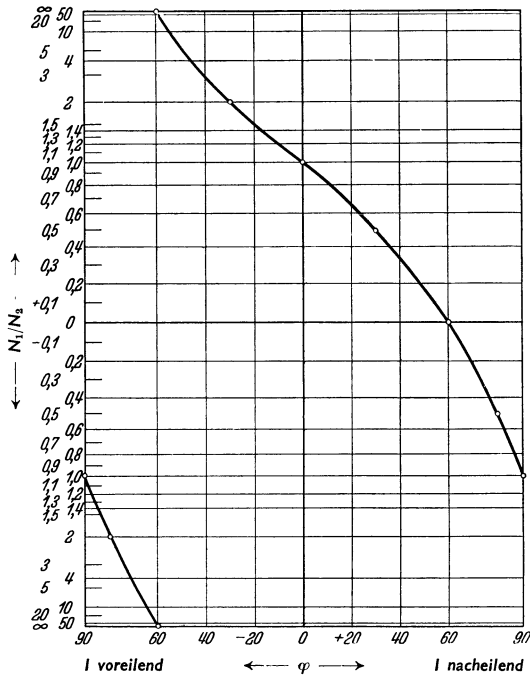


Abb. 31. Leistungsfaktor aus dem Verhältnis der Angaben der beiden Leistungsmesser bei Zweileistungsmesserschaltung.

l) Phasenmesser. Hat man sinusförmigen Verlauf des Wechselstromes, so kann man die Phase aus dem Leistungsfaktor ohne 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 zwei Leistungsmessern (s. S. 85), deren Angaben N_1 und N_2 sind, entnimmt man den Wert des Leistungsfaktors den Kurven der Abb. 31, deren Werte nach der bekannten Gleichung $\text{tg } \varphi = \frac{N_1 - N_2}{N_1 + N_2} \cdot \sqrt{3}$ berechnet sind. Die Gleichung gilt nur für gleiche Belastung aller drei Phasen.

¹ ZWIERINA, O.: ETZ 1929 S. 1844.

² ZWIERINA, O.: Elektrotechn. u. Masch.-Bau 1935 S. 589.

Hat man die Stromspulen der zwei Leistungsmesser in den Phasen R und T liegen, während ihre Spannungsspulen an $R-S$ und $T-S$ angeschlossen sind, so zeigt ein dritter Leistungsmesser mit der Stromspule in Phase S einen dem Leistungsfaktor proportionalen Ausschlag, wenn man seine Spannungsspule an $S-0$ anschließt. Die in Abb. 31 dargestellte Kurve kann man auch durch eine Skala¹ oder durch eine Fluchtlinientafel² ersetzen.

Bequemer ist es, den Leistungsfaktor direkt mit einem sog. Phasenmesser zu bestimmen. Die Phasenmesser bestehen meist aus mehreren auf einer Achse befestigten Drehspulen, denen Widerstände und Selbstinduktionen vorgeschaltet sind³. 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 geprüft wurde.

m) Zungenfrequenzmesser. Sehr brauchbar für Laboratoriumszwecke und für Messungen an Ort und Stelle sind die Zungenfrequenzmesser. Sie beruhen darauf, daß die Eigenfrequenzen einer Reihe von Stahlzungen entsprechend den zu messenden Frequenzen abgestimmt sind. Die Stahlzungen werden durch Elektromagnete, die von dem zu messenden Wechselstrom erregt werden, in Schwingungen gebracht. 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.

n) Zeigerfrequenzmesser mit einem Zeiger⁴. 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.

o) Zeigerfrequenzmesser mit zwei sich kreuzenden Zeigern⁵. Zeigerfrequenzmesser mit zwei sich kreuzenden Zeigern sind öfters gebaut worden und beruhen darauf, daß zwei dynamometrische Meßgeräte, welche in bestimmten Schaltungen mit Widerständen und Selbstinduktionen verbunden sind, bei verschiedenen Frequenzen verschiedene Ausschläge geben. Der Kreuzungspunkt beider Zeiger wird dabei zur Mes-

¹ SCHMITZ, L.: ETZ 1923 S. 904.

² LANGREHR, H.: ETZ 1923 S. 178.

³ Vgl. BRION-VIEWEG: Starkstrommeßtechnik, S. 105.

⁴ Vgl. MARTIENSSEN: ETZ 1910 S. 204 — Elektr. Kraftbetr. Bahn. S. 372 — ferner KEINATH: ETZ 1916 S. 271.

⁵ JOLY: C. R. Acad. Sci., Paris Bd. 150 (1910) S. 826 — Électricien (2) Bd. 39 (1910) S. 193. — FERRIÉ: Lumière Electr. Bd. 12 (1910) S. 427 — ETZ 1911 S. 474.

sung der Frequenz benutzt. An Stelle der dynamometrischen Meßgeräte kann man auch zwei Hitzdrahtstrommesser verwenden, von denen dem einen ein Widerstand, dem anderen eine Selbstinduktion vorgeschaltet ist.

3. Verwendung der Vorrichtungen zur Erweiterung der Meßbereiche zusammen mit den Meßgeräten.

a) **Vorwiderstände.** Die Strom-, Spannungs- und Leistungsmesser werden meist für alle Hauptstrommeßbereiche und die gebräuchlichsten Spannungsmeßbereiche geprüft. Will man Messungen in Spannungsmeßbereichen machen, für die man das Meßgerät nicht zusammen mit den Vorwiderständen geprüft hat, so muß man die Werte für die zur Erweiterung des Meßbereiches benutzten Vorwiderstände genau kennen. Dann kann man die von der Prüfung 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

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

wobei α_{\max} der größte Zeigerausschlag und U_{\max} der Sollwert der größten Spannung für das betrachtete Meßbereich ist. Für dieses Meßbereich habe der Spannungsmesser den Widerstand r_1 . Dann gilt für einen beliebigen Ausschlag

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

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

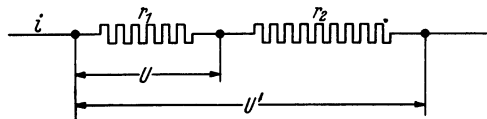


Abb. 32. Verwendung der Vorwiderstände.

Das Meßbereich wird nun dadurch vergrößert, daß man nach Abb. 32 einen Vorwiderstand r_2 zu r_1 zufügt. Für den gleichen Ausschlag α fließt der gleiche Strom i durch $r_1 + r_2$. Es ist

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

Es folgt

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

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

Für das neue Meßbereich muß man also die Ablesung α erst mit der vom ersten Meßbereich bekannten Skalenkorrektion 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 U' kann man dann auf die Form bringen

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

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.

Zahlenbeispiel:

$$r_1 = 1002 \Omega, \quad R_1 = 1000 \Omega, \quad \delta_1 = 0,2\%,$$

$$r_2 = 4006 \Omega, \quad R_2 = 4000 \Omega, \quad \delta_2 = 0,15\%,$$

$$c = 0,2 \text{ für das erste Meßbereich,}$$

$$c_s = c \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1,0$$

$$\delta = c \cdot \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{\delta_2 - \delta_1}{1 + \delta_1} = 0,2 \cdot 4 \cdot \frac{-0,05\%}{1,002}$$

$$= -0,04\% \text{ für das erweiterte Meßbereich.}$$

Bei einer Ablesung $\alpha = 122,3$ Teilstrichen sei die Skalenkorrektion

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

$$\alpha + k = 122,6$$

$$U' = 1,0 \cdot 122,6 - \frac{0,04}{100} \cdot 122,6.$$

$$= 122,6 - 0,05 \text{ V.}$$

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

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

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 Prüfung vornehmen, so daß also nur für die verschiedenen Spannungsmebereiche eine Erweiterung durch Vorwiderstände in Frage kommt.

b) Nebenwiderstände. Umständlicher werden die Korrekturen für die Erweiterung des Meßbereiches eines Instrumentes durch Nebenwiderstände. Die Überlegungen brauchen nur für Strommesser für Gleichstrom gemacht zu werden, da man bei Wechselstrommeßgeräten

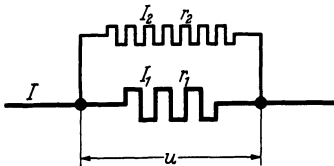


Abb. 33a.

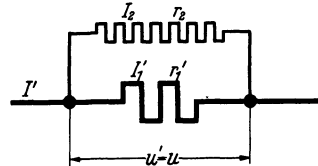


Abb. 33b.

Abb. 33 a u. b. Verwendung der Nebenwiderstände.

keine Nebenschlüsse anwendet. Abb. 33a zeigt das Schaltungsschema für ein Meßbereich, Abb. 33b dasjenige für eine Erweiterung des Meßbereiches durch Ersatz des Widerstandes r_1 durch den Widerstand r'_1 . Es sei wieder die Konstante definiert durch die Gleichung

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

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

Für ein und denselben Ausschlag α gelten in den beiden durch die Abb. 33a und b gekennzeichneten Meßbereichen die Gleichungen

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

$$c' \cdot (\alpha + k) = I' = u \cdot \frac{r'_1 + r_2}{r'_1 \cdot r_2}.$$

$I_2 = u/r_2$, also auch u , ist in beiden Fällen gleich. Es folgt

$$I' = c \cdot (\alpha + k) \cdot \frac{r_1}{r'_1} \cdot \frac{r'_1 + r_2}{r_1 + r_2}.$$

Bringt man die Gleichung auf die Form

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

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.

¹ Vgl. ORLICH: Helios, Lpz. 1909 S. 373.

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 Skalenkorrektur k' für das neue Meßbereich zu erhalten, kann man die Gleichung für I' wieder auf die Form bringen

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

Es ist dann

$$k' = k + \left[\left(\delta_1 - \delta'_1 \frac{R_1 + r_2}{R'_1 + r_2} \right) \cdot (\alpha + k) \right] : \left[(1 + \delta'_1) \left(1 + \delta_1 + \frac{r_2}{R_1} \right) \frac{R_1}{r_2} \right].$$

Zahlenbeispiel:

$$\begin{aligned} R_2 = r_2 &= 10,02, & c &= 0,01, \\ R_1 &= 0,5260, & r_1 &= 0,5360, & \delta_1 &= +1,901\%, \\ R'_1 &= 0,050227, & r'_1 &= 0,05000, & \delta'_1 &= -0,452\%, \end{aligned}$$

$$c_s = c \cdot \frac{R_1}{R'_1} \cdot \frac{R'_1 + r_2}{R_1 + r_2} = 0,01 \cdot \frac{0,5260}{0,050227} \cdot \frac{10,07023}{10,5460}$$

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

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

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

bereich.

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

$$\begin{aligned} k &= -0,3 \text{ Teilstriche.} \\ \alpha + k &= 142,1 \end{aligned}$$

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

und

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

c) **Strom- und Spannungswandler.** Bei Verwendung von Strom- und Spannungswandlern müssen sowohl die Strom- und Spannungsfehler als auch die Fehlwinkel berücksichtigt werden. Sind in Abb. 34 U_1 die Primärspannung, U_2 die Sekundärspannung des Spannungswandlers, I_1 der Primärstrom, I_2 der Sekundärstrom des Stromwandlers, δ_U und δ_j die Fehlwinkel des Spannungs- und Stromwandlers, so

ist bei einer Phasenverschiebung φ zwischen den Größen U_1 und I_1 die zu messende Leistung

$$N_1 = U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi.$$

Der an die Sekundärwicklungen der Wandler angeschlossene Leistungsmesser zeigt

$$N_2 = U_2 \cdot I_2 \cdot \cos(\varphi + \delta_U - \delta_I).$$

Bei der Definition des Spannungs- und Stromfehlers auf S. 9 sind die Sekundärspannung und der Sekundärstrom mit dem Nennwert des Übersetzungsverhältnisses multipliziert; das bedeutet, daß die Fehler auf das Übersetzungsverhältnis 1:1 bezogen werden. Nimmt man dies an, so kann man auch den Gesamtfehler der Leistung auf die Übersetzungsverhältnisse 1:1 beziehen und erhält dafür

$$F = \frac{N_2 - N_1}{N_1} = \frac{N_2}{N_1} - 1 = \frac{U_2 \cdot I_2 \cdot \cos(\varphi + \delta_U - \delta_I)}{U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi} - 1.$$

Nun ist

$$\frac{U_2 - U_1}{U_1} = F_U = \text{Spannungsfehler, also } \frac{U_2}{U_1} = F_U + 1$$

und ebenso

$$\frac{I_2 - I_1}{I_1} = F_I = \text{Stromfehler, also } \frac{I_2}{I_1} = F_I + 1,$$

ferner erhält man nach einer Umrechnung

$$\frac{\cos(\varphi + \delta_U - \delta_I)}{\cos \varphi} = \cos(\delta_U - \delta_I) - \sin(\delta_U - \delta_I) \cdot \operatorname{tg} \varphi.$$

Setzt man bei der weiteren Ausrechnung $\cos(\delta_U - \delta_I) = 1$; $F_U \cdot F_I = 0$; $1 + F_U + F_I = 1$ als Multiplikator vor $\sin(\delta_U - \delta_I) \cdot \operatorname{tg} \varphi$, so erhält man schließlich

$$F = F_U + F_I - \sin(\delta_U - \delta_I) \cdot \operatorname{tg} \varphi.$$

Nun ist

$$\sin(\delta_U - \delta_I) = \frac{\pi}{10800} \cdot (\delta_U - \delta_I) = 0,000291 (\delta_U - \delta_I),$$

wenn man δ_U und δ_I in Minuten einsetzt.

So erhält man schließlich den Fehler in Prozent, wenn man auch F_U und F_I in Prozent einsetzt und, wie eben gesagt, δ_U und δ_I in Minuten:

$$F = F_U + F_I - 0,0291 (\delta_U - \delta_I) \operatorname{tg} \varphi.$$

Wenn δ_I größer als δ_U ist, kann man auch, wie dies oft geschieht, schreiben:

$$F = F_U + F_I + 0,0291 (\delta_I - \delta_U) \cdot \operatorname{tg} \varphi.$$

Um bequem arbeiten zu können, trägt man sich meist für jedes Meßbereich des Wandlers den Fehler und den Fehlwinkel in Abhängig-

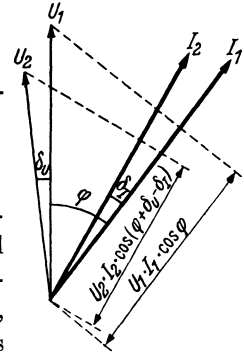


Abb. 34. Diagramm des Strom- und Spannungswandlers.

keit von den primären Größen auf. Man erhält so eine Kurvenschar für die verschiedenen Bürden der Wandler.

Zahlenbeispiel: $\cos \varphi = 0,5, \quad \operatorname{tg} \varphi = 1,732.$

$$F_U = -0,33\%, \quad \delta_U = +10 \text{ min,}$$

$$F_I = +0,21\%, \quad \delta_I = +6 \text{ min,}$$

$$F = -0,33 + 0,21 - 0,0291(10 - 6) \cdot 1,732$$

$$= -0,33 + 0,21 - 0,202$$

$$= -0,32\%.$$

Man sieht daraus, daß sich die Fehler zum Teil gegeneinander aufheben. Dies ist natürlich nicht immer der Fall, sondern hängt von den jeweiligen Eigenschaften der Wandler ab.

4. Hilfsvorrichtungen zur Bestimmung der Stromrichtung und der Phase.

a) **Drehspul-Meßgerät.** Bei Gleichstromleitungen ist man oft im ungewissen, ob man den positiven oder den negativen Leiter vor sich hat. Hat man ein Drehspul-Meßgerät 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 sog. 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 Abb. 35 sehr einfach herzustellen.

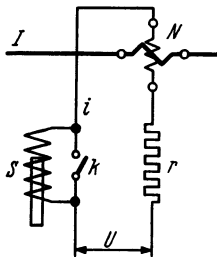


Abb. 35. Selbstinduktionsspule zur Prüfung des Phasensinnes.

Die Stromspule eines Leistungsmessers N wird vom Strom I durchflossen, die Spannungsspule vom Strom i . Außer dem Vorwiderstand r schaltet man der Spannungsspule noch eine Spule S mit hoher Windungszahl vor, deren Selbstinduktion man durch Einschieben eines Eisenkerns vergrößern kann. Durch Einschalten des Schalters k kann man die Spule kurzschließen und die normalen Verhältnisse beim Messen wiederherstellen. Eilt nun der Strom i in der Spannungsspule dem Strom I in der Hauptstromspule voraus, wie in

Abb. 36a gezeichnet, so wird beim Einschieben des Eisenkerns in die Spule der Strom i nach i' wandern und die angezeigte Leistung wird von

N auf N' zunehmen. Es darf dabei natürlich die Größe des Stromes i nicht wesentlich abnehmen. Ist dies zu befürchten, so muß man nicht die Spannung U , sondern den Strom i durch Nachregulieren konstant halten. Den Fall, daß die Spannung U und damit der Spannungstrom i dem Hauptstrom I nacheilt, veranschaulicht Abb. 36b. Hier wird sich der Ausschlag des Leistungsmessers verkleinern, wenn man den Eisenkern in die Spule einschiebt. Je größer die Vor- oder Nacheilung ist, desto deutlicher wird die Änderung des Ausschlages werden.

Verwendet man Leistungsmesser mit getrenntem Vorwiderstand, so kann man einen kleinen Telephonkondensator parallel zur Spannungsspule des Leistungsmessers legen. Wie man sich leicht klarmachen kann, wird beim Parallelschalten des Kondensators der Ausschlag des Leistungsmessers größer bei Nacheilung, kleiner bei Voreilung des Hauptstromes gegenüber der Spannung.

Schließlich soll noch eine Methode erwähnt werden, die jedoch nur dann anwendbar ist, wenn man die Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom durch Phasenschieber oder andere Mittel beliebig ein-

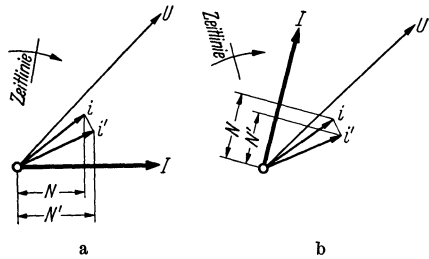


Abb. 36. Diagramme zur Schaltung Abb. 35. a) induktive Belastung, b) kapazitive Belastung.

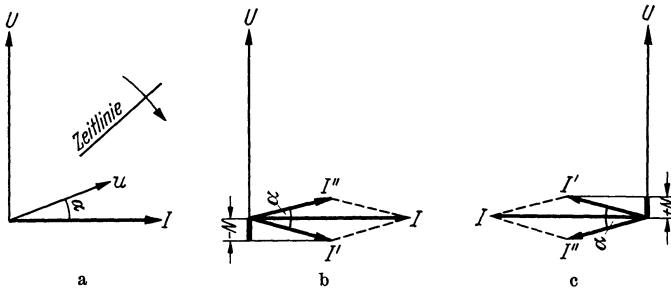


Abb. 37 a, b, c. Diagramme für Nebenwiderstand zur Stromspule.

stellen kann. Man verschiebt die Spannung U gegen den Strom I so lange, bis der Leistungsmesser Null zeigt, Abb. 37a. Die Spannung u an der Stromspule eilt dem Strom I um α vor. Schaltet man nun einen kleinen Widerstand (z. B. einen Draht) parallel zur Stromspule, so teilt sich der Strom I , dessen Phase erhalten bleibt, in den Strom I' in der Stromspule und den Strom I'' im Widerstand auf. Der Winkel zwischen I' und I'' ist gleich α , weil I'' in Phase mit der Spannung u an der Stromspule sein muß, wie in Abb. 37b dargestellt. Der Leistungsmesser zeigt in unserem Beispiel, wo die Spannung U dem Strom I voreilt (induktive Belastung), einen kleinen negativen Ausschlag. Würde

der Strom I der Spannung U voreilen (kapazitive Belastung), so würde der Leistungsmesser beim Parallelschalten des Widerstandes zur Stromspule einen kleinen positiven Ausschlag zeigen, Abb. 37c.

d) **Polprüfer oder Vektormesser 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. Man kann dazu einen Leistungsmesser verwenden, dessen Anschlußklemmen mit $+$ und $-$ bezeichnet sind; ein solcher Leistungsmesser zeigt nur dann positive Ausschläge, wenn in seinen beiden Spulen die Ströme gleichgerichtet sind und gleichzeitig von der $+$ - zur $-$ -Klemme fließen oder umgekehrt. Auf diese Weise kann man allerdings nur feststellen, ob die Ströme um mehr als $\pm 90^\circ$ gegeneinander verschoben sind. Will man noch wissen, ob die zu bestimmende Spannung gegenüber der Grundspannung vor- oder nachhilt, so muß man noch eine der unter c) beschriebenen Methoden anwenden.

Da man aber meist den Richtungssinn zweier *Spannungen* gegeneinander feststellen will, so hat man Meßgeräte gebaut, bei denen nicht nur die bewegliche, sondern auch die feste Spule als dünndrähtige Spannungsspule ausgeführt ist, so daß man an beide Spulen die beiden zu vergleichenden Spannungen anschließen kann. Die Weston-Instrument-Co. hat ein Meßgerät auf den Markt gebracht, welches $U_1 \cdot U_2 \cdot \sin \varphi$ anzeigt¹ und als sog. „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 Meßgerät Null an. Sind beide Spannungen in der Phase gegeneinander verschoben, so erhält man positive oder negative Ausschläge. Auch hier kann man nur mit Hilfe

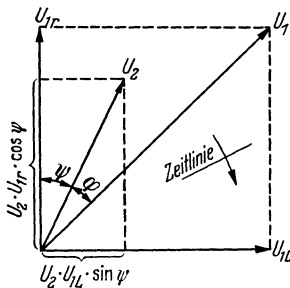


Abb. 38. Diagramm des Polprüfers nach BRÜCKMANN.

einer der unter c) genannten Methoden einwandfrei Voreilung oder Nacheilung bestimmen.

Der Polprüfer von A. BRÜCKMANN² zeigt $U_1 \cdot U_2 \cdot \cos \varphi$ an, ist also ein Leistungsmesser mit zwei dünndrähtigen Spulen. Man kann den Richtungssinn deshalb genau so messen, wie mit dem normalen Leistungsmesser. Um aber mit dem Meßgerät 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 U_{1r} und U_{1L} , die man durch Zerlegung der Grundspannung U_1 mittels einer besonderen Schaltung erhält, Abb. 38.

¹ HEINRICH, R. O.: ETZ 1912 S. 1147.

² ETZ 1916 S. 219.

Die Spannung U_2 , deren Phase zu bestimmen ist, gibt dann nach dem folgenden Schema in den verschiedenen Quadranten positive oder negative Werte, je nachdem man sie mit der Spannung U_{1r} oder U_{1L} zusammenwirken läßt; aus ihnen kann man die gesuchte Lage der Spannung U_2 zur Grundspannung U_1 in das Diagramm hineinzeichnen.

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

e) Prüfschaltungen für den richtigen Anschluß von Spannungs- und Stromwandlern. Um beim Zusammenschalten von Zählern und Wandlern keine Fehler zu machen, muß man die Richtigkeit der auf den Spannungswandlern angegebenen Bezeichnungen UV und uv und eben-

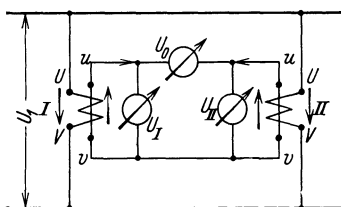


Abb. 39. Prüfschaltung mit Vergleichswandler für die Anschlüsse eines Spannungswandlers.

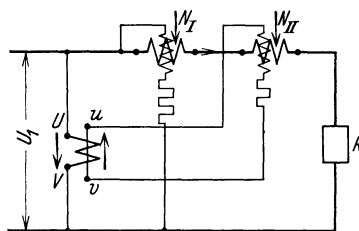


Abb. 40. Prüfschaltung mit Leistungsmesser für die Anschlüsse eines Spannungswandlers.

so bei den Stromwandlern die Bezeichnungen KL und kl prüfen können. Abb. 39 zeigt eine Schaltung, bei der zwei gleiche Spannungswandler I und II primär und sekundär parallel geschaltet sind. Einer der beiden Wandler, z. B. I , ist der Normalwandler, von dem man weiß, daß er

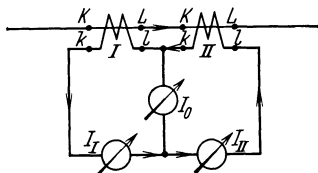


Abb. 41. Prüfschaltung mit Vergleichswandler für die Anschlüsse eines Stromwandlers.

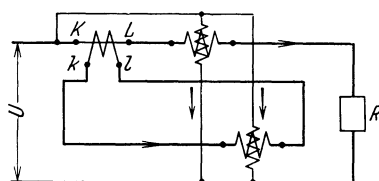


Abb. 42. Prüfschaltung mit Leistungsmesser für die Anschlüsse eines Stromwandlers.

richtig gepolt ist. Ist die Klemmenbezeichnung der zu prüfenden Wandler II richtig, dann muß der Spannungsmesser U_0 Null zeigen. Die Spannungsmesser U_I und U_{II} sind nicht erforderlich.

Hat man keinen Vergleichswandler zur Verfügung, so kann man die richtige Polung durch die in Abb. 40 dargestellte Schaltung mittels zweier gleicher Leistungsmesser N_I und N_{II} feststellen. Die Stromspulen der Leistungsmesser sind hintereinander geschaltet, die Spannungen sind unter Voraussetzung der richtigen Klemmenspannung gleichsinnig angeschlossen. Dann müssen beide Leistungsmesser positiv

anzeigen. Das Verfahren ist nur für Spannungswandler mit kleinen Primärspannungen anwendbar.

Die Abb. 41 und 42 zeigen die entsprechenden Schaltungen für die Prüfung der richtigen Polung von Stromwandlern, die nach dem Vorhergesagten keiner weiteren Erläuterung bedürfen.

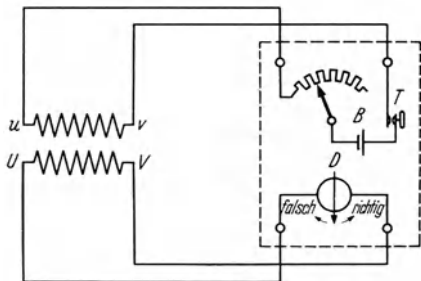


Abb. 43. Polprüfeinrichtung mit Batterie.

Tastern T einen kurzen Stromstoß, an die Primärwicklung U, V hat man ein Drehpulmeßgerät D angeschlossen; ist der positive Pol der Batterie an u , der positive Pol des Meßgeräts an U angeschlossen, so muß das Instrument einen positiven Ausschlag zeigen. Beim Stromwandler wird man meist die Batterie an die Primärwicklung legen und das Meßgerät an die Sekundärwicklung anschließen.

Für die Prüfung der richtigen Anschlüsse am Einbauort ist ein Universalgerät entwickelt worden, mit dem besonders Drehstromanschlüsse auf die Richtigkeit der Schaltung geprüft werden können².



Abb. 44. Drehfeldzeiger nach dem Drehfeldmotorprinzip.

einem Steinlager gelagert ist, leicht drehen. Werden die drei Wicklungen erregt, so dreht sich die Scheibe langsam in derselben Richtung, in der die Phasen der Spannungen U_R, U_S, U_T zeitlich aufeinander

Sehr einfach ist auch ein Verfahren, für das SCHERING ein handliches Meßgerät angegeben hat¹, Abb. 43:

Durch die Niederspannungswicklung u, v eines Spannungswandlers schickt man mit Hilfe einer kleinen Gleichstrombatterie B (Trockenelement) und eines

f) **Drehfeldzeiger.** Bei Drehstrom kommt außer der Richtung noch der Drehsinn bei eindeutigen Bestimmungen für die Anschlüsse in Frage. Ein einfacher Apparat ist der in Abb. 44 abgebildete³. Drei Eisenkerne tragen Wicklungen, an die die Spannungen U_R, U_S, U_T des zu messenden Drehstroms angeschlossen werden. Über den drei Eisenkernen kann sich eine Eisen-, Kupfer- oder Aluminiumscheibe, die mit einer Spitze auf

¹ Elektrotechn. u. Masch.-Bau 1928 S. 218 — Arch. techn. Messen 1931 Z 224—1.

² POLEK, H.: Siemens-Z. Bd. 19 (1939) H. 6 S. 264.

³ Frühere Ausführung s. MÖLLINGER: ETZ 1900 S. 601.

folgen. Der Drehfeldzeiger ist für Spannungen von 50 bis 500 V bei Frequenzen von 20 bis 60 Hz verwendbar.

Abb. 45 zeigt einen Drehfeldzeiger, der keine drehenden Teile hat¹; auf seiner Vorderseite sind nur zwei Glühlampen zu sehen. Die mit

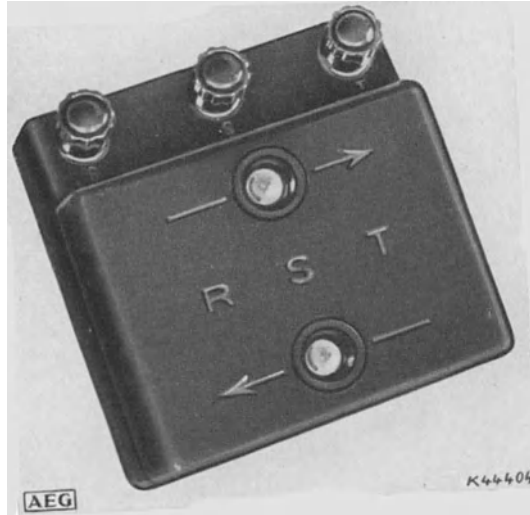


Abb. 45. Drehfeldzeiger ohne drehende Teile.

RST bezeichneten Klemmen werden an die drei Leiter des Drehstromnetzes angeschlossen. Ist der Drehsinn richtig, dann leuchtet die eine Lampe auf; ist der Drehsinn verkehrt, die zweite. Abb. 46 zeigt die

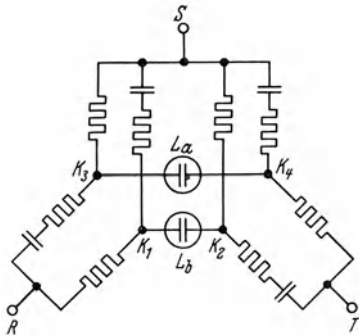


Abb. 46. Innenschaltung des Drehfeldzeigers nach Abb. 45.

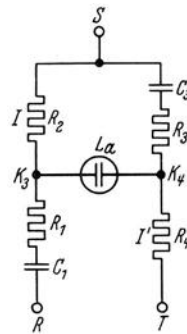


Abb. 47. Äußeres System der Schaltung Abb. 46.

¹ HAUFFE, G.: ETZ 1938 S. 1367. — RÜBSAAT, H.: ETZ 1938 S. 334. — BRAUER, W.: AEG-Mitt., August 1938 Heft 8 S. 445. — Ältere Ausführungen: SCHMIDT, R.: Elektrotechn. Umschau 1921 Heft 12 S. 186. — KARTAK: Electr. Wld., Lond. Bd. 77 (1921) S. 928. — STUBBINGS, G. W.: Electr. Rev., Lond. 1928 S. 13. — HOCHHÄUSLER, P.: Elektrotechn. u. Masch.-Bau, Wien 1936 S. 605 — ETZ 1937 S. 539.

Innenschaltung; es sind zwei Systeme aus Widerständen und Kondensatoren vorgesehen, von denen eines in Abb. 47 herausgezeichnet ist. Aus dem Diagramm Abb. 48 ergibt sich folgendes: Ist der Vektordreh-sinn richtig, also entgegen dem Uhrzeigerdreh-sinn, so setzt sich die Spannung $U_{RS} = U_R - U_S$ aus den Spannungen $I \cdot R_2$ und $I \sqrt{R_1^2 + \frac{1}{\omega^2 C_1^2}}$ zusammen. Da $I \cdot \frac{1}{\omega C_1}$ dem Strom I nacheilt, so ergibt sich die gezeichnete Lage für den Punkt K_3 . Ebenso setzt sich die Spannung $U_{ST} = U_S - U_T$ aus den Spannungen $I' \cdot R_4$ und $I' \cdot \sqrt{R_3^2 + \frac{1}{\omega^2 C_3^2}}$ zusammen. $I' \cdot \frac{1}{\omega C_3}$ eilt wieder dem Strom I nach, also kommt K_4 in die gezeichnete Lage. Man wählt nun die Größen von R_1, R_2 und C_1, C_3 so, daß bei Nenn-frequenz die Winkel zwischen U_{RS} und den

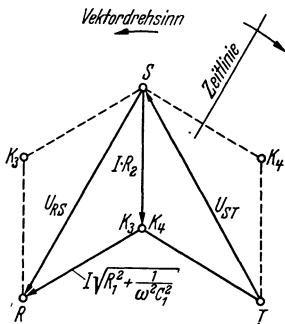


Abb. 48 a. Diagramm für das äußere System Abb. 47.

Teilspannungen U_{RS} und U_{ST} aus den Teilspannungen der vier Zweige der Schaltung Abb.47.

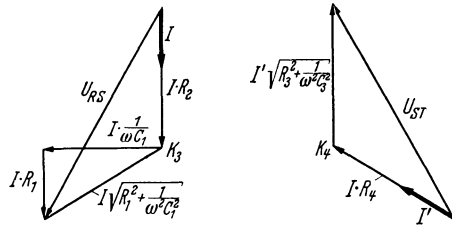


Abb. 48 b. Zustandkommen der Spannungen U_{RS} und U_{ST} aus den Teilspannungen der vier Zweige der Schaltung Abb.47.

Teilspannungen $I R_2$ und $I \sqrt{R_1^2 + \frac{1}{\omega^2 C_1^2}}$, gleich 30° sind, auch macht man $R_3 = R_1, R_4 = R_2, C_3 = C_1$. Dann fallen bei richtigem Drehsinn die Punkte K_3 und K_4 im Diagramm Abb. 48 zusammen, d. h. zwischen den Punkten K_3 und K_4 in der Schaltung Abb. 47 herrscht keine Spannungsdifferenz, die Lampe L_a bleibt dunkel.

Keht man nun den Drehsinn um, so wird $I \cdot \frac{1}{\omega C_1}$ um 180° verschoben, die Teilspannungen von U_{RS} und U_{ST} kommen dann in die im Diagramm Abb. 48 durch gestrichelte Linien gekennzeichnete Lage, und zwischen K_3 und K_4 herrscht eine Spannung, die so groß ist wie die verkettete Spannung, die Lampe L_a leuchtet dann hell auf.

Genau umgekehrt liegen die Verhältnisse beim zweiten System. Bei richtigem Drehsinn leuchtet die Lampe L_b auf, bei falschem Drehsinn bleibt sie dunkel.

5. Hilfsschalter zum Sparen von Meßgeräten.

a) Spannungsmesser-Ersatzschalter. 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 Abb. 49 dargestellt ist. Die drei Leitungen 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 Widerstand des Spannungsmessers 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 der Spannungsmesser 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.

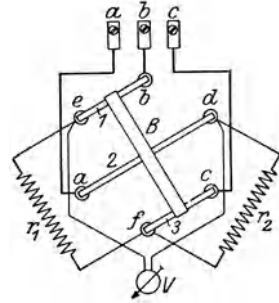


Abb. 49. Spannungsmesser-Ersatzschalter.

b) Leistungsmesser-Umschalter für Messung von Drehstromleistungen nach der Zweileistungsmessermethode. Bei Drehstrommessungen nach der Zweileistungsmessermethode (S. 85) kann man mit einem Leistungsmesser auskommen, wenn man den Leistungsmesserumschalter nach Abb. 50 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.

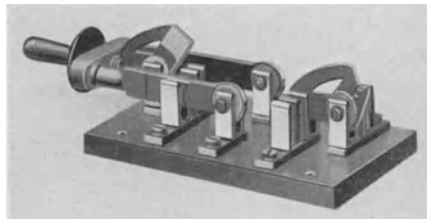


Abb. 50. Leistungsmesser-Umschalter von Siemens & Halske.

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, wenn der Schalter in seiner Mittelstellung steht. Bei direkter Belastung durch das Netz kann man die Spannungsspule an das eine Schaltmesser legen und mit der Hauptstromspule umschalten, solange $\cos \varphi < 0,5$ ist; bei $\cos \varphi > 0,5$ und bei indirekter Belastung (Spar-schaltung) muß man einen besonderen Spannungsumschalter vorsehen.

IV. Einrichtungen zur Bestimmung der Angaben.

Wie wir oben S. 13 sahen, prüft man die Zähler mit Ausnahme der elektrolytischen und Pendelzähler meist so, daß man eine gewisse Anzahl von Umdrehungen des Zählerankers zählt, die Zeit für diese Um-

drehungen mißt und die Leistung während dieser Zeit konstant hält. Will man sehr genaue Messungen machen, so braucht man zwei Beobachter: einen, der die Umdrehungen zählt und die Zeit mit der Stoppuhr abstoppt, und einen zweiten, der die Leistung durch Regelung der Spannung oder des Stromes (oder beider) konstant hält. Der zweite Beobachter kann entbehrt werden, wenn man im Prüfraum über Konstanthaltungseinrichtungen (vgl. Kap. II) verfügt. Sowohl die Mittel zur Zeitbestimmung als auch die Vorrichtungen zur selbsttätigen Zählung der Umdrehungen und der Zeit, die also auch den ersten Beobachter entbehrlich machen, sollen im folgenden beschrieben werden.

1. Pendeluhr und Doppelzeitschreiber oder Chronograph.

Nur in seltenen Fällen benutzt man heute noch für Zählerprüfungen den Doppelzeitschreiber. Bei ihm wird ein Papierstreifen mit gleichbleibender Geschwindigkeit an zwei Schreibstiften vorbeibewegt. Der eine der beiden Schreibstifte wird elektromagnetisch vermittlels einer Pendeluhr mit Sekundenkontakt jede Sekunde gegen den ablaufenden Streifen gedrückt und hinterläßt auf ihm eine Marke. Der zweite wird durch einen Elektromagnet betätigt, dessen Stromkreis man mit einem Taster 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 erfahren¹, wodurch eine genaue Ablesung sehr erleichtert wird. Besonders bewährt haben sich Schreibwerke, die einen fortlaufenden Farbstrich auf das Papier zeichnen, der bei jedesmaliger Betätigung des Elektromagnets 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 folgt².

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. Oft werden gegen die subjektiven Fehler, die beim Abstoppen sehr leicht vorkommen, Einwände gemacht. Da aber der subjektive Fehler beim Einschalten dem beim

¹ Schreibende Zeitmesser. Arch. techn. Messen, 1933 J 154—4.

² GEWECKE u. v. KRUKOWSKI benutzen als Hilfsmittel zur Auswertung der Streifen eine mit strahlenförmiger Teilung versehene Glasplatte. ETZ 1918 S. 356.

Abschalten (Arretieren) gleichen wird, so kann man mit einer Meßgenauigkeit von $\pm 0,2$ Sekunden rechnen, wenn mehrere 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 können¹. Von Uhren mit zwei Arretierzeigern muß außer für Spezialfälle abgeraten werden, da diese immer zu Komplikationen Anlaß geben und meist häufigere Reparaturen notwendig machen. Stoppuhren mit drehbarem Zifferblatt sind sehr haltbar, weil bei ihnen die Nullstellvorrichtung für den Zeiger wegfällt. Auf eine genau zentrische Lage der Zeigerachse muß man bei diesen Uhren ebenso acht geben wie bei denen mit Nullstellvorrichtung.

Es sind auch Stoppuhren mit sehr großem Zifferblatt und drei Zeigern: einem Minutenzeiger, einem Sekundenzeiger und einem Zeiger, der von $\frac{1}{10}$ zu $\frac{1}{10}$ Sekunde springt, gebaut worden, Abb. 51. Diese stellt man auf den Prüftisch und betätigt sie mechanisch durch einen oben angebrachten Druckknopf oder elektrisch durch ein ferngesteuertes Relais².

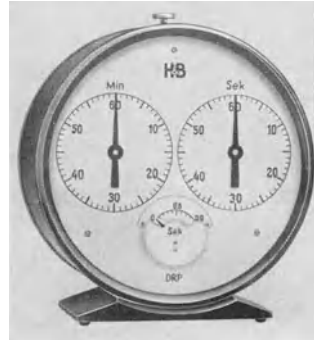


Abb. 51. Präzisions-Stoppuhr von H. & B.

Die Umdrehungen des Zählers beobachtet man genau so, wie beim Arbeiten mit dem Doppelzeitschreiber, 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 gleich 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 Minute = 60 Sekunden einen Beobachtungsfehler von $\pm 0,2$ Sekunden, so ist dies gleichbedeutend mit einem prozentualen Fehler von $\pm 0,33\%$. Dies ist also die erreichbare Meßgenauigkeit. Vgl. S. 4.

¹ WALTER, B.: Über Fehler in den Angaben von Stoppuhren. Z. Instrumentenkde. 1927 S. 583.

² Hartmann & Braun, Braune Liste II 3000/1, 35/0. und Arch. techn. Messen 1932 J 154—2.

3. Kontaktpendel nach KARTAK.

Frei von den Fehlern der üblichen Stoppuhren ist die Anordnung von KARTAK¹. Der Anker der Uhr wird von einem polarisierten Relais bewegt, das durch eine dauernd in Schwingung gehaltene Stimmgabel elektrisch gesteuert wird. Die Stimmgabel kann sehr genau abgestimmt werden, z. B. auf 20 volle Schwingungen in der Sekunde; auch ist der Temperaturfehler sehr klein². Beim Beginn der Messung wird der Stromkreis des polarisierten Relais geschlossen, beim Ende der Messung geöffnet. Die Genauigkeit der Zeitbestimmung mit dieser Vorrichtung ist also $\frac{1}{20}$ Sekunde. Die Genauigkeit der Messung ist demnach wesentlich nur abhängig vom Ablesefehler beim Vorübergehen der beweglichen an der festen Marke.

4. Schwingungskreis und Synchronuhr.

Eine für Zählermessungen geeignete rein elektrische Methode der Zeitmessung beruht darauf, daß man eine Frequenz von 50 Hz durch einen normalen Röhrengenerator (Rückkopplungsschaltung) erzeugt und

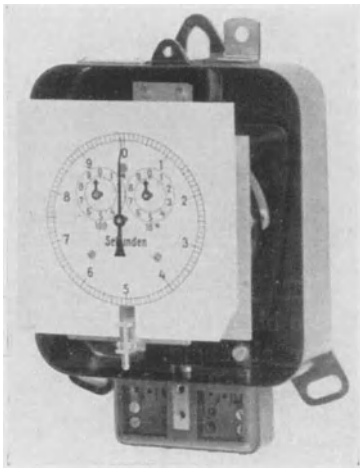


Abb. 52. Synchronuhr für Schwingungskreis der SSW.

mit dieser Frequenz Synchronuhren betreibt. Den Schwingungskreis des Röhrengenerators darf man nicht zu klein bemessen, damit die Frequenz genügend konstant bleibt. Den Einfluß der Temperatur kompensiert man dadurch, daß man für den Schwingungskreis temperaturabhängige Kondensatoren mit einstellbarem Temperaturkoeffizienten (sog. Trimmer) verwendet oder dadurch, daß man die ganze Anlage in einen Thermostaten einbaut. Um eine genügend große Leistung zu erhalten, muß man hinter dem Röhrengenerator noch Verstärkerröhren oder besser Wechselrichter schalten. Mit einer solchen Einrichtung kann man die Frequenz

auf etwa $0,05\frac{0}{00}$ konstant halten. Eine noch größere Genauigkeit kann man durch Verwendung eines Stimmgabelgenerators oder eines Quarzgenerators erreichen.

