

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000294815

x
14

PRÜFUNGEN
IN
ELEKTRISCHEN ZENTRALEN

MIT DAMPFMASCHINEN- UND
GASMOTOREN-BETRIEB

9/12

F. Nr. 25488



H. 14.

84.

PRÜFUNGEN

IN

ELEKTRISCHEN ZENTRALEN

MIT DAMPFMASCHINEN- UND
GASMOTOREN-BETRIEB

VON

DR. PHIL. E. W. LEHMANN-RICHTER

KONSULTIERENDER DIPLOM-INGENIEUR FÜR ELEKTRISCHE LICHT
UND KRAFT-ANLAGEN IN FRANKFURT A. M.



MIT 91 EINGEDRUCKTEN ABBILDUNGEN

BRAUNSCHWEIG

DRUCK UND VERLAG VON FRIEDRICH VIEWEG UND SOHN

1903

X



11-351656

Alle Rechte, namentlich dasjenige der Übersetzung in fremde Sprachen,
vorbehalten

~~115440~~



BPK-3-80/2018
Akc. Nr. ~~515~~ 160

V O R W O R T.

Auf Wunsch Studierender und Fachgenossen habe ich es unternommen, das Wesentlichste über Prüfungen in kleineren elektrischen Zentralen mit Dampf- und Gasbetrieb¹⁾, wie solche bei Übernahme neu errichteter Werke und anderen Gelegenheiten — Besitzwechsel, nach mehrjährigem Betriebe u. s. f. — erforderlich sind, in nachstehendem Leitfaden zu erläutern. Ich hoffe, daß derselbe den gehegten Erwartungen entsprechen wird.

Es ist mir eine angenehme Pflicht, an dieser Stelle den Gesellschaften: Gebr. Körting, Schuckert u. Comp., Siemens u. Halske, Union und Pollak, welche mir mit dem freundlichsten Entgegenkommen Mitteilungen über einige Prüfungsprotokolle zugehen ließen, die mir bei der Vollendung meines Buches wertvoll waren, bestens zu danken, wie auch der Verlagsbuchhandlung von Friedr. Vieweg u. Sohn, welche in dankenswertester Weise bemüht war, meinen Wünschen zu entsprechen, und durch korrekte und schnelle Drucklegung meine Arbeit wesentlich erleichtert hat.

¹⁾ Prüfungen an Wasser-(rädern), -turbinen und Dampfturbinen gedenke ich noch in diesem Jahre als Ergänzungsband zu obigem Buche folgen zu lassen.

Frankfurt a. M., im August 1903.

E. W. Lehmann-Richter.

INHALT.

	Seite
Einleitung	1
A. Dampfkessel.	
I. Allgemeine Versuchsbedingungen	3
II. Gang der Untersuchung	4
1. Kohlenmenge. — Zusammensetzung der Kohle. — Heizwert der Kohle. — Zugstärke bzw. Luftmenge. — Temperatur der in die Feuerung eintretenden Luft und der abziehenden Gase. — Heizgasuntersuchung. — Menge und Wärmeverluste der Herdrückstände	4
2. Speisewassermenge und zur Verdampfung nötige Wärme. — Dampffuchtigkeit. — Dampfspannung	8
3. Nutzeffekt eines Dampfkessels	10
Beispiele.	
Prüfung eines liegenden Einflammrohrkessels von Schulz-Knaudt, Aktiengesellschaft, Essen a. d. Ruhr	11
(Weitere Beispiele siehe Kapitel N.)	
B. Dampfmaschinen.	
Allgemeines	15
1. Theoretischer Teil	15
Indizierte Leistung. — Dampfverbrauch, indizierter und wirklicher; Dampfverluste; Korrektion nach Grove; Gesamtwärme des Dampfes; Krausesche Formel. — Eintrittsspannung. — Nutzdruk und absoluter Arbeitsdruck sowie Wirkungsgrad einer Dampfmaschine.	
2. Berechnung des mittleren indizierten Druckes aus den Indikator- diagrammen	23
Ausmessen des Diagrammes. — Polarplanimeter. — Eichung einer Indikatorfeder.	
3. Folgerungen über die Dampfverteilung und die Güte einer Dampf- maschine aus ihren Indikator- diagrammen	28
Arbeitsvorgang im Dampfzylinder. — Anormale Diagramme und Fehler der Steuerung.	
4. Das Indizieren	30
Anbringen des Indikators. — Bewegungsübertragung vom Kreuzkopf nach dem Indikator.	

5. Bestimmung der Nutzleistung einer Dampfmaschine	34
Reibungsarbeit bei Leergang und Vollast. — Das Bremsdynamometer. Pronyscher Zaum und verwandte Apparate (Poncelet, Navier, Hartig, Wettler, Imray, E. Brauer u. a.). — Wirbelstrombremse von Gran. — Einschaltdynamometer von Hachette, Batchelder und White, Hartig, Hefner von Alteneck.	