In Abb. 52 ist die Synchronuhr, die von dem Generator betrieben wird, abgebildet; sie hat einen großen Sekundenzeiger und zwei weitere Zeiger, die das 10- und 100fache des Sekundenzeigers anzeigen. Die Uhr

¹ Accurate timing in electrical tests. Electr. Wld., Lond. Bd. 73 (1919) S. 672.

² GRAFFUNDER, W.: Arch. techn. Messen 1938 Z 42—12.

wird durch Schließen und Öffnen ihres Stromkreises mittels eines Druckknopfschalters ein- und ausgeschaltet. Um jederzeit die Genauigkeit der Meßfrequenz prüfen zu können, kann man eine Kontrolluhr vorsehen, die außer einem von der Meßfrequenz betriebenen Zeiger noch einen zweiten Zeiger hat, der von einer Normalpendeluhr angetrieben wird. Am Gleichlauf der beiden Zeiger kann man feststellen, ob die Meßfrequenz sich nicht geändert hat. Bei diesem Verfahren ist die Genauigkeit der Fehlermessung nur noch abhängig von der Bestimmung der Umdrehungen, denn die Zeitmessung ist um ein Mehrfaches genauer als bei allen anderen Zeitmeßverfahren.

5. Selbsttätige Zählvorrichtungen.

Es liegt nahe, zur Bestimmung der Umdrehungen von Zählern selbsttätige Einrichtungen zu verwenden. Man erspart dadurch das lästige Zählen der Umdrehungen und macht sich frei von dem dabei auftretenden subjektiven Fehler. 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.

Zu solchen selbsttätigen Vorrichtungen braucht man zwei Teile: einmal eine Vorrichtung am Zähler, die bei jeder Umdrehung des Ankers oder einem Teil jeder Umdrehung einen Kontakt schließt, und zweitens eine Vorrichtung, die beim Anfang und Ende der Zählung eine Uhr ein- und ausschaltet.

a) Vorrichtungen am Zähler.

1. Mechanischer Kontakt. Am einfachsten ist es, von der Drehachse des Ankers¹ einen mechanischen Kontakt betätigen zu lassen, der wenig Reibung verursacht und nur bei sehr kleinen Belastungen die Umdrehungszahl des Ankers beeinflusst. Man kann dabei auf ein Reibungsmoment von 0,015 cmg herunterkommen. Da der Kontakt nur während eines kleinen Teiles einer Umdrehung, z. B. 10°, in Tätigkeit tritt, geht die Reibung nur mit $\frac{10}{360} \cdot 0,015 = 0,00042$ cmg in die Messung ein. Ist das Nenndrehmoment des Zählers 5 cmg und mißt man bei der sehr kleinen Belastung von 2% der Nennlast, so ist das Drehmoment des Zählers bei dieser Belastung 0,1 cmg. Bei dieser Belastung wird die Messung durch den Kontakt um $\frac{0,00042}{0,1} \cdot 100 = 0,4\%$ beeinflusst.

Eine andere Ausführung ordnet den Kontakt als Schließungskontakt am Umfang des Ankers so an, daß der Kontaktstrom bei seinem Weg

¹ CALLSEN, A.: Siemens-Z. 1927 S. 79, wo ein Öffnungskontakt angewendet wird.

vom Umfang zur Achse durch das Feld des Bremsmagnets hindurch geht. Wählt man die Stromrichtung so, daß ein positives Drehmoment entsteht, so kann man die Kontaktreibung fast vollkommen kompensieren; die Beeinflussung ist auch bei sehr kleinen Belastungen nur etwa 0,1 bis 0,2%¹.

2. Funkenübergang zwischen Anker und Elektrode. Ein am Umfang des Zählerankers angebrachter, mit Spitze versehener Reiter und eine in geringer Entfernung vom Ankerumfang fest angeordnete Spitze werden an die Sekundärwicklung eines kleinen Hochspannungstransformators gelegt (3000 bis 10000 V)². Bei jeder Umdrehung des Ankers springt ein Funke über, wobei sich der Strom in der Primärwicklung des Hochspannungstransformators ändert. Durch diese Änderung wird ein Relais betätigt. Nach Angabe von THOMPSON beeinflußt der Umstand, daß der Funke nicht genau dann überspringt, wenn die Spitzen einander gegenüber stehen, nur bei weniger als drei Ankerumdrehungen in der Minute das Meßergebnis um mehr als 0,1%.

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 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 Prüfung vornehmen, ohne eine besondere Hochspannungseinführung vorzusehen.

3. Optische Übertragung. Vollständig störungsfrei ist die optische Übertragung. Bei früheren Einrichtungen³ brachte man an dem Zähleranker oder seiner Achse einen leichten Planspiegel an und ließ ein durch eine Linse parallel gerichtetes Strahlenbündel einer hochkerzigen Lampe bei jeder Umdrehung des Ankers von dem Spiegel auf eine stromdurchflossene Selenzelle reflektieren. Die Stromänderung in der Selenzelle wurde durch eine Brückenschaltung vergrößert und durch

¹ ESTEL, F.: ETZ 1920 S. 269.

² THOMPSON, G.: Electr. Wld., Lond. 1913 S. 246. — FITCH and HUBER: Bull. Bur. Stand., Wash. Bd. 10 (1913) S. 174.

³ GEWECKE u. v. KRUKOWSKI: ETZ 1918 S. 356.

ein Relais mechanisch wirksam gemacht. Die heute bekannten Photozellen in Verbindung mit Röhrenverstärkern ermöglichen es, eine sehr kleine Helligkeitsänderung zum Betätigen eines Relais zu verwenden. Wird der Umfang des Zählerankers von einer Lichtquelle bestrahlt, so genügt schon die Änderung der Lichtstärke beim Vorbeigang der am Umfang des Ankers angebrachten Zählmarke, um einen sicheren Kontakt einzuleiten¹. Solche Anordnungen werden auch bei den Geberzählern für die stroboskopischen Einstellvorrichtungen verwendet.

b) Vorrichtungen zum Abzählen der Umdrehungen und zur Betätigung der Uhr.

1. Doppelzeitschreiber. Für bestimmte Messungen wird man den Doppelzeitschreiber verwenden. Das eine Relais des Doppelzeitschreibers wird dann von der Kontaktvorrichtung des Zählers betätigt, während das andere von einer genau gehenden Kontaktuhr geschaltet wird.

2. Mechanische Zählvorrichtungen. Bei den mechanischen Zählvorrichtungen wird mit Hilfe eines oder mehrerer durch die Kontaktvorrichtung des Zählers betätigter Relais ein Rad schrittweise bei jeder Ankerumdrehung vorwärts bewegt. Dieses Rad trägt einen Stift, der die Nullstellung kennzeichnet und der die Stoppuhr oder Synchronuhr mechanisch oder elektrisch einschaltet. Auf dem Radkranz kann ein zweiter Stift an eine beliebige Stelle gebracht werden, so daß nach Zurücklegung eines bestimmten Winkels, entsprechend einer bestimmten Umdrehungszahl des Zählers, die Uhr wieder ausgeschaltet wird. Dieser Grundgedanke hat in verschiedener Ausführung zu den Apparaten von ESTEL² und CALLSEN³ geführt. Man erhält mit diesen Vorrichtungen die Umdrehungen, die man am Radkranz eingestellt hat, und die Zeit, die für die eingestellten Umdrehungen aufläuft. Den Fehler muß man noch aus Umdrehungen, Zeit und Leistung ausrechnen (vgl. S. 13). Während der Messung hat man natürlich die Leistung am Leistungsmesser konstant gehalten.

3. Mechanische Zählvorrichtung in Verbindung mit Gleichlast-Prüfzähler⁴. Anstatt mit der mechanischen Zählvorrichtung eine Uhr zu betätigen, kann man auch den in Kap. V beschriebenen Gleichlast-Prüfzähler ein- und nach einer eingestellten Anzahl von Umdrehungen ausschalten. Dieses Verfahren hat den Vorteil, daß man den Fehler am Prüfzähler direkt ablesen kann, ohne erst eine Rechnung vornehmen zu müssen. Alle subjektiven Meßfehler sind dabei ausgeschaltet.

¹ NÖLKE, O. E.: Arch. techn. Messen 1936 Z 733—3.

² ESTEL, F.: ETZ 1920 S. 269.

³ CALLSEN, A.: Siemens-Z. 1927 S. 79.

⁴ NÖLKE, O. E.: Arch. techn. Messen, 1936 Z. 733—3.

V. Prüf- oder Eichzähler.

a) Prüfzähler mit mehreren Meßbereichen.

Ein Prüf- oder Eichzähler ist im Grunde nichts anderes als ein mit besonderen Vorrichtungen versehener, sehr genau eingestellter Normalzähler, mit dessen Angaben die Angaben des zu prüfenden Zählers verglichen werden. Abb. 53 zeigt eine neuere Ausführung eines solchen Universal-Prüfzählers. Der Zähler kann sowohl als Drehstromzähler nach Abb. 54 als auch als Wechselstromzähler nach Abb. 55 geschaltet werden. Der Spannungskreis kann mit Hilfe eines an dem Zähler an-

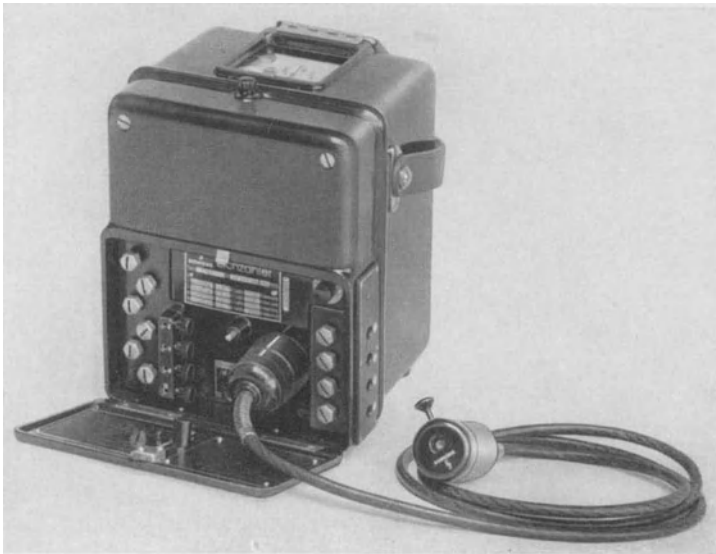


Abb. 53. Universal-Prüfzähler der SSW

gebrachten Umschalters für zwei verschiedene Spannungen, z. B. 380 und 220 V umgeschaltet werden. Der Hauptstromkreis ist für zwei Meßbereiche im Verhältnis 1 : 2 vorgesehen: 2,5 : 5 bis 25 : 50 A. Zu diesem Zwecke ist an der linken Seite des Zählers ein Schieber mit drei Löchern angebracht; steht der Schieber oben, so sind nur die Klemmenbohrungen für die niedere, steht er unten, so sind nur die Klemmenbohrungen für die höhere Stromstärke freigegeben. Für die Verwendung bei größeren Stromstärken und Spannungen muß man Präzisionswandler vorsehen.

Das Zählwerk ist ein Zeigerzählwerk mit einem großen und zwei kleinen Zifferblättern, deren Angaben in dekadischem Verhältnis zueinander stehen und auf denen man die Umdrehungen des Prüfzählers ablesen kann. Es ist mit einer Nullstellvorrichtung versehen, die durch

den oben am Gehäuse sichtbaren Druckknopf von Hand betätigt werden kann. Der Spannungskreis des Zählers wird durch einen mit einem Mehrfachstecker über eine lange Schnur angeschlossenen Druckknopfschalter besonderer Konstruktion ein- und ausgeschaltet. Der Schalter hat vier Stellungen: 0, 1, 2, 3. Stellung 0 ist: Zähler ausgeschaltet und Anker festgestellt; Stellung 1: Zähler ausgeschaltet, aber Anker frei; Stellung 2: Zähler eingeschaltet; Stellung 3: Zähler ausgeschaltet, Anker noch frei. Bei Stellung 0 ist der Anker wieder festgestellt.

Wenn der in der Abb. 53 unten sichtbare Deckel geschlossen ist, ist der Anker des Zählers festgestellt, so daß während des Transportes keine Beschädigung des Lagers möglich ist. Um den Drehsinn des Anschlusses feststellen zu können, ist ein kleiner Drehfeldzeiger eingebaut, der kurzzeitig durch einen Druckknopf betätigt wird und der von oben neben dem Zifferblatt beobachtet werden kann.

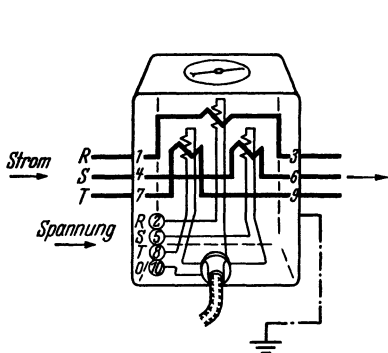


Abb. 54. Universal-Prüfzähler in der Schaltung als Drehstromzähler.

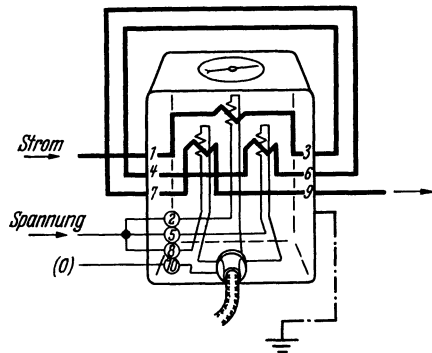


Abb. 55. Universal-Prüfzähler in der Schaltung als Einphasenzähler.

Die Prüfung geht so vor sich: Man stellt die Leistung durch einen Leistungsmesser oder durch die Belastung oder durch einen Belastungswandler auf den gewollten Wert ein. Das Zeigerzählwerk des Prüfzählers wird auf Null gestellt. Der Druckknopfschalter steht noch auf Stellung 0, man bringt ihn auf Stellung 1, die Bereitschaftstellung. Die abuzählenden Umdrehungen des zu prüfenden Zählers hat man inzwischen festgestellt. Bei Beginn des Zählens schaltet man den Druckknopfschalter auf Stellung 2, der Prüfzähler fängt an zu laufen; am Ende der letzten abuzählenden Ankerumdrehung des zu prüfenden Zählers schaltet man den Druckknopfschalter auf Stellung 3, der Eichzähler ist ausgeschaltet. Nach einigen Sekunden, die genügen, um den Anker des Prüfzählers auslaufen zu lassen, stellt man den Schalter wieder auf die Ruhestellung 0.

Hat man mit einem Drehstrom-Prüfzähler nach Abb. 54 einen Drehstrom-Dreileiter- oder -Vierleiterzähler geprüft, so berechnet sich dessen Fehler folgendermaßen: Die Angaben A in kWh des zu prüfenden Zählers sind $U_x : C_x$, wenn U_x die gezählten Umdrehungen, C_x die

Umdrehungen je kWh sind; der wirkliche Verbrauch W , den der Prüfzähler angibt, ist entsprechend $U_{Ei} : C_{Ei}$, der Fehler des zu prüfenden Zählers ist F in Prozent $= \frac{A - W}{W} \cdot 100 + F_{Ei}$, wenn F_{Ei} der Fehler des Eichzählers in Prozent ist. Also ergibt sich F in Prozent $= \frac{U_x \cdot C_{Ei} - U_{Ei} \cdot C_x}{U_{Ei} \cdot C_x} \cdot 100 + F_{Ei}$. Die Fehler F_{Ei} des Prüfzählers für verschiedene Belastungen und Meßbereiche muß man in einer Tabelle zusammenstellen, wie man dies auch bei Leistungsmessern tut.

Ein großer Vorzug der Messung mit dem Prüfzähler ist es, daß die Belastung während der Prüfung nicht konstant gehalten werden muß, sondern daß es genügt, den gewollten Wert der Belastung bei Beginn der Prüfung annähernd einzustellen. Für die Messung genügt also ein Beobachter. Da das Meßergebnis unabhängig von Belastungsschwankungen ist, wenn sie sich in den Grenzen der normalen Schwankungen der Netzspannung bewegen, so kann man mit dem Prüfzähler auch Zählerprüfungen eingebauter Zähler an Ort und Stelle vornehmen. Meist benutzt man dabei den Prüfzähler zusammen mit einem Belastungstransformator (vgl. S. 30) und kann dann den zu prüfenden Zähler bei allen gebräuchlichen Belastungspunkten durchmessen, ohne das Netz selbst als Belastung benutzen zu müssen. Die Genauigkeit der Prüfung mit dem Prüfzähler ist abhängig von dem Meßfehler des Prüfzählers selbst, der mit 0,2 bis 0,3% angenommen werden kann, und von dem subjektiven Fehler, den der Ableser beim Zählen der Umdrehungen des zu prüfenden Zählers macht.

b) Gleichlast-Prüfzähler für Wechselstromprüfungen.

Das von HOMMEL angegebene Gleichlast-Prüfverfahren besteht darin, daß bei jeder Belastung des zu prüfenden Zählers der Prüfzähler bei seiner Nennlast arbeitet. Die grundsätzliche Anordnung ist in Abb. 56

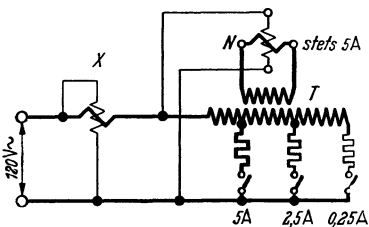


Abb. 56. Gleichlast-Prüfverfahren, grundsätzliche Schaltung.

dargestellt. X ist der zu prüfende Zähler, der z. B. für 120 V Nennspannung und 5 A Nennstrom bemessen ist; er soll bei den Belastungen 5 A, 2,5 A und 0,25 A geprüft werden. N ist der Gleichlast-Prüfzähler, dessen Nennspannung 120 V sei; er soll bei allen Belastungen mit seiner Nennstromstärke 5 A laufen. Um dies zu erreichen, ist der Transformator (Stromwandler) T angeordnet, der Anzapfungen für verschiedene Belastungen hat. Die Anzapfungen sind so gewählt, daß bei jeder der Belastungen 5, 2,5 und 0,25 A in der Sekundärwicklung des Transformators T , also auch in der Stromwicklung des Gleichlast-Prüfzählers, der Strom 5 A fließt. Durch einfaches Umstecken eines

Transformator (Stromwandler) T angeordnet, der Anzapfungen für verschiedene Belastungen hat. Die Anzapfungen sind so gewählt, daß bei jeder der Belastungen 5, 2,5 und 0,25 A in der Sekundärwicklung des Transformators T , also auch in der Stromwicklung des Gleichlast-Prüfzählers, der Strom 5 A fließt. Durch einfaches Umstecken eines

Schaltsteckers können die verschiedenen Belastungsstufen eingeschaltet werden. Abweichend von dieser grundsätzlichen Schaltung arbeitet man in Wirklichkeit natürlich mit getrenntem Strom- und Spannungskreis (in Sparschaltung), worauf das oben Gesagte sinngemäß zutrifft.

Das Gleichlast-Prüfverfahren hat gegenüber allen anderen Verfahren den Vorzug der höchsten Meßgenauigkeit. Denn der Gleichlast-Prüfzähler läuft immer mit seiner Nennlast, also mit einem hohen Drehmoment, und wird daher durch kleine Schwankungen seiner Reibungsverhältnisse nicht beeinflußt; er wird nur an diesem einen Punkt mit einem sehr genauen Meßgerät (Torsionsleistungsmesser) und einer Präzisionspendeluhr eingestellt. Die Wiederholung dieser einen Einstellung in gewissen Zeitabständen macht wenig Mühe.

Ein ausgeführter Gleichlast-Prüfzähler ist in Abb. 57 dargestellt, die Schaltung zeigt Abb. 58.

Seine Stromspule ist an die Sekundärseite eines außerhalb des Zählers liegenden und deshalb in Abb. 58 nicht gezeichneten Stromwandlers angeschlossen, dessen Primärwicklung wie in Abb. 56 Anzapfungen für die vorgeschriebenen Belastungsstufen hat (die dort gezeichneten Belastungswiderstände fallen gewöhnlich bei der Messung mit getrenntem Strom- und Spannungskreis fort). Bei jeder Belastungsstufe ist der die Strom-



Abb. 57. Gleichlast-Prüfzähler der SSW.

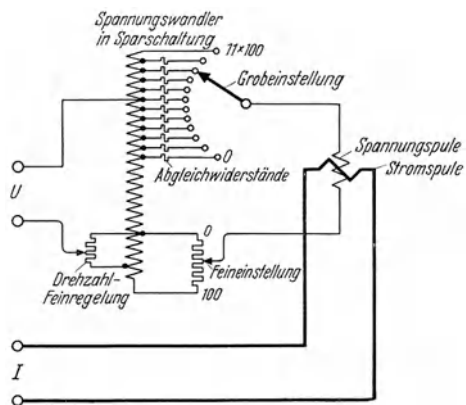


Abb. 58. Schaltung des Gleichlast-Prüfzählers.

spule des Zählers durchfließende Strom 5 A. Je verschiedener die Nennstromstärken der zu prüfenden Zähler sind, desto mehrstufiger muß der Anzapfstromwandler ausgeführt sein.

Der Spannungskreis des Gleichlast-Prüfzählers weist die in Abb. 58 dargestellte besondere Schaltung auf; durch sie wird ein großer Vorteil erreicht, nämlich der, daß man bei der Prüfung jedes beliebigen Zählers

den Fehler direkt in Prozenten ablesen kann. Es sind, wie aus Abb. 57 ersichtlich, 2 Skalen vorgesehen, die in Prozenten geeicht sind; eine schwarze für $\cos \varphi = 1$ und eine rote für $\cos \varphi = 0,5$. Da die zu prüfenden Zähler verschiedene Konstanten (Umdrehungen je kWh) haben können, muß, damit man trotzdem nur je eine Fehlerkala für $\cos \varphi = 1$ und $\cos \varphi = 0,5$ benötigt, die Drehzahl des Gleichlast-Prüfzählers bei Zählern derselben Nennleistung aber verschiedener Konstanten etwas verschieden sein, und zwar muß, um alle vorkommenden Konstanten zu erfassen, die Drehzahl des Gleichlast-Prüfzählers in dem Bereich $\pm 20\%$ der Normaldrehzahl regelbar sein. Zu dem Zweck ist die Spannungsspule des Gleichlast-Prüfzählers an einen Spannungswandler in Sparschaltung angeschlossen, der eine Grobeinstellung für die Hunderter und eine Feineinstellung für die Zehner und Einer hat. Je nach der Kurbelstellung wird der Spannungsspule eine größere oder kleinere Spannung als die Normalspannung zugeführt, wodurch sich die Drehzahl entsprechend einstellt. Die Genauigkeit des Gleichlast-Prüfzählers ist bei der geringen Drehzahlabweichung von max. $\pm 20\%$ genau dieselbe wie bei seiner Normaldrehzahl. Der Sparwandler wird mittels der zwei in Abb. 57 zu sehenden Drehknöpfe auf den jeweiligen Wert der Konstanten des zu prüfenden Zählers eingestellt.

Aus Tabellen, die dem Gleichlast-Prüfzähler beigegeben sind, kann man die für jedes Meßbereich und jede Konstante des Prüflings passenden Werte ablesen. Hat man für einen Prüfling bestimmter Konstante einmal die Einstellung am Gleichlast-Prüfzähler vorgenommen, so bleibt diese Einstellung natürlich für alle an diesem Prüfling vorzunehmenden Messungen bestehen.

Ist beispielsweise der Prüfling ein Einphasenzähler für 5 A 120 V und hat er die Konstante 4800 U/kWh, so entnimmt man den Tabellen, daß beide Kurbeln des Spannungswandlers auf 0 eingestellt werden müssen und daß man am Prüfling bei Nennlast 60 Umdrehungen zählen muß. Will man bei der halben Last, also 2,5 A prüfen, so muß man nur an der Primärseite des den Stromkreis speisenden Wandlers die entsprechende Anzapfung mit dem Schaltstecker einschalten, den Strom auf etwa 2,5 A einstellen und kann dann mit der Messung beginnen. Natürlich muß man dann 30 Umdrehungen am Prüfling zählen, wenn man seinen Fehler an der Prozentskala des Gleichlast-Prüfzählers ablesen will.

Ist der Prüfling für 3 A 220 V ausgeführt und ist seine Konstante 3600 U/kWh, so ergeben die Tabellen, daß man die Kurbeln des Spannungswandlers auf 570 einstellen und am Prüfling 40 Umdrehungen bei Nennlast zählen muß.

Da der Gleichlast-Prüfzähler vorzugsweise in Prüfmestern oder anderen Prüfstellen verwendet wird, wird er zusammen mit seinem Stromwandler (der Spannungswandler ist im Gleichlast-Prüfzähler eingebaut)

an den Prüftischen wie der Leistungsmesser eingeschaltet. Für Außenprüfungen an Ort und Stelle kann er zusammen mit einem Belastungswandler benutzt werden, man zieht aber für solche Messungen meist den oben beschriebenen Universal-Prüfzähler vor.

Es ist selbstverständlich, daß der Gleichlast-Prüfzähler als Präzisionszähler ausgeführt ist. Er hat einen vollkommenen Temperaturausgleich, eine Drehzahl-Feinregelung mittels Spannungsteilers, ein Unterlager besonderer Ausführung mit geringer Reibung, ein Zeigerzählwerk mit Nulleinstellung. Beim Aufsetzen des Deckels vor dem Transport wird der Anker festgestellt, damit das Unterlager nicht beschädigt werden kann.

Mit dem Gleichlast-Prüfzähler kann man bei jeder Belastung mit einer Genauigkeit von $\pm 0,1\%$ rechnen. Dabei ist Voraussetzung, daß die Einstellung des Gleichlastzählers selbst, wie oben schon gesagt, mit besonderen Mitteln — Torsionsleistungsmesser höchster Präzision und Präzisionspendeluhr — vorgenommen worden ist. Korrekturen brauchen also nicht angebracht zu werden.

e) Gleichlast-Prüfverfahren für die Prüfung von Drehstromzählern.

Die Prüfung von Drehstromzählern bei gleichzeitiger Belastung kann man nach einer besonderen Schaltung, die in Abb. 59 angegeben ist, mit einem Wechselstrom-Gleichlastzähler vornehmen¹. Es sind dazu zwei Spannungswandler in Sonderausführung, drei Stromwandler und ein Relais erforderlich. Der in der Phase *S* liegende Stromwandler speist die

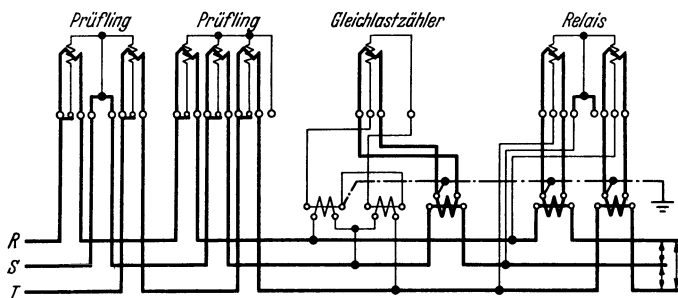


Abb. 59. Gleichlast-Prüfverfahren für Drehstrom.

Stromspulen des Gleichlastzählers, die beiden in den Phasen *R* und *T* liegenden Stromwandler die Stromspulen des Relais. Die Spannungswandler für den Gleichlastzähler sind so geschaltet, daß an seinen Klemmen die geometrische Summe der Spannungen *RS* und *TS* liegt. Außerdem ist das Übersetzungsverhältnis jedes Spannungswandlers $\sqrt{3} : 1$. Bei Annahme eines symmetrischen Spannungsdreiecks und gleichzeitiger Be-

¹ Die Methode ist von H. NÜTZELBERGER angegeben. Eine Beschreibung wird demnächst in der ETZ erscheinen.

lastung würde der Gleichlastzähler die Drehstromarbeit richtig zählen. Damit der Zähler auch bei unsymmetrischem Spannungsdreieck und nicht ganz gleichseitiger Belastung die Drehstromarbeit richtig zählt, ist das in der Abb. 59 rechts sichtbare Relais erforderlich. Dieses Relais ist weiter nichts als ein ungebremster Drehstromzähler mit zwei messenden Systemen, der so geschaltet ist, daß die Drehmomente der beiden Systeme einander entgegenwirken. Steht der Anker des Relais still, so zeigt der Gleichlastzähler die Drehstromarbeit richtig an. Man muß also die Spannungen oder die Ströme so einregeln, daß der Anker des Relais stillsteht.

Wie aus Abb. 59 zu ersehen ist, kann man sowohl Dreileiter- als auch Vierleiter-Drehstromzähler in betriebsmäßiger Schaltung prüfen. Das Verfahren hat den großen Vorzug, daß kein symmetrisches Spannungsdreieck erforderlich ist, sondern daß man nur die elektrischen Größen so einregeln muß, daß der Anker des Relais am Anfang und am Ende der Messung sich in seiner Nullstellung befindet.

d) Gleichlast-Prüfverfahren für die Prüfung von Gleichstromzählern.

Für die Prüfung von Gleichstromzählern ist das Gleichlast-Prüfverfahren folgendermaßen verwendbar: Für jeden der von der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt vorgeschriebenen Meßpunkte $\frac{1}{1}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{10}$ und $\frac{1}{20}$ der Nennlast benutzt man als Normalzähler je einen Zähler, der bei dem betreffenden Belastungspunkt seine Nennstromstärke hat und für diese eine Stromstärke so genau wie möglich eingestellt ist. Im übrigen muß man für die Messung die SynchronEinstellung (s. S. 15) anwenden.

VI. Prüfschaltungen.

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 nachprüfen 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 ein-

deutig 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. Da es sich um Prüfschaltungen handelt, sind für die Meßgeräte und den Zähler getrennte Wandler vorgesehen; beim Einbau an Ort und Stelle sind Meßgeräte und Zähler natürlich an gleiche Wandler angeschlossen. Der bei Wechselstrommessungen immer anzuschließende Frequenzmesser ist in allen Schaltungsbildern weggelassen worden, weil er meist direkt an die von dem stromliefernden Generator kommenden Leitungen angeschlossen wird und die Messung dann nicht beeinflusst. Ebenso sind alle Regelorgane zur Regelung des Stromes, der Spannung und der Phasenverschiebung fortgelassen worden, um die Schaltungsbilder so klar wie möglich zu machen. Bei Verwendung von Normal- oder Prüfzählern an Stelle von Leistungsmessern werden diese meist genau so geschaltet wie die zu prüfenden Zähler.

Die Vorschriften des Verbandes Deutscher Elektrotechniker¹ sind für die Leitungsführungen berücksichtigt. Die Phasen sind mit RST bezeichnet.

Über die Schaltung der Leistungsmesser sei folgendes erwähnt: Bei richtiger Polung des Leistungsmessers ergibt die in Abb. 60a gezeichnete Schaltung einen positiven Ausschlag des Leistungsmessers, Abb. 60b zeigt die Schaltung bei umgepolter Spannungsspule. Für die Schaltungen der Zähler gelten die Abb. 61a für Vorwärtslauf bei richtiger Polung, Abb. 61b bei umgepolter Spannungsspule.

Für die Aufstellung der Diagramme bei Wechsel- und Drehstrom sind folgende Regeln maßgebend: Die Zeitlinie rotiert im Sinne des Uhrzeigers, der Drehsinn der Vektoren ist also entgegen dem des Uhrzeigers. Bei Dreiphasenstrom ist die verkettete Spannung $U_R - U_S = U_{RS}$, wie in Abb. 62 dargestellt. Für die Ströme gilt die gleiche Regel. Alle Winkel von den Spannungen zu den Strömen werden im Drehsinn des Uhrzeigers positiv gerechnet, d. h. induktive Last; entgegen dem Drehsinn des Uhrzeigers negativ, d. h. kapazitive Last. Die

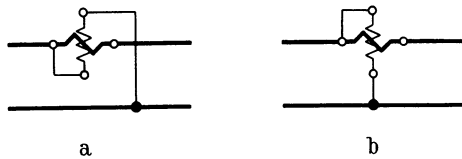


Abb. 60a u. b. Schaltung der Leistungsmesser.

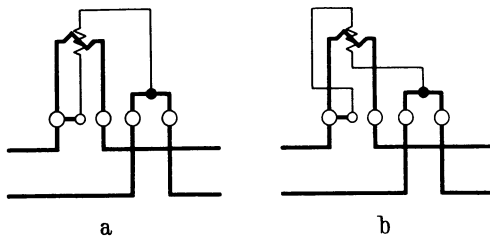


Abb. 61a u. b. Schaltung der Zähler.

¹ Regeln für Elektrizitätszähler. ETZ 1930 S. 753, 1931 S. 776.

Winkel vom Fluß des Hauptstromkreises Φ_I zum Fluß des Spannungskreises Φ_U rechnet man positiv im Drehsinn des Uhrzeigers, Abb. 63.

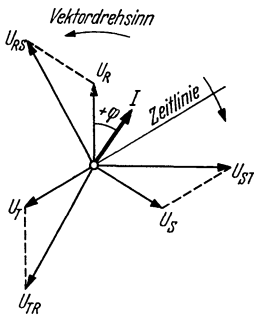


Abb. 62. Vektordiagramm für Drehstrom.

Bei der Besonderheit jeder Schaltung würde es auf Schwierigkeiten stoßen, allgemeine Richtlinien aufzustellen. Es soll deshalb nur auf einige Gesichtspunkte hingewiesen werden, die bei der Besprechung der einzelnen Schaltungen nicht erwähnt werden.

Beim Anschluß von Drehstromzählern muß man darauf achten, daß die einzelnen Phasen in der richtigen Folge angeschlossen werden, da die meisten Drehstromzähler nicht unabhängig von der Phasenfolge sind.

Auf die Vorteile der Schaltung bei getrenntem Strom- und Spannungskreis ist schon im Kap. II, 1., Sparschaltung, ausführlich hingewiesen worden; sie wird in Prüfräumen fast durchweg angewandt. Auch wenn man nur eine Wechselstromquelle zur Verfügung hat, speist man meist den Hauptstromkreis der Zähler mit einem Transformator niederer Sekundärspannung und den Spannungskreis entweder direkt aus dem Netz oder aus einem Transformator mit veränderlichem Übersetzungsverhältnis. Da man jedoch in vielen Fällen mit direkter Belastung durch das Netz auskommen muß, ist im folgenden auch auf diese Schaltungen genügend Rücksicht genommen worden.

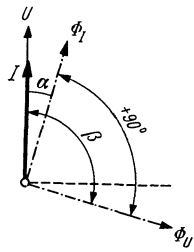


Abb. 63. Vektordiagramm für die magnetischen Flüsse.

In den Schaltungsbildern für Hochspannung sind nur Meßgeräte in Verbindung mit Spannungswandlern angenommen worden und die Erdung ist entsprechend vorgesehen. Da man in manchen Prüfräumen und Laboratorien noch mit

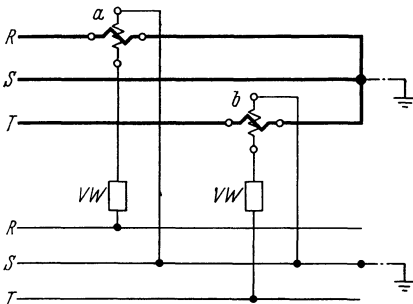


Abb. 64. Schaltung der Vorwiderstände für die Leistungsmesser bei Erdung.

Vorwiderständen arbeitet, sei ein kurzer Hinweis ihrer Schaltung in bezug auf die Erdung gegeben. Abb. 64 zeigt die richtige Schaltung für die Vorwiderstände VW der Leistungsmesser in einer Drehstrom - Dreileiterschaltung für Zähler mit zwei messenden Systemen. Die Potentialdifferenz zwischen den Spulen der Leistungsmesser ist dabei sehr klein.

Falsch wäre es dagegen, wenn man die Vorwiderstände an den Stellen a und b in die Leitungen legen würde, weil dann die ganze Netzspannung zwischen der festen und der

man die Vorwiderstände an den Stellen a und b in die Leitungen legen würde, weil dann die ganze Netzspannung zwischen der festen und der

beweglichen Spule der Leistungsmesser liegen und zum Durchschlag führen könnte.

Schließlich sei noch auf einen Fehler hingewiesen, der bei der Prüfung von Zählern in Verbindung mit Tarifapparaten leicht vorkommt. Solche Apparate haben oft Aufzugsmagnete, deren Wicklungen an die Spannungsklemmen angeschlossen sind. Im normalen Betrieb und bei der Prüfung mit direkter Belastung stört dies natürlich nicht. Prüft man dagegen bei getrennten Strom- und Spannungskreisen, so muß man für den Stromkreis des Aufzugsmagnets eine getrennte Stromquelle verwenden, da sonst bei jedesmaligem Ansprechen des Aufzugmagnets der Spannungsabfall in der Spannungsleitung die Angaben der Meßinstrumente zu stark beeinflußt. Das gleiche gilt für Pendelzähler mit Aufzugmagneten für das Uhrwerk.

Was sonst noch an allgemeinen Gesichtspunkten zu erwähnen wäre, ist an geeigneter Stelle in den folgenden Beschreibungen der Spezialfälle erläutert.

1. Einphasenwechselstrom.

a) Schaltung bei getrenntem Strom- und Spannungskreis.

Niederspannung und Niederstrom.

Bei Einphasenwechselstrom wird der Leistungsmesser N genau so geschaltet wie der Zähler Z , vgl. Abb. 65. Strommesser I und Spannungsmesser U 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

$$\cos \varphi = \frac{N}{U \cdot I}.$$

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. 47) kann man dagegen den Leistungsfaktor nur unter Annahme von sinusförmigem Verlauf von Strom und Spannung messen.

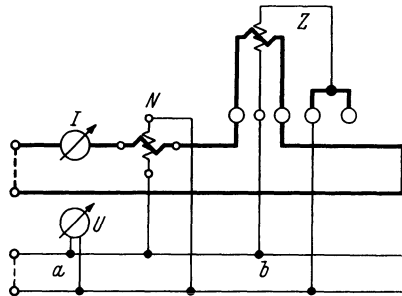


Abb. 65. Einphasenwechselstrom, getrennter Strom- und Spannungskreis, Niederspannung und Niederstrom.

Hochspannung und Hochstrom.

In Abb. 66 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 eine Äquipotentialverbindung 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 Teilstrichen hervorrufen. Zu empfehlen ist es ferner, die Wandler auf der Sekundärseite 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 (Verschiebungsströme) auch sehr klein und vollkommen unschädlich sind,

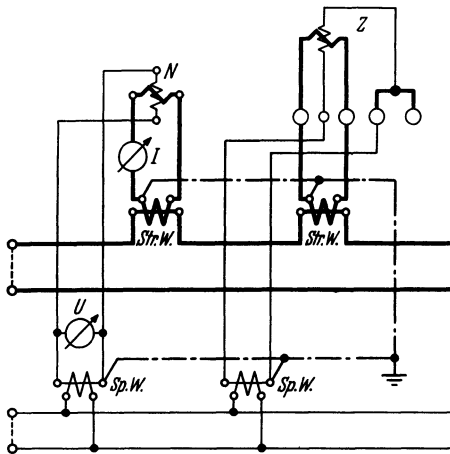


Abb. 66. Einphasenwechselstrom, getrennter Strom- und Spannungskreis, Hochspannung und Hochstrom.

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 Meßgeräten erhebliche Fehlmessungen machen. Ob die Leitungsführung genügend feldlos ist, stellt man am einfachsten dadurch fest, daß man das für die Beeinflussung in Frage kommende Meßgerät um 180° dreht und beobachtet, ob sich sein Ausschlag ändert oder nicht.

darseite 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 (Verschiebungsströme) auch sehr klein und vollkommen unschädlich sind,

Der Leistungsfaktor berechnet sich genau so wie bei Niederspannung; die Wandlerfehler sind bei Verwendung moderner Wandler so gering, daß man sie nicht zu berücksichtigen braucht.

b) Schaltung bei direkter Belastung.

Niederspannung und Niederstrom.

Will man einen Wechselstromzähler an Ort und Stelle prüfen, so hat man nur selten die Möglichkeit, mit getrennten Strom- und Spannungskreisen zu arbeiten.

Die Belastung stellt man dann entweder durch die Installation selbst oder durch besondere Belastungswiderstände *B.-W.*, wie sie oben S. 29 beschrieben sind, her. Die Schaltung wird nach dem Schema der Abb. 67 ausgeführt. Eine Äquipotentialverbindung zwischen Strom- und Spannungsspule ist ohne weiteres durch die Schaltung des Zählers am Einbauort gegeben.

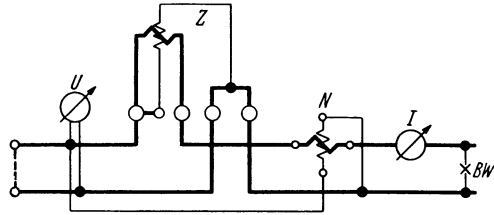


Abb. 67. Einphasenwechselstrom, direkte Belastung, Niederspannung und Niederstrom.

Bei Niederspannung und Hochspannung ist der Spannungsmesser und die Spannungsspule des Leistungsmessers oder der Spannungs-

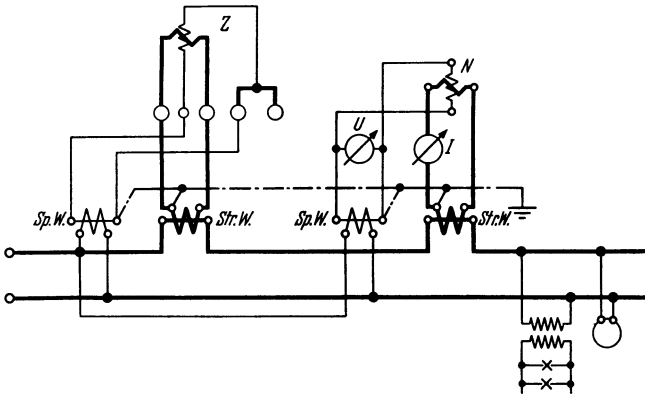


Abb. 68. Einphasenwechselstrom, direkte Belastung, Hochspannung und Hochstrom.

wandler so anzuschließen, daß die in ihnen fließenden Ströme nicht durch die Stromspule des Zählers fließen, sondern vorher abgezweigt werden, wie dies aus den Abb. 67 und 68 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 Äquipotentialverbindung zwischen Haupt-

strom- und Spannungskreis vorgesehen, wie dies in Abb. 67 gezeichnet ist. Bei Hochstrommessungen muß darauf geachtet werden, daß die Zuleitungen zum Stromwandler möglichst nahe aneinander geführt werden, damit keine Felder entstehen, die die Angaben der Strommesser und Leistungsmesser beeinflussen. Auch muß man darauf achten, daß man die Meßgeräte 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 Meßgerät in zwei um 180° gegeneinander versetzten Stellungen abliest, wobei es keine Änderung des Ausschlags zeigen darf.

2. Vierleiter-Zweiphasenwechselstrom.

Wie Abb. 69 zeigt, sind bei Vierleiter-Zweiphasenstrom beide Phasen vollkommen unabhängig voneinander. Jede Phase wirkt auf ein Zählersystem, das von dem anderen elektrisch vollkommen getrennt ist. Beide Systeme arbeiten mechanisch auf eine gemeinsame Achse.