Beispiele.

Erstes Beispiel: Prüfung einer Ventildampfmaschine der Firma Beck u. Rosenbaum	43
Zweites Beispiel: Leistungsversuch an einer Hochdrucklokomobile der Maschinenfabrik „Badenia“	47
Drittes Beispiel: Untersuchung einer 150 pferdigen Verbundlokomobile von R. Wolf	49
(Weitere Beispiele siehe Kapitel N sowie auch G.)	

C. Gasmotoren.

Allgemeines	50
Theoretischer Teil	51
Allgemeine Formeln für die Untersuchungen an Gasmotoren. — Kalorimetrische Untersuchung des Heizgases.	

Beispiele.

Erstes Beispiel: Untersuchung eines Gasmotors von 2 PS	53
Zweites Beispiel: Untersuchung eines 16 pferdigen Gasmotors bezügl. Gasverbrauch	56
Drittes Beispiel: Prüfung eines Gasmotors von 4 PS bezügl. Leistung, Heizwertbestimmung und Wärmebilanz	57
Viertes Beispiel: Vergleichsversuche für den Gasverbrauch bei Leucht- und Kraftgasbetrieb	61
(Weitere Beispiele siehe Kapitel D.)	

D. Generatorgasanlagen.

Allgemeines: Verwendung des Gases als Betriebskraft	62
Erzeugung des Generator- oder Kraftgases: Druckgasanlagen, Sauggasanlagen	62

Beispiel.

Untersuchung der Kraftgasanlage (Generatoren und Motoren) des Elektrizitätswerkes Erlangen (siehe auch Kapitel G, viertes Beispiel)	64
---	----

E. Betriebskraft und Gleichförmigkeit des Ganges der Antriebsmaschinen.

Verwendbarkeit und Zweckmäßigkeit der verschiedenen Betriebsarten. — Ungleichförmigkeitsgrad und Winkelabweichung. Tachograph, Apparat von Mix	70
(Siehe hierzu Beispiele in Kapitel N.)	

F. Messungen.

1. Allgemeine Bemerkungen über Messung von Stromstärken, Spannungen, Tourenzahl, elektrischen Widerständen u. s. f. — Apparate zur Wechselstrommessung. — Kalorimeter und Cardew-Instrument. — Präzisionsinstrumente. — Elektrometer	75
--	----

2. Das Elektrodynamometer	78
Messung von Wechselströmen. — Messung der elektrischen Energie (Wattmeter): Schaltungen des Wattmeters und erforderliche Korrekturen; Einfluß der Selbstinduktion im Nebenschluß bei Messung der Wechselstromenergie, Korrekturen.	
3. Effektmessung bei Mehrphasenströmen. — Zwei-Wattmetermethode	83
4. Messung der Schlüpfung bei asynchronen Motoren. — Apparate von Ziehl und Siemens & Halske	86

G. Gleichstrommaschinen.

Mechanischer und elektrischer Wirkungsgrad. — Direkte und indirekte Bestimmung des Wirkungsgrades. — Bestimmung desselben aus den Verlusten. Maximale Erwärmung der Wickelungen sowie der anderen Teile der Maschine: Direkte und indirekte Bestimmung (aus der Widerstandserhöhung der Wickelungen), Bestimmung aus den Verlusten, der Abkühlungsfläche und der Geschwindigkeit der einzelnen Maschinenteile. — Die wichtigsten Beziehungen zwischen den elektrischen Größen	90
---	----

Beispiele.

Erstes Beispiel: Bestimmung des Wirkungsgrades einer Compoundmaschine	95
Zweites Beispiel: Untersuchung der Gleichstrommaschinen der Palmengarten-Zentrale in Frankfurt a. M.	96
Drittes Beispiel: Prüfung einer Nebenschlußgleichstrommaschine inkl. der Betriebsdampfmaschine (siehe auch unter Kapitel B)	101
Viertes Beispiel: Prüfung der elektrischen Maschinen des Elektrizitätswerkes Erlangen (siehe auch Kapitel D unter Beispiel)	105
Fünftes Beispiel: Prüfung eines Gleichstromcompoundgenerators der Union-Elektrizitätsgesellschaft Berlin	114
(Siehe auch Kapitel N, zweites Beispiel.)	