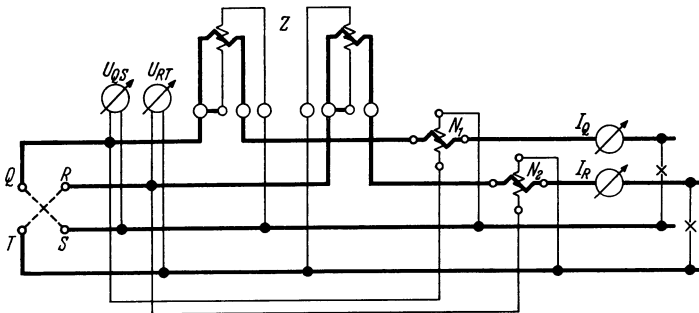


Abb. 69. Vierleiter-Zweiphasenstrom, direkte Belastung, Niederspannung und Niederstrom.

a) **Schaltung bei direkter Belastung.** Bei der Prüfung an Ort und Stelle benutzt man zwei Leistungsmesser, die genau so wie die beiden Systeme des Zählers geschaltet werden, Abb. 69.

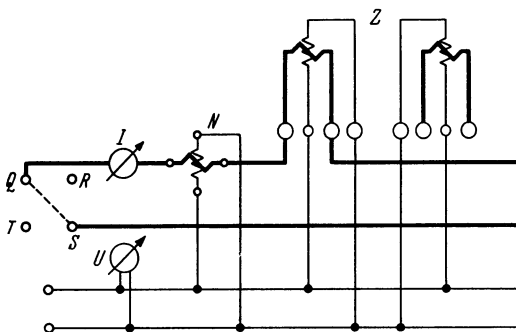


Abb. 70. Vierleiter-Zweiphasenstrom, getrennter Strom- und Spannungskreis, Niederspannung und Niederstrom.

b) **Schaltung bei getrennten Strom- und Spannungskreisen.** Bei der Prüfung mit getrennten Strom- und Spannungskreisen nimmt man meist jede Phase getrennt vor, macht also zwei Einphasenmessungen, entsprechend Abbildung 70. 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 nur die Bremsung durch den Fluß der Spannungsspule soll den normalen Wert haben. Nur wenn man Zähler zu prüfen 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 prüfen und hat man keine Zweiphasenstromquelle zur Verfügung, so kann man sich dadurch helfen, daß man entsprechend Abb. 71 z. B. an einem Drehstromtransformator, dessen Nullpunkt zugänglich ist, die Spannungen U_R und U_{ST} 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 Prüfung mittels Einphasenstrom vorlieb nehmen.

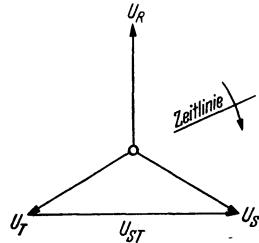


Abb. 71. Zweiphasenstrom aus Drehstrom.

Schaltungsbilder für Hochspannungs- und Hochstromprüfungen 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 T und S sowohl im Spannungs- als auch im Hauptstromkreise 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 T und S 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 grundsätzlich eine Einphasenmessung dreimal

wiederholt. Bei der Messung mit getrennten Strom- und Spannungskreisen schaltet man sowohl die Spannungsspulen der Zähler und Leistungsmesser als auch die Spannungsmesser zwischen die einzelnen Phasen und den Nulleiter.

Oft wird man aber die Schaltung des Spannungskreises nach Abb. 72 machen, d. h. man wird sich mit Hilfe der drei Spannungsmesser ein gleichseitiges Spannungsdreieck herstellen und dann das Dreieck so drehen, daß es zu dem Stern des Hauptstromdiagramms in die richtige zeitliche Lage kommt. Auch muß man die Spannungen auf die richtige

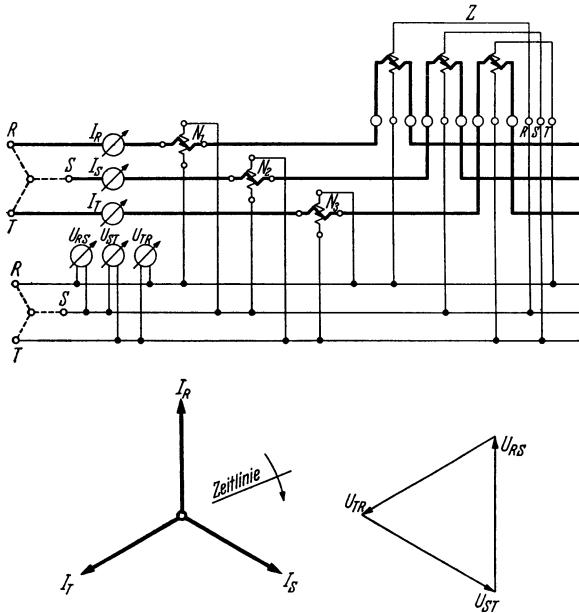


Abb. 72. Vierleiter-Drehstrom mit drei messenden Systemen, getrennte Strom- und Spannungskreise, Niederspannung und Niederstrom.

Größe einregeln. Voraussetzung ist, daß beide Enden aller drei Spannungsspulen an der Anschlußklemme des Zählers zugänglich und nicht unlösbar in Stern geschaltet sind. Sind diese Enden mit R , S , T bezeichnet, so wird verbunden:

$$\begin{array}{l} R \text{ mit Leitung } S, \\ S \text{ ,, ,, } T, \\ T \text{ ,, ,, } R. \end{array}$$

Der Nullpunkt der Spulen liegt also reihum an den Phasen R , S , T . Dann erhält man die richtigen Verhältnisse, wie aus den unter Abb. 72 gezeichneten Diagrammen hervorgeht. Das linke Diagramm bezieht sich auf den in Stern geschalteten Stromkreis, das rechte auf die in Dreieck geschalteten Spannungsspulen. Es besteht daher Phasengleichheit zwischen Strom und Spannung in jedem messenden System, wenn

die Ströme und Spannungen die in den Diagrammen gezeichnete Lage haben.

Die drei Stromkreise schaltet man entsprechend Abb. 72 in Stern und stellt mit Hilfe der drei Strommesser ein gleichseitiges Stromdreieck her. Eine Nulleitung erübrigt sich.

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

Hochspannung und Hochstrom.

Für Hochspannung ist kein besonderes Schaltschema gezeichnet, es ergibt sich aus Abb. 72, 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 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 Abb. 86).

b) Schaltung bei direkter Belastung.

Abb. 73 zeigt die Schaltung für Zähler mit drei messenden Systemen und Nulleiter an Ort und Stelle bei direkter Belastung durch Lampen

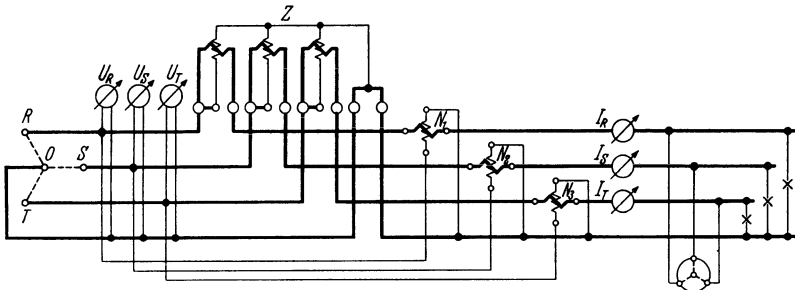


Abb. 73. Vierleiter-Drehstrom mit drei messenden Systemen, direkte Belastung, Niederspannung und Niederstrom.

und Motoren. Wie bei Einphasenwechselstrom ist darauf zu achten, daß alle Spannungsleitungen vor den Zählerhauptstromspulen abzweigend werden müssen, damit an den Meßgeräten die gleiche Spannung liegt wie am Zähler.

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

e) Abschaltung einer Phase.

Für den Fall, daß alle Belastungen an den Nulleiter angeschlossen sind, ist es ohne Einfluß auf die Größe und die Phase der Ströme oder Spannungen, wenn man eine Phase abschaltet. Hat man jedoch die drei Belastungen zwar in Stern geschaltet, jedoch den Nulleiter nicht an den Sternpunkt herangeführt, wie in Abb. 74, so ergeben sich bei

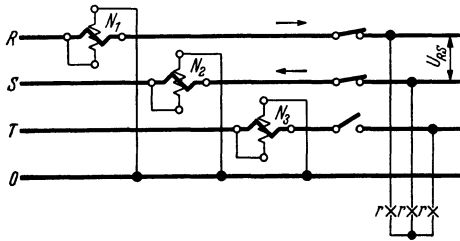


Abb. 74. Vierleiter-Drehstrom, Abschaltung einer Phase.

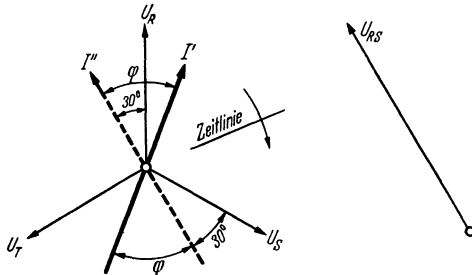


Abb. 75. Vierleiter-Drehstrom, Abschaltung einer Phase.
Diagramm zu Abb. 74.

R und S liegenden Belastungen gegeben ist. Sind diese Belastungen jedoch induktiv, so ist die Lage des Stromes um den Winkel φ gegen U_{RS} verschoben, wie I' in Abb. 75.

Die Belastungsverhältnisse, die sich einerseits bei gleicher Belastung aller drei Phasen, andererseits bei Abschaltung der Phase T , also alleiniger Belastung zwischen den Phasen R und S ergeben, sind im folgenden nebeneinandergestellt.

Alle drei Phasen eingeschaltet.

Phasenspannungen

$$U_R = U_S = U_T = U$$

Belastung jeder Phase

$$r$$

Phase T abgeschaltet.

Spannung zwischen R und S

$$U_{RS} = U \cdot \sqrt{3}$$

Belastung zwischen R und S

$$2r$$

Abschaltung einer Phase die im folgenden beschriebenen Verhältnisse. Der Einfachheit wegen sei angenommen, daß alle drei Belastungen vor der Abschaltung gleichartig und gleich groß ($=r$) sind und daß die Gleichheit der drei Phasenspannungen auch nach dem Abschalten einer Phase erhalten bleibt. Nach Abschaltung der Phase T ergibt sich zwischen den Phasen R und S ein Strom, der bei induktionsfreier Belastung mit der verketteten Spannung $U_{RS} = U\sqrt{3}$ in Phase ist und dessen Größe I'' durch den Widerstand $2r$ der zwischen den Leitungen

Strom jeder Phase

$$I_R = I_S = I_T = I = \frac{U}{r} \cdot$$

Strom zwischen R und S

$$I' = \frac{U\sqrt{3}}{2r} = I \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}$$

Leistungsmesser 1 zeigt

$$N_1 = U_R \cdot I_R \cdot \cos \varphi = U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad N_1 = U_R \cdot I' \cdot \cos(30^\circ \mp \varphi)$$

Leistungsmesser 2 zeigt

$$= U \cdot I \cdot \frac{3}{4} \text{ für } \varphi = 0$$

$$N_2 = U_S \cdot I_S \cdot \cos \varphi = U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad N_2 = U_S \cdot I' \cdot \cos(30^\circ \pm \varphi)$$

Leistungsmesser 3 zeigt

$$= U \cdot I \cdot \frac{3}{4} \text{ für } \varphi = 0$$

$$N_3 = U_T \cdot I_T \cdot \cos \varphi = U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad N_3 = 0$$

Die Gesamtleistung ist

$$N = 3 \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

$$N = \frac{1}{2} \cdot 3 \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi.$$

In den Gleichungen gilt das obere Vorzeichen bei induktiver, das untere bei kapazitiver Belastung. Bei induktionsfreier Belastung zeigt jeder der beiden Leistungsmesser nach Abschaltung einer Phase die Hälfte der Gesamtleistung an. 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.

Der Zähler arbeitet natürlich genau so wie die Leistungsmesser.

5. Dreileiter-Drehstrom, zwei messende Systeme.

a) Allgemeines.

In Drehstromnetzen ohne Nulleiter schaltet man die Zähler allgemein nach der sog. Zweileistungsmesserschaltung oder Zweiwattmetermethode¹. Da diese Schaltung am häufigsten in Drehstromanlagen vorkommt und sich daher jeder Zählertechniker damit befassen muß, soll sie etwas ausführlicher behandelt und der bekannte Beweis für ihre Richtigkeit angeführt werden. In Momentanwerten ist die Leistung eines Drehstroms

$$n = u_R \cdot i_R + u_S \cdot i_S + u_T \cdot i_T,$$

wobei u_R, u_S, u_T die Phasenspannungen, i_R, i_S, i_T die Ströme in den drei Leitungen sind.

Es ist nun bei Drehstrom ohne Nulleiter

$$i_R + i_S + i_T = 0.$$

Subtrahieren wir von der ersten Gleichung den Betrag $u_S(i_R + i_S + i_T)$, der ja Null ist, so erhalten wir

$$n = i_R(u_R - u_S) + i_T(u_T - u_S).$$

¹ Vgl. BEHN-ESCHENBERG: ETZ 1892 S. 73. — ARON: ETZ 1892 S. 193.

Nennen wir entsprechend dem Diagramm Abb. 76

$u_R - u_S$ die verkettete Spannung u_{RS} ,

$u_T - u_S$ „ „ „ „ u_{TS} ,

so erhält man schließlich

$$n = i_R \cdot u_{RS} + i_T \cdot u_{TS}.$$

An Stelle der Momentanwerte kann man bekanntlich die Effektivwerte setzen, hat dann jedoch die Phasenwinkel zwischen den Strömen und Spannungen zu berücksichtigen.

Man erhält unter Annahme sinusförmigen Wechselstroms am Leistungsmesser N_1 in der Schaltung nach Abb. 77

$$N_1 = J_R \cdot U_{RS} \cdot \cos(30^\circ \pm \varphi)$$

und am Leistungsmesser N_2

$$N_2 = J_T \cdot U_{TS} \cdot \cos(30^\circ \mp \varphi).$$

Das obere Vorzeichen gilt für induktive, das untere für kapazitive Belastung. Da man die Spannung

$U_{TS} = -U_{ST}$ so an den Leistungsmesser N_2 angeschlossen hat, daß er einen positiven Wert zeigt, so erhält man die Gesamtleistung als Summe der Ablesungen an den beiden Leistungsmessern.

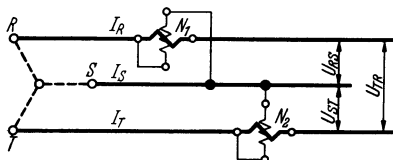


Abb. 76. Diagramm für Dreileiter-Drehstrom mit zwei messenden Systemen.

Abb. 77. Schaltung für Dreileiter-Drehstrom mit zwei messenden Systemen.

Bei gleicher Belastung aller drei Zweige und bei Gleichheit aller drei verketteten Spannungen, d. h. wenn

$$I_R = I_T = I$$

und

$$U_{RS} = U_{TS} = U_v$$

ist, wird die Summe der Ablesungen

$$N = N_1 + N_2 = I \cdot U_v \cdot 2 \cdot \cos 30^\circ \cdot \cos \varphi = I \cdot U_v \cdot \sqrt{3} \cdot \cos \varphi.$$

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

Man berechnet bei der Zweileistungsmesserschaltung den Leistungsfaktor aber meist aus den Einzelablesungen der Leistungsmesser, wie dies auf S. 47 ausführlich angegeben ist.

Um leicht einstellen zu können und über die Lage der einzelnen Vektoren immer ein klares Bild zu haben, zeichnet man sich die Abb. 76 auf festen Karton und macht den in der Abbildung mit einem Kreis umgebenen Mittelteil, auf dem die Vektoren der drei Ströme gezeichnet

sind, drehbar. Diese sog. „Drehscheiben“ haben sich im Laboratoriumsgebrauch bewährt.

b) Schaltung bei getrennten Strom- und Spannungskreisen.

Niederspannung und Niederstrom.

Bei Niederspannung und Niederstrom gestaltet sich die Schaltung nach der Zweileistungsmesserschaltung sehr einfach, vgl. Abb. 78. Zähler und Leistungsmesser sind ganz gleich geschaltet.

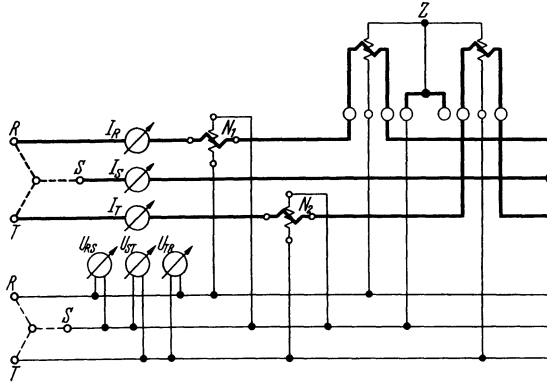


Abb. 78. Dreileiter-Drehstrom mit zwei messenden Systemen, getrennte Strom- und Spannungskreise, Niederspannung und Niederstrom.

Schaltet man eine der Phasen ab, so zeigt bei Abschaltung der Phase R nur der Leistungsmesser N_2 an, bei Abschaltung der Phase T nur der Leistungsmesser N_1 . Es ergibt sich also in diesen Fällen eine einfache

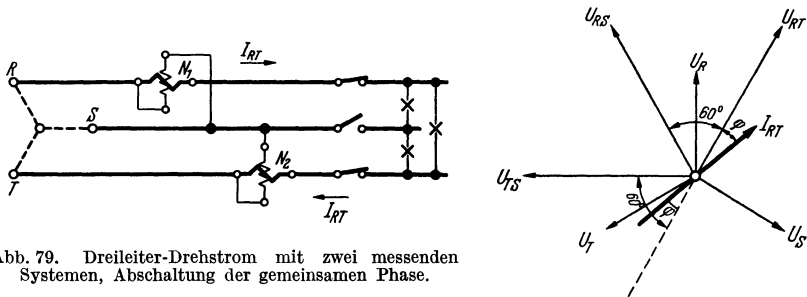


Abb. 79. Dreileiter-Drehstrom mit zwei messenden Systemen, Abschaltung der gemeinsamen Phase.

Einphasenmessung. Schaltet man dagegen Phase S ab, so zeigen beide Leistungsmesser an. In Abb. 79 ist das Diagramm der Ströme und Spannungen für diesen Fall gezeichnet. An den beiden Leitern R und T liegt die verkettete Spannung U_{RT} . Bei induktionsfreier Belastung wird sich also der Strom in Phase mit U_{RT} einstellen, bei induktiver Belastung verschiebt sich der Strom in die Lage I_{RT} . Die Leistungsmesser zeigen an

$$N_1 = I_{RT} \cdot U_{RS} \cdot \cos(60^\circ + \varphi),$$

$$N_2 = I_{RT} \cdot U_{TS} \cdot \cos(60^\circ - \varphi).$$

Die Stromrichtung im Leistungsmesser N_2 ist umgekehrt, wie bei normaler Schaltung. Im Diagramm arbeitet $-I_{RT}$ mit U_{TS} zusammen, also ergibt sich ein positiver Wert von N_2 . Kann man $U_{RS} = U_{TS} = U_v$ setzen, so wird

$$N = N_1 + N_2 = I_{RT} \cdot U_v \cdot \cos \varphi,$$

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

Hochspannung und Hochstrom.

Zu dem Schaltungsschema Abb. 80 für Hochspannung ist zu bemerken, daß niederspannungsseitig Äquipotentialverbindungen zwischen den Strom- und Spannungsspulen bei den Leistungsmessern und beim

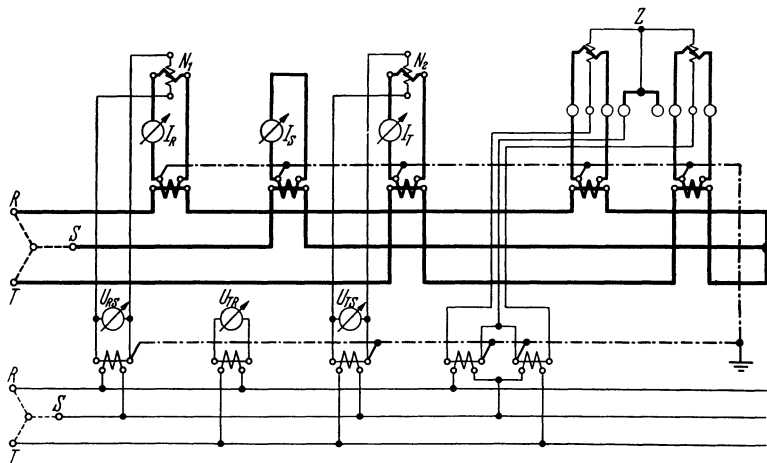


Abb. 80. Dreileiter-Drehstrom mit zwei messenden Systemen, getrennte Strom- und Spannungskreise, Hochspannung und Hochstrom.

Zähler notwendig sind. Diese Verbindungen erdet man auch zweckmäßig entsprechend den strichpunktierten Linien der Abb. 80. Bei Verwendung eines Drehstromwandlers erdet man dessen Nullpunkt; die Erdung der Hauptstromspulen bleibt wie in Abb. 80 bestehen. Im Spannungskreis wird man hochspannungsseitig nur einen vorhandenen Nullpunkt oder einen künstlich geschaffenen erden. Andere Erdungen sind nicht zulässig. Für *direkte Belastung* ändert sich gegenüber den Schaltungen Abb. 78 und 80 nur das eine, daß die beiden Leitungssysteme in eines zusammengelegt werden.

Schaltung mit nur einem Leistungsmesser.

Bei Niederspannung kann man mit einem Leistungsmesser oder einem Prüfzähler auskommen, wenn man die Schaltung nach Abb. 81 wählt¹. Die Stromspulen des Zählers und des Leistungsmessers werden

¹ DI PIERI, C.: *Elettrotecnica* Bd. 24 (1937) S. 784; Referat ETZ 1938 S. 472. — Eine nicht so vollkommene Schaltung ist die von DOERICH: ETZ 1928 S. 180; vgl. dazu W. BEETZ: ETZ 1929 S. 1835.

von ein und demselben Strom I durchflossen, die Spannungsspulen des Zählers liegen an U_R und U_T , die Spannungsspule des Leistungsmessers an U_{RT} . Man muß darauf achten, daß der Strom I das Meßwerk b in solcher Richtung durchfließt, daß bei $\cos \varphi = 1$ ein positives

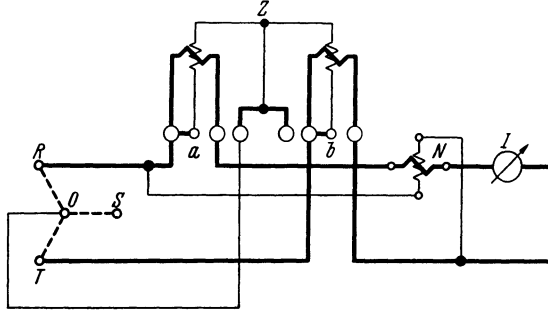


Abb. 81. Dreileiter-Drehstrom, Schaltung mit nur einem Leistungsmesser.

Drehmoment auftritt, wenn die Spannungsanschlüsse entsprechend Abb. 81 gemacht sind. Bei dieser Anordnung braucht man die Verbindung der beiden Spannungsspulen, an die der Nulleiter angeschlossen wird, nicht zu lösen; da sie meist im Innern des Zählers liegt, ist dies wünschenswert. Aus dem Diagramm Abb. 82 kann man die Angaben des Zählers und des Leistungsmessers ablesen. Der Zähler zeigt:

$$A = U_R \cdot I \cdot \cos(\varphi + 30^\circ) + U_T \cdot I \cdot \cos(\varphi - 30^\circ) \\ = U \cdot I \cdot 2 \cos \varphi \cdot \frac{1}{2} \sqrt{3} = U \cdot I \cdot \sqrt{3} \cdot \cos \varphi,$$

wenn man $U_R = U_T = U$ setzen kann.

Der Leistungsmesser zeigt

$$N = U_{RT} \cdot I \cdot \cos \varphi = U \cdot I \cdot \sqrt{3} \cdot \cos \varphi,$$

also das gleiche wie der Zähler, wenn man $U_{RT} = U\sqrt{3}$ setzen kann. Es ist also nur notwendig, daß die Spannungen U_R und U_T gleich groß gehalten werden und um 120° versetzt sind. Dann hat auch die Spannung U_{RT} die richtige Phasenlage. Da die Spannungsspulen des Zählers im Betrieb nicht an den Sternspannungen, sondern an den verketteten Spannungen liegen, ist es erforderlich, die Spannungen U_R und U_T im Verhältnis $1 : \sqrt{3}$ zu erhöhen. Bei direkter Schaltung kann man dies mit Hilfe eines kleinen Wandlers machen, bei Sparschaltung regelt man den Spannungskreis entsprechend. Der Zähler zeigt dann

$$A = 3 \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \cdot t.$$

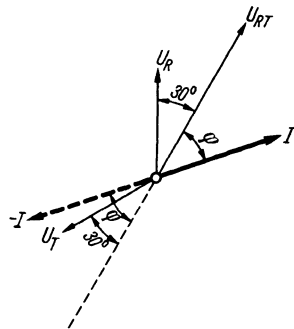


Abb. 82. Diagramm zur Schaltung Abb. 81.

Um die Angaben des Leistungsmessers denen des Zählers vergleichen zu können, muß man sie mit $\sqrt{3}$ multiplizieren.

Der Vorteil der beschriebenen Schaltung gegenüber ähnlichen bisher bekannten ist der, daß die gegenseitige Beeinflussung der Spannungsflüsse der beiden Meßwerke a und b genau die gleiche ist, wie bei der Zweileistungsmesserschaltung nach Abb. 77, weil dafür die Nachteilung von U_R gegen U_T um 120° gleichbedeutend ist mit der Nachteilung von U_{RS} gegen U_{TS} um 60° in Abb. 76. Denn die Drehmomente, die von um einen Winkel ψ phasenverschobenen Spannungsflüssen gebildet werden, sind proportional $\sin \psi$ und $\sin 120^\circ = \sin 60^\circ$. Die Wechselwirkungen zwischen dem Stromfluß des einen Meßwerkes und dem Spannungsfluß des anderen Meßwerkes und zwischen den Stromflüssen der beiden Meßwerke sind andere als bei der Zweileistungsmesserschaltung. Bei Zählern mit nicht vollkommen wirkender Drehfeldkompensation können sich also kleine Abweichungen gegenüber der Zweileistungsmesserschaltung ergeben.

6. Vierleiter-Drehstrom, zwei messende Systeme.

a) Allgemeines.

Eine besondere Schaltungsart zur Messung der Arbeit in Vierleiter-Drehstromnetzen durch Zähler mit nur zwei messenden Systemen zeigt Abb. 83 und 84. Ein System trägt zwei Hauptstromwicklungen, die

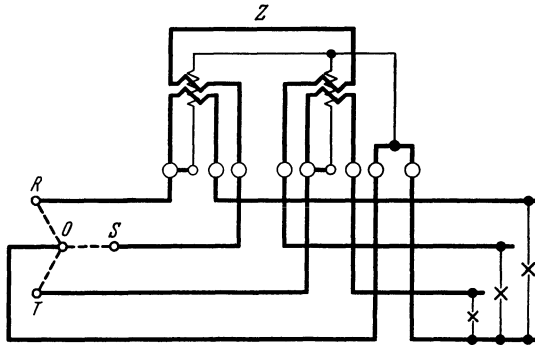


Abb. 83. Vierleiter-Drehstrom mit zwei messenden Systemen, direkte Belastung, Niederspannung und Niederstrom.

in die Phasen R und S eingeschaltet sind, das andere ebenfalls zwei Hauptstromwicklungen, die in die Phasen T und S eingeschaltet sind. An der Spannungswicklung des ersten Systems liegt die Spannung U_R , an der des zweiten Systems die Spannung U_T . Beide Systeme arbeiten auf die gleiche Achse¹.

¹ Die Schaltung ist ein vollständiges Analogon zur Zweileistungsmesserschaltung S. 85 und 86; an Stelle der elektrisch verketteten Spannungen u_{RS} und u_{TS} treten die magnetisch verketteten Ströme i_{RS} und i_{TS} , an Stelle der Phasenströme i_R und i_T die Phasenspannungen u_R und u_T . Aus der induktiven Phasenverschiebung wird eine kapazitive und umgekehrt.

Die Wicklungen sind in solchem Sinne aufgebracht, daß die Ströme und Spannungen entsprechend Abb. 84 zusammenarbeiten; der Momentanwert der Leistung wird

$$n = i_{RS} \cdot u_R + i_{TS} \cdot u_T.$$

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

$$u_R + u_S + u_T = 0.$$

Hat dagegen diese Summe einen bestimmten Wert, so daß

$$u_R + u_S + u_T = u_0,$$

so ist die Leistung im Netz¹

$$n = i_{RS} \cdot u_R + i_{TS} \cdot u_T + i_S \cdot u_0.$$

Der Wert $i_S \cdot u_0$ wird vom Zähler nicht mitgezählt. Da nun aber, wie ORLICH¹ nachgewiesen hat, die Spannung u_0 bei nicht sinusförmigem Wechselstrom oder bei Verzerrung des Nullpunktes beträchtliche Werte annehmen kann, sind so geschaltete Zähler zur Messung in Drehstrom-Vierleiternetzen nur bedingt geeignet. Praktisch kommen allerdings selten so große Verzerrungen vor, daß die Angaben um mehr als einige Prozente geändert werden².

Unter Einsetzung der Effektivwerte ergibt sich aus Abb. 84 die Leistung bei induktiver Belastung:

$$\begin{aligned} N &= I_{RS} \cdot U_R \cdot \cos(30^\circ - \varphi) + I_{TS} \cdot U_T \cdot \cos(30^\circ + \varphi) \\ &= 3 \cdot I \cdot U \cdot \cos \varphi, \end{aligned}$$

wenn man $I_{RS} = I_{TS} = I\sqrt{3}$ und $U_R = U_T = U$ setzen kann, d. h. wenn die Belastungsströme und die Spannungen untereinander gleich sind.

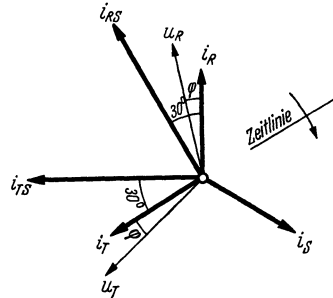


Abb. 84. Diagramm zur Schaltung Abb. 83.

b) Schaltung bei getrennten Strom- und Spannungskreisen.

Niederspannung und Niederstrom.

Für die Prüfung 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 Regelung 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

¹ Die Gleichung läßt sich aus der von ORLICH (ETZ 1907 S. 71) angegebenen Gleichung 11 durch einige Umformungen ableiten.

² Vgl. STUBBINGS: Electrician Bd. 87 (1921) S. 754; Referat ETZ 1922 S. 1165.

120° gegeneinander verschoben sind. Dies ist aber Bedingung dafür, daß das Störungsglied $i_S \cdot u_0 = 0$ wird.

Man hilft sich dadurch, daß man ähnlich wie oben beim Vierleiter-Drehstromzähler mit drei messenden Systemen nur drei Leitungen benutzt und die verketteten Spannungen dieses Systems sinngemäß mit den Spannungsspulen des Zählers und der Leistungsmesser verbindet. In Abb. 85 ist die Prüfschaltung angegeben. Zur Schaltung des Hauptstromkreises ist nichts zu bemerken. Diejenige Spannungsspule des Zählers, die in der Installation an U_R zu liegen kommt, wird an U_{RS} gelegt, ebenso die Spannungsspule, die in der Installation an U_T liegt,

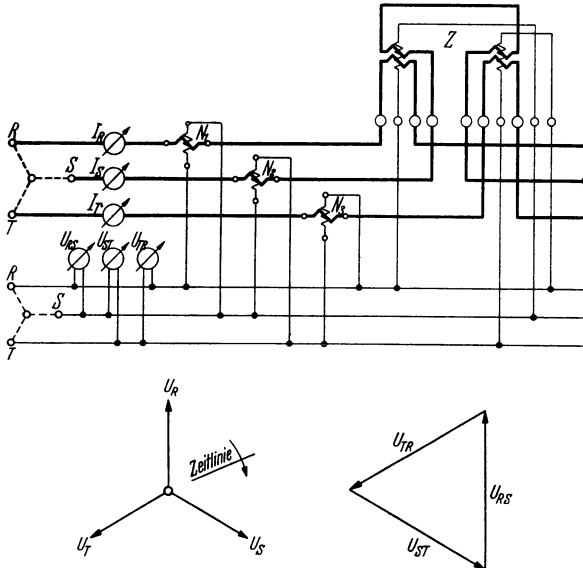


Abb. 85. Vierleiter-Drehstrom mit zwei messenden Systemen, getrennte Strom- und Spannungskreise, Niederspannung und Niederstrom.

an U_{TR} . Einmal ersetzt also die Leitung S den Nulleiter, das andere Mal die Leitung R . Der Zähler muß deshalb so eingerichtet sein, daß man die Enden der Spannungsspulen, die in der Installation am Nullpunkt liegen, für die Prüfschaltung 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 wie der Zähler geschaltet werden, sondern in jeder Phase muß ein Leistungsmesser liegen. Dabei werden die Spannungsleitungen folgendermaßen verbunden:

Leistungsmesser in	Spannung	Nulleiter ersetzt durch Leitung
Phase R	U_{RS}	S
Phase S	U_{ST}	T
Phase T	U_{TR}	R

Hochspannung und Hochstrom.

Für Hochspannung und Hochstrom wird nach Abb. 86 geschaltet. Die Schaltung der drei Leistungsmesser ist ebenso wie in Abb. 85, Besonderheiten zeigen sich nur bei der Schaltung der Hauptstromkreise des Zählers.

Entweder benutzt man einen Zähler mit zwei Wicklungen auf jedem System, wozu man drei Stromwandler braucht, oder man verkettet, wie in der Abbildung 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 Abb. 86 angegeben. Wenn der die Hochspannung liefernde Transformator keinen für die Erdung zugänglichen Nullpunkt hat, kann man einen künstlichen Nullpunkt etwa durch eine Drehstromdrosselspule herstellen.

e) Schaltung bei direkter Belastung.

Niederspannung und Niederstrom.

Bedeutend einfacher als für die Prüfung mit getrennten Strom- und Spannungskreisen gestaltet sich die Schaltung für direkte Prüfung in der Installation. Abb. 87 bedarf keiner Erläuterung. Es ist durch Messung der verketteten und der Phasenspannungen festzustellen, ob das Glied u_0 nicht auf die Angaben

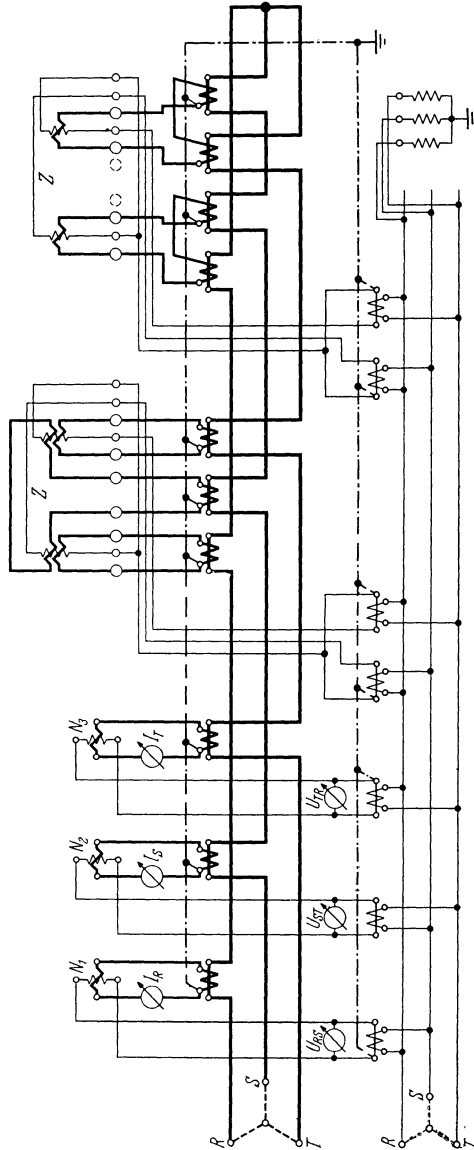


Abb. 86. Vierleiter-Drehstrom mit zwei messenden Systemen, getrennte Strom- und Spannungskreise, Hochspannung und Hochstrom.

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

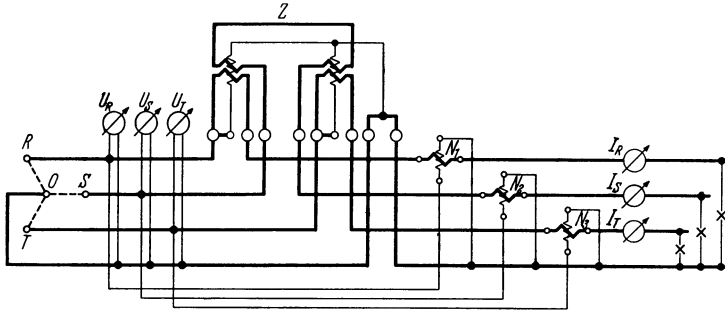


Abb. 87. Vierleiter-Drehstrom mit zwei messenden Systemen, direkte Belastung, Niederspannung und Niederstrom.

Abb. 87, die Schaltung des Hauptstromkreises ist genau gleich der in Abb. 86. Äquipotential- und Erdverbindungen müssen sinngemäß hergestellt werden.

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 Ungleichheiten 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 werden deshalb von der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt nicht mehr zur Beglaubigung zugelassen. Trotzdem werden diese Zähler in Niederspannungsnetzen 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.** Abb. 88.

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

$$Z = 3 \cdot I_R \cdot U_R \cdot \cos \varphi \cdot t.$$

¹ Vgl. SCHMIEDEL: ETZ 1913 S. 53.

Ebenso ist die auf dem Zählerschild angegebene Konstante so gewählt, daß die aus den Umdrehungen berechneten Angaben die Drehstromarbeit ergeben. Man prüft den Zähler sowohl für Niederspannung als auch für Hochspannung als Einphasenzähler. Die Angaben des zur Prüfung verwendeten Leistungsmessers müssen also bei der Berechnung des Fehlers mit 3 multipliziert werden.

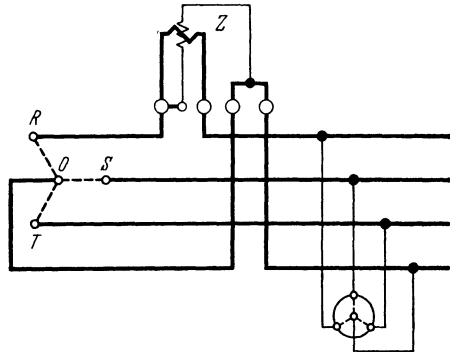


Abb. 88. Drehstrom mit einem messenden System, J_R und U_R .

e) Eine Hauptstromspule in einer Phasenleitung, eine Spannungsspule zwischen dieser Leitung und einer anderen Phasenleitung. Abb. 89.

Der Zähler mißt an und für sich $N \cdot t = I_R \cdot U_{RT} \cdot \cos \varphi \cdot t$, wenn der von der Spannungsspule erzeugte magnetische Fluß der Spannung um 60° nachleilt (anstatt wie beim normalen Einphasenzähler um 90°), wie aus dem Diagramm Abb. 90a ersichtlich ist.

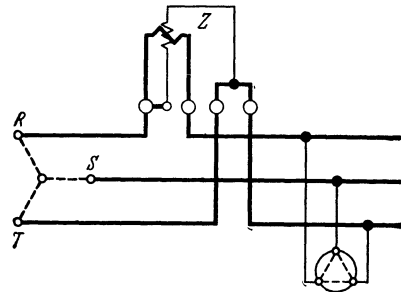


Abb. 89. Drehstrom mit einem messenden System, J_R und U_{RT} .

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

$$Z = \sqrt{3} \cdot I_R \cdot U_{RT} \cdot \cos \varphi \cdot t = 3 \cdot I \cdot U \cdot \cos \varphi \cdot t.$$

Entsprechend ist die Konstante auf dem Zählerschild so angegeben, daß die aus den Umdrehungen berechneten Angaben die Drehstromarbeit ergeben.

Bei der Prüfung mit getrenntem Strom- und Spannungskreis schaltet man Zähler und Leistungsmesser genau so wie bei Einphasenmessungen, wobei an den Spannungsspulen eine Spannung von der Größe der verketteten Spannung liegen muß. Bei

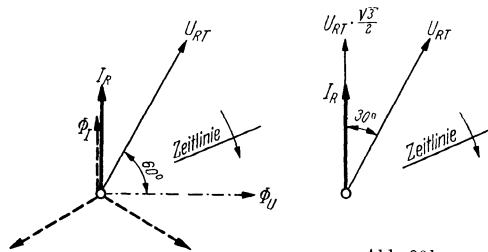


Abb. 90a. Zähler. Abb. 90b. Leistungsmesser.
Abb. 90a u. b. Diagramme zur Schaltung Abb. 89.

induktionsfreier Belastung für den Zähler muß der Leistungsmesser entsprechend Abb. 90b anzeigen $I_R \cdot U_{RT} \cdot \sqrt{3}/2$, also 0,866 seines

größten 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:

$$N = 2 \cdot I_R \cdot U_{RT} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = I_R \cdot U_{RT} \sqrt{3} = 3 \cdot U \cdot I.$$

Will man den Zähler für induktive Last eichen, so muß man bedenken, daß der Leistungsmesser $I_R \cdot U_{RT} \cdot \cos(30^\circ - \varphi)$ zeigt, während der Zähler mit einer Geschwindigkeit läuft, die $I_R \cdot U_{RT} \cdot \sqrt{3} \cdot \cos \varphi$ proportional ist. Deshalb stellt man sich am besten die folgende Tabelle auf, die die Ausschläge des Leistungsmessers für eine Anzahl von Lei-

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

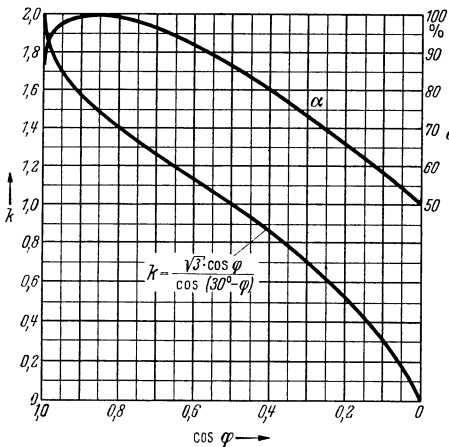


Abb. 91. Korrektur k für den Leistungsmesser in Abb. 89.

stungsfaktoren im Netz in Prozenten des größten 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 Zählers entsprechende Leistung für die Berechnung des Fehlers zu erhalten. Die Faktoren sind in Abhängigkeit von $\cos \varphi$ in Abb. 91 aufgetragen.

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. Abb. 92.

Bei dem Zähler nach Abb. 92 durchfließen die beiden Phasenströme zwei auf ein und denselben Eisenkern aufgebraachte Wicklungen. Der von ihnen erzeugte magnetische Fluß wird von gleicher Größe und von gleicher Phase, wie wenn sich die beiden Ströme I_R und I_T entsprechend dem Diagramm der Abb. 93a zu einem resultierenden Strom I_{RT} verbänden. Die an der Spannungsspule liegende Spannung ist bei induktionsfreier Belastung U''_{RT} , fällt also mit dem Strom I_{RT} zusammen. Bei induktiver Last eilt der Strom der Spannung um einen Winkel φ nach, was gleichbedeutend ist mit einer Verschiebung von U''_{RT} nach U'_{RT} in Abb. 93a. Da der Zähler mit 90° -Verschiebung gebaut ist, sind seine Angaben

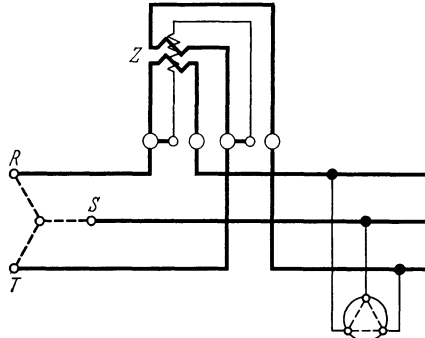


Abb. 92. Drehstrom mit einem messenden System, $I_R - I_T$ und U_{RT} .

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

$$A = I_{RT} \cdot U'_{RT} \cdot \cos \varphi \cdot t.$$

Man kann den Zähler als Einphasenzähler prüfen, 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 I_R und $-I_T$ durch die Spulen leitet oder zwei phasengleiche Ströme, von denen jeder die Größe $I_R \cdot \sqrt{3}/2$ hat. Bei Bestimmung der Höhe der Belastung ist der Zahlenwert zu berücksichtigen. Im übrigen kann man die Angaben des Zählers direkt mit denen eines Leistungsmessers vergleichen, der vom gleichen Strom durchflossen wird und an der gleichen Spannung liegt.

Will man an Ort und Stelle mit Drehstrom prüfen, so kann man die Stromspulen zweier Leistungsmesser wie die des Zählers in je eine Phase einschalten, während man ihre Spannungsspulen an ein und dieselbe Spannung U'_{RT} anschließt. Entsprechend dem Diagramm der

Abb. 93a. Zähler. Abb. 93b. Leistungsmesser. Diagramme zur Schaltung Abb. 92.

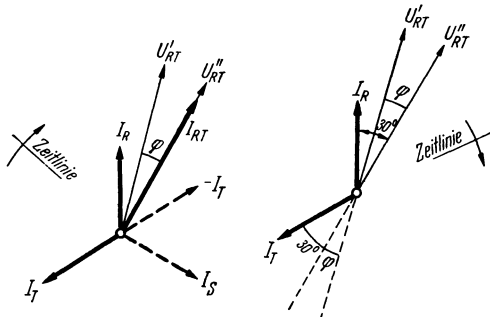


Abb. 93a. Zähler. Abb. 93b. Leistungsmesser. Diagramme zur Schaltung Abb. 92.

Abb. 93 b ergibt die Summe der Ablesungen der beiden Leistungsmesser bei induktiver Last:

$$N = I_R \cdot U'_{RT} \cdot \cos(30^\circ - \varphi) + I_T \cdot U'_{RT} \cdot \cos(30^\circ + \varphi).$$

Setzt man unter Annahme gleicher Belastung der drei Zweige $I_R = I_T$, ferner unter Voraussetzung genauer 120° -Verschiebung $I_R - I_T = I_R \sqrt{3}$, so erhält man

$$N = I_R \sqrt{3} \cdot U'_{RT} \cdot \cos \varphi = I_{RT} \cdot U'_{RT} \cdot \cos \varphi.$$

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 prüfen 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. Blindverbrauchzähler¹.

a) Allgemeines.

Alle bisher beschriebenen Prüfschaltungen waren für die Prüfung von Wirkverbrauchzählern bestimmt. Wir wollen uns im folgenden mit den Schaltungen für Blindverbrauchzähler befassen, vorher aber einige grundsätzliche Eigenschaften der Blindverbrauchzähler erörtern.

Die Blindverbrauchzähler sind vor allem bei größeren Anlagen von Wichtigkeit, wo es erwünscht ist, die induktive oder kapazitive Speicherenergie zu erfassen. Es werden also meist Drehstrom-Blindverbrauchzähler zu prüfen sein. Aber auch für Wechselstrommessungen werden in Sonderfällen Blindverbrauchzähler benötigt. Die grundsätzliche Wirkungsweise der Blindverbrauchzähler wollen wir uns kurz an dem Beispiel eines Einphasen-Blindverbrauchzählers für induktive Last klar machen.

Der Blindverbrauchzähler soll bekanntlich anzeigen:

$$A = N_B \cdot t = U \cdot I \cdot \sin \varphi \cdot t.$$

Bei induktionsfreier Last, also $\cos \varphi = 1$, ist $\sin \varphi = 0$, und die Angaben des Zählers sind dann auch gleich Null. Bei rein induktiver Last, also

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

$\cos \varphi = 0$, ist $\sin \varphi = 1$, und der Zähler läuft mit seiner größten Umdrehungszahl.

Abb. 94a zeigt das Diagramm eines Einphasen-Blindverbrauchzählers bei induktionsfreier Last; die Spannung U und der Strom I sind phasengleich. Der Strom wird in der gleichen Richtung wie beim Wirkverbrauchzähler durch den Zähler geleitet, die Spannung wird im umgekehrten Sinne wie beim Wirkverbrauchzähler angeschlossen, also in Richtung $-U$; den Grund dafür werden wir später sehen.

Der Spannungsfluß Φ_U eilt der Spannung $-U$ um β nach, der Stromfluß Φ_I dem Strom I um α . β und α müssen sich beim Blindverbrauchzähler zu 0° ergänzen (beim Wirkverbrauchzähler zu 90°).

Bei induktionsfreier Last sind die Flüsse Φ_U und Φ_I dann um $\psi_0 = 180^\circ$ verschoben. Bei einer induktiven Phasenverschiebung φ ergibt sich aus Abb. 94b eine Verschiebung zwischen Φ_U und Φ_I von $\psi = 180^\circ - \varphi$. Das Drehmoment des Zählers ist bekanntlich proportional $\Phi_U \cdot \Phi_I \cdot \sin \psi$; es ist positiv, da $\sin(180^\circ - \varphi)$ positiv ist. Würde die Phasenverschiebung zwischen Φ_U und Φ_I bei induktionsfreier Last nicht 180° , sondern 0° sein, würde also die

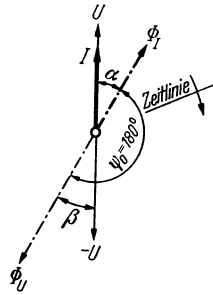


Abb. 94a.

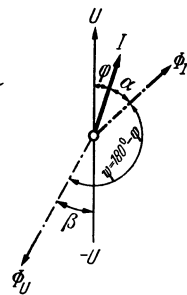


Abb. 94b.

Abb. 94a u. b. Allgemeine Diagramme eines Blindverbrauchszählers für Einphasenwechselstrom.

Spannung U genau so angeschlossen werden wie beim Wirkverbrauchzähler, so würde $\psi = -\varphi$ werden, $\sin \psi = \sin(-\varphi)$ würde negativ werden, der Zähler würde rückwärts laufen.

Daraus ergibt sich die allgemeine Regel für alle Blindverbrauchzähler für Einphasen- und Dreiphasen-Wechselstrom: „Jedes messende System muß so eingerichtet sein, daß bei induktionsfreier Belastung der Spannungsfluß dem Stromfluß um 180° nacheilt.“

Die einzelnen Bauarten der Blindverbrauchzähler unterscheiden sich nur dadurch, daß man zur Erzeugung des Spannungsflusses verschiedene Spannungen heranzieht. Man unterscheidet folgende Bauarten:

1. 180° -Verschiebung. Die Einphasenzähler können nur so ausgeführt werden, wie dies in Abb. 94 dargestellt ist. Drehstromzähler können ebenso ausgeführt werden. Die Zähler werden außen genau so angeschlossen wie Wirkverbrauchzähler. Die innere Schaltung ist dagegen vollkommen von der der Wirkverbrauchzähler verschieden.

2. 90° -Verschiebung. Nur für Drehstromzähler. Die innere Schaltung ist genau die gleiche wie die der Wirkverbrauchzähler, β und α ergänzen sich zu 90° . Die 180° -Verschiebung der Flüsse wird durch den Anschluß der Spannungsspulen an solche geeigneter Lage erzielt.

3. 60° -Verschiebung. Nur für Drehstromzähler. β und α ergänzen sich zu 60° . Die 180° -Verschiebung der Flüsse wird durch Anschluß der Spannungsspulen an solche geeigneter Lage erzielt.

Diese drei Schaltungen werden in folgendem behandelt werden, weil sie die gebräuchlichsten sind.

Ganz allgemein gilt ferner für Blindverbrauchzähler das Folgende: Die Schaltungen der Blindverbrauchzähler für induktive Last können in Schaltungen für kapazitive Last verwandelt werden, wenn man die Anschlüsse entweder an allen Stromspulen oder an allen Spannungsspulen umkehrt. Werden die für induktive Last geschalteten Blindverbrauchzähler kapazitiv belastet, so laufen sie rückwärts.

Zyklische Vertauschung der zusammengehörenden Größen ist bei allen Blindverbrauchzählern statthaft.

Während bei Wirkverbrauchzählern mit Drehfeldkompensation der Drehsinn fast ohne Einfluß ist und bei solchen ohne Kompensation nur Fehler von einigen Prozent bei falschem Drehsinn entstehen können, treten bei Blindverbrauchszählern bei falschem Drehsinn gänzlich veränderte Verhältnisse ein. Beispielsweise laufen Blindverbrauchzähler mit 90° -Verschiebung bei verkehrtem Drehsinn verkehrt herum, und zwar mit der gleichen Geschwindigkeit, mit der sie bei richtigem Anschluß vorwärts laufen; solche mit 60° -Verschiebung zeigen bei verkehrtem Drehsinn vollkommen falsch; nur die Blindverbrauchzähler mit 180° -Verschiebung sind unabhängig vom Drehsinn. Vor dem Anschließen von Blindverbrauchzählern muß man deshalb fast stets mit einem Drehfeldrichtungsanzeiger den Drehsinn feststellen.

Über den Anschluß der Leistungsmesser gilt allgemein folgendes:

Die Spannungsspule muß an eine Spannung angeschlossen werden, die bei induktionsfreier Last dem Strom um 90° nacheilt. Dann erhält man bei induktiver Last immer einen positiven Ausschlag, der $U \cdot J \cdot \sin \varphi$ proportional ist.

Im folgenden sollen nur die Schaltungen bei direkter Belastung und für Niederspannung und Niederstrom angegeben werden. Die Schaltungen für getrennten Strom- und Spannungskreis und für Hochspannung und Hochstrom lassen sich leicht aus den ausführlich angegebenen Schaltungen für Wirkverbrauch ableiten.

b) Vierleiter-Drehstrom, drei messende Systeme mit 180° -Verschiebung.

Die einzelnen Systeme sind im Innern nach Abb. 95 ausgeführt. Außen werden sie genau so angeschlossen wie beim Wirkverbrauchzähler. Damit die Leistungsmesser die Blindlast anzeigen, müssen sie anstatt an die Spannungen U_R , U_S , U_T bei Wirkverbraucherschaltung an die um 90° nacheilenden Spannungen U_{ST} , U_{TR} , U_{RS} angeschlossen werden, Abb. 96. Die Angaben der Leistungsmesser muß man durch $\sqrt{3}$

dividieren oder man muß durch Wahl richtiger Vorwiderstände in den Spannungskreisen dafür sorgen, daß die Größe der Ströme in den Spannungskreisen genau so groß ist, wie wenn sie an die Phasenspannungen

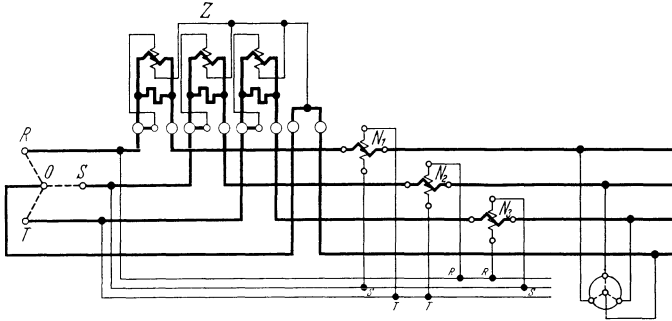


Abb. 95. Vierleiter-Drehstrom, drei messende Systeme mit 180° Verschiebung, direkte Belastung, Niederspannung und Niederstrom.

angeschlossen wären; der Gesamtwiderstand des Spannungskreises jedes Leistungsmessers muß $\sqrt{3}$ mal so groß gemacht werden, als wenn an ihm die Phasenspannung läge.

Voraussetzung für die Richtigkeit der Messung ist fernerhin, daß sowohl die Phasenspannungen als auch die verketteten Spannungen untereinander gleich sind. Bei direkter Schaltung nach Abb. 95 kann man dies nur durch gleiche Belastung aller drei Zweige erreichen. Bei der Messung mit getrennten Strom- und Spannungskreisen muß man sich gegebenenfalls einen künstlichen Nullpunkt durch eine genügend große Drossel schaffen oder besondere Regelschaltungen für die Symmetrierung¹ verwenden.

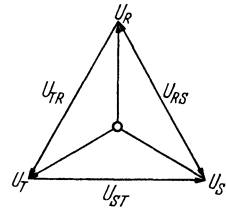


Abb. 96. Diagramm der Spannungen.

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

Bei Blindverbrauchzählern für Vierleiter-Drehstrom, deren Systeme ebenso wie die der Wirkverbrauchzähler für 90° -Verschiebung eingerichtet sind, werden die Anschlüsse der Spannungsspulen an die Netzleiter in folgender Weise gegenüber den in Abb. 73 gezeichneten vertauscht:

An Stelle von U_R tritt U_{ST} ,
 „ „ „ U_S „ U_{TR} ,
 „ „ „ U_T „ U_{RS} .

Abb. 97 zeigt die entsprechende Schaltung des Zählers und der Leistungsmesser, die in diesem Fall übereinstimmen. Die Enden der Spannungsspulen des Zählers müssen sämtlich an Einzelklemmen geführt

¹ REESE, R.: ETZ 1935 S. 1069, 1095 — Druckschrift der AEG Zf/V 411, Okt. 1935.

sein, damit sie an die richtigen Spannungen angeschlossen werden können. In Abb. 98 ist das Diagramm der Spannungen, der Ströme und der Flüsse für den Zähler bei gleicher Belastung der drei Phasen gezeichnet.

Um ein einfaches Diagramm zu erhalten, setzen wir voraus, daß der Stromfluß in Phase mit dem Strom ist, während er in Wirklichkeit

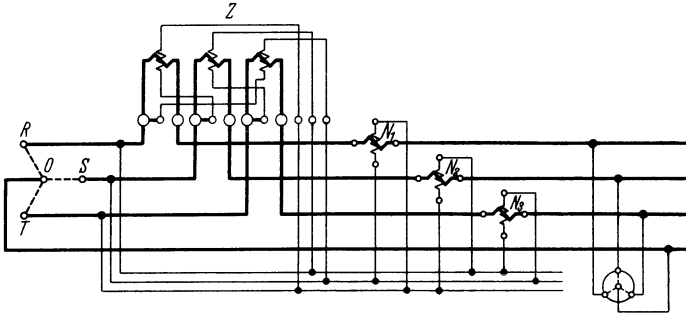


Abb. 97. Vierleiter-Drehstrom, drei messende Systeme mit 90° -Verschiebung, direkte Belastung, Niederspannung und Niederstrom.

um einen kleinen Winkel nacheilt. Der Spannungsfluß eilt dann der ihn erzeugenden Spannung um genau 90° nach. Am System R , das vom Strom I_R durchflossen wird, liegt die Spannung U_{ST} . Der von ihr erzeugte Spannungsfluß $\Phi_{U_{ST}}$ eilt dem Stromfluß Φ_{I_R} um $180^\circ - \varphi$

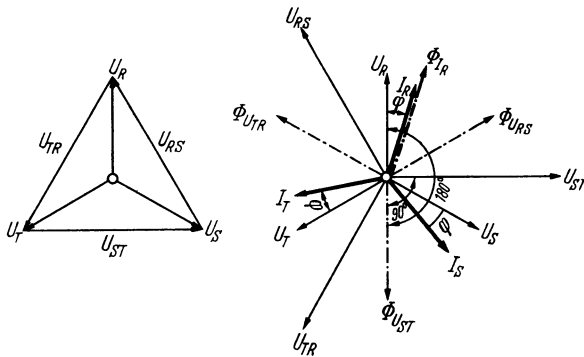


Abb. 98. Diagramme des Zählers für die Schaltung nach Abb. 97.

nach; analog gilt das gleiche für die anderen Systeme. Die Bedingung für das richtige Arbeiten des Zählers ist also erfüllt.

Die Spannungsspulen des Zählers müssen natürlich für die verketteten Spannungen richtig bemessen sein. Ebenso muß die Zählwerkübersetzung so gewählt sein, daß der Blindverbrauch am Zählwerk angezeigt wird. Da die Leistungsmesser genau so wie die Zähler geschaltet werden, so zeigt jedes von ihnen entsprechend Abb. 98 den Wert $U_{ST} \cdot I_R \cdot \cos(90^\circ - \varphi) = \sqrt{3} \cdot U_R \cdot I_R \cdot \sin \varphi$ an; man muß also die Summe der an den drei Leistungsmessern abgelesenen Leistungen noch

durch $\sqrt{3}$ dividieren, um den richtigen Blindverbrauch zu erhalten, oder man muß die Vorwiderstände der Leistungsmesser $\sqrt{3}$ mal so groß wählen als bei normaler Schaltung.

Bei der Messung mit getrennten Strom- und Spannungskreisen kann man entweder die verketteten oder die Sternspannungen an Zähler und Leistungsmesser anschließen und sie in die richtige Lage drehen. 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. Eine Symmetrierung des Spannungsdreiecks ist hier bei der Prüfung nicht erforderlich.

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

Man kann die Blindverbrauchzähler für Vierleiter-Drehstrom auch so ausführen, daß jedes der drei messenden Systeme für 60° -Verschiebung eingerichtet ist. Es wird dann folgende zyklische Vertauschung gegenüber der Schaltung Abb. 73 für Wirkverbrauchzähler gemacht:

$$\begin{array}{cccc} \text{An Stelle von } U_R & \text{tritt } U_S, & & \\ \text{„ „ „ } U_S & \text{„ } U_T, & & \\ \text{„ „ „ } U_T & \text{„ } U_R. & & \end{array}$$

Somit ergibt sich die Schaltung der Zähler nach Abb. 99. Das Diagramm Abb. 100 veranschaulicht die Wirkungsweise bei induktiver Phasenverschiebung unter Voraussetzung gleicher Belastung der drei Zweige.

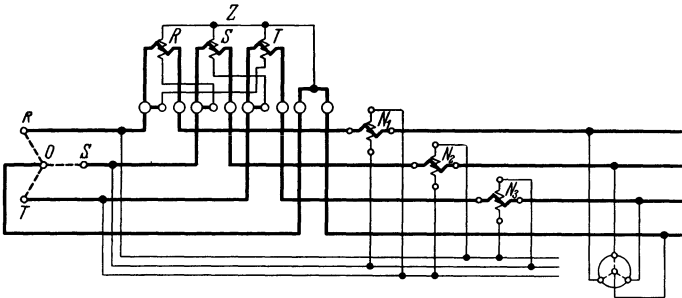


Abb. 99. Vierleiter-Drehstrom, drei messende Systeme mit 60° -Verschiebung, direkte Belastung, Niederspannung und Niederstrom.

Es ist wieder die Annahme gemacht, daß der Stromfluß in Phase mit dem Strom ist; der Spannungsfluß eilt der ihn erzeugenden Spannung dann um genau 60° nach. Am System R , das vom Strom I_R durchflossen wird, liegt die Spannung U_S . Der von ihr erzeugte Fluß Φ_{U_S} eilt dem Stromfluß Φ_{I_R} um $180^\circ - \varphi$ nach. Die Bedingung für das richtige Arbeiten des Zählers ist also erfüllt.

Die Leistungsmesser werden ebenso geschaltet wie in Abb. 97; dann sind die Angaben jedes Leistungsmessers proportional $U_{ST} \cdot I_R \cdot \sin \varphi$, die Gesamtleistung muß wieder durch $\sqrt{3}$ dividiert werden. Da am

Zähler die Sternspannungen, an den Leistungsmessern die verketteten Spannungen liegen, so 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. Es muß also wie beim Zähler mit 180°-Verschiebung das Spannungsdreieck vollkommen symmetriert sein

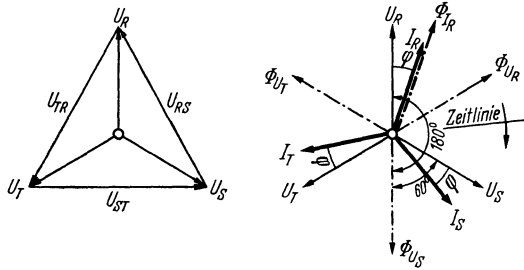


Abb. 100. Diagramme des nach Abb. 99 geschalteten Zählers.

e) Dreileiter-Drehstrom, zwei messende Systeme mit 180°-Verschiebung.

Der Zähler wird von außen genau so angeschlossen wie ein Wirkverbrauchszähler in Zweileistungsmesserschaltung, im Innern sind die Spannungsspulen dagegen umgepolt, Abb. 101. Für induktionsfreie Last sind die Ströme, Spannungen und Flüsse für beide messenden Systeme in

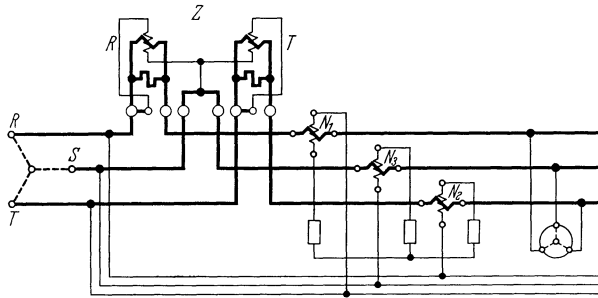


Abb. 101. Dreileiter-Drehstrom, zwei messende Systeme mit 180°-Verschiebung, direkte Belastung, Niederspannung und Niederstrom.

den Abb. 102a und b gezeichnet. Im System R sind die beiden Drehmoment bildenden Flüsse Φ_{I_R} und $\Phi_{U_{RS}}$ um $180^\circ - 30^\circ = 150^\circ$, im System T die Flüsse Φ_{I_T} und $\Phi_{U_{TS}}$ um $180^\circ + 30^\circ = 210^\circ$ gegeneinander verschoben. Bei einer induktiven Phasenverschiebung φ ist das Gesamtdrehmoment

$$D = c \cdot \Phi_{U_{RS}} \cdot \Phi_{I_R} \cdot \sin(150^\circ - \varphi) + c \cdot \Phi_{U_{TS}} \cdot \Phi_{I_T} \cdot \sin(210^\circ - \varphi).$$

Bei gleicher Belastung aller drei Phasen wird

$$D = c \cdot \Phi_U \sqrt{3} \cdot \Phi_I \cdot \sin \varphi \cdot 2 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = c \cdot 3 \cdot \Phi_U \cdot \Phi_I \cdot \sin \varphi.$$

Bei konstanter Frequenz ist also die gezählte Arbeit proportional $3 \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi \cdot t$, der Zähler zählt also die Blindenergie richtig.

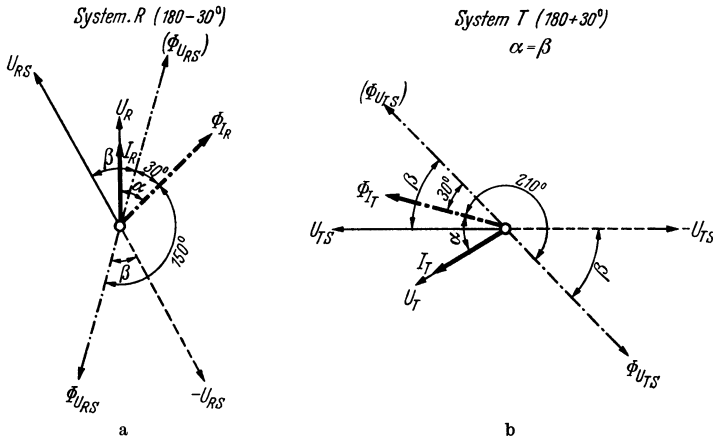


Abb. 102. Diagramme des Zählers für Schaltung Abb. 101. a) System R, b) System T.

Die Leistungsmesser kann man nicht wie bei der Wirkleistungsmessung anschließen, sondern muß eine Kunstschaltung anwenden. Man könnte die Leistungsmessung ebenso wie in den Abb. 95, 97, 99 vornehmen, da bei genauer Gleichhaltung alle drei Spannungen die Drehstromleistung mit drei Leistungsmessern immer richtig ist. Man mißt aber bei Dreileiterdrehstrom meist mit zwei Leistungsmessern. N_1 und N_2 entsprechend Abb. 101. An den Leistungsmesser N_1 schließt man die gegen U_{RS} um 90° nacheilende Spannung $-U_T$, an den Leistungsmesser N_2 die der Spannung U_{TS} um 90° nacheilende Spannung U_R an, natürlich so, daß beide Leistungsmesser bei $\cos \varphi = 0$ oder $\sin \varphi = 1$ einen positiven Ausschlag zeigen. Dann zeigen die Leistungsmesser entsprechend Abb. 103 a und b

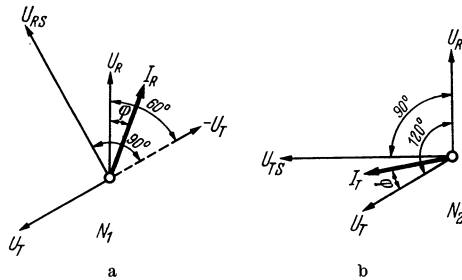


Abb. 103. Diagramme der Leistungsmesser für Schaltung Abb. 101. a) Leistungsmesser N_1 , b) Leistungsmesser N_2 .

$$N_1 = U_T \cdot I_R \cdot \cos(60^\circ - \varphi) \quad \text{und}$$

$$N_2 = U_R \cdot I_T \cdot \cos(120^\circ - \varphi).$$

Die Summe der Angaben der beiden Leistungsmesser $N_1 + N_2 = U \cdot I \cdot \sqrt{3} \cdot \sin \varphi$ ist also der Blindleistung proportional.

Um die Angaben mit denen des Zählers vergleichen zu können, muß man sie noch mit $\sqrt{3}$ multiplizieren.

Wie aus Abb. 101 zu ersehen, bildet man am besten dadurch einen künstlichen Nullpunkt, daß man einen dritten Leistungsmesser N_3 in den Stromkreis S und an die Spannung U_S schaltet und die Spannungskreise aller drei Leistungsmesser in Stern schaltet. Dann braucht man nur die drei Ströme und die drei verketteten Spannungen auf genau gleiche Größe einzustellen und benötigt nicht besondere Symmetrierungsschaltungen. An dem dritten Leistungsmesser kann man die Phasenlage feststellen, denn sein Ausschlag ist proportional $\cos \varphi$.

Sind die Spannungen untereinander nicht gleich, so treten bei gleichzeitiger Belastung keine Fehler auf. Bei einseitiger Belastung dagegen können die Fehler sehr groß werden. Ist z. B. die eine Spannung um 1% zu klein und sind die beiden anderen Spannungen um 1% zu groß, so können bei einseitiger Belastung und $\sin \varphi = 0,25$ ($\cos \varphi = 0,97$) Fehler bis zu 9% entstehen. Sind die Spannungen um mehr als 1% voneinander verschieden, so kann der Fehler noch größer werden. Im Betrieb wird die Belastung nur selten ganz einseitig sein, vielmehr wird in großen Netzen eine nahezu gleichseitige Belastung herrschen. Man wird deshalb im Betrieb mit so großen Fehlern nicht zu rechnen haben¹.

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

Bei Blindverbrauchzählern, deren beide Systeme entsprechend der Zweileistungsmesserschaltung eingerichtet sind und mit 90° -Verschiebung arbeiten, muß man eine Kunstschtaltung machen, die in Abb. 104 angewendet ist und deren Wirkungsweise aus den Diagrammen Abb. 105 a

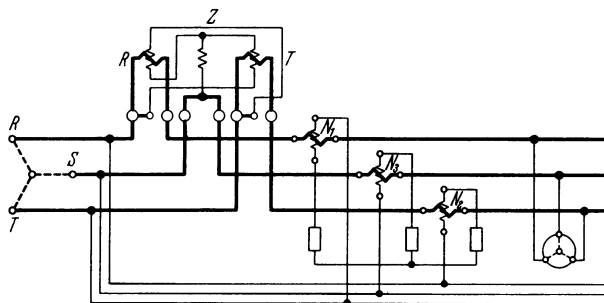


Abb. 104. Dreileiter-Drehstrom, zwei messende Systeme mit 90° -Verschiebung, direkte Belastung, Niederspannung und Niederstrom.

und b hervorgeht. Beim System R des Zählers tritt an Stelle der Spannung U_{RS} bei der Wirkverbrauchschaltung die um 90° nacheilende Spannung $-U_T$, beim System T an Stelle der Spannung U_{TR} die Spannung U_R . Da im Dreileiternetz der Nullpunkt nicht zugänglich ist,

¹ Vgl. auch SCHERING, H., u. R. SCHMIDT: Z. Instrumentenkde. 1920 Heft 7 S. 137.

muß entweder ein künstlicher Nullpunkt durch eine besondere Nullpunktdrossel geschaffen werden, oder es muß im Zähler noch eine dritte Spannungsspule vorgesehen werden, die mit den anderen Spannungs-

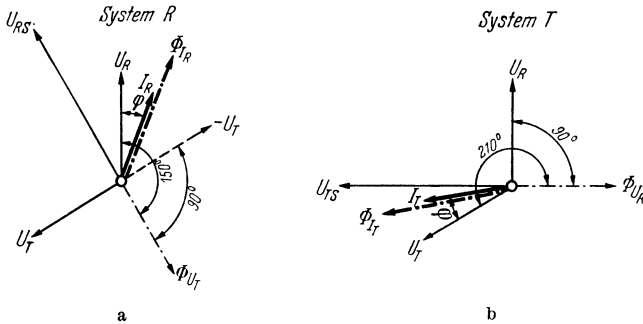


Abb. 105. Diagramme des Zählers nach Schaltung Abb. 104. a) System R, b) System T.

spulen in Stern geschaltet wird, wie in Abb. 104 gezeichnet. Das Drehmoment des Zählers ergibt sich zu

$$D = c \cdot \Phi_{U_T} \cdot \Phi_{I_R} \cdot \sin(150^\circ - \varphi) + c \cdot \Phi_{U_R} \cdot \Phi_{I_T} \cdot \sin(210^\circ - \varphi) \\ = c \cdot \Phi_U \cdot \Phi_I \cdot \sin \varphi \cdot \sqrt{3} \text{ bei gleicher Belastung aller Phasen.}$$

Das Drehmoment soll aber $D = c \cdot 3 \cdot \Phi_U \cdot \Phi_I \cdot \sin \varphi$ sein; deshalb müssen die Spannungswicklungen so bemessen sein, daß bei Anschluß an die Phasenspannung der Fluß $\sqrt{3}$ mal größer wird.

Die Leistungsmesser N_1 und N_2 werden genau so geschaltet wie die Systeme R und T des Zählers, der künstliche Nullpunkt wird mit Hilfe des Spannungskreises eines dritten in Phase S liegenden Leistungsmessers gebildet, dessen Ausschlag dem $\cos \varphi$ proportional ist. Die Angaben der Leistungsmesser müssen mit $\sqrt{3}$ multipliziert werden, damit man ihre Angaben mit denen des Zählers vergleichen kann. Man muß darauf achten, daß die verketteten Spannungen untereinander genau gleich sind, dann ist die Symmetrie der Phasenspannungen gesichert, ohne daß man besondere Symmetrierungseinrichtungen braucht.

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

Wenn die beiden nach der Zweileistungsmesserschaltung geschalteten Systeme des Blindverbrauchzählers mit 60° -Verschiebung arbeiten, so werden gegenüber der Wirkverbrauchschaltung, Abb. 78 und 80, folgende Vertauschungen vorgenommen:

$$\begin{array}{l} \text{An Stelle von } U_{RS} \text{ tritt } U_{ST}, \\ \text{„ „ „ } U_{TS} \text{ „ } U_{RT}. \end{array}$$

Die Schaltung ist in Abb. 106, das Diagramm in Abb. 107 dargestellt. Das Gesamtdrehmoment des Zählers wird

$$D = c \cdot \Phi_{U_{ST}} \cdot \Phi_{I_R} \cdot \sin(150^\circ - \varphi) + c \cdot \Phi_{U_{RT}} \cdot \Phi_{I_T} \cdot \sin(210^\circ - \varphi).$$

Bei gleicher Belastung aller Phasen wird

$$D = c \cdot 3 \cdot \Phi_U \cdot \Phi_I \cdot \sin \varphi.$$

Bei konstanter Frequenz sind also die Angaben des Zählers proportional $3 \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi$.

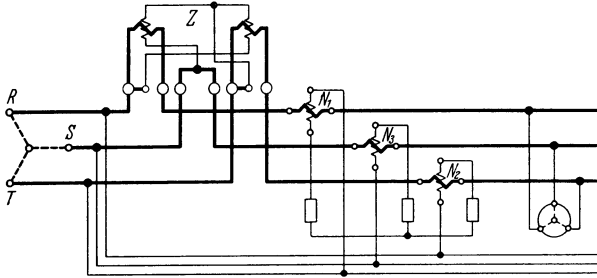


Abb. 106. Dreileiter-Drehstrom, zwei messende Systeme mit 60° -Verschiebung, direkte Belastung, Niederspannung und Niederstrom.

Die Leistungsmesser werden genau so geschaltet wie bei den anderen Schaltungen für Dreileiter-Blindverbrauch, ihre Angaben müssen mit $\sqrt{3}$ multipliziert werden.

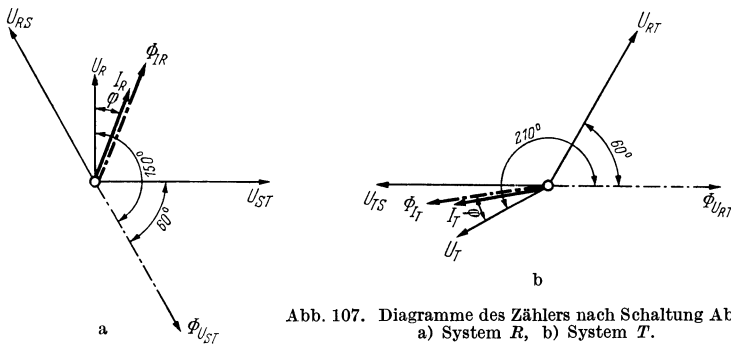


Abb. 107. Diagramme des Zählers nach Schaltung Abb. 106. a) System R, b) System T.

9. Zweileiter-Gleichstrom.

Für die Prüfung von Amperestundenzählern braucht man nur einen Stromkreis, in den man einen Strommesser in Reihe mit dem Amperestundenzähler schaltet.

Bei der Prüfung von Wattstundenzählern sind die Schaltungen sowohl bei getrennten Strom- und Spannungskreisen als auch bei direkter Belastung die gleichen wie für Einphasenwechselstrom (Abb. 65 u. 67). Der Frequenzmesser und der Leistungsmesser kommen natürlich in Fortfall. Die Leistung ist stets gleich dem Produkt aus Strom und Spannung. Als Meßgeräte benutzt man meist Drehspul-Meßgeräte.

10. Dreileiter-Gleichstrom.

a) Zwei Hauptstromspulen, jede in einem Außenleiter, Spannungskreis zwischen den beiden Außenleitern. Abb. 108.

aa) Allgemeines. Nach der Theorie der Gleichstromzähler entsprechen die Angaben dem Produkt aus dem magnetischen Fluß Φ_I , den die festen Spulen erzeugen, dem Fluß Φ_U , den die bewegliche Ankerwicklung erzeugt, und der Zeit. In unserem 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

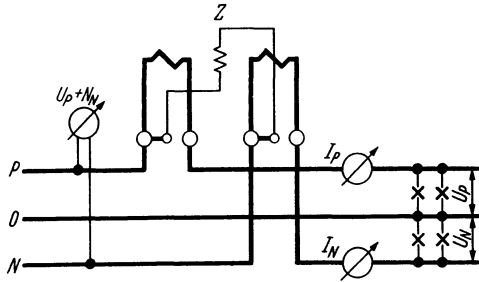


Abb. 108. Dreileiter-Gleichstrom mit zwei Hauptstromspulen, Außenleiterspannung, direkte Belastung.

$$A = c_1 \cdot \Phi_I \cdot \Phi_U \cdot t = c_2 \cdot (I_P + I_N)(U_P + U_N) \cdot t$$

$$= c_2 \cdot (I_P \cdot U_P + I_N \cdot U_N + I_P \cdot U_N + I_N \cdot U_P) \cdot t.$$

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

$$W = (I_P \cdot U_P + I_N \cdot U_N) \cdot t.$$

Sind die Ströme und die Spannungen unter sich gleich, so wird bei richtig eingestelltem 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

$$F = \frac{A - W}{W} = \frac{I_P \cdot U_N + I_N \cdot U_P - (I_P \cdot U_P + I_N \cdot U_N)}{2 \cdot (I_P \cdot U_P + I_N \cdot U_N)}.$$

Grenzfälle: $U_P = 0$, also auch $I_P = 0$: $F = -\frac{1}{2} = -50\%$,

$U_N = 0$, „ „ „ $I_N = 0$: $F = -\frac{1}{2} = -50\%$,

$I_P = 0$, alle anderen beliebig: $F = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_P}{U_N} - \frac{1}{2}$,

$I_N = 0$, „ „ „ „ : $F = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_N}{U_P} - \frac{1}{2}$.

Allgemein: $I_P > I_N$, $U_P > U_N$: $F = -$,

$I_P > I_N$, $U_P < U_N$: $F = +$,

$I_P < I_N$, $U_P > U_N$: $F = +$,

$I_P < I_N$, $U_P < U_N$: $F = -$.

Zahlenbeispiel:

$$I_P = 50 \text{ A}, \quad I_N = 25 \text{ A}, \quad U_P = 110 \text{ V}, \quad U_N = 100 \text{ V}, \quad t = 1 \text{ Stunde},$$

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

Für verschiedene Verhältnisse $I_P : I_N$ und $U_P : U_N$ sind die Fehlerwerte in Abb. 109 in Kurvenform dargestellt.

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

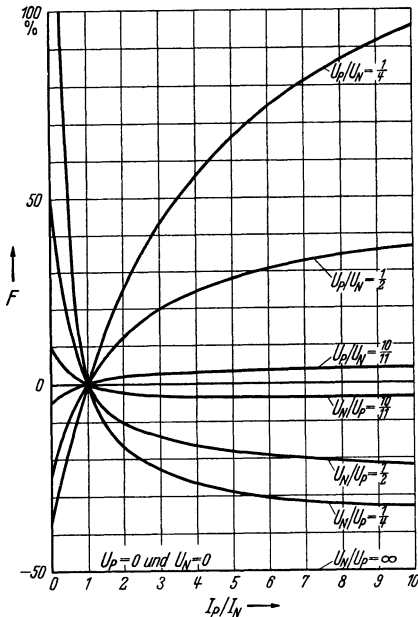


Abb. 109. Kurven der Fehler für Schaltung nach Abb. 108 bei verschiedenen Verhältnissen $I_P : I_N$ und $U_P : U_N$.

ab) Schaltung bei getrennten Strom- und Spannungskreisen. Für die Prüfung mit getrenntem Strom- und Spannungskreis läßt man den Nulleiter weg und benutzt eine Zweileiterschaltung, wobei man den gleichen Strom durch beide Hauptstromspulen schiebt, so daß sich deren magnetische Flüsse addieren. Als Spannung wählt man eine solche, deren Größe der Außenleiterspannung entspricht.

ac) Schaltung bei direkter Belastung in der Installation. Bei der Prüfung mit direkter Belastung in der Installation schaltet man die Strommesser genau wie die Hauptstromspulen des Zählers, den Spannungsmesser genau wie den

Spannungskreis des Zählers, Abb. 108. Aus den Ablesungen erhält man:

$$W' = (I_P + I_N) \cdot (U_P + U_N).$$

Da der Zähler eine solche Zählwerkübersetzung 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 zwei Strom- und zwei Spannungsmessern, so gibt die Summe aller $U \cdot I$ zwar die Leistung im Netz richtig an, ist aber nur dann mit den Angaben des Zählers zwecks Prüfung vergleichbar, wenn die beiden Ströme oder die beiden Spannungen untereinander gleich sind.

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

Die Angaben des nach Abb. 110 geschalteten Zählers sind

$$A = I_P \cdot (U_P + U_N) \cdot t = (I_P \cdot U_P + I_P \cdot U_N) \cdot t.$$

Der wirkliche Verbrauch im Netz ist

$$W = (I_P \cdot U_P + I_N \cdot U_N) \cdot t.$$

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

$$F = \frac{(I_P - I_N) \cdot U_N}{I_P \cdot U_P + I_N \cdot U_N} = \frac{I_P/I_N - 1}{I_P/I_N \cdot U_P/U_N + 1}.$$

Grenzfälle: $I_P = 0$ oder I_P und $U_P = 0$: $F = -1 = -100\%$, (Stillstand).

$$I_N = 0: F = U_N/U_P$$

Allgemein: $I_P > I_N$, alle anderen beliebig: $F = +$,

$I_P < I_N$, „ „ „ „ : $F = -$.

Bei der Prüfung 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.

e) Eine Hauptstromspule in einem Außenleiter, Spannungskreis zwischen diesem Leiter und dem Nulleiter.

Nur die Arbeit des einen Zweiges des Dreileitersystems wird gemessen, wenn man den Zähler wie einen Zweileiterzähler nach Abb. 111 schaltet. Sein Zählwerk muß so eingerichtet sein, daß es den doppelten Betrag der gemessenen Arbeit anzeigt:

$$A = 2 \cdot I_P \cdot U_P \cdot t.$$

Der wirkliche Verbrauch im Netz ist

$$W = I_P \cdot U_P + I_N \cdot U_N \cdot t.$$

Der Fehler bei Ungleichheiten in den Spannungen und Belastungsströmen wird

$$F = \frac{I_P \cdot U_P - I_N \cdot U_N}{I_P \cdot U_P + I_N \cdot U_N}.$$

Bleibt die Spannung U_P aus, wird also der Strom $I_P = 0$, so steht der Zähler, $F = -100\%$. Bleibt die Spannung U_N aus, wobei auch $I_N = 0$ 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 Prüfung schaltet man den Strommesser genau so wie die Hauptstromspule, den Spannungsmesser genau so wie den Spannungskreis des Zählers.

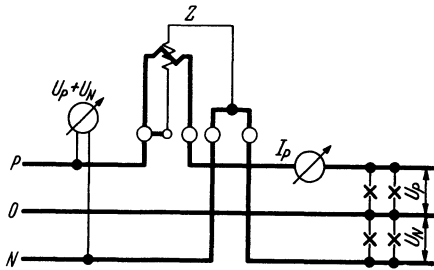


Abb. 110. Dreileiter-Gleichstrom, eine Hauptstromspule, Außenleiterspannung, direkte Belastung.

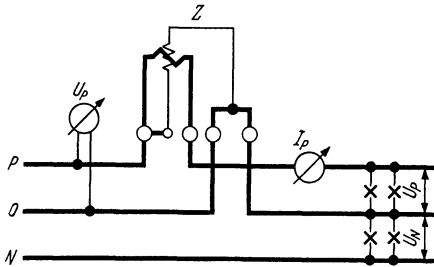


Abb. 111. Dreileiter-Gleichstrom, eine Hauptstromspule, Nulleiterspannung, direkte Belastung.

VII. Prüfklemmen.

Wenn man an Ort und Stelle Zählerprüfungen machen will, muß man einen Teil der Zähleranschlüsse lösen, um die Meßgeräte oder Prüfzähler nach einer der in Kap. VI beschriebenen Prüfschaltungen einzubauen. Dabei muß man die Installation abschalten, so daß alle angeschlossenen Lampen, Motoren und Geräte außer Betrieb kommen. Erst wenn man die Schaltung fertiggestellt hat, erhält die Belastung wieder Strom. Das gleiche gilt nach Beendigung der Prüfung. Die Unterbrechung der Stromversorgung des Abnehmers kann man vermeiden, wenn man den Zähler an sog. Prüfklemmen anschließt, die so eingerichtet sind, daß man die Meßgeräte in den Stromkreis einschalten kann, ohne die Installation abschalten zu müssen. Natürlich kann man solche Prüfklemmen nur für Niederspannungsanschlüsse bei nicht sehr großen Stromstärken verwenden. Es sind eine ganze Anzahl verschiedener Ausführungen von Prüfklemmen vorgeschlagen und ausgeführt worden, von denen wir zwei charakteristische Beispiele herausgreifen wollen.

1. Prüfklemme für Zweileiter-Gleich- oder Wechselstrom.

In Abb. 112 ist eine Prüfklemme für Zweileiter-Gleich- oder Wechselstrom mit dem Anschluß des Zählers gezeichnet. Die Prüfklemme hat sechs Einzelklemmen, von denen vier mit Stiften versehen sind, die in die Büchsenklemmen des Zählers eingesetzt werden und dauernd mit dem Zähler verbunden bleiben. Über je drei Einzelklemmen liegt, gegen diese durch eine Zwischenlage isoliert, eine T-förmige Brücke. Ihr horizontaler Balken kann nach Art eines Linienwählers durch Schrauben mit verschiedenen Einzelklemmen verbunden werden, so daß man alle gewünschten Schaltungen herstellen kann. Der obere Ansatz liegt frei und dient zum Anschluß einer Leitung an die Brücke. 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 nicht mehr als drei Schrauben. Abb. 112a zeigt die Verbindungen bei Betriebsschaltung. Will man zur Prüfschaltung Abb. 112c übergehen, so muß man zunächst den Zähler entsprechend Abb. 112b kurzschließen. Dann schließt man den Hauptstromkreis des Leistungsmessers N und den Strommesser J in Reihe mit dem regelbaren Belastungswiderstand B an die Klemmen 3 und 6 an und entfernt dann die Schrauben, die die Brücken mit den Klemmen 3 und 6 verbinden. Die Spannungsklemmen des Leistungsmessers N und des Spannungsmessers U werden an den Klemmen 1 und 4 angeklemt. Nun kann man den Zähler in ganz normaler Weise bei verschiedenen Belastungen

prüfen, die man mit dem Belastungswiderstand B einstellt. Die Installation, hier z. B. angeschlossene Glühlampen, liegt dabei nach wie vor am Netz, jedoch geht der von den Glühlampen verbrauchte Strom nicht durch den Zähler, trägt also nicht zur Belastung bei. Abb. 112d zeigt eine Schaltung, bei der die Installation selbst als Belastung benutzt wird. Um diese Schaltung herzustellen, muß man ebenfalls zu-

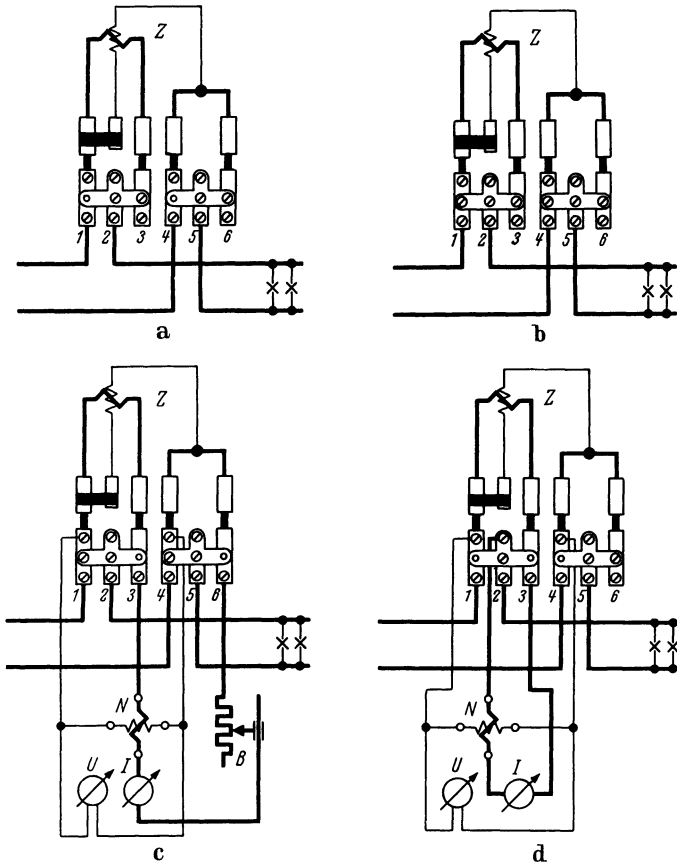


Abb. 112. Prüfklemme für Zweileiter-Gleich- oder Wechselstrom. a) Betriebsschaltung, b) Übergangsschaltung, c) Prüfschaltung mit Belastungswiderstand, d) Prüfschaltung mit Belastung durch die Installation.

nächst den Zähler nach Abb. 112b kurzschließen, dann schließt man die Meßgeräte an und schließlich entfernt man die Schrauben, die die beiden Brücken mit den Klemmen 1, 3 und 4 verbinden. (Die Entfernung der Schraube 4 ist eigentlich nur bei doppelpoliger Schaltung des Zählers notwendig.) Die Belastung kann man bei der Schaltung nach Abb. 112d nur durch Einschalten von mehr oder weniger Glühlampen (oder anderen Geräten) regeln. Die Übergangsschaltung nach Abb. 112b dient auch noch dazu, den Zähler auszuwechseln, ohne die Installation zu unterbrechen.

2. Prüfklemme für Dreileiter-Drehstrom.

Eine Prüfklemme für Drehstrom-Dreileiter-Zähler zeigt Abb. 113¹. Als Beispiel ist der Anschluß eines Wandlerzählers gewählt, weil diese Anordnung am häufigsten vorkommen wird. Die Prüfklemme besteht aus neun Einzelklemmen. Zwei schwenkbare Brücken für die Einzelklemmen 1, 2, 3 und 7, 8, 9 können in drei verschiedene Lagen gestellt und durch Schrauben mit

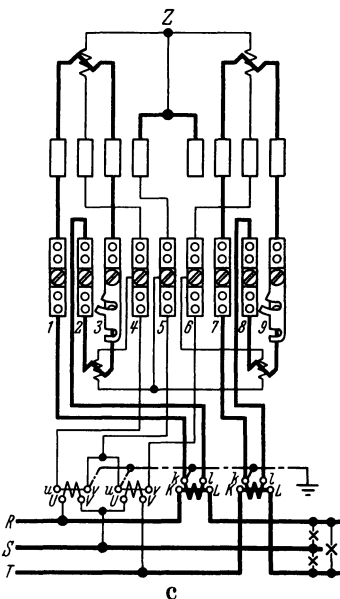
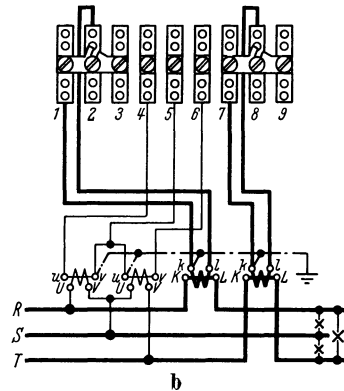
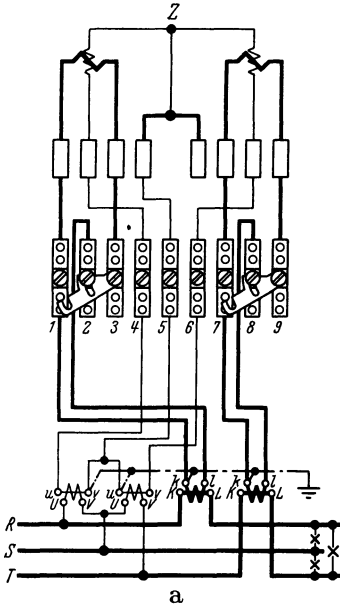


Abb. 113. Prüfklemme für Dreileiter-Drehstrom.
a) Betriebsschaltung, b) Übergangsschaltung, c) Prüfschaltung.

den Einzelklemmen verbunden werden. In der Horizontalstellung sind die Einzelklemmen 1, 2, 3 und 7, 8, 9 kurzgeschlossen, in der um 45° gegen die Horizontale geneigten Stellung sind nur die Einzelklemmen 2 und 3 einerseits und 8 und 9 andererseits untereinander verbunden, in der vertikalen Stellung der Brücke sind alle Verbindungen zwischen den Einzelklemmen aufgehoben. Die Hauptstromspulen des Zählers sind mit den Klemmen 1 und 3 und 7 und 9 verbunden, die Spannungsspulen mit den drei mittleren Klemmen 4, 5, 6. Abb. 113a ist die Betriebsschaltung, die Brücken stehen 45° gegen die horizontale geneigt. Die Einzelklemmen 2, 3 und 8, 9 sind miteinander verbunden. In Abb. 113b, der Übergangsstellung,

¹ AEG-Mitt. 1934 Heft 9 S. 305.

sind die Stromspulen kurzgeschlossen. Bei dieser Schaltung kann man den Zähler austauschen, wenn dies erforderlich ist. Während die Klemme nach Abb. 113b geschaltet ist, schließt man die Hauptstromspulen der Leistungsmesser und ihre Spannungsspulen an, dann löst man die Brücke und bringt sie in die vertikale Stellung für die Prüfschaltung Abb. 113c. Als Belastung dient hier die Installation, nur durch Zuschalten von mehr oder weniger Verbrauchern kann man sie in verschiedener Höhe einstellen. Man prüft auf diese Weise natürlich nur den Zähler selbst; für die Feststellung der Angaben des Meßsatzes muß man noch die bekannten Eigenschaften der Wandler berücksichtigen.

VIII. Prüfung der Strom- und Spannungswandler.

Im In- und Ausland sind eine große Anzahl von Meßschaltungen für die Prüfung von Strom- und Spannungswandlern angegeben worden, die mit den verschiedensten Mitteln das gleiche Ziel erreichen wollen¹. Wir wollen hier nur einige der gebräuchlichsten Einrichtungen beschreiben.

a) Absolutes Verfahren von SCHERING und ALBERTI².

Wohl die genaueste Anordnung ist die Kompensationsmethode von SCHERING und ALBERTI. Sie hat sich für Laboratoriumsmessungen allgemein durchgesetzt.

Stromwandler.

Abb. 114 zeigt schematisch die Schaltung für die Prüfung von Stromwandlern. Der zu prüfende Stromwandler X ist mit seinen Sekundärklemmen über die Bürde B an den Normalwiderstand R_2 angeschlossen. Dieser hat für 5 A sekundären Nennstrom den Wert 0,1001 Ω , für 1 A 0,5025 Ω . Parallel zu ihm liegt der Teiler $R_x = 100 \Omega$. Der Kombinationswiderstand $R_{II} = \frac{R_2 \cdot R_x}{R_2 + R_x}$ ist dann im einen Falle genau 0,1000 Ω , im anderen Falle 0,5000 Ω , allgemein $R_{II} = \frac{0,5}{I'_{x2}}$, wobei I'_{x2} der sekundäre Nennstrom ist.

Als Normalwandler N dient ein Zweistufenwandler nach BROOKS und HOLTZ höchster Präzision. Sein Sekundär- und Tertiärstrom sind in den beiden gleichen Normalwiderständen $R_1 = 0,4008 \Omega$ kombiniert. An seine Stelle tritt bei neueren Ausführungen ein Promille-Wandler, an dessen Sekundärwicklung ein einziger Widerstand von 0,4 Ω angeschlossen wird. Für kleine Stromstärken benutzt man an Stelle des Normal-

¹ Übersicht vgl. G. KEINATH: Die Technik elektrischer Meßgeräte. Bd. I. 3. Aufl. S. 592. München u. Berlin: Oldenbourg 1928. Ferner: Arch. techn. Messen 1921 Z 224—1, 1932 Z 224—1, 1934 Z 224—4, 1938 Z 224—9, 1938 Z 33—1.

² Arch. Elektrotechn. Bd. 2 (1914) S. 263 und Gebrauchsanweisungen der herstellenden Firmen.

wandlers winkelfreie Normalwiderstände, wobei die übrige Anordnung die gleiche bleibt. Der Meßzweig vom Widerstand $R=200\ \Omega$ ist in mehrere Teile unterteilt. Zu dem einen Teil $r_2=136,1\ \Omega$ liegt der Drehkondensator C parallel, der andere Teil besteht aus einem festen Widerstand von $47\ \Omega$ und einem Schleifdraht von $6\ \Omega$, so daß mit dem Schleifkontakt ein Wert $r_1=50 \pm 3\ \Omega$ abgegriffen werden kann. Der Kombinationswiderstand $R_I = \frac{R_1 \cdot R}{R_1 + R} = 0,400\ \Omega$.

Man mißt folgendermaßen: Nach Einstellung des Vibrationsgalvanometers VG auf Resonanz mit der Meßfrequenz stellt man $r_x = 20 \cdot I_{N2}^*$ ein, wobei I_{N2} der Sekundärstrom des Normalwandlers ist. Durch wechselweises Verstellen von r_1 und C bringt man nun den Ausschlag

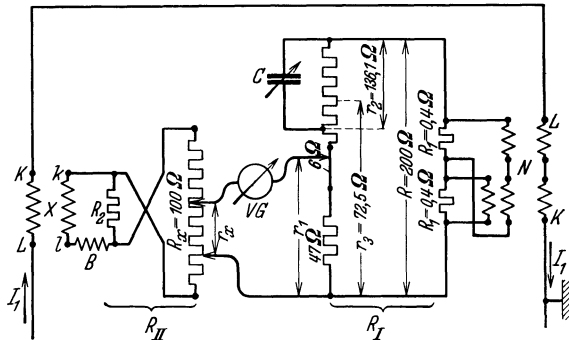


Abb. 114. Prüfeinrichtung für Stromwandler nach SCHERING und ALBERTI.

des Vibrationsgalvanometers auf Null. Dann sind die Spannungen an r_x und r_1 entgegengesetzt gleich:

$$I_{x2} \cdot R_{II} \cdot \frac{r_x}{R_x} = I_{N2} \cdot R_I \cdot \frac{r_1}{R}.$$

Der prozentuale Stromfehler ist

$$F_I = \frac{I_{x2} - I'_{x2}}{I_{x2}} \cdot 100,$$

wobei I'_{x2} der sekundäre Nennstrom ist. Haben Normalwandler und zu prüfender Wandler gleiche Nennübersetzung, so kann man an allen Stellen I'_{x2} durch I_{N2} ersetzen. Setzt man die obengenannten Werte ein, so wird $F_I = 2r_1 - 100$. Den Stromfehler des Normalwandlers oder den Fehler des Normalwiderstandes muß man zum Fehler F_I hinzuzählen. Meist kann diese Korrektur aber vernachlässigt werden.

Der Fehlwinkel gegenüber dem Normalwandler ist

$$\delta_I = \frac{r_2^2 \cdot \omega \cdot C}{R} \cdot \frac{180}{\pi} \cdot 60 \text{ min.}$$

* Ist der Primärstrom I_1 für die Einstellung maßgebend, so setzt man $I_{N2} = I_1 / \dot{U}_N$, wobei \dot{U}_N die Nennübersetzung des Normalwandlers ist.

ω ist die Kreisfrequenz, C die Kapazität in μF . Bei 50 Hz wird unter Einsetzung der Widerstände $\delta_I = 100 \cdot C$, allgemein für eine Frequenz f $\delta_I = 100 \cdot f/50 \cdot C$. Zu diesem Winkel muß man den Fehlwinkel des Normalwandlers oder -widerstandes hinzuzählen, wenn dies erforderlich ist. Für negativen Fehlwinkel legt man C an $r_3 = 72,5 \Omega$ und erhält $-\delta_I = 50 \cdot f/50 \cdot C$, also für 50 Hz $-\delta_I = 50 \cdot C$.

Die Meßbereiche der Einrichtung sind: für den Stromfehler $\pm 6\%$, für den Fehlwinkel $+\delta_I$ 0,1 bis 99,9 min, für $-\delta_I$ 0,05 bis 49,9 min.

Die Meßgenauigkeit ist $\pm 0,01\%$ für den Stromfehler und $\pm 0,1$ min für den Fehlwinkel.

Spannungswandler.

Die Schaltung für die Prüfung von Spannungswandlern mit Normalwandler N zeigt Abb. 115. (Statt des Normalwandlers wird bei den absoluten Meßeinrichtungen der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt ein Spannungsteiler aus induktionsfreien Widerständen verwendet.) Die mit r_x eingestellte Teilspannung von U_{x2} wird gegen eine mit r_1 der Größe und mit dem Drehkondensator C der Phase nach eingestellte Teilspannung von U_{N2} verglichen. Im einzelnen sei folgendes bemerkt: An den Niederspannungsklemmen des zu prüfenden Wandlers x liegt der Niederspannungsteiler $R_x = 100 \cdot U'_{x2}$, wobei U'_{x2} die sekundäre Nennspannung bedeutet (also z. B. 11000 Ω an 110 V). Der Normalwandler N ist mit seinen Niederspannungsklemmen über einen Widerstand $R_V = 500 \Omega$ an den Meßwiderstand $R = 500 \Omega$ angeschlossen, der mehrfach unterteilt ist: eine Anzapfung in der Mitte teilt ihn in $r_3 = 103,4 \Omega$ und $r_4 = 396,6 \Omega$; von r_4 ist wieder $r_2 = 304,4 \Omega$, zu dem der Drehkondensator C parallel liegt, von r_3 ist 98 Ω und ein Schleifdraht von 4 Ω abgeteilt, so daß $r_1 = 100 \pm 2 \Omega$ eingestellt werden kann. Das Vibrationsgalvanometer VG ist an den Schleifkontakt von r_1 und an den von r_x angeschlossen.

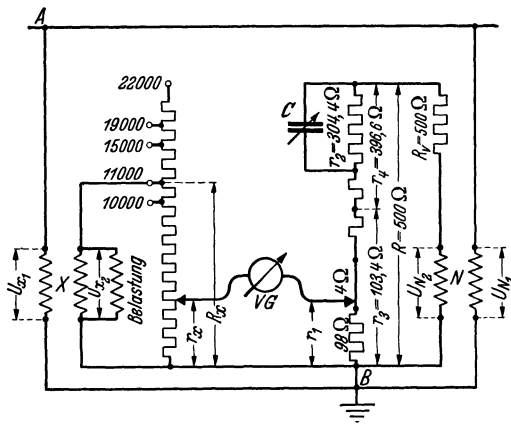


Abb. 115. Prüfeinrichtung für Spannungswandler nach SCHERING und ALBERTI.

Man mißt folgendermaßen: Nach Einstellung des Vibrationsgalvanometers auf Resonanz mit der Meßfrequenz stellt man $r_x = 10 \cdot U_{N2}^*$

* Ist die Hochspannung U_1 für die Einstellung maßgebend, so setzt man $U_{N2} = U_1/\dot{U}_N$, wobei \dot{U}_N die Nennübersetzung des Normalwandlers ist.

ein, wobei U_{N2} die Sekundärspannung des Normalwandlers ist. Man bringt nun durch wechselweises Verstellen des Schleifkontaktes auf dem Schleifdraht 4Ω und des Drehkondensators C den Ausschlag des Vibrationsgalvanometers auf Null. Dann sind die Spannungen an den Enden von r_x und r_1 entgegengesetzt gleich:

$$U_{x2} \cdot \frac{r_x}{R_x} = U_{N2} \cdot \frac{r_1}{R_V + R}.$$

Unter Einsetzen der obengenannten Werte der Widerstände wird der prozentuale Spannungsfehler gegenüber dem Normalwandler

$$F_U = \frac{U_{x2} - U'_{x2}}{U'_{x2}} \cdot 100 = r_1 - 100.$$

U'_{x2} ist die sekundäre Nennspannung des zu prüfenden Wandlers. Hat der Normalwandler die gleiche Nennübersetzung wie der zu prüfende Wandler, so kann man für U'_{x2} auch U_{N2} setzen. Die an dem Schleifkontakt des Schleifdrahtes (4Ω) angebrachte Skala ist in Prozenten beziffert, so daß man F_U direkt ablesen kann. Hat der Normalspannungswandler einen Spannungsfehler F_{UN} , so muß man ihn zu F_U zuzählen, um den Spannungsfehler des zu prüfenden Wandlers zu erhalten:

$$F_{UX} = F_U \pm F_{UN}.$$

F_{UN} ist mit dem richtigen Vorzeichen einzusetzen.

Den Fehlwinkel gegenüber dem Normalwandler erhält man aus der Einstellung des Kondensators C mit

$$\delta_U = \frac{r_2^2 \cdot \omega \cdot C}{2R} \cdot \frac{180}{\pi} \cdot 60 \text{ min.}$$

ω ist darin die Kreisfrequenz, C die Kapazität in μF . Bei 50 Hz wird $\delta_U = 100 \cdot C$. Für andere Frequenzen f muß man schreiben: $\delta_U = 100 \cdot f/50 \cdot C$. Zu diesem Wert muß man den Fehlwinkel des Normalwandlers zuzählen, um den Fehlwinkel des zu prüfenden Wandlers zu erhalten:

$$\delta_{Ux} = \delta_U \pm \delta_{UN}.$$

Ist der Fehlwinkel negativ, so muß man den Kondensator C an den Widerstand r_3 anlegen und erhält dann

$$-\delta_U = r_2 \cdot \omega \cdot C \left(1 - \frac{r_3}{2R}\right) \cdot \frac{180}{\pi} \cdot 60 \text{ min.}$$

Unter Einsetzung der Werte wird wieder für 50 Hz $-\delta_U = 100 \cdot C$ und $\delta_{Ux} = -\delta_U \pm \delta_{UN}$. Für andere Frequenzen f gilt wieder $-\delta_U = 100 \cdot f/50 \cdot C$.

Die Meßbereiche der beschriebenen Einrichtung sind: für den Spannungsfehler $\pm 2\%$, für den Fehlwinkel $\pm 0,1$ bis $99,9$ min bei 50 Hz.

Die Meßgenauigkeit ist: für den Spannungsfehler $\pm 0,01\%$, für den Fehlwinkel $\pm 0,1$ min.

b) Gegenschaltungsverfahren von W. HOHLE¹.

Bei allen Gegenschaltungsverfahren muß man zwei Meßwandler mit gleichen Übersetzungsverhältnissen haben, den zu prüfenden Wandler X und einen Normalwandler N , dessen Fehler man genau kennt.

Stromwandler.

Die grundsätzliche Schaltung für den Vergleich zweier Stromwandler zeigt Abb. 116. Der zu prüfende Wandler X und der Normalwandler N sind primär hintereinander, sekundär gegeneinander geschaltet. Die Bürde B , bei der die Prüfung vorgenommen werden soll, liegt im sekundären Stromkreis des Wandlers X . Der Widerstand r ist so angeordnet, daß durch ihn die Differenz der Sekundärströme der beiden Wandler

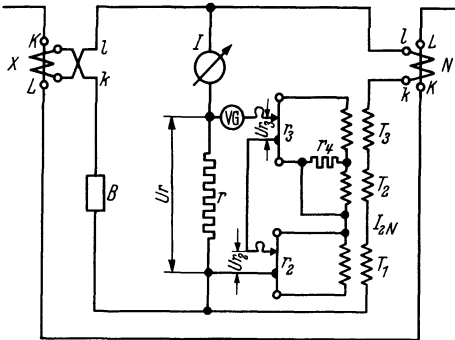


Abb. 116. Prüfeinrichtung für Stromwandler nach W. HOHLE.

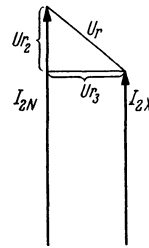


Abb. 117. Diagramm zur Schaltung Abb. 116.

fließt. Der Strommesser I liegt in Serie mit r , damit man feststellen kann, ob die Gegenschaltung richtig ausgeführt ist; er darf nur einen sehr kleinen Ausschlag zeigen. Ferner sind zwei Schleifdrähte r_2 und r_3 angeordnet; der eine, r_2 , wird vom Sekundärstrom I_{2N} des Normalwandlers über den kleinen Transformator T_1 gespeist und von einem Strom durchflossen, der phasengleich mit I_{2N} oder um 180° verschoben ist. Der zweite, r_3 , wird von einem Strom durchflossen, der um 90° gegen den Strom I_{2N} verschoben ist. Der Widerstand r_4 und die kleinen Transformatoren T_2 und T_3 sind so bemessen, daß die 90° -Verschiebung zustande kommt.

Die Messung geht folgendermaßen vor sich: Man verschiebt die Schleifkontakte auf den beiden Schleifdrahtwiderständen r_2 und r_3 abwechselnd so lange, bis das Vibrationsgalvanometer VG Null zeigt. Dann ist die Spannung U_r am Widerstand r , die dem Differenzstrom entspricht, durch die beiden an den Widerständen r_2 und r_3 abgegriffenen Teilspannungen U_{r2} und U_{r3} kompensiert, Abb. 117. Die Spannung U_{r2} am Widerstand r_2 , die in Phase mit dem Sekundärstrom I_{2N} des Nor-

¹ Arch. Elektrotechn. Bd. 27 (1933) S. 849. — Phys. Z. 1934 S. 844. — Arch. techn. Messen 1934 Z 224—4, 1938 Z 224—10.

malwandlers N ist, entspricht dem Stromfehler, die senkrecht dazu stehende Spannung U_{r_3} am Widerstand r_3 dem Fehlwinkel. Die Teilungen an den Schleifdrähten sind so beziffert, daß man direkt den Stromfehler und den Fehlwinkel ablesen kann. Der Stromfehler und der Fehlwinkel des Normalwandlers müssen zu den Ablesungen an den Teilungen noch hinzugezählt werden, um die absoluten Werte zu erhalten. Die Meßbereiche sind: für den Stromfehler $-1,5\%$ bis $+1,5\%$, für den Fehlwinkel -20 min bis $+80$ min. Durch einen nicht gezeichneten Umschalter können die Bereiche um den fünffachen Betrag erweitert werden. Die Genauigkeit für den Stromfehler ist etwa $0,01\%$, für den Fehlwinkel etwa $0,3$ min.

Spannungswandler.

Eine entsprechende Anordnung zur Prüfung von Spannungswandlern zeigt Abb. 118. Die beiden Spannungswandler X und N sind primär parallel, sekundär gegeneinander geschaltet. Mit Hilfe der Transformatoren T_1 , T_2 und T_3 und des Widerstandes r_4 einerseits und der Kapazität C und des Widerstandes r_c andererseits werden die

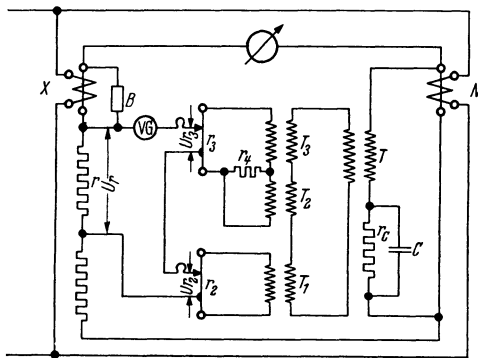


Abb. 118. Prüfeinrichtung für Spannungswandler nach W. HOHLE.

Ableichungen so getroffen, daß die Spannung U_{r_2} an r_2 in Phase mit der Sekundärspannung des Normalwandlers N , die Spannung U_{r_3} am Widerstand r_3 senkrecht dazu steht. Am Widerstand r kann ein Teil U_r der Differenzspannung abgenommen werden. Man kompensiert diese Spannung dadurch, daß man ebenso wie bei der Stromwandlermessung die Schleifkontakte auf r_2 und r_3 so lange verschiebt, bis das Vibrationsgalvanometer VG Null zeigt. An den Teilungen der Schleifdrähte r_2 und r_3 kann man direkt den Spannungsfehler und den Fehlwinkel ablesen. Den Spannungsfehler und den Fehlwinkel des Normalwandlers muß man sinngemäß zu diesen Ablesungen hinzuzählen, um die absoluten Werte zu erhalten.

Meßbereiche und Genauigkeit sind die gleichen wie bei der Stromwandler-Prüfeinrichtung.

Die beiden Einrichtungen werden in einem tragbaren Kasten zusammengebaut geliefert, so daß man wahlweise Stromwandler oder Spannungswandler prüfen kann; dabei werden verschiedene Elemente der Einrichtung für beide Prüfungen benutzt. Eine solche Anordnung zeigt die Abb. 119.

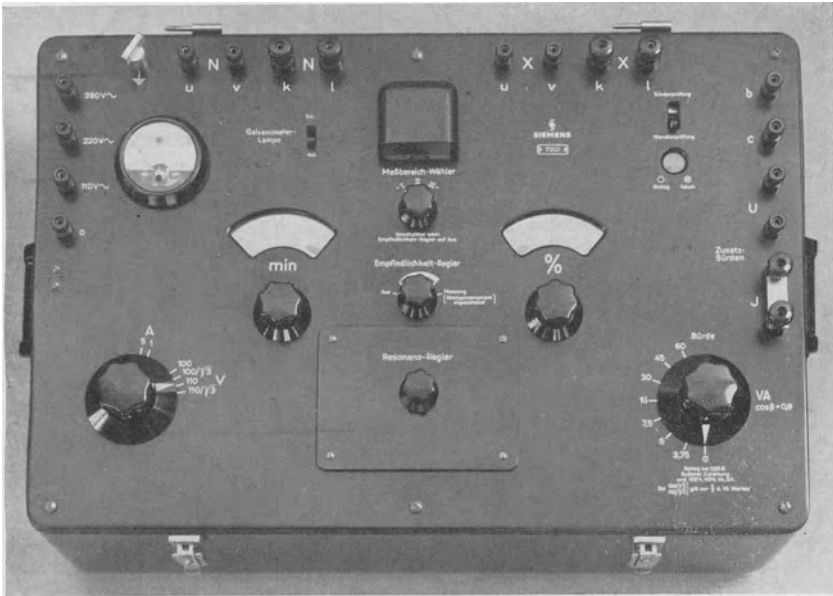


Abb. 119. Prüfeinrichtung für Strom- und Spannungswandler nach W. HOHLE.

c) Gegenschaltungsverfahren von O. ZWIERINA¹.

Bei dem Gegenschaltungsverfahren von O. ZWIERINA wird die Kompensation nicht auf rein elektrischem Wege, sondern indirekt durch magnetische Verkettung der zu kompensierenden Ströme vorgenommen. Als Vorzug des Verfahrens wird die sehr große erreichbare Meßgenauigkeit infolge der magnetischen Verkettung genannt, das Vibrationsgalvanometer braucht deshalb nicht allzu empfindlich zu sein. Außerdem kann man infolge der sehr kleinen Widerstände im Sekundärkreis des Wandlers fast bis zur Bürde Null herunter messen.

Stromwandler.

In Abb. 120 ist X der zu messende Stromwandler, N der Normalwandler. An die Sekundärwicklung des Wandlers X ist die Bürde B und die Wicklung a des Ringkernes E aus Material hoher Anfangspermeabilität angeschlossen. An die Sekundärwicklung des Normalwandlers N ist die Wicklung b des Ringkernes E angeschlossen, die die gleiche Windungszahl wie a hat. In Reihe damit liegen die Widerstände r_1 und r_2 (zusammen $0,2 \Omega$): r_1 dient zur Grobregelung, r_2 zur Feinregelung. Durch Schleifkontakte werden an diese Schleifdrähte die Wicklungen c und d des Ringkernes E angeschlossen. In dem Stromkreis von c liegt ein Widerstand r (1000Ω), in dem Stromkreis von d

¹ Elektrotechn. u. Masch.-Bau Wien 1937 Heft 1 S. 1.

ein Kondensator C . Der Strom in r_1 und r_2 ist in Phase mit dem Sekundärstrom I_{N2} des Normalwandlers N , desgleichen der Strom in der Wicklung c des Ringkernes E ; dagegen ist der Strom in der Wicklung d senkrecht dazu.

Da die Wicklungen a und b gegengeschaltet sind, entspricht der von ihnen erzeugte Fluß im Ringkern E dem Differenzstrom von I_{N2}

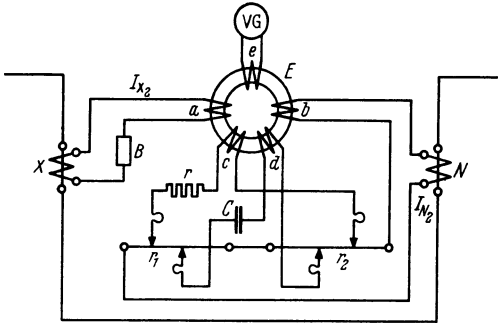


Abb. 120. Prüfeinrichtung für Stromwandler nach O. ZWIERINA.

und I_{X2} . Dieser Fluß wird nun durch Verschieben der Schleifkontakte auf den Widerständen r_1 und r_2 kompensiert, bis das an die Wicklung c angeschlossene Vibrationsgalvanometer VG Null zeigt. Der in der Wicklung c erzeugte Fluß entspricht der Komponente des Differenzstromes, die in Phase mit I_{N2} ist, der in der Wicklung d erzeugte Fluß

steht senkrecht dazu. Die Verhältnisse liegen ebenso wie für die Methode von HOHLE in Abb. 117 dargestellt. Die Teilung der Schleifdrähte r_1 und r_2 ist so beziffert, daß man an der Entfernung der in der Abbildung oben liegenden Schleifkontakte den Stromfehler, an der Entfernung der unteren den Fehlwinkel ablesen kann. Für die Messung des Stromfehlers sind drei Meßbereiche vorgesehen: $\pm 1,1\%$, $\pm 2,2\%$, $\pm 11\%$; für den Fehlwinkel ebenfalls drei Meßbereiche: ± 60 min, ± 120 min, ± 600 min. In der Abb. 120 sind die dazu notwendigen Schaltungen nicht eingezeichnet.

Die Teilung an den Schleifkontakten ist so groß, daß 20 mm Skalenlänge 0,01 % Stromfehler und 1 min Fehlwinkel entspricht.

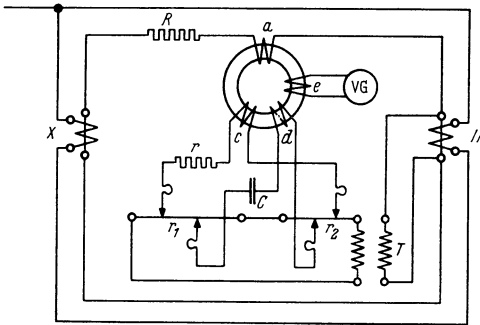


Abb. 121. Prüfeinrichtung für Spannungswandler nach O. ZWIERINA.

Spannungswandler.

In Abb. 121 ist die entsprechende Anordnung zur Prüfung von Spannungswandlern dargestellt. Der zu prüfende Spannungswandler X und der Normalwandler N sind primär

parallel, sekundär über die Wicklung a des Ringkernes E und einen Widerstand R gegeneinander geschaltet. An die Sekundärwicklung des Normalwandlers N ist außerdem der Transformator T angeschlossen,

der die gleiche Kompensationseinrichtung speist, die wir bei der Stromwandler-Prüfeinrichtung beschrieben hatten. Die Schleifkontakte werden so lange auf den Schleifdrähten r_1 und r_2 verstellt, bis das Vibrationsgalvanometer VG Null zeigt. Dann kann man an der Entfernung der in der Abb. 121 oben liegenden Schleifkontakte den Spannungsfehler, an der Entfernung der unteren den Fehlwinkel ablesen.

d) Gegenschaltungsverfahren mit Hilfswicklung auf dem Normalwandler¹.

Erwähnt werden soll noch ein Gegenschaltungsverfahren, das wesentlich von den beschriebenen abweicht und das für die Stromwandlerprüfung in Abb. 122 dargestellt ist. Die Abgleichung der beiden Wandler, des zu prüfenden X und des Normalwandler N , wird durch eine Hilfswicklung F auf dem Normalwandler erreicht, der ein in seiner

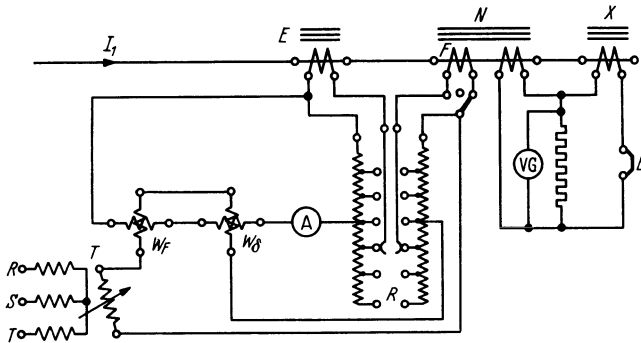


Abb. 122. Prüfeinrichtung für Stromwandler mit Hilfswicklung auf dem Normalwandler.

Größe durch den Regler R und in seiner Phase durch den Phasenschieber T einregelbarer Hilfsstrom zugeführt wird. Zur Messung der Größe des Hilfsstromes und des Fehlwinkels dienen ein Wirkleistungsmesser W_F und ein Blindleistungsmesser W_δ , deren eine Wicklung von dem Abgleichstrom und deren zweite von dem dem Wandler E entnommenen Strom durchflossen wird. Die Größe und Phase des Hilfsstromes werden so lange verändert, bis das Vibrationsgalvanometer VG Null zeigt.

Für die Prüfung von Spannungswandlern ist eine entsprechende Einrichtung geschaffen worden.

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

Wir haben uns bisher mit den verschiedenen Einrichtungen und Schaltungen befaßt, die man zur Prüfung der Zähler und Meßwandler

¹ „Wandler-Meßeinrichtungen“. Mitt. a. d. Arbeitsgebiet der Koch & Sterzel A.-G., Heft Nr. T, 20. Febr. 1938. Druckschrift VIII 326.

im Laboratorium, im Prüfraum oder an Ort und Stelle braucht. Es wird auch in den meisten Fällen genügen, daß man die Fehler der Zähler und Wandler feststellt. Will man darüber hinaus noch andere Eigenschaften der Zähler kennenlernen, die für die Beurteilung eines Zählers in mechanischer, magnetischer und elektrischer Hinsicht von Wert sind, so braucht man dazu noch verschiedene Einrichtungen und die Kenntnis einiger Meßverfahren, die im folgenden beschrieben werden sollen. Solche Untersuchungen werden in den meisten Fällen auf das Laboratorium beschränkt bleiben und nur an einzelnen Stücken vorgenommen werden.

1. Drehmoment.

Ein großes Drehmoment ist für jeden Zähler erwünscht, weil die Reibung in den bewegten Teilen einen möglichst kleinen Einfluß auf die Angaben des Zählers haben soll. Das Verhältnis Drehmoment zu Ankergewicht, das heute noch oftmals angegeben wird, ist für Zähler nicht von dem ausschlaggebenden Wert wie bei Meßinstrumenten, denn das Ankergewicht beeinflußt nur die Reibung im Unterlager, während die Reibung zwischen Schnecke und Schneckenrad (oder Ritzel und Zahnrad) des Zählwerks, die Reibung zwischen Bürsten und Kollektor bei Gleichstromzählern, die Reibung des Maximumzeigers bei Maximumzählern nicht vom Ankergewicht abhängen. Beim Zähler ist es das Verhältnis: mechanische Leistung an der Zählerachse zu Reibungsleistung, das sowohl für die Fehlerkurve bei neuen Zählern als auch für das Verhalten des Zählers nach längerer Zeit maßgebend ist. Einige Verfahren und Vorrichtungen zur Messung des mechanischen Drehmoments an der Zählerachse werden im folgenden beschrieben, in einem weiteren Kapitel werden wir uns mit der Messung der Reibung befassen.

a) **Kräftemesser mit Torsionsfeder** (Federdynamometer). Das Federdynamometer nach Angabe von STERN¹ wird wohl am häufigsten zur Messung des Drehmoments angewendet. Es ist in Abb. 123 dargestellt. Das eine Ende einer Spiralfeder ist an einem in Spitzen gelagerten Hebel befestigt, das andere an der Achse eines über einer Skalenscheibe drehbaren Reibungszeigers. Der mit einem geränderten Knopf versehene Zeiger ist in der Abbildung oben zu sehen, die Skala, auf deren Teilstriche er eingestellt werden kann, ist in der Abbildung von ihrem Platze weggenommen und rechts unten zu sehen. Der in Spitzen gelagerte Hebel greift mit seinem Ende direkt am Umfang der Zählerbremsscheibe mittels eines auf diese aufgesetzten Reiters oder indirekt mittels 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

¹ ETZ 1902 S. 777.

Kraft auf den Hebel, so bewegt er sich aus der Nullage. Nun dreht man den Reibungszeiger so lange, bis die Hebelspitze wieder auf den Nullpunkt der Skala einspielt. Der Reibungszeiger gibt auf der Skala den Torsionswinkel der Spiralfeder an, dem die gemessene Kraft proportional ist. Das Meßgerät muß mit einem Normaldynamometer oder durch Gewichte geeicht werden. Man mißt mit dem Meßgerät 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.

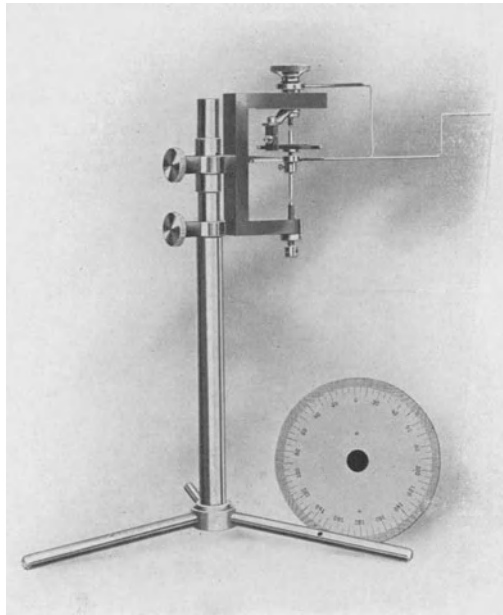


Abb. 123. Federkräftemesser.

Eine Abart dieses Meßgeräts mit horizontal liegender Drehachse stellen die SSW her¹.

b) Pendelkräftemesser. Auf dem Prinzip des Kräfteparallelogramms beruht das Dynamometer von AGNEW², Abb. 124. 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

¹ Es ist bei H. W. L. BRÜCKMANN: Elektrizitätszähler, 2. Aufl. S. 315, abgebildet. Leipzig: Leiner 1926.

² Bull. Bur. Stand., Wash. Bd. 7 (1910) Nr. 1 — Electr. Rev., Chicago Bd. 57 S. 375.

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. Nach dem Kräfteparallelogramm ist die das Gewicht G von der Senkrechten um den Winkel α ablenkende Kraft

$$K = G \cdot \operatorname{tg} \alpha.$$

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

Eine Eichung des Meßgeräts 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 den Nullpunkt der sphärischen Skala eingestellt wird.

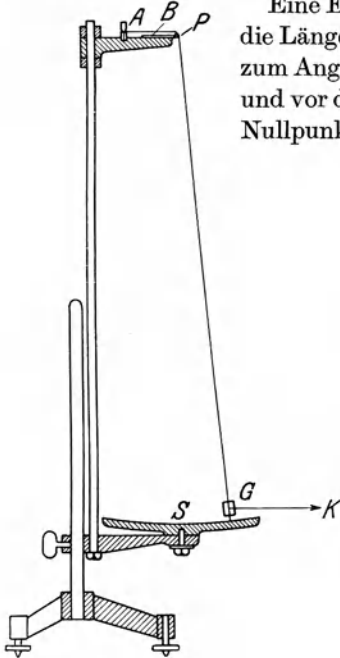


Abb. 124. [Pendelkräftemesser.

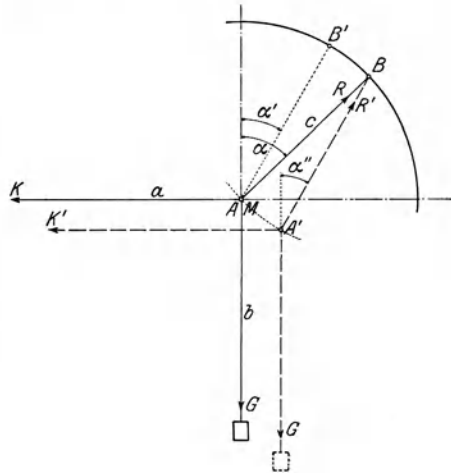


Abb. 125. Kräfteparallelogramm.

e) **Kräftemesser nach dem Kräfteparallelogramm.** Ein Dynamometer nach dem Kräfteparallelogramm mit Rückführung auf die Nullstellung ist in Abb. 126 dargestellt¹, das Prinzip zeigt Abb. 125. 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 , der die resultierende Kraft R aufnimmt, kann mit seinem Ende B auf einer Kreisbahn verschoben werden. Bei richtiger Einstellung soll der Punkt A mit dem Mittelpunkte M dieser Kreisbahn zusammenfallen. Wenn K und G rechtwinklig aufeinander stehen, ist

$$K = G \cdot \operatorname{tg} \alpha.$$

¹ SCHMIEDEL: Z. Instrumentenkde. 1913 S. 373.

Die ausgezogenen Linien der Abb. 125 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 $K' = G \cdot \operatorname{tg} \alpha'$. Der in der

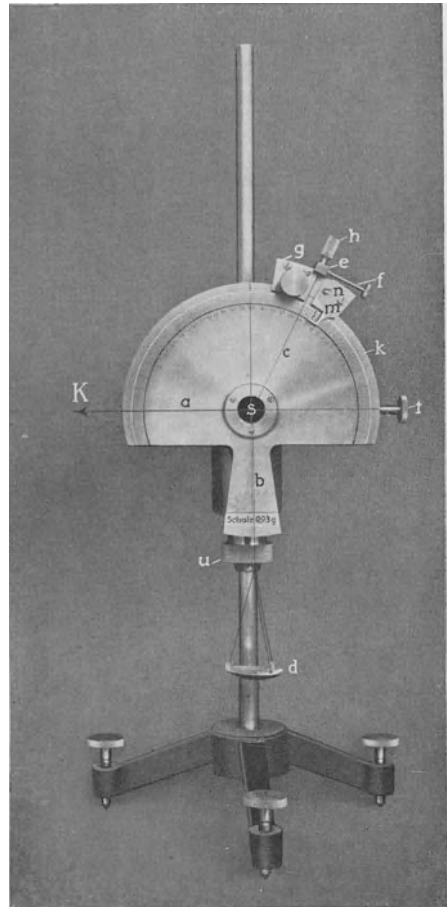
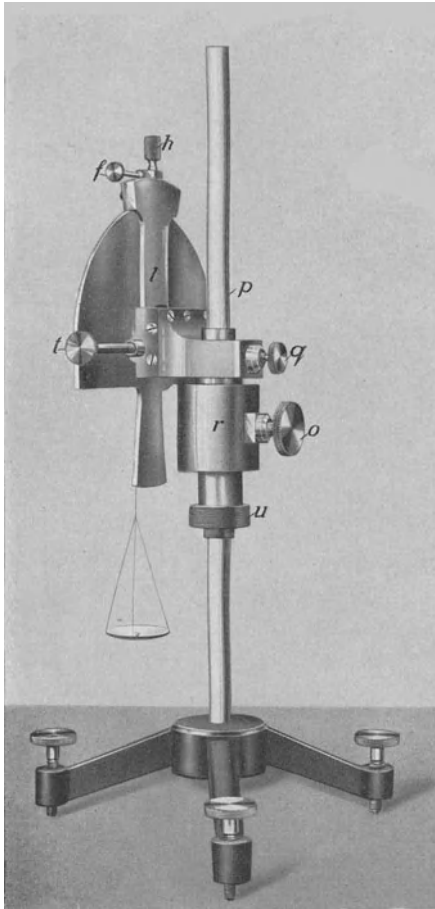


Abb. 126. Kräftemesser nach dem Prinzip des Kräfteparallelogramms.

Abb. 125 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.

Bei dem in Abb. 126 nach diesem Prinzip ausgeführten Apparat dient die Schraube o zur Grobverstellung, die Mutter u zur Feinverstellung in vertikaler Richtung auf der Stange p . Nach Lösung der Schraube q kann man den Apparat um die Achse der Stange p schwen-

ken; mit der Schraube t verschiebt man ihn in horizontaler Richtung. Das Gewicht G der Schale d am Faden b beträgt etwa 1 g und kann durch Auflegen von Gewichten beliebig erhöht werden. Die Stellung des Fadens c auf der zweiseitig ausgebildeten Tangentenskala k liest man an dem Zeiger m ab. Bei der Messung verschiebt man den Faden c , indem man nach Lösung der bei g sichtbaren Feststellschraube am Handgriff h so lange verstellt, bis der Knotenpunkt der Fäden a b c mit dem Kreuzungspunkt zweier auf dem Spiegel S eingezätzter feiner Striche zusammenfällt.

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

Es bleibt nun nur ein Hinweis darauf, wie man das Gewicht der Waagschale 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 Waagschale mit den Fäden ist, die beiden Messungen:

$$1. \quad K = (X + G_1) \cdot \operatorname{tg} \alpha_1,$$

$$2. \quad K = (X + G_2) \cdot \operatorname{tg} \alpha_2,$$

also

$$X = \frac{G_2 \cdot \operatorname{tg} \alpha_2 - G_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_1 - \operatorname{tg} \alpha_2}.$$

Zahlenbeispiel:

$$G_1 = 1,0 \text{ g}, \quad \operatorname{tg} \alpha_1 = 1,10, \quad G_2 = 2,0 \text{ g}, \quad \operatorname{tg} \alpha_2 = 0,75,$$

$$X = \frac{2,0 \cdot 0,75 - 1,0 \cdot 1,10}{1,10 - 0,75} = 1,14 \text{ g}.$$

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

d) **Kräftemesser nach dem Waageprinzip.** Es sei noch ein Kräfte-messer erwähnt, der auf dem Prinzip der Waage 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 Abb. 127 in Ansicht und Aufsicht 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 Waagebalken w angebracht ist. Mit derselben Achse ist ein senkrecht zum Waagebalken w stehen-

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

der 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 hineintragenden Ende läuft er in eine Zeigerspitze x aus, die über einer fest mit dem Rohr r verbundenen Skala s spielen kann. Zur Veränderung

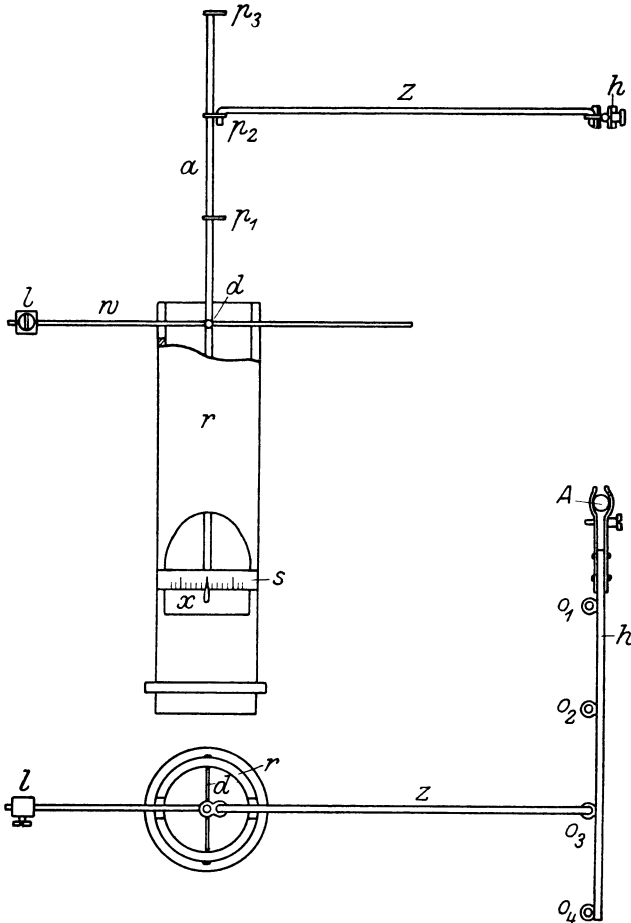


Abb. 127. Kräftermesser nach dem Waageprinzip.

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) Selbsttätige Vorrichtung zur Aufzeichnung des Drehmoments über den ganzen Umfang, insbesondere für Amperestundenzähler. Bei Gleichstrom-Amperestundenzählern schwankt das Drehmoment bei ver-

schiedenen Ankerstellungen sehr erheblich. Besonders in den Wendepunkten der Drehmomentkurve hält es schwer, eine stabile Einstellung des Kräftemessers zu erhalten. ALBERTI¹ hat deshalb eine Vorrichtung geschaffen, die es gestattet, in jeder Ankerstellung das Drehmoment nicht nur zu messen, sondern auch selbsttätig aufzuzeichnen.

Abb. 128 zeigt das Prinzip der Anordnung. 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 Kraft der am Hebel *h* angreifenden Spiralfeder. Berührt der Hebel *h* den Kontakt *q*₁, so wird der Motor *m* derart gesteuert, daß er das Zahnrad *z* in einer solchen

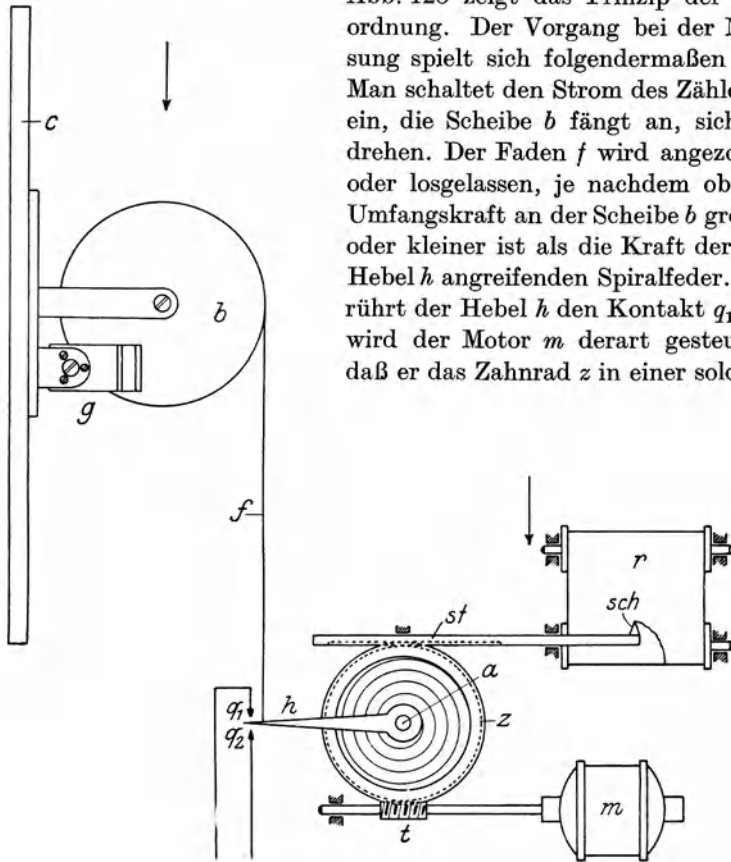


Abb. 128. Einrichtung zur selbsttätigen Zugkraftmessung.

Richtung antreibt, daß die Federkraft vergrößert wird; berührt er den Kontakt *q*₂, so wird der Motor umgesteuert und verkleinert die Federkraft. Der Bewegung des Zahnrades *z* entspricht der Hub des mit ihm durch die Zahnstange *st* gekuppelten Schreibstiftes *sch*. 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

¹ ETZ 1916 S. 285. Dort sind auch eine größere Anzahl von mit dem Apparat aufgenommenen Kurven wiedergegeben.

sind die Pendelbewegungen des Hebels h und damit des Schreibstiftes *sch*. Bewegt man nun den Zähler g langsam auf seiner Gleitbahn c und gleichzeitig damit den Registrierstreifen r , so wird auf diesem 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 vom Anker in mechanische Leistung umgewandelte elektrische Leistung ist

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

Dabei ist U_a die Gegen-EMK. des Ankers in Volt, die man aus der Differenz der Klemmenspannung und dem Ohmschen Spannungsabfall berechnen kann; I_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 mit dieser Methode im Bewegungszustande gemessene Drehmoment ist etwas kleiner als das mit den oben beschriebenen Methoden bei Stillstand gemessene. Und zwar ist das mittlere Drehmoment bei Stillstand im Verhältnis $I_0 : I_a$ größer als das bei Bewegung gemessene. Dabei bedeutet I_0 den Ankerstrom bei Stillstand und der gleichen Klemmenspannung, bei der der Ankerstrom I_a bei Bewegung vorhanden ist.

2. Reibung.

Wie schon oben gesagt, ist die Kenntnis des Reibungsmoments der Lager, des Zählwerks, der Bürsten auf dem Kollektor, des Maximumzeigers für die Beurteilung des Zählers wünschenswert. Die Vorrichtungen und Methoden zu seiner Bestimmung sollen deshalb ausführlich behandelt werden.

Die gleichen Methoden können natürlich auch dazu verwendet werden, die Zunahme der Reibung im Verlaufe längerer Betriebszeiten zu bestimmen³.

¹ MÖLLINGER: Wirkungsweise der Motorzähler und Meßwandler 2. Aufl. S. 43. Berlin: Julius Springer 1925.

² S. folgendes Kapitel.

³ WACHSMANN, F.: Untersuchung der Reibungsverhältnisse in Elektrizitätszählern unter besonderer Berücksichtigung der Veränderlichkeit der Reibungswerte im Verlaufe längerer Betriebszeiten. Dissert. München 1934.

a) Torsionswaage.

Abb. 129 zeigt die schematische Anordnung der Torsionswaage von BRUCKMANN und REYNST¹. Der Zähler Z ist in einem Rahmen R aufgehängt, der in einem Bügel B verschoben werden kann. Am Bügel B ist ein Stahldraht D angebracht, dessen anderes Ende am Torsionskopf K befestigt ist. Am Torsionskopf K sitzt ein Zeiger A_1 , der über der festen Skala S bewegt werden kann, ebenso am Bügel B ein Zeiger A_2 . Am unteren Ende des Rahmens R sind zwei Stromzuführungen angebracht, die in zwei mit Quecksilber gefüllte Näpfe Q tauchen. Diese

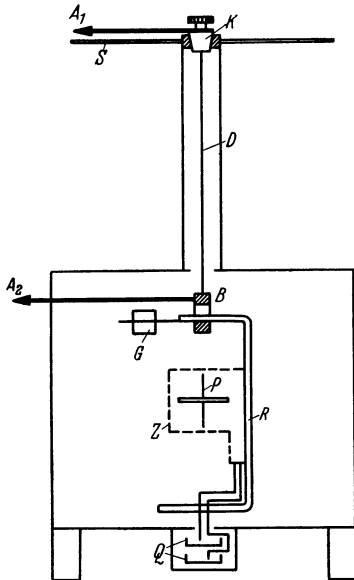


Abb. 129. Torsionswaage nach BRUCKMANN und REYNST.

Anordnung braucht man nur dann, wenn man Messungen bei stromdurchflossenem Zähler machen will, z. B. zur Bestimmung der Dämpfung durch die Wechselflüsse. Vor Beginn der Messung wird der Rahmen R im Bügel B so verschoben, daß die Zählerachse P mit der Achse des Stahldrahtes D zusammenfällt und mit Hilfe des Laufgewichtes G und einer Wasserwaage so eingestellt, daß die Zählerscheibe in die horizontale Lage kommt.

Will man nun das Reibungsmoment des Zählers messen, dann bläst man seine Scheibe z. B. mit einem Luftstrom von einigen cm Wassersäule an, den man mit Hilfe eines Manometers konstant hält. Dann läuft die Scheibe mit konstanter Drehzahl um, der Zeiger A_2 bewegt sich aus seiner Nullage. Nun verdreht man den Torsionskopf K so lange, bis der Zeiger A_2 wieder auf Null steht. Da die Masse des Rahmens mit dem darauf befestigten Zähler sehr groß ist, ist die Schwingungsdauer sehr lang (2 min). Deshalb wird eine Dämpfung sehr stark sein müssen, wenn sie wirksam sein soll. Der an der Stellung des Zeigers A_1 auf der Skala S abgelesene Torsionswinkel ist ein Maß für das Reibungsmoment: $D_R = C \cdot \alpha$. Man macht Messungen bei verschiedenen Drehzahlen und kann dann das Reibungsmoment in Abhängigkeit von der Drehzahl als Kurve auftragen.

Um bei einem Gleichstromzähler die Reibungsmomente der Lagerung, des Zählwerks und der Bürsten getrennt zu erhalten, macht man drei Versuchsreihen, vgl. Abb. 130:

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

¹ Elektrotechn. u. Masch.-Bau Wien 1937 Heft 50 S. 609.

Die Differenz zwischen Kurve 1 und 2 ergibt die Zählwerksreibung, die zwischen 2 und 3 die Bürstenreibung, Kurve 3 die Lager- plus Luftreibung.

Will man die Luftreibung noch von der Lagerreibung trennen, so kann man dies mit der beschriebenen Einrichtung nur dadurch erreichen, daß man den Kasten, in dem sich die Einrichtung befindet, luftleer macht und bei elektrisch angetriebenem Zähler eine Meßreihe macht. Mit gleichem Antrieb macht man eine zweite Meßreihe bei normalem Luftdruck. Die Differenz der beiden aufgenommenen Kurven ergibt dann die Luftreibung.

Auf die gleiche Weise wie die Zählwerksreibung kann man durch Differenzbildung auch die Reibung eines Maximumwerkes und sonstiger den Zähler belastender Einrichtungen feststellen.

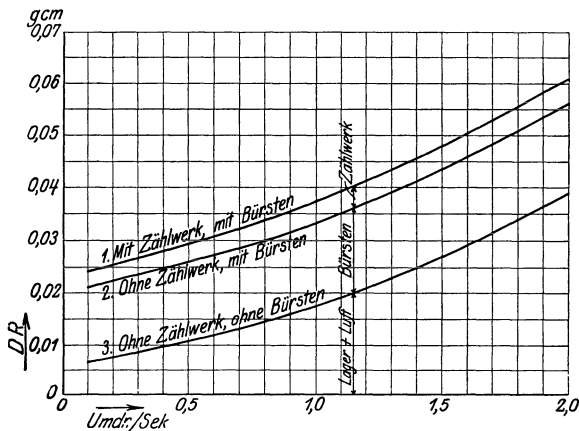


Abb. 130. Reibungskurven.

Die Eichung der Torsionswaage nimmt man mit Hilfe von zwei Schwingungsversuchen vor. Man mißt die Schwingungsdauer τ_1 des Apparates allein und die Schwingungsdauer τ_2 des Apparates unter Hinzufügung eines bekannten (polaren) Trägheitsmoments K_R . Ist K das Trägheitsmoment der Torsionswaage allein, so gelten die Beziehungen:

$$\tau_1 = 2\pi \sqrt{\frac{K}{C}}, \quad \tau_2 = 2\pi \sqrt{\frac{K + K_R}{C}},$$

woraus sich die Konstante ergibt zu

$$C = \frac{4\pi^2 \cdot K_R}{\tau_2^2 - \tau_1^2}.$$

Benutzt man als Zusatz-Trägheitsmoment einen ringförmigen Körper (der an allen Stellen die gleiche Dicke haben und dessen Material homogen sein muß), mißt seinen äußeren und inneren Radius r_a und r_i in cm und bestimmt seine Masse m in g durch Wägung, so berechnet sich das (polare) Trägheitsmoment des Ringes zu $K_R = \frac{1}{2} m (r_i^2 + r_a^2) \text{ gcm}^2$.

b) Torsionsdynamometer.

Abb. 131 ist das Torsionsdynamometer von H. ZIEMENDORFF in schematischer Darstellung¹. Man kann mit dieser Einrichtung Reibungsmessungen an einzelnen Zählerteilen machen. In Abb. 131a ist es z. B. das Unterlager U , dessen Reibungsmoment bei verschiedenen Ankergewichten gemessen werden soll. Das Unterlager U ist in einen Träger T eingeschraubt, die zylinderförmige Glocke R ist so auf der Achse D befestigt, daß ihr Schwerpunkt unter dem Drehpunkt des Lagers liegt. Durch Gewichte G kann die Belastung des Lagers verschieden groß gemacht werden. Das Dynamometer selbst besteht aus

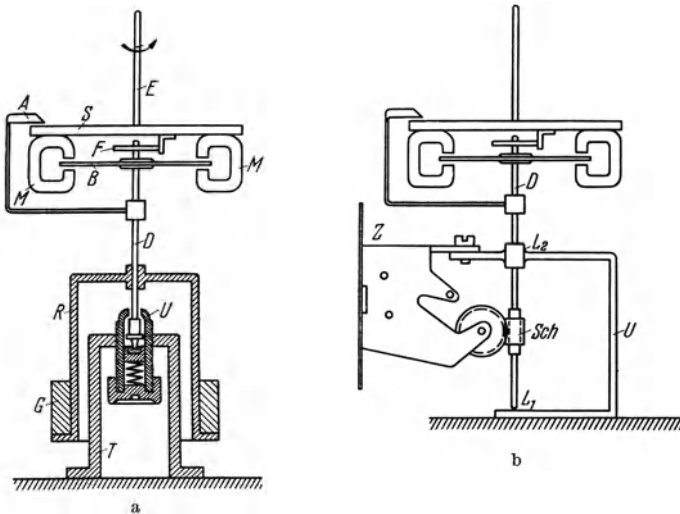


Abb. 131. Torsionsdynamometer nach ZIEMENDORFF. a) Anordnung für Reibungsmessung an Unterlagern, b) Anordnung für Reibungsmessung an Zählwerken.

einem nicht gezeichneten regelbaren Motor, der die Achse E in Pfeilrichtung antreibt. Auf der Achse E ist eine kreisrunde Skala S angebracht, an deren unterer Fläche das eine Ende der Spiralfeder F befestigt ist. Das andere Ende der Feder F ist am oberen Teil der Achse D angeklemt. An der Achse D sitzt ein Zeiger A , der über der Skala S spielen kann. An der unteren Fläche der Skala S sitzen zwei kleine permanente Magnete M , in deren Luftspalt die auf der Achse D sitzende kleine Bremsscheibe B hineinragt. Diese Anordnung dient zur aperiodischen Dämpfung der Schwingungen und erleichtert die Ablesung. Zeiger A , Scheibe B , Achse D und Glocke R wiegen zusammen etwa 10 g; dies ist also die niedrigste Belastung, bei der die Reibung gemessen werden kann.

¹ Es wird bei den Siemens-Schuckert-Werken zur Messung der Reibungsmomente benutzt.

Bei der Messung wird die Achse E mit konstanter Drehzahl angetrieben, dann bewegt sich der Zeiger A so lange aus der Nullage, bis das Reibungsmoment des Lagers und das Torsionsmoment der Feder F im Gleichgewicht sind. Der Torsionswinkel α , den man an der Skala S ablesen kann, ist dann ein Maß für das Reibungsmoment des Lagers: $D_R = C \cdot \alpha$. Die Konstante C bestimmt man am besten durch Eichung des Dynamometers mit einem bekannten Drehmoment, z. B. durch Ablenkung eines Fadenpendels. Während der Messung drehen sich natürlich Zeiger A und Skala S mit gleicher Umdrehungsgeschwindigkeit. Da diese aber bei den üblichen Zählern sehr klein ist, kann man während der Bewegung den Zeigerausschlag bequem ablesen.

In Abb. 131 b ist eine Hilfsvorrichtung zur Messung von Zählwerksreibungen dargestellt. Die Achse D trägt oben die gleichen Teile wie in Abb. 131 a. Sie ist in dem Bügel U in den Lagern L_1 und L_2 gelagert. Außerdem ist auf ihr die Schnecke Sch des zu prüfenden Zählermusters befestigt. Das Zählwerk Z wird am Träger U angeschraubt. Man macht zwei Messungen, eine mit Zählwerk und eine ohne Zählwerk zur Bestimmung des Reibungsmoments der beiden Lager L_1 und L_2 . Die Differenz aus der ersten und zweiten Messung ergibt die Zählwerksreibung.

Auf ähnliche Weise kann man auch die Reibung von Maximumwerken und anderen den Zähler belastenden Zählerteilen messen.

Die gesamte Zählerreibung kann man messen, wenn man das Dynamometer an dem oberen freien Achsenende des Zählers befestigen kann. Sonst muß man das Oberlager entfernen und das Dynamometer durch ein Zwischenglied mit der Zählerachse verbinden. Die Luftreibung der Scheibe kann man dadurch bestimmen, daß man z. B. in der Vorrichtung Abb. 131 a eine Meßreihe mit auf die Achse D aufgesetzter Triebsscheibe macht, eine zweite Meßreihe mit einem Ersatzgewicht für die Triebsscheibe, das möglichst kleine Oberfläche und damit eine verschwindend kleine Luftreibung hat. Die Differenz aus beiden Messungen ergibt die Luftreibung. Ebenso wie bei der Torsionswaage kann man natürlich auch zwei Meßreihen im luftleeren Raum und bei Atmosphärendruck machen und durch Differenzbildung die Luftreibung bestimmen.

c) Auslaufmessungen.

Die bei Maschinenmessungen viel angewendete Auslaufmethode ist auch auf die Messung der Reibungsmomente von Zählern erfolgreich angewendet worden¹. Bei der Messung geht man folgendermaßen vor: Man entfernt die Bremsmagnete des Zählers und schaltet seine Stromkreise aus, damit keine Felder entstehen können, die zusammen mit

¹ SCHMIEDEL: Verh. d. Vereins z. Beförd. d. Gewerbefleißes 1910 S. 571, 655; 1911 S. 111. — Elektrotechn. u. Masch.-Bau 1911 S. 955, 978.

kurzgeschlossenen Leitern bremsend wirken würden. Dies 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 Drehzahl, die etwas über der Vollast-Drehzahl 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. 62) 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. 65) beschriebenen selbsttätigen Zählvorrichtungen zur Verfügung hat. So haben z. B. FITCH und HUBER¹ 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

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

Man muß also die zweite Ableitung der aufgenommenen Kurve $u = f(t)$ nach der Zeit bilden und das Trägheitsmoment K des Ankers bestimmen. Außerdem muß man die erste Ableitung du/dt kennen, weil man die Abhängigkeit des Drehmoments der Reibung von den sekundlichen Umdrehungen des Ankers $n = du/dt$ sucht.

Man kann die Auslaufkurven auch dadurch aufnehmen, daß man bei abgenommenem Bremsmagnet den Zähler durch Erregung des Hauptstrom- und Spannungskreises auf verschiedene konstante Drehzahlen bringt, diese zählt, dann den Strom in beiden Kreisen abschaltet und die Zeit vom Abschalten bis zum Stillstand des Ankers mißt. Diese von H. W. L. BRÜCKMANN² angegebene Methode hat jedoch den

¹ Bull. Bur. Stand., Wash. Bd. 10 (1913).

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

² ETZ 1910 S. 861.

Nachteil, daß sowohl die konstante Drehzahl als auch der Stillstandspunkt nicht sehr exakt bestimmt werden können. 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, Abb. 132.

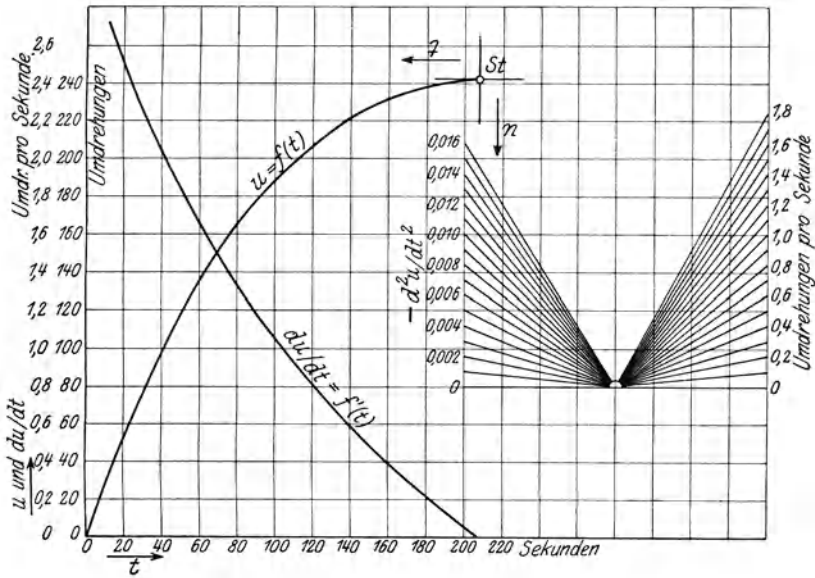


Abb. 132. Auslaufkurve.

Dann zieht man eine Schar von strahlenförmigen Geraden so, daß die trigonometrischen Tangenten ihrer Winkel α mit der Abszissenachse bestimmten Werten der sekundlichen Ankerumdrehungen entsprechen:

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

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 Abb. 132 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 man die Reibungskurve $D_R=f(du/dt)$, Abb. 130. 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.

Dem gefundenen du/dt ordnet man einen mittleren Wert

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

zu. Bei der praktischen Anwendung der Methode muß man eine Anzahl Kunstgriffe anwenden, die in der angezogenen Arbeit ausführlich zahlenmäßig behandelt sind.

Vereinfachte Auslaufmethode. Für viele Zwecke wird die vereinfachte Auslaufmethode von HOMMEL² genügen, die allerdings nicht sehr genau ist. Multipliziert man die Bewegungsgleichung des auslaufenden Ankers $D_R = K \cdot d\omega/dt$ auf beiden Seiten mit ω , so kann man sie in eine Arbeitsgleichung verwandeln:

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

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

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

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.

¹ Eingehende Beweisführung s. SCHMIEDEL: Verh. d. Vereins z. Beförd. d. Gewerbefleißes 1910 S. 574.

² Elektrotechn. u. Masch.-Bau 1920 S. 81.

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

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

Dieser Wert gibt einen guten Annäherungswert für das Reibungsmoment. Mit dieser Methode kann man auch die Trennung der Verluste vornehmen.

Rechnerische Auswertung. FITCH und HUBER¹ 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 aus sich bis zu einer bestimmten Umdrehungszahl beschleunigt. Die gewollte Kurve ergibt sich z. B. aus Abb. 132, 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

$$u = at^2 + bt^4$$

ausdrücken lassen². Um die Konstanten a und b zu finden, muß man die zwei verschiedenen Umdrehungszahlen der Kurve entsprechenden Gleichungen lösen:

$$u_1 = at_1^2 + bt_1^4,$$

$$u_2 = at_2^2 + bt_2^4.$$

Es ergibt sich:

$$a = \frac{u_1 t_2^4 - u_2 t_1^4}{t_1^2 t_2^4 - t_1^4 t_2^2},$$

$$b = \frac{u_2 t_1^2 - u_1 t_2^2}{t_1^2 t_2^4 - t_1^4 t_2^2}.$$

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 mittels einer das obere Achsenende umfassenden Klemmvorrichtung an einem etwa 2 m

¹ Vgl. oben S. 136.

² Erstmals wurde diese Darstellung der Auslaufkurve von KUHLMANN angegeben. ETZ 1901 S. 393.

langen Stahldraht von etwa 0,2 mm Durchmesser auf und läßt ihn hin und her schwingen. Man zählt eine Anzahl von Vorbeigängen der auf dem Anker angebrachten Marke an einer festen Marke (indem man bei „Null“ zu zählen anfängt) und bestimmt die zugehörige Zeit. Die daraus ermittelte Zeit zwischen zwei Vorbeigängen ist die Schwingungsdauer τ_1 .¹ Man macht einen zweiten Schwingungsversuch unter Zuhilfenahme eines Zusatzringes von bekanntem Trägheitsmoment K_R , den man konzentrisch zur Drehachse auf die Bremsscheibe des Zählers auflegt und bestimmt die Schwingungsdauer 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

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

Zur Berechnung des Trägheitsmoments des Zusatzringes (der an allen Stellen die gleiche Dicke haben und dessen Material homogen sein muß) mißt man seinen äußeren und inneren Radius, r_a und r_i , in cm und bestimmt durch Wägung seine Masse in g. Das Trägheitsmoment des Ringes ist dann

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

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 Nennstromes. Bei Wechselstromzählern sollen diese Ströme J_1 und J_2 gleichphasig mit der Spannung sein. Die Stromkreise werden so geschaltet, daß die entstehenden Drehmomente den Anker rückwärts zu treiben suchen. Die Auslaufversuche wertet man nur für ein kurzes Geschwindigkeitsintervall aus, für das man die Kurvenstücke aufzeichnet, die den folgenden beiden Gleichungen entsprechen:

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

und

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

¹ Für sehr genaue Schwingungsmessungen vgl. man KOHLRAUSCH: Lehrbuch der praktischen Physik. 17. Aufl. Leipzig: Teubner 1935.

Es gilt die Beziehung

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

wobei die in der Klammer stehenden Verzögerungen ein und derselben Geschwindigkeit entsprechen müssen.

Im allgemeinen kann man bei dem kleinen Unterschied zwischen den Strömen I_1 und I_2 Proportionalität zwischen Drehmoment und Produkt aus Strom und Spannung annehmen. Annähernd gilt dies bis zum Drehmoment D_n bei Nennstrom I_n und Nennspannung U_n . Also

$$\frac{D_1 - D_2}{D_n} = \frac{(I_1 - I_2) \cdot U}{I_n \cdot U_n}.$$

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

$$K \cdot \frac{2\pi}{981} \cdot \left[\left(\frac{d^2 u}{dt^2} \right)_1 - \left(\frac{d^2 u}{dt^2} \right)_2 \right] = D_n \cdot \frac{(I_1 - I_2) \cdot U}{I_n \cdot U_n}.$$

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

Trennung der Verluste. Die Trennung der Verluste wird in der gleichen Weise ausgeführt, wie im Abschnitt a bei der Torsionswaage beschrieben.

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 unter normalem Luftdruck noch einen solchen in einem luftleer gemachten Raum vornimmt und die Differenz der beiden Reibungskurven bildet.

d) Methode des geeichten Motors.

Entfernt man bei einem Gleichstrom-Wattstundenzähler die Bremsmagnete und legt an seinen Anker eine kleine Spannung U_k , so erhöht sich seine Tourenzahl so lange, bis Gleichgewicht zwischen der mechanischen Reibungsleistung und dem Teil der elektrischen Leistung besteht, die im Anker in mechanische umgewandelt wird³:

$$D_R \cdot 2\pi \cdot \frac{du}{dt} \cdot 10^{-7} = U_a \cdot I_a.$$

¹ S. oben S. 124.

² Über mögliche Fehlerquellen s. Verh. d. Vereins z. Beförd. d. Gewerbefleißes 1910 S. 658.

³ Siehe v. KRUKOWSKI: Vorgänge in der Scheibe eines Induktionszählers usw. Berlin: Julius Springer 1920.

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

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

3. Reibungskompensation.

a) **Gleichstrom-Wattstundenzähler.** Bei Gleichstrom-Wattstundenzählern kompensiert man die Reibung meist durch die sog. Kompensationsspule, die mit dem Anker in Reihe geschaltet ist und vom Strom des Spannungskreises durchflossen wird.

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

$$D'_k = D_k \pm D_H = c_k \cdot U^2 \pm c_H \cdot U.$$

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 dadurch bestimmen, daß man zwei Drehmoment-Bestimmungen bei ausgeschaltetem Hauptstromkreis, aber eingeschaltetem Spannungskreis mit einer in dem vorigen Kapitel unter a) bis c) beschriebenen Methode vornimmt. Die eine Messung macht man bei normaler Lage des Zählers, die andere bei um 180° veränderter Lage; oder man beläßt den Zähler in seiner normalen Lage und macht die Messung bei zwei verschieden großen Spannungen.

Änderung der Lage des Zählers. Erste Messung: Der Spannungskreis ist normal geschaltet, nur in der Kompensationsspule ist die Stromrichtung umgeschaltet, so daß das von ihr erzeugte Drehmoment verzögernd wirkt. Die Klemmenspannung ist die normale, die

¹ Vgl. Elektrotechn. u. Masch.-Bau 1911 S. 978 — ferner SCHMIEDEL: Wirkungsweise und Entwurf der Motorelektrizitätszähler. S. 113. Stuttgart: Enke 1916.

Bürsten liegen am Kollektor an, Bremsmagnet und Zählwerk sind entfernt, der Hauptstromkreis ist abgeschaltet. Die Messung ergibt nach Abzug des bekannten Drehmoments der Reibung:

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

Eine zweite Messung macht man unter sonst gleichen Bedingungen, nachdem man den Zähler um 180° um seine vertikale Achse gedreht aufgehängt hat. Diese Messung ergibt nach Abzug des bekannten Drehmoments der Reibung:

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

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

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

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

$$\begin{aligned} D_{k1} &= c_k \cdot U_1^2 \pm c_H \cdot U_1, \\ D_{k2} &= c_k \cdot U_2^2 \pm c_H \cdot U_2, \end{aligned}$$

und daraus

$$c_k = \frac{D_{k1} - D_{k2} \cdot \frac{U_1}{U_2}}{U_1^2 - U_1 \cdot U_2} \quad \text{und} \quad c_H = \frac{-D_{k1} \cdot U_2^2 + D_{k2} \cdot U_1^2}{U_1 \cdot U_2 (\pm U_1 \mp U_2)}.$$

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 mit den im vorigen Kapitel unter a) und b) genannten Methoden messen. Die unter c) genannte Auslaufmethode ist aber nicht anwendbar, weil der Spannungskreis voll erregt sein muß und also auch die Eigenbremsung, die um ein Vielfaches größer ist, in die Erscheinung tritt. Dies gilt auch für Gleichstrom-Ampèrestundenzähler, weil bei diesen der Bremsmagnet vorhanden sein muß, wenn die Kompensation zur Wirkung kommen soll. Die im folgenden beschriebene Methode gestattet, 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

¹ Vgl. z. B. SCHMIEDEL: Wirkungsweise und Entwurf. S. 88. — MÖLLINGER: Wirkungsweise der Motorzähler. 2. Aufl. S. 90.

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

$$D_k = \frac{(F_1 - F_2)}{2} \cdot \frac{D_n}{K} \cdot \frac{I}{I_n} \cdot \cos \varphi.$$

Dabei ist D_n der Nennwert des treibenden Drehmoments, I_n der Nennstrom, I der Strom, bei dem die Messung gemacht ist, K eine Konstante, deren Wert in der Nähe von 1,1 liegt. Voraussetzung ist 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 Amperestunden-zähler anwenden.

4. Anlauf und Leerlauf.

So wichtig wie die Untersuchung der Reibung und der Reibungskompensation für die genaue Kenntnis einer Zählertype ist, interessiert doch letzten Endes die Elektrizitätswerke nur die meßtechnische Auswirkung dieser Eigenschaften. Diese drückt sich im Anlaufstrom oder in der Anlaufleistung aus. Bei Gleichstromzählern mißt man den Anlaufstrom mit einem hochempfindlichen Strommesser, bei Wechselstrom meist dadurch, daß man den Zähler wie im Netz schaltet und als Belastung einen induktionsfreien regelbaren Widerstand bekannter Größe benutzt. Den Anlaufstrom kann man dann aus Klemmenspannung und Widerstand berechnen. Bei der Messung des Anlaufstroms muß man darauf achten, daß der Zähler erschütterungsfrei aufgehängt ist; auch schon geringe Gebäudeerschütterungen erleichtern den Anlauf. Hängt der Zähler etwas schief, so spielt natürlich auch die Schwerpunktslage des beweglichen Ankers eine erhebliche Rolle; auch bei gut ausbalancierten Ankern ist diese immer ein wenig außerhalb der Drehachse. Besonders muß man auf die Stellung der Leerlaufhemmung achten; man soll den Anlauf immer in der Ankerstellung messen, in der die Leerlaufhemmung am wirksamsten ist.

Die Kontrolle darüber, ob der Zähler bei erhöhter oder erniedrigter Spannung leerläuft, ist möglichst bei nicht gänzlich erschütterungsfrei aufgehängtem Zähler vorzunehmen; je stärker die Erschütterungen sind, desto leichter läuft der Zähler leer. Auch auf schiefe Aufhängung muß man Rücksicht nehmen, denn je nach der Lage des Schwerpunkts des beweglichen Ankers wird der Leerlauf erleichtert oder erschwert. Wenn auch die amtlichen Vorschriften einen gewissen Betrag für den Vorlauf zulassen, so stellt man in der Praxis doch immer die Anforderung, daß der Zähler keinen Leerlauf haben darf, wenn sich die Spannung um $\pm 10\%$ gegen den Nennwert ändert.

5. Eigenbremsung.

Die Eigenbremsung wird bei Wechselstrom-Induktionszählern durch Bewegung der Scheibe in den Wechselströmen 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. Bei Amperestundenzählern 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:

$$D_I = c_I \cdot \frac{du}{dt} \cdot I^2,$$

wobei D_I das Drehmoment der Eigenbremsung des Hauptstromflusses, c_I eine Konstante, du/dt die sekundlichen Umdrehungen und I der Hauptstrom sind. 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_I heraus und trägt die Quadratwurzeln von D_I als Funktion von I auf. Die so erhaltenen Geraden kann man bis zum Nennwert I_n ziehen. Ein Beispiel für eine solche Extrapolation zeigt Abb. 133.

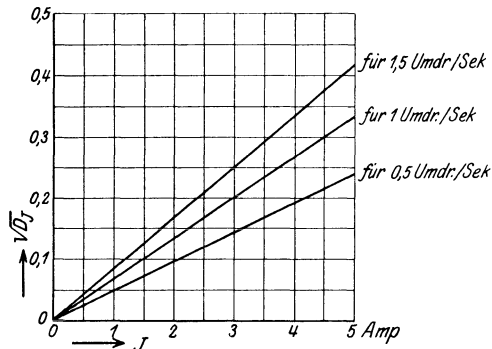


Abb. 133. Eigenbremsung durch den Hauptstromfluß.

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

$$D_U = c_U \cdot \frac{du}{dt} \cdot U^2.$$

Da D_I , D_U und du/dt aus den Auslaufmessungen bestimmt, I und U bekannt sind, kann man die Bremskonstanten c_I und c_U 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, kann man nur dann anwenden, wenn man den Zähler nicht im normalen Zustande, wie er die Fabrikation verläßt, prüfen will; man muß sein Oberlager entfernen und auf seine verlängerte Achse den Anker eines Gleichstrommotors setzen. Dieser besteht aus einer Scheibe aus Isoliermaterial, welche die Wicklung eines Amperestundenzählers trägt und die sich in den Luftspalten zweier permanenter Magnete bewegen kann (ungedämpfter Flachankerzähler). Die vom Motor abgegebene mechanische Leistung ist $I_a \cdot U_a$; sie ist gleich der durch die Eigenbremsung und die Reibung vernichteten Leistung:

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

I_a ist der Ankerstrom, U_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, zieht sie von dem gefundenen Werte ab und erhält dann die Eigenbremsung allein.

c) Einlaufmethode. Für Wechselstrom-Induktionszähler hat H. W. L. BRÜCKMANN³ 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:

$$D = D_U + D_I + D_R.$$

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

$$D = D_n \cdot \frac{U \cdot I}{U_n \cdot I_n} = D_U.$$

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

² S. oben S. 131.

³ ETZ 1910 S. 859 — vgl. auch SCHMIEDEL: Elektrotechn. u. Masch.-Bau 1911 S. 980; ferner ebenda 1912 Heft 7 S. 156.

Hat man das Nenndrehmoment D_n gemessen, so kann man aus einer solchen einfachen Messung, da die Nennspannung U_n und der Nennstrom I_n bekannt sind, die Eigenbremsung D_U 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 SCHILLÈS¹ durch folgendes Verfahren feststellen: Man bestimmt z. B. für einen kleinen Strom I'' und die Nennspannung U_n das Drehmoment D'' bei Stillstand des Zählers; sodann läßt man den Zähler mit abgenommenem Bremsmagnet laufen und mißt die Geschwindigkeit $(du/dt)''$, die sich für die gleichen Werte von Strom und Spannung einstellt. Die gefundenen Werte D'' und $(du/dt)''$ trägt man als Ordinate und Abszisse in einem rechtwinkligen Koordinatensystem auf. Die in Abb. 134 eingetragene Verbindungslinie der beiden markierten Punkte ergibt

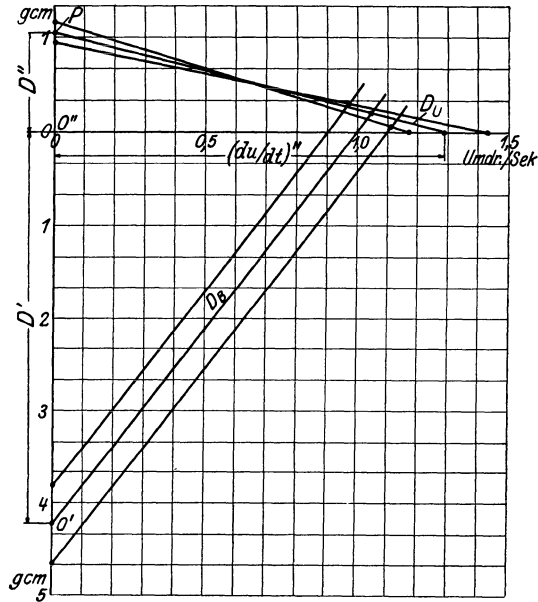


Abb. 134. Indirekte Methode zur Bestimmung der Eigenbremsung.

den Verlauf des Drehmoments D_U der Eigenbremsung durch den Spannungsfluß in Abhängigkeit von den sekundlichen Umdrehungen. Ferner trägt man von O'' aus den Wert D' ab, der dadurch bestimmt ist, daß er sich mit D'' zum Nenndrehmoment D_n ergänzt. Den Punkt O' verbindet man mit dem Punkte der Geraden für D_U , der den Nennumdrehungen (in unserem Beispiel 1,042) entspricht. Diese Gerade stellt die Abhängigkeit des Bremsmoments des Bremsmagnets D_B von der Geschwindigkeit dar. Es gilt nun für die Beschleunigungsperiode folgende Beziehung:

$$D_n = D_B + D_U + 2\pi K \cdot \frac{d^2 u}{dt^2}.$$

¹ Lumière Électr. (2) Bd. 15 (1911) S. 7 — Elektrotechn. u. Masch.-Bau 1911 S. 704.

Der Ordinatenabschnitt zwischen den beiden Geraden für D_U und D_B stellt also für jede Geschwindigkeit das Drehmoment der Beschleunigung der Ankermasse dar. K ist dabei das Trägheitsmoment des Ankers. Der stationäre Zustand wird erreicht, wenn die Beschleunigung Null wird, also im Schnittpunkt der beiden Geraden für D_U und D_B . Hat man die Konstruktion für die Nennspannung durchgeführt, so ist es einfach, auch für andere Spannungen die entsprechenden Geraden einzuzichnen.

In unserem Beispiel ist die Nennspannung 500 V, für 450 und 550 V sind gleichfalls die Geraden für D_U gemessen und aufgetragen. Der Strom I'' ist für alle drei Fälle zu 20% des Nennstroms eingesetzt. Der Punkt O' wird ebenfalls bestimmt, wobei zu beachten ist, daß das Drehmoment von den neuen Punkten P an abgetragen werden muß. Die Neigung der Geraden für D_B bleibt natürlich immer dieselbe, da die Flüsse des Bremsmagnets und des Hauptstromkreises gleich bleiben. Die Schnittpunkte der zugehörigen Geraden $D_B = f'(du/dt)$ und $D_U = f''(du/dt)$ 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

$$1,042 \cdot \frac{450}{500} = 0,938 \quad \text{und} \quad 1,042 \cdot \frac{550}{500} = 1,144$$

und die Abweichungen gegenüber den Angaben des Zählers bei 500 V zu

$$\frac{0,965 - 0,938}{0,938} = + 2,9 \% \quad \text{für 450 V,}$$

$$\frac{1,100 - 1,144}{1,144} = - 3,8 \% \quad \text{für 550 V.}$$

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.

6. Stoßweise Belastung.

Stromstöße und Spannungsstöße 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

¹ Vgl. Fig. 10 der obengenannten Arbeit von GENKIN und SCHILLÈS.

ein Motorzähler bei stoßweiser Belastung zu viel zeigt¹. 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 bemerkbar ist². Bei Pendelzählern kann nur dann, wenn die Belastungsstöße in Resonanz mit den Pendelschwingungen sind, eine sehr wesentliche Beeinflussung der Angaben eintreten³.

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 zwischen Unterbrechung und Einschaltung wählt man meist 1 Sekunde. Um ein allmähliches Anwachsen des Stromes zu erhalten, kann man bei der Prüfung von Gleichstromzählern einen

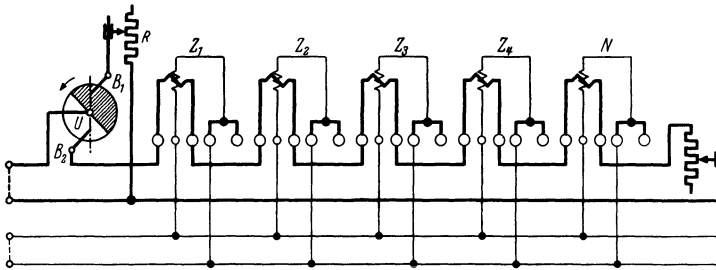


Abb. 135. Schaltung für stoßweise Belastung mit Normalzähler.

variablen elektrolytischen Widerstand² verwenden; für die Prüfung von Wechselstromzählern benutzt man die im folgenden beschriebenen Anordnungen.

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 unbeeinflussten Zählers. Bei Gleichstrom nimmt man dazu zweckmäßig einen Elektrolytzähler oder ein Voltmeter², bei Wechselstrom einen Pendelzähler, dessen Eigenschwingung nicht in Resonanz mit der Periode der Unterbrechungen ist⁴. Die Schaltung macht man nach Abb. 135. 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.

¹ Vgl. SCHMIEDEL: Elektrotechn. u. Masch.-Bau 1911 S. 555. — ROBERTSON: The Institution of Electrical Engineers, Sept. 1, 1911.

² Vgl. ORLICH u. G. SCHULZE: Elektrotechn. u. Masch.-Bau 1909 S. 801.

³ Vgl. ROBERTSON: l. c. ⁴ Vgl. SCHMIEDEL: l. c.

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 Abb. 136 mit Vorteil zu verwenden¹. Die Zähler Z_1 und Z_2 werden durch den Umschalter U stoßweise belastet,

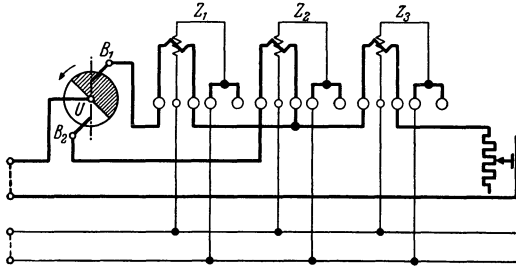


Abb. 136. Schaltung für stoßweise Belastung mit Auswechseln der Zähler.

der Zähler Z_3 dagegen gleichmäßig. Hat man die drei Zähler vorher für den Strom, mit dem man stoßweise belasten will, auf genau gleiche Angaben eingestellt, so müßte die 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

$$F = \frac{(A'_1 + A'_2) - (A_1 + A_2)}{A_1 + A_2} = \frac{A'_1 + A'_2 - A_3}{A_3} = \frac{A'_1 + A'_2}{A_3} - 1.$$

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 ein², 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

$$F_2 = \frac{2A'_2}{A_2} - 1 \quad \text{und} \quad F_3 = \frac{2A'_3}{A_3} - 1.$$

¹ MÖLLINGER u. v. KRUKOWSKI: ETZ 1917 S. 332.

² Man kann auch die Angaben auf den Sollwert korrigieren, wenn man von der genau gleichen Einstellung absehen will.

7. Kurvenform.

Bei Wechselstromzählern kann die Kurvenform auf die Angaben einwirken, weil die Spannungsspule nicht wie eine reine Induktivität wirkt¹. 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, daß nur in ganz besonderen Fällen die Kurvenform die Angaben beeinflußt².

8. 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 Wechselstrom-Induktionszählern ist die Beeinflussung am geringsten, weil der Luftspalt des Bremsmagnets sehr klein ist, dagegen können sie gegebenenfalls von großen Wechselstromfeldern, z. B. einem offenen Elektromagnet, beeinflußt werden.

Von den Magnetmotorzählern sind diejenigen der Flachankertype 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 $\pm 2\%$, die der Trommelankerzähler um etwa $\pm 6\%$ beeinflussen.

Sehr stark beeinflussen lassen sich die Gleichstrom-Wattstundenzähler, zumal wenn sie Eisen im beweglichen System haben. Je kleiner das Feld der Hauptstromspulen ist, desto empfindlicher sind sie.

b) Unabsichtliche Einwirkung stromführender Leitungen. Wechselstrom-Induktionszähler werden durch äußere Wechselfelder stromdurch-

¹ Vgl. ROGOWSKI u. VIEWEG: Z. Instrumentenkde. 1913 S. 122. — HURBIN, M.: Schweiz. Bull. 1929 Nr. 19 S. 669. — BETZ, W.: ETZ 1934 S. 1223.

² ROSA, LLOYD u. REID: Bull. Bur. Stand., Wash. Bd. 1 Nr. 3 S. 421; Referat ETZ 1906 S. 635. — RATCLIFF u. MOORE: J. Instn. electr. Engrs. 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.

flossener Leiter wenig beeinflußt, weil ihr Eisenkreis bis auf den kleinen Luftspalt für die Triebsscheibe geschlossen ist und ihr Gehäuse meist aus Eisen besteht.

Gleichstrom-Magnetmotorzähler sind ebenso fast störungsfrei in dieser Hinsicht.

Elektrodynamische Wattstundenzähler dagegen werden von äußeren Feldern stark beeinflußt, wenn sie nicht mit astatisch geschaltetem Doppelanker gebaut sind. 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 elektrodynamischen 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 $1/10$ des Nennstromes bei marktgängigen Ausführungen). Bei der Installation solcher Zähler muß man diesem Umstande Rechnung tragen.

Das Maß der Beeinflussbarkeit eines elektrodynamischen Zählers durch äußere Felder drückt man zweckmäßig durch die „Beeinflussungskonstante“¹ aus. Sie ist definiert durch die Gleichung

$$\Delta F = \frac{c \cdot N_A \cdot I_A}{a \cdot N \cdot I}$$

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; $N \cdot I$ sind die Amperewindungen der Hauptstromspulen, bei denen ΔF gemessen wird, I_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 I , den beeinflussenden Strom I_A , seine Entfernung a vom Zähler und die Fehler F_1 und F_2 für zwei Stromrichtungen von I_A . Die Windungszahl N der Hauptstromwicklung muß bekannt sein. Es ist dann die Beeinflussungskonstante

$$c = \Delta F \cdot a \cdot \frac{N \cdot I}{N_A \cdot I_A}$$

Bei marktgängigen Ausführungen von elektrodynamischen Gleichstrom-Wattstundenzählern liegt die Beeinflussungskonstante zwischen 1 und 4.

Es sei noch auf eine Anordnung zur Feststellung des Verhaltens des Zählers gegenüber äußeren Feldern hingewiesen, die in den englischen

¹ Vgl. SCHMIEDEL: Elektrotechn. u. Masch.-Bau 1911 S. 955 — Wirkungsweise und Entwurf, S. 114.

Vorschriften¹ enthalten ist. Der Zähler wird im Zentrum einer Spule von 1 m Durchmesser, die 100 AW führt, aufgehängt; die Fläche der Spule muß vertikal sein und rechtwinklig zur Fläche der Zählergrundplatte stehen. Bei der Prüfung von Gleichstromzählern wird die Spule von Gleichstrom durchflossen, bei Wechselstromzählern von einem Wechselstrom, der einmal gleichphasig mit dem Zählerstrom und bei einer zweiten Messung um 60° gegen ihn verschoben ist. Die Änderung der Angaben zwischen Nennlast und 25% der Nennlast bei $\cos \varphi = 1$ soll bei Einwirkung des Fremdfeldes nicht mehr betragen als 1,5%. Diese Bedingung ist allerdings reichlich scharf und wird wohl kaum von einem der auf dem Markt befindlichen Zähler eingehalten.

9. Temperatur.

Zur Messung der Raumtemperatur außerhalb des Zählers genügt ein gewöhnliches Quecksilberthermometer. Will man das Verhalten des Zählers bei höheren und niederen Raumtemperaturen kennen, so verwendet man Heiz- oder Kühlschränke bekannter Bauart, in deren Innerem man den Zähler anschließt. An verschiedenen Stellen hängt man Quecksilberthermometer auf, um festzustellen, ob die Temperaturverteilung gleichmäßig ist.

Im Innern des Zählers kann man nur Thermometer kleiner Abmessungen anbringen, mit denen die Temperatur des ganzen Zählers gemessen wird. Da man sie selten von außen ablesen kann, nimmt man besser kleine Fieberthermometer, die den Höchstwert der Temperatur festhalten. Will man an ganz bestimmten Stellen des Zählers die Temperatur feststellen, so verwendet man am besten ein Thermoelement² 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 1 m 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

¹ British Standard Specification for Electricity Meters, Sept. 1937, clause 40 und appendix F.

² KEINATH, G.: Thermolemente. Arch. techn. Messen 1933 J 241—1.

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 Erwärmung¹ (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 sind²

Kupfer	0,0043
Aluminium	0,0047
Nickel	$\sim 0,0067$
Eisen	$\sim 0,0066$
Konstantan	$-0,00003$ bis $+0,00005$
Manganin	$\sim 0,00002$

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.

¹ REW § 18. — ETZ 1939 S. 1285.

² Vgl. z. B. KOHLRAUSCH: Praktische Physik. 17. Aufl. S. 917, 1938. — Die Werte gelten für reine Metalle.

10. Kurzschlußsicherheit.

a) Thermische Kurzschlußsicherheit.

Für die thermische Belastbarkeit eines Zählers ist der Kupferquerschnitt der Hauptstromwicklung maßgebend. Die REZ 1932 setzen für Zähler bis 30 A nur eine Überlastung um 100 % während 2 Minuten und um 50 % während 2 Stunden fest. Die meisten Zähler halten aber eine weit höhere thermische Belastung aus. Es wird sich empfehlen, für Zähler ähnlich wie für Wandler als Maß für die thermische Kurzschlußfestigkeit den Strom festzusetzen, den die Hauptstromwicklung 1 Sekunde lang, ohne Schaden zu nehmen, aushalten kann, d. h. bei der die Wicklung eine Endtemperatur von 200° C nicht überschreitet. Diesen „Sekundenstrom“ stellt man mit einem Strommesser und einer Ersatzimpedanz ein und schaltet dann an Stelle dieser die Hauptstromwicklung durch einen Spezialschalter¹ 1 Sekunde lang ein. Die Erwärmung der Wicklung mißt man unmittelbar nach dem Versuch mit Gleichstrom aus der Widerstandszunahme oder mit Thermoelementen (s. oben).

b) Dynamische Kurzschlußsicherheit.

Der Zähler soll auch starke dynamische Beanspruchungen bei hohen Kurzschlußströmen aushalten, ohne daß sich seine Angaben wesentlich ändern. Es ist vorgeschlagen worden, auf den Zähler 6 Kurzschlüsse über eine Silbersicherung von der doppelten Nennstromstärke des Zählers zu machen. Dabei soll der Stromkreis so bemessen sein, daß

bei 5 A Nennstrom des Zählers ein Kurzschlußstrom von 450 A,
 „ 10 A „ „ „ „ „ „ „ 650 A

entsteht. Die bleibende Änderung der Angaben des Zählers soll nach diesen 6 Kurzschlüssen nicht größer sein als 1,5 %. Für größere Nennstromstärken sind keine Vorschläge gemacht worden.

Eine Versuchsanordnung zur Einstellung des Kurzschlußstromes mit Gleichstrom ist in Abb. 137 schematisch gezeichnet. *S* ist die Silbersicherung von doppelter Nennstromstärke des Zählers,

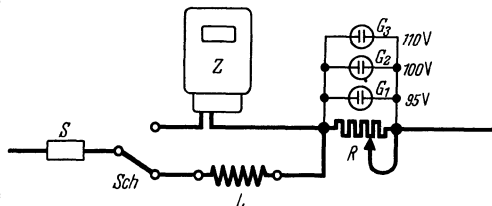


Abb. 137. Versuchsanordnung zur Einstellung des Stoßkurzschlußstromes.

Z der Zähler, *L* die Ersatzimpedanz für den Zähler, *R* ein bekannter Widerstand, *G*₁, *G*₂ und *G*₃ Glimmlampen verschiedener Ansprechspannung, die man aus einer größeren Stückzahl passend aussuchen muß. Für den Kurzschlußstrom, z. B. 450 A, ist *R* so groß zu wählen, daß

¹ RICHTER, H.: Kurzzeitmesser zur Relaisprüfung. Arch. techn. Messen 1937 J 154—8.

die mittlere Glimmlampe G_2 gerade anspricht. Man regelt nun durch Vornahme mehrerer Kurzschlüsse über die Ersatzimpedanz L den Strom so ein, daß die Glimmlampen G_1 und G_3 nicht mehr ansprechen, sondern nur G_2 . Dann schaltet man den Schalter Sch auf den Zählerstromkreis um und macht nun 6 Kurzschlüsse hintereinander. An dem Aufleuchten der Glimmlampen kann man dabei erkennen, ob die Einstellung richtig geblieben ist.

Man kann die Versuche natürlich auch mit Wechselstrom machen, wenn ein Synchronschalter vorhanden ist, mit dem man den Wechselstrom z. B. bei seinem Scheitelwert einschaltet.

Bei diesen Versuchen muß mit großer Vorsicht vorgegangen werden, weil hohe Spannungen auftreten können. Der Schalter Sch muß sehr stark dimensioniert und ein Trockenschalter sein.

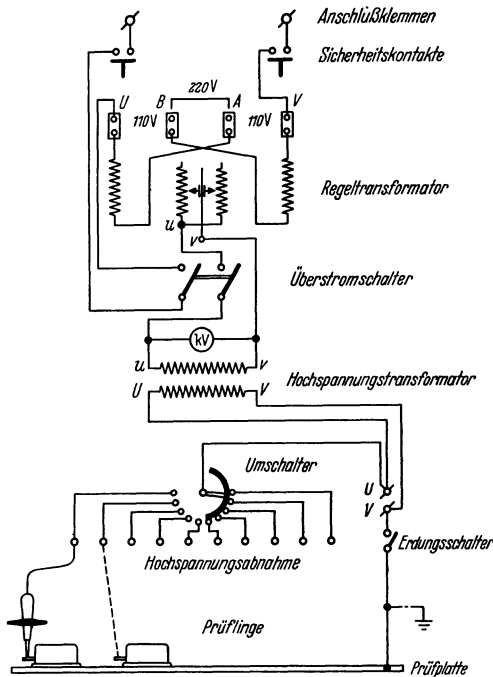


Abb. 138. Schaltung einer Isolations-Prüfeinrichtung.

11. Isolation.

a) Durchschlagprüfung.

Die REZ schreiben vor¹, daß die Isolation zwischen den spannungsführenden Teilen so zu bemessen ist, daß eine Wechselspannung der Frequenz 50 Hz bei Wechsel- und Drehstromzählern von 2000 V, bei Gleichstromzählern von 1000 V Effektivwert 1 Minute lang ausgehalten wird. Die Spannung soll sinus-

förmigen Verlauf haben und allmählich gesteigert werden. Die Stromquelle soll eine Leistung von mindestens 500 VA haben. Die zu Prüfungszwecken gebauten Einrichtungen bestehen aus einem kleinen Hochspannungstransformator, den notwendigen Regel- und Meßgeräten und zwei Metallspitzen mit isolierten Handgriffen, mit denen die Spannung an die auf Durchschlagspannung zu messenden Teile des Prüflings angelegt wird. Die Schaltung einer solchen Einrichtung zeigt Abb. 138. Der darin gezeichnete Umschalter muß ein Spezialschalter für Hochspannung sein; meist wird man ihn wegfällen lassen. Es muß ab und zu festgestellt werden, ob die Sinusform der Prüfspannung noch besteht.

¹ REZ (1932) § 17.

b) Stoßspannungsprüfung¹. Nicht nur in Hochspannungs-, sondern auch in Niederspannungsnetzen treten gelegentlich Stoßspannungen auf, die durch atmosphärische Entladungen oder beabsichtigte oder unbeabsichtigte Schaltvorgänge entstehen können. Um diese Stoßspannungen für Prüfzwecke nachzubilden, muß man einen Spannungsstoß erzeugen, d. h. eine Spannungswelle, die sehr rasch bis zum Scheitelwert ansteigt und dann etwas langsamer wieder abfällt. Die Polarität kann positiv oder negativ gegen Erde sein. In Abb. 139 sind die Werte für die Normalwelle nach VDE eingezeichnet. Zur Prüfung von Zählern genügt die Erzeugung eines Spannungsstoßes bis etwa 20 kV Scheitelspannung. Dafür ist ein einfacher Entladekreis nach Abb. 140 geeignet. An die Klemmen *a*, *b* ist eine Gleichspannungsquelle, z. B. eine Influenzmaschine oder eine über Gleichrichter gleichgerichtete Wechselspannungsquelle angeschlossen. *C_S* ist der Stoßkondensator, *SF* die Schaltfunkenstrecke, *P* der Prüfling, *MF* die Meßfunkenstrecke, *R_e* ein Entladewiderstand, *R_d* ein Dämpfungswiderstand. Als Größen der Kondensatoren und Widerstände für einen Entladekreis, wie er praktisch zur Prüfung von Zählern brauchbar ist, ergeben sich z. B. folgende: Bei Verwendung eines Kondensators *C_S* = 0,01 µF wird für die Normalwelle (bestimmend für die Halbwertdauer) *R_e* = 7200 Ω, *R_d* = *T_s*/2*C_p*, wobei *T_s* = 0,5 µs für die Stirndauer der Normalwelle, *C_p* die zu bestimmende Kapazität des Prüflings *P* ist. Die Größenordnung der Kapazität der Zählerpulen *C_p* ist etwa 10 bis 100 · 10⁻⁶ µF.

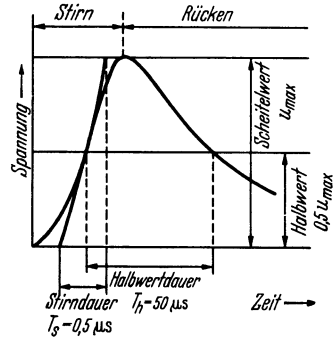


Abb. 139. Normal-Stoßspannungswelle.

Bei der Messung geht man folgendermaßen vor: Der Scheitelwert der Stoßspannung wird, von kleinen Werten ausgehend, allmählich durch Steigerung der Spannung der Gleichspannungsquelle und Vergrößerung der Schaltfunkenstrecke *SF* so weit erhöht, bis etwa die Hälfte der erzeugten Spannungsstöße am Prüfling zu Überschlägen führt. Die Meßfunkenstrecke wird bei diesem Zustand so weit verkleinert, bis etwa die Hälfte der Überschläge an der Meßfunkenstrecke eintreten.

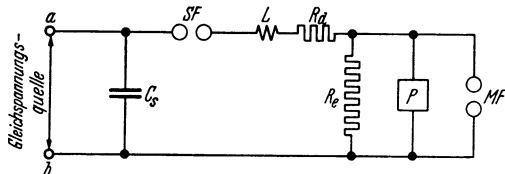


Abb. 140. Schaltung einer Stoßspannungs-Prüfeinrichtung.

¹ Vgl. S. FRANCK: Meßentladungsstrecken (Ionenstrecken). Berlin: Julius Springer 1931. — Leitsätze für die Prüfung mit Spannungsstößen. VDE 0450/1933. Neueste Fassung ETZ 1939 S. 874.

Der dann an der Meßfunkenstrecke abgelesene Wert ist der Scheitelwert der Stoßspannung¹.

Die an Zählern gemessenen Werte der Stoßspannung, bei denen ein Überschlag erfolgt, liegen zwischen 4 und 10 kV. Je nach dem Aufbau des Zählers und je nach der Form der Spannungswelle ist das Verhältnis der Stoßspannung zum Scheitelwert der Überschlagspannung bei Wechselstrom von einer Frequenz 50 (Stoßfaktor) etwa 1,5 bis 3.

12. Eigenverbrauch der Wicklungen.

a) **Gleichstrom.** Bei Gleichstrom kommt nur der Kupferverlust der Wicklungen in Betracht, man kann also aus Strom- und Spannungsmessungen den Eigenverbrauch bestimmen. Man benutzt dabei für

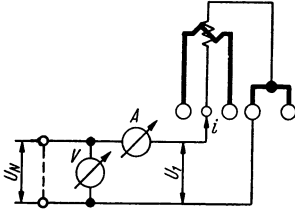


Abb. 141. Eigenverbrauchsmessung für den Spannungskreis bei Gleichstrom.

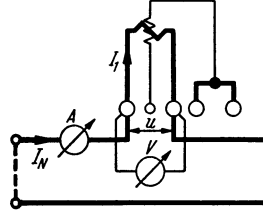


Abb. 142. Eigenverbrauchsmessung für den Hauptstromkreis bei Gleichstrom.

die Messung des Eigenverbrauchs im Spannungskreis die Schaltung nach Abb. 141. Der Eigenverbrauch ist dann

$$N = i \cdot U_1 = i(U_N - i \cdot R_A).$$

Dabei ist i der am Strommesser A abgelesene Strom, U_N die am Spannungsmesser V abgelesene Spannung, für die man den Eigenverbrauch kennen will, R_A der Widerstand des Strommessers A . Der Spannungsabfall $i \cdot R_A$ am Strommesser ist meist so klein, daß man U_N und U_1 gleichsetzen kann.

Für die Messung im Hauptstromkreis ist die Schaltung nach Abb. 142 geeigneter. Man stellt mit dem Strommesser A den Nennstrom I_n ein, bei dem man messen will, und liest die Spannung u am Spannungsmesser V ab. Der Eigenverbrauch ist

$$N = I_1 \cdot u = \left(I_N - \frac{u}{R_V} \right) \cdot u = I_N \cdot u - \frac{u^2}{R_V}.$$

Ist der Widerstand R_V des Spannungsmessers groß, so kann man das Korrektionsglied vernachlässigen. Bei Zählern für kleine Stromstärken kann es vorkommen, daß man es berücksichtigen muß.

b) **Wechselstrom.** Elektrodynamischer Leistungsmesser. Abb. 143 zeigt die Schaltung zur Messung des Eigenverbrauchs im

¹ Stoßspannungswerte für Meßfunkenstrecken s. ETZ 1938 S. 1067 Tafel I bis III.

Spannungskreis von Wechselstromzählern unter Verwendung eines elektrodynamischen Leistungsmessers. Der Eigenverbrauch in der Spannungsspule des Zählers ist $N_1 = N_N - i^2 \cdot R_W$. N_1 ist der Eigenverbrauch bei der Spannung U_1 , N_N bei der Nennspannung U_N . Meist ist $N_1 = N_N$ zu setzen, weil man das Korrektionsglied vernachlässigen kann.

Will man es berücksichtigen, so muß man noch den Ohmschen Widerstand R_W der Hauptstromspule des Leistungsmessers kennen und den Strom i in der Spannungsspule des Zählers messen. Hat man zu diesem Zweck einen Strommesser A mit der Stromspule des Leistungsmessers hintereinander geschaltet, so muß man zu R_W noch den Widerstand R_A des Strommessers hinzuzählen. Ist der Spannungsabfall in den Stromspulen des Leistungs- und Strommessers so groß,

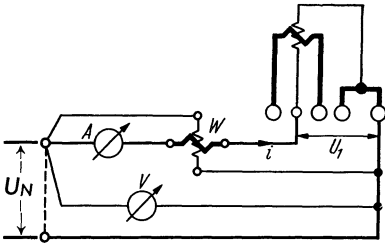


Abb. 143. Eigenverbrauchsmessung für den Spannungskreis bei Wechselstrom.

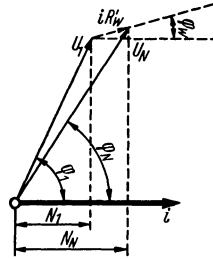


Abb. 144. Diagramm zur Schaltung nach Abb. 143.

daß U_1 sehr viel kleiner wird als U_N , so muß man U_1 berechnen. Die Messung des Eigenverbrauchs nimmt man dann bei verschiedenen Spannungen U_N vor und trägt den korrigierten Eigenverbrauch als Funktion von U_1 auf. Aus dieser Kurve kann man den korrigierten Eigenverbrauch für die Spannung U_N (durch Interpolation) ablesen. U_1 berechnet sich nach Diagramm Abb. 144 zu

$$U_1 = \sqrt{U_N^2 + (i \cdot R'_W)^2 - 2U_N \cdot i \cdot R'_W \cdot \cos(\varphi_N - \varphi_W)}.$$

Darin sind U_N und i die nach der Schaltung Abb. 143 gemessenen Größen. R'_W ist der Scheinwiderstand des Leistungs- (und Strom-) Messers; zu seiner Berechnung muß man den Wirkwiderstand R_W und den Blindwiderstand L_W des Leistungs- (und Strom-) Messers kennen¹. Die Frequenz f des zur Messung benutzten Wechselstromes wird man immer feststellen müssen. Dann berechnet sich der Scheinwiderstand

$$R'_W = \sqrt{R_W^2 + (2\pi f L_W)^2}.$$

Der Winkel φ_N ist gegeben durch

$$\cos \varphi_N = \frac{N_N}{U_N \cdot i},$$

¹ Nach den „Regeln für Meßgeräte“ sollen diese Werte auf Präzisionsmeßgeräten angegeben sein.

der Winkel φ_w durch

$$\operatorname{tg} \varphi_w = \frac{2\pi f \cdot L_w}{R_w}.$$

Den Eigenverbrauch im Hauptstromkreis kann man mit einem Leistungsmesser nicht bestimmen, weil der Spannungsabfall am Hauptstromkreis immer so klein ist (etwa 1 V und weniger), daß die Spannungsspule des Leistungsmessers nicht genügend Strom führen würde, um einen ablesbaren Ausschlag zu erzeugen. Höchstens mit einem hochempfindlichen Spiegeldynamometer wird man eine brauchbare Messung ausführen können. Man muß also zu einer der im folgenden beschriebenen Anordnungen seine Zuflucht nehmen.

Will man nicht den Eigenverbrauch des Hauptstromkreises, sondern nur den Spannungsabfall am Hauptstromkreis kennen, so verwendet man ein hochempfindliches Hitzdraht- oder Thermoumformer- oder Gleichrichtermeßgerät, das als Spannungsmesser geprüft ist. Hat man einen Wechselstromkompensationsapparat zur Verfügung, so arbeitet es sich mit diesem natürlich weit angenehmer.

Elektrometer. Sehr genau kann man mit dem Elektrometer den Eigenverbrauch messen. Das Elektrometer von HUGO SCHULTZE¹ hat sehr wenig Eingang in die Laboratorien gefunden, 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 interessiert, sei auf die Arbeit von ORLICH² verwiesen.

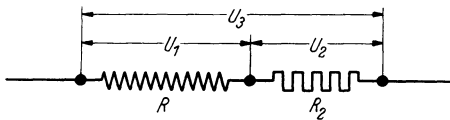


Abb. 145. Dreivoltmetermethode.

essiert, sei auf die Arbeit von ORLICH² verwiesen.

Dreivoltmetermethode. Die Dreivoltmetermethode Abbildung 145 eignet sich zur Messung des Eigenverbrauchs

der Spannungsspule. Man schaltet mit dem induktiven Widerstand R der Spannungsspule einen induktionslosen Widerstand R_2 in Serie und mißt mit einem statischen Spannungsmesser die Spannungen U_1 an dem unbekanntem induktiven Widerstand R , U_2 an dem bekannten induktionslosen Widerstand R_2 und U_3 an den Enden beider hintereinandergeschalteter Widerstände (Summenspannung). Dann ist die im unbekanntem induktiven Widerstand verbrauchte Leistung

$$N = \frac{1}{2R_2} (U_3^2 - U_1^2 - U_2^2).$$

Der Leistungsfaktor wird

$$\cos \varphi = \frac{U_3^2 - U_1^2 - U_2^2}{2 U_1 \cdot U_2}.$$

¹ Z. Instrumentenkde. 1907 S. 65.

² ETZ 1909 S. 435, 466. Besonders in Betracht kommen die Abb. 9, 10 u. 11 S. 438.

Will man genaue Resultate erhalten, so muß man sehr genau messen, weil man die Leistung aus Differenzenbildung ermittelt.

Verwendet man an Stelle des statischen Spannungsmessers drei dynamometrische Spannungsmesser oder einen an einen Voltmeterersatzschalter angeschlossenen, so muß man den Verlust im Voltmeter noch von der nach der obigen Gleichung berechneten Leistung abziehen¹.

Mit dem Wechselstromkompensator mißt man am besten in der Schaltung Abb. 146. Zur Spannungsspule parallel legt man einen sehr hohen induktionsfreien Widerstand R_1 (etwa 100000 Ω oder mehr) und zweigt von einem kleinen Teil R'_1 die zu messende Spannung U'_1 ab. Den Vorschaltwiderstand R_2 wird man sehr klein wählen, so daß der Spannungsabfall U_2 etwa gleich U'_1 wird, beide sollen in der Nähe von 0,5 V liegen. U'_3 wird dann von der gleichen Größenordnung sein. U_3 kann man mit einem elektrodynamischen Spannungsmesser einstellen, es wird sich nur um einen verschwindend kleinen Betrag von U_1 unterscheiden. Man mißt nacheinander U'_1 , U_2 und U'_3 . Der Verbrauch in der Spannungsspule des Zählers berechnet sich zu

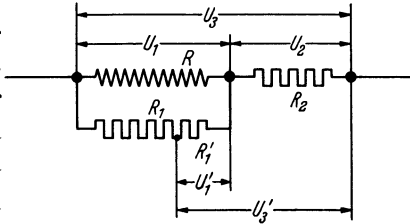


Abb. 146. Dreivoltmetermethode; Anordnung für die Messung mit dem Wechselstromkompensator.

$$N = \frac{R_1}{R'_1} \cdot \frac{1}{2R_2} (U_3'^2 - U_1'^2 - U_2^2) - \left(\frac{U_1'}{R'_1}\right)^2 \cdot R_1.$$

Das Korrektionsglied, das den Verlust im Spannungsteiler R_1 darstellt, kann man sehr klein machen, wenn man nur den Widerstand R_1 groß genug wählt. Somit erhält man ziemlich genaue Werte für den Eigenverbrauch.

Den Leistungsfaktor kann man mit genügender Genauigkeit aus folgender Gleichung berechnen:

$$\cos \varphi = \frac{R'_1 (U_3'^2 - U_1'^2 - U_2^2) - 2 U_1'^2 \cdot R_2}{2 \cdot U_1' \cdot U_2 \cdot R'_1}.$$

Der Strom in der Spannungsspule ist $i = U_2/R_2$.

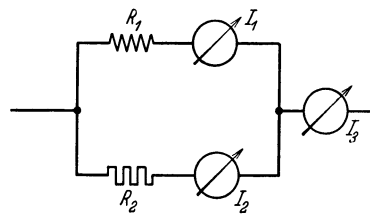


Abb. 147. Dreiamperemetermethode.

Dreiamperemetermethode. Den Eigenverbrauch im Hauptstromkreis kann man mit der Dreiamperemetermethode messen. In Abb. 147 ist R_1 der Widerstand der Hauptstromspulen, R_2 ein induktionsfreier Widerstand; mit drei Strommessern mißt man die Ströme I_1 , I_2 und den Summenstrom I_3 . Die Leistung im Widerstand R_1 ist

$$N = \frac{R_2}{2} \cdot (I_3^2 - I_1^2 - I_2^2).$$

¹ WICHT, H. H.: ETZ 1938 S. 561.

Der Leistungsfaktor ist

$$\cos \varphi = \frac{I_3^2 - I_1^2 - I_2^2}{2 \cdot I_1 \cdot I_2},$$

der Spannungsabfall an der Hauptstromspule $U = I_2 \cdot R_2$.

Brückenmethoden. Abb. 148 zeigt eine von SCHERING¹ angegebene Brückenschaltung zur Messung des *Eigenverbrauchs im Spannungskreis* von Wechselstromzählern. Z ist die zu messende Spannungsspule des Zählers, R ein fester induktionsfreier Widerstand, M eine feste gegenseitige Induktivität, r und ϱ kleine regelbare Widerstände, am besten Gleitdrähte, durch deren Verstellung der Ausschlag des Vibrationsgalvanometers VG auf Null gebracht wird. Durch Verstellen des Widerstandes ϱ wird die Amplitude der an ϱ liegenden Spannung, durch r vorwiegend die Phase der gegengeschalteten

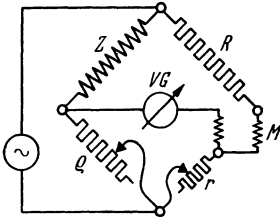


Abb. 148. Eigenverbrauchs-messung im Spannungskreis nach der Brückenmethode.

Spannung geregelt. Der Eigenverbrauch in der Spannungsspule berechnet sich dann zu

$$N = \frac{U_N^2 \cdot r}{R \cdot \varrho},$$

wenn U_N die Spannung an der Brücke ist und der Spannungsabfall in ϱ so klein ist, daß er vernachlässigt werden kann. Der Leistungsfaktor ist

$$\cos \varphi = \frac{r}{\omega M} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{r}{\omega M}\right)^2}} = \frac{r}{\omega M} \cdot k.$$

Den Faktor k zeichnet man sich als Funktion von $r/\omega M$ auf. Als zweckmäßige Größen gibt SCHERING an: $R = 20000 \Omega$, $r = 7$ bis 13Ω , $\varrho = 20$ bis 70Ω , $M = 1/4\pi = 0,08$ H. Um den Einfluß äußerer Streufelder zu vermeiden, sind die Wicklungen für die Gegeninduktivität auf zwei gleiche Rollen verteilt, deren Felder entgegengesetzt gerichtet sind (astatische Anordnung). Die Summe der Induktivitäten der Primärwicklungen wird klein gehalten, z. B. $0,04$ H.

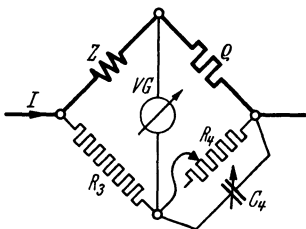


Abb. 149. Eigenverbrauchs-messung im Hauptstromkreis nach der Brückenmethode.

Zur Messung des *Eigenverbrauchs im Hauptstromkreis* dient die Schaltung nach Abb. 149. Z ist die Hauptstromspule des Zählers, ϱ ein induktionsfreier Meßwiderstand (Normalwiderstand) von passendem Wert, R_3 und R_4 sind hohe induktionsfreie Widerstände, C_4 ist eine Kapazität von etwa $1 \mu F$.

Man nimmt dazu am besten einen Dreidekaden-Kurbelkondensator und für R_4 einen Kurbelwiderstand. Durch Veränderung von R_4 und C_4 kann man das Vibrationsgalvanometer G auf Null bringen. Hat man

¹ Z. Instrumentenkd. 1922 S. 106.

nur einen unveränderlichen Kondensator, so muß man R_3 und R_4 veränderlich machen. Der Eigenverbrauch in der Hauptstromspule ergibt sich zu

$$N = I^2 \cdot \varrho \cdot \frac{R_3}{R_4}$$

und der Leistungsfaktor

$$\cos \varphi = \frac{1}{R_4 \cdot \omega C_4} \cdot k,$$

dabei ist

$$k = \frac{1}{\sqrt{1 + (R_4 \omega C_4)^2}}.$$

Für höhere Stromstärken als 10 A empfiehlt SCHERING die Verwendung eines Stromwandlers, wofür er ebenfalls die Gleichungen für den Eigenverbrauch und den Leistungsfaktor angibt.

13. Kurzschlußwindungen.

Durch ungewollte Kurzschlußwindungen in der Wicklung der Spannungsspule wird der Eigenverbrauch, das Drehmoment und die Phasenabgleichung verändert. Einige Vorrichtungen, welche wenige dünne Kurzschlußwindungen nachzuweisen gestatten, sollen im folgenden beschrieben werden.

a) **Kurzschlußprüfer nach A. TÄUBER-GRETLER**¹. Abb. 150. Die Sekundärwicklung T_2 eines primär mit 50 Hz erregten Transformators ist mit zwei gleichen eisengeschlossenen Drosselspulen D_1 und D_2 zu einer Brückenschaltung verbunden. Zwischen dem Mittelpunkt der Transformatorwicklung T_2 und dem Mittelpunkt der Drosseln liegt die bewegliche Spule S_2 eines elektrodynamischen Meßgeräts. Die feste Spule S_1 ist eisengeschlossen, sie wird über einen Vorschaltwiderstand R an die Netzspannung angeschlossen. Auf die Drosselspule D_2 wird die zu prüfende Spule Sp aufgesteckt.

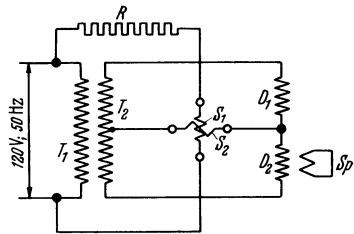


Abb. 150. Kurzschlußprüfer nach A. TÄUBER-GRETLER.

Der Ausschlag am Meßgerät ist dann in Teilstrichen $a = c \cdot n \cdot d^2/l$, wobei n die Windungszahl, l die Länge in m und d den Drahtdurchmesser in mm der Kurzschlußwindung bedeuten. Eine Kurzschlußwindung von 10 cm Länge bei 0,2 mm Drahtdurchmesser ergibt noch einen Ausschlag von 1,5 mm.

b) **Schlußhörer**². Abb. 151. Durch einen an eine kleine Gleichstromquelle angeschlossenen Summer S wird ein Wechselstrom von etwa

¹ TÄUBER-GRETLER, A.: Bull. schweiz. elektrotechn. Ver. Bd. 12 (1921) S. 217 — ETZ 1922 S. 438. Die Vorrichtung wird von der Firma Trüb, Täuber & Co. hergestellt.

² MEYER, GEORG J.: ETZ 1923 S. 830. Der Apparat wurde früher von der Dr. Paul Meyer A.-G. hergestellt.

400 bis 500 Hz erzeugt. Dieser durchfließt die auf einem Eisenkern verschiebbar angeordnete Erregerspule E . Auf dem Eisenkern sitzen in Gegenschaltung zwei gleiche Spulen A und B , die über ein Telefon T geschlossen sind. Ein Kondensator C dient zur Funkenunterdrückung am Summer und zur Reinigung des Tones, ein Taster K zum Anlassen des Summers durch Kurzschließen des Unterbrecherkontaktes.

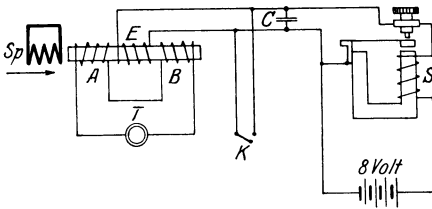


Abb. 151. Schlußhörer.

Man stellt die Erregerspule so ein, daß im Telefon kein Ton zu hören ist. Schiebt man nun über die eine der beiden Spulen (z. B. A) die zu prüfende Spule Sp , so spricht das Telefon an. Die Anzahl der kurzgeschlossenen Windungen kann man annähernd durch Normalspulen

mit bekannter kurzgeschlossener Windungszahl bestimmen. Entweder kompensiert man die Wirkung der zu prüfenden Spule durch die Normalspule, indem man sie auf die freie Spule B wirken läßt, oder man vergleicht die Tonstärke der Normalspule mit der zu prüfenden Spule. Bei richtiger Einstellung lassen sich 1 bis 2 Kurzschlußwindungen von je 7 cm Länge bei einem Drahtdurchmesser von nur 0,09 mm einwandfrei feststellen.

e) **Brücke mit Gleichrichtermeßgerät.** Unter Verwendung der neuen hochempfindlichen Gleichrichtermeßgeräte kann man auch mit einer einfachen Brückenschaltung nach Abb. 152 sehr wenige Kurzschlußwindungen

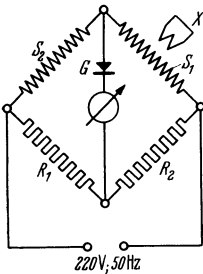


Abb. 152. Brücke mit Gleichrichtermeßgerät.

dünnen Drahtes nachweisen. S_1 und S_2 sind offene Drosseln mit U-förmigem Eisenkern; sie sind entsprechend Abb. 153 rechtwinklig zueinander angeordnet, damit sie sich möglichst wenig beeinflussen. R_1 und R_2 sind Widerstände, G ein Gleichrichtermeßgerät. Die Brücke wird mit 50periodigem Wechselstrom

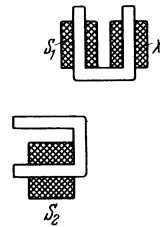


Abb. 153. Anordnung der Spulen S_1 und S_2 in der Brückenschaltung Abb. 152.

vom Netz aus gespeist. Die zu prüfende Spule X wird auf den freien Schenkel des U-förmigen Eisens der Spule S_1 aufgeschoben. Schon 10 Windungen von 30 mm Windungsdurchmesser eines Drahtes von 0,1 mm Kupferdurchmesser ergeben einen Ausschlag von 1 Teilstrich.

14. 90°-Verschiebung.

Sollen Wechselstrom-Induktionszähler auch bei Phasenverschiebungen im Netz 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, $\psi \pm \varphi = 90^\circ$ ¹.

a) Stillstandsmethode. Ist die genannte Bedingung erfüllt, so muß, wenn $\varphi = 90^\circ$ ist, die mit dem Leistungsmesser gemessene Leistung $N = U \cdot I \cdot \cos \varphi = 0$ 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, wenn die Spannung oder die Frequenz vom Nennwert abweicht, $\psi \pm \varphi$ meist nicht genau $= 90^\circ$, sondern weicht um einen kleinen Winkel δ von 90° ab: $\psi \pm \varphi = 90^\circ + \delta$. Stellt man also den Zähler auf Stillstand ein, so muß ψ Null sein, der Leistungsmesser zeigt dann, da $\pm \varphi = 90^\circ - \psi + \delta$:

$$N = U \cdot I \cdot \cos(90^\circ + \delta).$$

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

$$N = -U \cdot I \cdot \sin \delta$$

und

$$\delta \sim \sin \delta = -\frac{N}{U \cdot I}.$$

Den Bogen δ kann man, da er meist sehr klein ist, $\sin \delta$ gleichsetzen. Will man δ in Winkelgraden erhalten, so muß man schreiben

$$\delta = -\frac{N}{U \cdot I} \cdot \frac{180}{\pi} \text{ Winkelgrade.}$$

δ wird negativ, wenn N positiv ist. Dies tritt ein, wenn der Fluß des Spannungskreises Φ_U der Spannung U um weniger als 90° nacheilt.

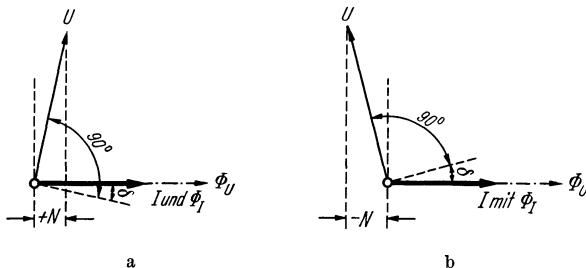


Abb. 154a u. b. Stillstandsmethode zur Bestimmung von δ .

In dem Diagramm Abb. 154a ist dieser Fall dargestellt. Es ist dabei der Einfachheit wegen angenommen, daß der Fluß Φ_I des Hauptstromkreises mit dem Hauptstrom I in Phase ist. Φ_U und Φ_I fallen zu-

¹ Das obere Vorzeichen gilt für induktive, das untere für kapazitive Last. Ausführliche Theorie der 90°-Verschiebung s. SCHMIEDEL: Wirkungsweise und Entwurf, S. 15ff.

sammen, $\psi = 0$, der Zähler steht still. Der Leistungsmesser zeigt dagegen nicht auf Null, sondern zeigt die kleine positive Leistung

$$N = U \cdot I \cdot \cos(90^\circ - \delta)$$

an. δ wird dagegen positiv, wenn der Fluß des Spannungskreises um mehr als 90° der Spannung nacheilt, wie in Abb. 154b dargestellt ist. Der Leistungsmesser zeigt dann die negative kleine Leistung

$$-N = U \cdot I \cdot \cos(90^\circ + \delta).$$

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 rückwärtsläuft 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 U und der Strom I müssen natürlich für beide Messungen genau gleichbleiben. Zur Erhöhung der Genauigkeit der Messung entfernt man den Bremsmagnet.

Ferner muß jede Unsymmetrie im Hauptstromkreis, durch die ein Leerlauf des Zählers bei unerregtem Spannungskreis 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) Winkelmessung mit Hilfsspule. Will man den wahren Winkel δ messen, so kann man sich auch der Messung mittels Hilfsspule bedienen.

¹ Vgl. Elektrotechn. u. Masch.-Bau 1912 Heft 7 S. 156. Schlußbemerkungen.

² SCHERING u. SCHMIDT: Z. Instrumentenkde. 1920 S. 138.

Man kann damit sowohl die Phasenverschiebung zwischen der Spannung U und dem motorisch wirksamen Fluß Φ_U , als auch die zwischen dem Hauptstrom I und dem motorisch wirksamen Fluß Φ_I bestimmen. Da eine solche Messung nur Interesse für wissenschaftliche Untersuchungen hat, soll sie hier nur erwähnt werden¹.

15. Felder.

a) **Gleichstrom.** Die Verteilung des Hauptstromfeldes kann man bei dynamometrischen Wattstundenzählern durch Rechnung finden, wenn man die darüber vorhandene Literatur benutzt². Man muß dazu allerdings die Abmessungen und die Windungszahlen der Hauptstromspulen kennen.

Experimentell kann man das Feld 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 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 Vorwiderstand an das Galvanometer an. Beim Ein- oder Ausschalten der Hauptstromspulen des Zählers entsteht dann an den Enden der Meßspule eine Spannung $e = \mathfrak{H} \cdot q \cdot n$, worin \mathfrak{H} 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

$$Q = \frac{\mathfrak{H} \cdot q \cdot n}{r} = C \cdot \alpha.$$

C ist die sog. „ballistische“ Galvanometerkonstante, die man durch Eichung mit einer Normalspule bestimmt hat³, α der „ballistische“ Ausschlag des Galvanometers. Es wird also die Feldstärke

$$\mathfrak{H} = \frac{C \cdot \alpha \cdot r}{q \cdot n}.$$

¹ Vgl. z. B. SCHMIEDEL: Wirkungsweise und Entwurf, S. 37. — MÖLLINGER: Wirkungsweise der Motorzähler, S. 186. — SCHERING u. SCHMIDT: Z. Instrumentenkunde 1923 S. 85.

² SCHMIEDEL: l. c. S. 141 ff.

³ Vgl. z. B. GÜMLICH: Leitfaden der magnetischen Messungen, S. 57 ff. Braunschweig: Vieweg 1918.

So kann man an jeder Stelle die Feldstärke bestimmen. Will man einen größeren Galvanometerausschlag erhalten, so kommutiert man den Hauptstrom von $+I$ auf $-I$.

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 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.

Man kann 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 Feldstärke¹.

In der Massenherstellung muß man eine große Anzahl von Magneten nach ihrer Stärke aussuchen und ordnen. Man benutzt dazu meist die Messung des Bremsmoments einer im Luftspalt des Magnets bewegten Aluminiumscheibe, so daß die Verhältnisse denen im Zähler selbst möglichst ähneln. Dieses Bremsmoment ist proportional dem Quadrat des Kraftflusses, wodurch die Messung genauer ausfällt, als wenn man nur den Kraftfluß in erster Potenz mißt. Zwei Vorrichtungen nach diesem Prinzip seien im folgenden beschrieben.

Magnetmotor und Bremscheibe. Durch einen kleinen Magnetmotor, z. B. einen kleinen Amperestundenzähler ohne Bremsung, treibt man eine Bremscheibe an, die der Zählerscheibe gleich ist, und läßt auf diese den zu messenden Bremsmagnet einwirken. Das Drehmoment des Motors ist dann gleich dem Bremsmoment: $D = c \cdot n \cdot \Phi^2$; dann ist Φ^2 umgekehrt proportional der Drehzahl. Die Drehzahl bestimmt man entweder mechanisch oder elektrisch durch Messung der Spannung an den Enden einer Hilfswicklung, die man auf den Ankerkern des Motors gewickelt hat.

Magnetmeßapparat mit Anwurf der Scheibe durch Feder. Abb. 155 zeigt das Innere eines praktisch viel verwendeten Magnetmeßapparates² nach Entfernung der Schutzhüllen. Eine Scheibe S von den gleichen Abmessungen wie die Zählerscheibe ist an einer vertikalen Achse befestigt, die oben einen über einer Skala spielenden Zeiger Z trägt.

¹ Apparate von Siemens & Halske, Hartmann & Braun.

² Der Apparat ist von der Firma H. Aron (jetzt Heliowattwerke) angegeben worden. Vgl. auch ETZ 1923 S. 352, wo ein ähnlicher Apparat beschrieben ist.

Dreht man den auf der Achse sitzenden Kordelknopf *K* links herum, so schnappt der auf der Achse befestigte Arm *A* hinter den Anschlag *B*. Zugleich wird mittels der Arme *C* und *D* die Feder *F* gespannt. Drückt man auf den Taster *T*, so wird die Scheibe freigegeben, die Feder *F* wirft sie an, bis der Hebel *D* an dem Haltepunkt *H* anschlägt. Dann setzt sich die Bewegung der Scheibe nur unter dem Einfluß des Bremsmagnets *M* bis zum Stillstand fort. Der gemessene Ausschlag ist annähernd proportional dem reziproken Wert des Quadrats des Bremsflusses. Man eicht den Apparat mit Normalmagneten, die man nach Umdrehungszahlen benennt, welche sie beim Einsetzen in einen Normalzähler machen.

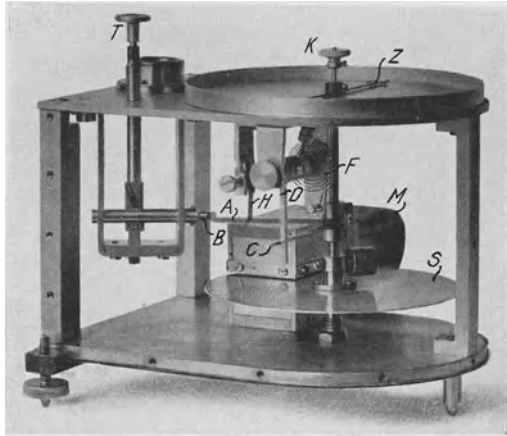


Abb. 155. Magnetmeßapparat mit Anwurf der Scheibe durch Feder.

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.

$$e = 4,44 \cdot f \cdot \mathfrak{B} \cdot q \cdot n \cdot 10^{-8} \text{ V.}$$

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, *f* die Frequenz des Wechselstromes. Daraus berechnet sich

$$\mathfrak{B} = \frac{e}{4,44 \cdot f \cdot q \cdot n} \cdot 10^8 \text{ Gauß.}$$

16. 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 Vor-

sichtsmaßregeln brauchbare Resultate erlangen kann. Den Verlauf der Strömung hat BÄUMLER¹ 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.

17. Bürsten-Übergangswiderstand bei Gleichstrom-Amperestundenzählern.

Bei Gleichstrom-Amperestundenzählern führt der Bürsten-Übergangswiderstand oft zu 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 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 Ankerwiderstandes 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.

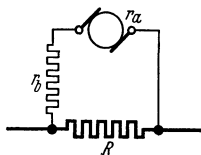


Abb. 156. Bürstenübergangswiderstand, Ersatzschaltung.

Das im folgenden beschriebene Verfahren ermöglicht es, die Messung nur an den Enden des von dem Nebenschlußwiderstand gelösten Ankerstromkreises vorzunehmen.

Der reine Ankerwiderstand r_a und der Bürsten-Übergangswiderstand r_b können wie zwei hintereinandergeschaltete Widerstände entsprechend dem Schema der Abb. 156 betrachtet werden. Nun bringt man den Anker in eine solche Stellung, daß die Bürsten, wie in Abb. 157 a für offene Schaltung 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 Abb. 157 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 Bürsten-Übergangswiderstand

$$r_b = 4r_2 - 3r_1.$$

Für geschlossene Schaltung eines dreiteiligen Ankers sind die Werte die gleichen, wie sich aus Abb. 158 a und b ergibt. Es wird dabei

¹ Vgl. v. KRUKOWSKI: l. c. S. 18.

$r_a = \frac{2}{3}r$ in der einen, $r_a = \frac{1}{2}r$ in der anderen Stellung; das Verhältnis der Widerstände ist wieder $\frac{3}{4}$.

Um die Größenordnung des Bürsten-Übergangswiderstandes zu verdeutlichen, sei im folgenden ein Zahlenbeispiel angeführt, das für einen

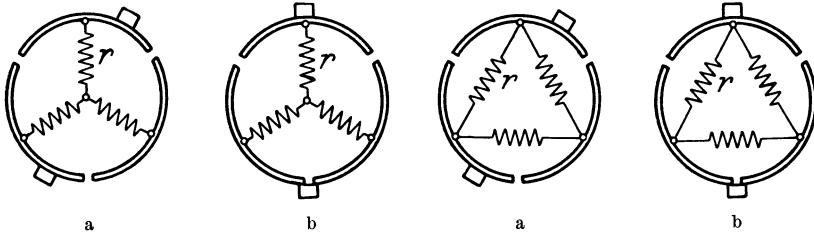


Abb. 157. Offene Ankerschaltung. a) Bürsten auf je einer Lamelle, b) eine Bürste auf zwei Lamellen.

Abb. 158. Geschlossene Ankerschaltung. a) Bürsten auf je einer Lamelle, b) eine Bürste auf zwei Lamellen.

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.

18. Gegenelektromotorische Kraft bei Gleichstromzählern.

Die Klemmenspannung an den Enden des Ankerkreises einschließlich des Vorschaltwiderstandes ist

$$U = i(r_a + r_v) + E,$$

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 Ampere-stundenzählern 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

$$U_1 = i(r_a + r_v).$$

Das andere Mal mißt man beim gleichen Strom die Klemmenspannung bei einer bestimmten Umdrehungszahl in der Sekunde und erhält

$$U_2 = i(r_a + r_v) + E.$$

Es ist also

$$E = U_2 - U_1.$$

Für einen Amperestundenzähler sind die gemessenen Werte in Abb. 159 zahlenmäßig aufgetragen.

Es sei bemerkt, daß man den Ankerwiderstand für die Stellung der Bürsten nehmen muß, wo jede Bürste nur eine Kollektorlamelle

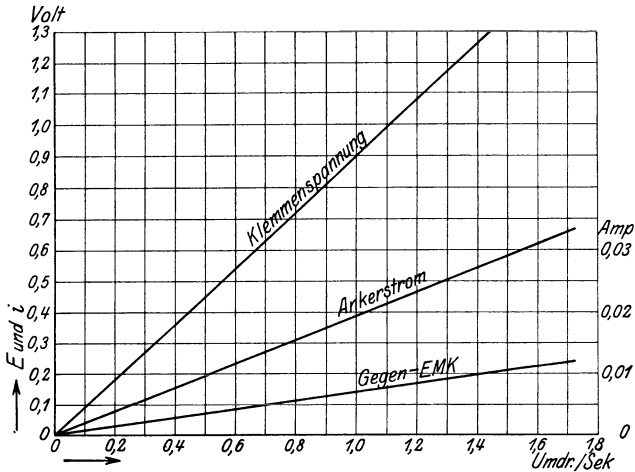


Abb. 159. Gegenelektromotorische Kraft, Klemmenspannung und Ankerstrom.

berührt. Denn bei der Bewegung des Ankers berühren die Bürsten nur kurzzeitig zwei Lamellen, so daß diese Stellung vernachlässigt werden kann.

19. 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

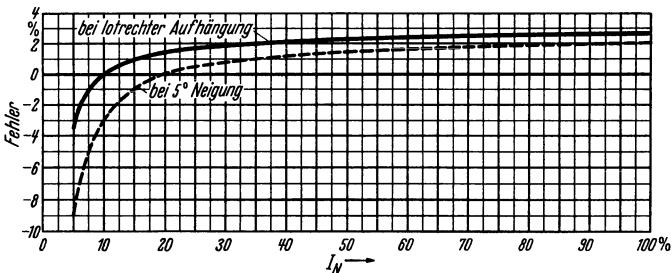


Abb. 160. Schiefe Aufhängung.

Reibung im Oberlager, das fast immer als Halslager ausgebildet wird, von dem wachsenden seitlichen Druck abhängig. Man bringt deshalb bei den Amperestundenzählern manchmal Pendellote an, um bei der Montage auf die Notwendigkeit richtiger Aufhängung hinzuweisen. In Abb. 160 ist der Einfluß einer um 5° schiefen Aufhängung auf die Angaben eines Amperestundenzählers gezeigt.

Anhang.

Prüfungen, die zur vollständigen Beurteilung eines Elektrizitätszählers erforderlich sind.

Zur vollständigen Beurteilung der Eigenschaften eines Wechselstromzählers sind folgende Prüfungen erforderlich:

1. a) Feststellung, ob die Angabe auf dem Zählerschild: 1 Kilowattstunde = a Umdrehungen, mit den wirklichen Verhältnissen übereinstimmt (Übersetzungsverhältnis des Zählwerks).
b) Messung der Isolation der Spulen gegen Gehäuse und gegeneinander (vgl. IX, 11).
2. Einstellung des Zählers nach besonderer Einstellvorschrift, 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 und IX, 4).
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 und IX, 4).
b) Feststellung, ob der Zähler bei abgeschaltetem Spannungskreis, aber eingeschaltetem Hauptstromkreis vor- oder rückwärts läuft.
5. Fehlermessungen (vgl. I, 3 und VI).
 - a) Fehler in Abhängigkeit vom Hauptstrom zwischen 5% und 150% des Nennstroms, bei überlastbaren Zählern auch für höhere Stromstärken. Die Nennwerte der Spannung und Frequenz sind dabei konstant zu halten, der Leistungsfaktor ist 1 und für eine zweite Meßreihe 0,5.
 - 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 Nennfrequenz konstant und Leistungsfaktor 1 konstant, der Hauptstrom gleich dem Nennstrom und bei einer zweiten Meßreihe 10% des Nennstroms ist.
 - d) Fehler bei 5% über und 5% unter der Nennfrequenz liegender Frequenz, wobei Nennstrom und Nennspannung konstant, der Leistungsfaktor 1 und bei einer zweiten Meßreihe 0,5 ist.

- e) Fehler bei einer um etwa 20° höheren und 20° niedrigeren Temperatur als die Zimmertemperatur (18°C).
 - f) Bei Mehrphasenzählern muß man noch den Einfluß einseitiger Belastung und ungleicher verketteter oder Sternspannungen prüfen. Ebenso ist der Einfluß der Drehrichtung des Drehfeldes festzustellen.
6. Feststellung des Eigenverbrauchs im Hauptstrom- und Spannungskreis, des Spannungsabfalles am Hauptstromkreis und des Stromes im Spannungskreis (vgl. IX, 12).
 7. Feststellung des Drehmoments (vgl. IX, 1).
 8. Feststellung des Einflusses der Temperaturerhöhung bei 1stündiger Überlastung mit einem 50% den Nennstrom übersteigenden Strom, bei überlastbaren Zählern der Belastbarkeit entsprechende höhere Ströme (vgl. IX, 9).
 9. Feststellung des Einflusses einer dauernden Belastung über 1 bis 2 Monate mit der Vollast oder besser einer wechselnden Last auf die Angaben.
 10. Feststellung des Einflusses von Kurzschlüssen entsprechend IX, 10.
 11. Feststellung der Reibung vor und nach der Dauereinschaltung (vgl. IX, 2).
 12. Einfluß des Verbiegens der Grundplatte auf die Angaben des Zählers.

Will man die elektrischen und magnetischen Eigenschaften gesondert feststellen, so macht man folgende Prüfungen:

13. Abweichung von der 90° -Verschiebung (vgl. IX, 14).
 - a) Winkel δ in Abhängigkeit vom Hauptstrom.
 - b) „ δ „ „ von der Spannung.
 - c) „ δ „ „ „ „ Frequenz.
14. Bremsung durch die magnetischen Flüsse des Hauptstrom- und Spannungskreises (vgl. IX, 5).

Der Einfluß von stoßweisen Belastungen und der Kurvenform (vgl. IX, 6 und 7) ist meist so klein, daß man von der Feststellung desselben absehen kann.

Bei *Gleichstromzählern* macht man entsprechende Messungen und fügt gegebenenfalls noch die unter IX, 15, 17, 18, 19 beschriebenen hinzu.

Namenverzeichnis.

- | | | |
|---|---|---|
| <p>Alberti 115, 130.
 Agnew 125.
 Aron 85.</p> <p>Baudisch, K. 20.
 Beetz, W. 88, 151.
 Behn-Eschenburg 85.
 Berthold, R. G. 20.
 Blathy, O. T. 16.
 Brauer, W. 59.
 Brion, G. 37, 48.
 Brooks, H. B. 42, 115.
 Brückmann, A. 56.
 —, H. W. L. 33, 125, 132,
 136, 146.</p> <p>Callsen, A. 65, 67.</p> <p>Déguisne 34.
 Diesselhorst 39.
 Doericht 88.</p> <p>Engel, A. v. 20.
 Estel, F. 66, 67.</p> <p>Ferrié 48.
 Feussner 39.
 Fitch 66, 136, 139, 141.
 Förster 5.
 Franck, S. 157.
 Franke, Rud. 39.
 Friedländer, E. 36.</p> <p>Gänger, B. 22.
 Genkin 147.
 Geyger, M. 34.
 —, W. 36, 41.
 Gewecke, H. 62, 66.
 Ghyczy, P. 17.
 Gossen 44.
 Graffunder, W. 64.
 Greiner, R. 36.
 Gruhn 37.
 Gumlich, E. 167.</p> <p>Hauffe, G. 59.
 Heinrich, R. O. 56.
 Hochhänsler, P. 59.</p> | <p>Hohle, W. 44, 119.
 Holtz 115.
 Hommel 70, 138.
 Huber 66, 136, 139, 141.
 Hurbin, M. 151.</p> <p>Jäger, W. 37, 38.
 Joly, C. R. 48.
 Irwin 151.</p> <p>Kafka, W. 20.
 Kartak 59, 64.
 Keinath, G. 37, 48, 115,
 153.
 Köhler, J. W. L. 44.
 Körös, L. 36.
 Kohlrausch, F. 5, 140, 154.
 Krönert, J. 37.
 Krukowski, W. v. 41, 62,
 66, 131, 141, 146, 150,
 170.
 Kuhlmann 139.</p> <p>Langrehr, H. 48.
 Linke, H. 20.
 Lloyd 151.</p> <p>Martienssen 48.
 Maurer, P. 16.
 Mehlhorn, H. 20, 22.
 Meyer, G. J. 163.
 Möllinger, J. A. 58, 143,
 150, 167.
 Moore 151.</p> <p>Nölke, O. E. 28, 67.
 Noeggerath, E. 20.
 Nützelberger, H. 73.</p> <p>Orlich, E. 16, 22, 35, 51,
 91, 160.</p> <p>Palm, A. 37, 44.
 Pederzani, K. 20.
 Di Pieri, C. 88.
 Polek, H. 32, 58.</p> | <p>Raps 39.
 Ratcliff 151.
 Reese, R. 101.
 Reid 151.
 Reynst, M. F. 132.
 Richter, H. 155.
 Robertson 149.
 Rogowski, W. 151.
 Rosa 151.
 Rübsaat, H. 59.
 Rump, W. 41, 44.</p> <p>Seidelbach, R. 36.
 Sequenz, H. 20.
 Simons 6.
 Skirl, W. 37.
 Stern 124.
 Stubbings, G. W. 59, 91.</p> <p>Schering, H. 41, 44, 58,
 106, 115, 162, 166, 167.
 Schillés 147.
 Schmidt, R. 7, 38, 39, 41,
 59, 106, 166, 167.
 Schmiedel, K. 94, 126,
 135, 138, 142, 143, 146,
 149, 152, 167.
 Schmitz, L. 48.
 Schultze, H. 160.
 Schulze, G. 149.</p> <p>Täuber-Gretler, A. 163.
 Tenzer, G. 16.
 Thompson, G. 66.</p> <p>Vieweg, V. 37, 48, 151.
 Vogler, H. 4.</p> <p>Wachsmann, F. 131.
 Walter, R. 63.
 Wicht, H. 161.
 Wolf, Otto 39.</p> <p>Ziemendorff, H. 134.
 Zwierina, O. 47, 121.</p> |
|---|---|---|

Sachverzeichnis.

- Absolutes Verfahren zur Wandlerprüfung 115.
Äußere Felder 151.
Akkumulatorenbatterien 19.
Angaben, Bestimmung der 61.
Anlaufstrom 7, 30, 144.
Astatische Meßwerke 46.
Asynchronmotor, gebremster 31.
Aufhängung, schiefe 144, 172.
Aufzugsmagnete 77.
Auslaufmessungen 135.
Auslaufmethode 145.
—, rechnerische Auswertung 139.
—, vereinfachte 135, 138.
- Ballistisches Galvanometer 167, 168.
Beeinflussung durch äußere Felder 151.
— durch strömführende Leitungen 151.
Beeinflussungskonstante durch Felder 152.
Beglaubigungsfehlergrenzen 7.
Belastungsdiagramm 17.
Belastungsstöße 148.
Belastungstransformatoren 30.
Belastungswandler 69.
Belastungswiderstände 29.
Blindleistungsmesser 46.
Blindverbrauchzähler 9, 98.
Bremsmoment 168.
Brückenmethoden für Eigenverbrauchsmessung 162.
Brückenschaltung als Phasenschieber 34.
Bürstenreibung 133.
Bürsten-Übergangswiderstand 170.
- Chronograph 62.
Constante des Torsionsdynamometers 135.
— der Torsionswaage 133.
- Dauerschaltungen 36.
Diagramm des Blindverbrauchszählers 99.
Doppelgeneratoren 22, 31, 32.
Doppelmeßwerk 45.
Doppelwegschaltung 43.
Doppelzeitschreiber 62, 67, 136.
Dreheisenmeßgeräte 42.
Drehfeldeinfluß bei Blindverbrauchszählern 100.
Drehfeldzeiger 58, 69.
Drehkondensator 116.
Drehmoment 124.
—, selbsttätige Aufzeichnung 129.
— aus der elektrischen Leistung 131.
Drehspulmeßgeräte 42.
Drehstrommotor als Phasenschieber 34.
Drehstrom-Prüfzähler 69.
Drehstromzähler für gleichbelastete Phasen 94.
Drehzahländerung 24.
Drehzahl-Feinregelung beim Gleichlast-Prüfzähler 71, 73.
Dreiamperemetermethode 161.
Dreileiter-Drehstrom 85.
—, ein messendes System 95.
—, Prüfung mit einem Leistungsmesser 89.
Dreileiter-Gleichstrom 108.
Dreileiter-Zweiphasenwechselstrom 81.
Dreivoltmetermethode 160.
Drossel mit Kraftflußregelung 32.
Drosselspulen 32.
Druckknopfschalter 69.
Durchlaufzeit des Zählwerks 12.
Durchschlagsprüfung 156.
- Eichzähler 68.
Eichzwang 12.
Eigenbremsung 145.
—, indirekte Bestimmung 147.
Eigentemperatur 153.
Eigenverbrauch 158.
Einlaufmethode 146.
Einphasenmotor mit Widerständen als Phasenschieber 33.
Einphasenwechselstromzähler, Prüfungsschaltungen 77.
Eisendrahtwiderstände 29, 30, 36.

- Eisengeschlossene Leistungsmesser 47.
 Elektrodynamische Meßgeräte 44.
 Elektrolytzähler 13.
 Elektrometer 160, 169.
 Elektronenröhren 20.
 Elektrostatische Meßgeräte 44.
 Erdfeld 152.
 Erdung 76.
 Erschütterungen 144.
 Erwärmung 154.

 Fadenaufhängung 46.
 Fälschung der Angaben durch äußere
 Felder 151.
 Federdynamometer 124.
 Felder, äußere 151.
 Feldmessung 167.
 Fehler 14.
 —, mittlerer 17.
 Fehlergrenzen 6.
 Fehlerkurve 16.
 Fehlwinkel 9, 53, 117, 118, 120, 122, 123,
 165.
 Fieberthermometer 153.
 Frequenzmesser 48.
 Frequenzwandler 31.
 Funkenstrecke 157.
 Funkenübergang für Zählvorrichtungen
 66.

 Galvanometer 41.
 Geeichter Motor zur Reibungsmessung
 141.
 — Motor zur Messung der Eigen-
 bremsung 146.
 Gegenelektromotorische Kraft 171.
 Gegenschaltungsverfahren zur Wandler-
 prüfung 119.
 Gitterspannung 21.
 Gitterwiderstände 29.
 Gleichlast-Prüfverfahren 5.
 — für Wechselstrom 70.
 — für Drehstrom 73.
 Gleichlast-Prüfzähler 5, 67, 70.
 Gleichrichtermeßgeräte 43, 164.
 Gleichstromgeneratoren 20.
 Gleichstromkompensator 37.
 Glimmlampen 155.
 Glimmröhre 36.

 Hilfsschalter 60.
 Hitzdrahtmeßgeräte 43.
 Hochspannungsgeneratoren 20.
 Hysteresefehler 43.

 Internationale Elektrotechnische Kom-
 mission 11.
 Isolation 156.

 Kadmiumelement 38.
 Koinzidenzen bei Pendelzählern 16.
 Kompensationsapparat 1, 37.
 Kompensationsmoment 142, 143.
 Kompensationsspule 142.
 Konstante 5.
 Konstanthaltung 36.
 Konstanthaltungseinrichtung 15.
 Kontaktpendel 64.
 Kontaktvorrichtung am Zähler 65.
 Korrektion 5.
 Korrektionsfaktor 5, 14.
 Kräftemesser 124.
 Kräfteparallelogramm 126.
 Kraftfluß, magnetischer 168.
 Kühlvorrichtungen für Normalwider-
 stände 39.
 Kupferoxydulgleichrichter 43.
 Kupferverlust 158.
 Kurvenform 151.
 Kurzschlußsicherheit, Dynamische 155.
 —, Thermische 155.
 Kurzschlußstrom 155.
 Kurzschlußprüfer 163.
 Kurzschlußwindungen 163.

 Lagerreibung 133, 135.
 Lampenwiderstände 29.
 Leerlauf 144.
 Leistungsfaktor 47.
 Leistungsmesser 45.
 — -Umschalter 61.
 Luftreibung 133, 135, 141.

 Magnetenmeßapparat 168.
 Magnete, permanente 168.
 Maximumwerke, Reibung 133, 135.
 Meßbereiche, Erweiterung der 49.
 Meßgenauigkeit 1.
 Meßwandler 9, 12.
 —, Prüfung der 115.
 Meßwandlerzähler 8.

 Nebenwiderstände 51.
 Normalelement 1, 38.
 Normalwiderstand 1, 38, 115.
 Normalzähler 15.
 Nullstellvorrichtung 63.
 Nullstellzählwerk 69, 73.

- Optische Übertragung für Zählvorrichtungen 66.
- Pendelkräftemesser 125.
- Pendeluhr 62.
- Pendelzähler 13.
- Periodenumformer 24, 31.
- Permanente Magnete 168.
- Petroleumbad für Normalwiderstände 38.
- Phasenlage, Bestimmung der 54.
- Phasenmesser 47.
- Phasenschieber mit Spannungsregelung 35.
- Phasenverschiebung 23.
- Photozelle 67.
- Physikalisch-Technische Reichsanstalt 7.
- Polprüfer 56, 58.
- Polreagenzpapier 54.
- Polumschaltbarer Generator 31.
- Präzisions-Stoppuhr 63.
- Promille-Wattmeter 46.
- Prüfämter 72.
- Prüfklemmen 112.
- Prüfordnung für elektrische Meßgeräte 7, 10.
- Prüfschaltungen 74.
- für Blindverbrauchzähler 98.
- für Gleichstromzähler 108.
- für den Anschluß von Wandlern 57.
- Prüftransformatoren 24, 28.
- Prüfzähler 68.
- Quecksilbernornal 1.
- Raumtemperatur 153.
- Regelgeschwindigkeit 37.
- Regeln für Elektrizitätszähler 75.
- für Wandler 9.
- Regeltransformatoren 27.
- Regelung der Frequenz 31.
- der Phasenverschiebung 32.
- , induktive 27.
- Regelwiderstände 25.
- Regler, mechanische 22.
- Reibung 131.
- , nach längerer Betriebszeit 131.
- Reibungskompensation 142.
- Röhrengenerator 64.
- Röhrengeregelter Generator 21, 22.
- Sekundenstrom 155.
- Selbstinduktion, veränderliche 54.
- Selenzelle 66.
- Skalenkorrektur 49.
- Spannungsfehler 10, 53, 118, 120, 123.
- Spannungsgleichhalter 36.
- Spannungsmesser-Ersatzschalter 60.
- Spannungstöße 148.
- Spannungsteiler 38, 117.
- Spannungswandler 10, 53.
- , Anschluß 57.
- , Prüfung der 115, 117, 120, 122.
- Sparschaltung 18.
- Spartransformatoren 28.
- Stabilisator 36.
- Stillstandsmethode zur Bestimmung des Fehlwinkels 165.
- Stoppuhr 4, 62, 67.
- Stoßfaktor 158.
- Stoßspannungsprüfung 157.
- Stoßspannungswelle 157.
- Stoßweise Belastung 148.
- Stroboskopische Prüfung 15.
- Einstellvorrichtung 67.
- Strömung in der Scheibe 169.
- Stromfehler 9, 53, 116, 120, 122.
- Stromrichtung, Bestimmung der 54.
- Stromstöße 148.
- Stromwandler 9, 53.
- , Anschluß 57.
- , Prüfung der 115, 119, 121.
- Stufentransformatoren 25.
- Summer 163.
- Synchroneinstellung 15.
- Synchroneinschalter 156.
- Synchronuhr 64, 67.
- Schalter für zyklische Vertauschung 35.
- Schaltung der Leistungsmesser 75.
- der Zähler 75.
- Scheibenströmung 169.
- Scheinwiderstand 159.
- Schiebetransformatoren 28, 29.
- Schiebewiderstände 29.
- Schiefe Aufhängung 172.
- Schlußhorcher 163.
- Stoßspannung 158.
- Schutzleitung 39.
- Schwingungskreis für Zeitmessung 64.
- Temperatur 153.
- Temperaturfehler 4.
- Temperaturkoeffizient 154.
- Thermische Meßgeräte 43.
- Thermoelement 44, 153.
- Thermoumformer 44.
- Thermometer 153.

- Thoma-Regler 22.
 Torsionsdynamometer 134.
 Torsionsleistungsmesser 46, 71, 73.
 Torsionswaage 132.
 Trägheitsmoment 133, 139.
 Trimmer 64.
- Überlast 7.
 Übersetzungsverhältnis 14.
 Umdrehungszählung 13.
 Unipolarmaschinen 20.
 Universal-Prüfzähler 68, 73.
- Variator 30, 36.
 Vektordiagramme 75.
 Vektormesser 56.
 Verkehrsfehlergrenzen 6.
 Vibrationsgalvanometer 116.
 Vierleiter-Drehstrom, drei messende Systeme 81.
 —, ein messendes System 94.
 —, zwei messende Systeme 90.
 Vierleiter-Zweiphasenwechselstrom 80.
 Voltameter 149.
- Vorlauf 8.
 Vorwiderstände 25, 49, 76.
 Waage als Kräftermesser 128.
 Wahrscheinlicher Meßfehler 5.
 Wechselstromgeneratoren 21.
 Wechselstromkompensator 41, 169.
 Winkelfehler 46, 47.
 Winkelmessung mit Hilfsspule 166.
 Wirkwiderstand 159.
 Wismutspirale 167.
- Zählvorrichtungen, mechanische 67.
 —, selbsttätige 65.
 Zählwerksablesung 12.
 Zählwerksreibung 133, 135.
 Zeigerfrequenzmesser 48.
 Zeigermeßgeräte 42.
 Zimmertemperatur 154.
 Zungenfrequenzmesser 48.
 Zweileistungsmesserschaltung 85.
 Zweileiter-Gleichstrom 108.
 Zweistufenwandler 115.
 Zweiwattmetermethode 85.
 Zyklische Vertauschung 33.
 — Vertauschung, Schalter 35.

Verlag von Julius Springer in Berlin

Grundzüge der Zählertechnik. Ein Lehr- und Nachschlagewerk. Von Dr.-Ing. **W. v. Krukowski**. Herausgegeben im Auftrage des Verbandes Deutscher Elektrotechniker. Mit 314 Abbildungen im Text. XI, 521 Seiten. 1930. Gebunden RM 30.60

Die Prüfung elektrischer Maschinen. Von Dipl.-Ing. **Werner Nürnberg** VDI, Berlin. Mit etwa 220 Textabbildungen. Etwa 320 Seiten. Erscheint im Januar 1940

Prüfordnung für elektrische Meßgeräte vom 1. Januar 1933. Herausgegeben von der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt. Amtliche Ausgabe. Mit 10 Tafeln. VI, 51 Seiten. 1933. Unveränderter Neudruck 1936. RM 2.40

Wirkungsweise der Motorzähler und Meßwandler mit besonderer Berücksichtigung der Blind-, Misch- und Scheinverbrauchsmessung. Für Betriebsleiter von Elektrizitätswerken, Zählertechniker und Studierende. Von Direktor Dr.-Ing. Dr.-Ing. e. h. **I. A. Möllinger**. Zweite, erweiterte Auflage. Mit 131 Textabbildungen. VI, 238 Seiten. 1925. Gebunden RM 10.80

Apparate und Meßmethoden für Elektrizität und Magnetismus. Bearbeitet von **E. Alberti, G. Angenheister, E. Baars, E. Giebe, A. Güntherschulze, E. Gumlich, W. Jaeger, F. Kottler, W. Meißner, G. Michel, H. Schering, R. Schmidt, W. Steinhaus, H. v. Steinwehr, S. Valentiner**. Redigiert von **W. Westphal**. (Handbuch der Physik, Bd. XVI). Mit 623 Abbildungen. IX, 801 Seiten. 1927. RM 59.40; gebunden RM 61.56

Der phasenverschobene Strom. Seine Messung und seine Verrechnung. Von Dipl.-Ing. **Richard F. Falk**, Ingenieur bei den Siemens-Schuckertwerken. Mit 52 Textabbildungen. IV, 92 Seiten. 1927. RM 5.94

Hochfrequenzmeßtechnik. Ihre wissenschaftlichen und praktischen Grundlagen. Von Dr.-Ing. **August Hund**. Zweite, vermehrte und verbesserte Auflage. Mit 287 Textabbildungen. XIX, 526 Seiten. 1928. Gebunden RM 35.10

Zu beziehen durch jede Buchhandlung

Verlag von Julius Springer in Berlin

Starkstrommeßtechnik. Ein Handbuch für Laboratorium und Praxis unter Mitarbeit zahlreicher Fachgelehrter. Herausgegeben von Professor Dr. G. Brion, Freiberg, und Oberregierungsrat Dipl.-Ing. V. Vieweg, Berlin. Mit 530 Abbildungen im Text und zahlreichen Tabellen. XII, 458 Seiten. 1933. Gebunden RM 37.50

Elektrische Meßgeräte und Meßeinrichtungen. Von Oberingenieur A. Palm. Mit 205 Abbildungen im Text und 6 Tafeln. IX, 231 Seiten. 1937. Gebunden RM 16.50

Elektrotechnische Meßkunde. Von Professor Dr.-Ing. P. B. Arthur Linker, Hannover. Vierte, völlig umgearbeitete und erweiterte Auflage. Mit 450 Textabbildungen. X, 619 Seiten. 1932. Gebunden RM 31.50

Elektrotechnische Meßinstrumente. Ein Leitfaden von Oberingenieur und Gewerbestudienrat Konrad Gruhn. Zweite, vermehrte und verbesserte Auflage. Mit 321 Textabbildungen. IV, 223 Seiten. 1923. Gebunden RM 6.30

Meßtechnische Übungen der Elektrotechnik. Von Oberingenieur a. D., Gewerbestudienrat Konrad Gruhn. Mit 305 Textabbildungen. VI, 177 Seiten. 1927. RM 9.45

Messungen an elektrischen Maschinen. Apparate, Instrumente, Methoden, Schaltungen. Von Oberingenieur Dipl.-Ing. Georg Jahn. Fünfte, gänzlich umgearbeitete Auflage des von R. Krause begründeten gleichnamigen Buches. Mit 407 Abbildungen im Text und auf 1 Tafel. VII, 394 Seiten. 1925. Gebunden RM 18.90

Meßgeräte und Schaltungen zum Parallelschalten von Wechselstrom-Maschinen. Von Oberingenieur Werner Skirl. Zweite, umgearbeitete und erweiterte Auflage. Mit 30 Tafeln, 30 ganzseitigen Schaltbildern und 14 Textbildern. VIII, 140 Seiten. 1923. Gebunden RM 4.50

Wechselstrom-Leistungsmessungen. Von Oberingenieur Werner Skirl. Dritte, vollständig umgearbeitete und erweiterte Auflage. Mit 247 zum größten Teil auf Tafeln angeordneten Bildern. VII, 278 Seiten. 1930. Gebunden RM 12.60

Zu beziehen durch jede Buchhandlung