H. Ein- und Mehrphasenmaschinen.

1. Vergleichende Betrachtung des Ein- und Mehrphasensystems	118
2. Das Drehstromsystem (Dreiecksschaltung, Sternschaltung)	120
3. Effektverluste und Wirkungsgrad eines Mehrphasengenerators	122
4. Theoretische Bemerkungen über asynchrone Drehstrommotoren	123
Einfluß der Selbstinduktion bzw. Streuung auf die Zugkraft. — Experimentelle Bestimmung der Selbstinduktion. — Energieverbrauch, Leistungsfaktor, Schlüpfung, Drehmoment und Wirkungsgrad eines Drehstrommotors.	
5. Experimentelle Untersuchungen an Mehrphasengeneratoren	125
Leerlaufscharakteristik. — Kurzschlußcharakteristik. — Konstruktion des Spannungsabfalles aus den Charakteristiken. — Äußere Charakteristik. — Induktive Belastung und Phasenverschiebung. — Konstanz der Klemmenspannung. — Direkte Ermittlung des Wirkungsgrades. — Ermittlung desselben durch Bestimmung der Verluste. — Verlust des unerregten und erregten Leerlaufs, Eisenverluste.	
6. Experimentelle Untersuchungen an asynchronen Mehrphasenmotoren	132
Leerlaufsarbeit und Verluste in Abhängigkeit von der primären Spannung. — Bestimmung der elektrischen und mechanischen Größen bei belastetem Motor. — Anlaufstromstärke und Anzugs-	

kraft in Abhängigkeit von der Spannung. — Drehmoment und Schlüpfung bei verschiedenem Rotorwiderstand. — Temperaturerhöhung im Betriebe.

Beispiele.

Erstes Beispiel: Prüfung an einem Drehstromgenerator der Union-Elektrizitätsgesellschaft Berlin	135
Zweites Beispiel: Untersuchung an einem Drehstromgenerator der E.-A.-G. vorm. Schuckert & Co.	144
Drittes Beispiel: Untersuchung eines asynchronen Einphasenmotors von Brown, Boveri & Co. (siehe auch Kapitel G, zweites Beispiel)	145
Viertes Beispiel: Untersuchung eines asynchronen Drehstrommotors der Union-Elektrizitätsgesellschaft Berlin	146
Fünftes Beispiel: Untersuchung eines asynchronen Drehstrommotors der E.-A.-G. vorm. Schuckert & Co.	150
Sechstes Beispiel: Prüfungsergebnisse der elektrischen Lokomotivmotoren der Jungfraubahn	151
(Siehe auch Kapitel N, drittes Beispiel.)	

I. Transformatoren.

1. Allgemeines über den Transformator	153
Wesen des Transformators. — Bedeutung der Eisenverluste für den Jahreswirkungsgrad. — Wirbelstromverluste. — Hysteresisverluste.	
2. Bestimmung des Wirkungsgrades und der Effektverluste	157
Direkte Methode. — Vorteil der unmittelbaren Verlustbestimmung. — Differentialwattmeter. — Anwendung zweier gleicher Transformatoren. — Getrennte Ermittlung der Eisenverluste (durch Leerlaufversuch) und der Kupferverluste (aus Stromstärken und Widerständen). — Kappsche Methode der Anwendung zweier gleicher Transformatoren sowie eines Hilfstransformators.	
3. Bestimmung des Spannungsabfalles	162
Allgemeines. — Methode von Scattergood. — Methode von Kapp (Diagramm des Spannungsabfalls).	
4. Rechnerische Untersuchung eines Transformators (Hauptformeln). — Beispiel hierzu	165

Beispiele.

Erstes Beispiel: Untersuchung eines Transformators von 1,4 K.-W. nach der Kenellyschen Methode	171
Zweites und drittes Beispiel: Prüfung eines Einphasentransformators und eines Drehstromtransformators der E.-A.-G. vorm. Schuckert & Co.	172

K. Akkumulatoren.

Aufgabe des Akkumulators. — Kapazität. — Nutzeffekt (Watt- und Ampère-Nutzeffekt). — Gang der Untersuchung	176
--	-----

Beispiele.

Prüfung der Batterie des Elektrizitätswerkes Erlangen sowie zweier Batterien der Zentrale Turin	178
---	-----

L. Messungen an Leitungsnetzen.

1. Allgemeines	181
2. Messung von Widerstand und Leitungsfähigkeit	182

3. Isolationsmessungen	184
Über den Isolationswert von Leitungsnetzen. — Methoden der Messung. — Apparat von Siemens & Halske, A.-G. — Methode von Dr. Bruger (Apparat von Hartmann & Braun.) — Abhängigkeit des Isolationswiderstandes von der Temperatur. — Beispiel einer Isolationsmessung an einem Kabelnetz.	
4. Kapazitätsmessungen	191
5. Fehlerbestimmungen	193
Schleifenmethode: Apparate von Siemens & Halske, A.-G., und Hartmann & Braun, A.-G.	

M. Elektrizitätszähler.

Einleitung. — Ampèrestundenzähler. — Wattstundenzähler. — Vergleich zwischen Ampère- und Wattstundenzählern. — Hauptpunkte bei Zähleruntersuchungen.	196
--	-----

Beispiele.

Untersuchungen: eines Einphasenzählers der E.-A.-G. vorm. Schuckert & Co., eines solchen von Hartmann & Braun, A.-G., eines Flügel-Wattstundenzählers von Siemens & Halske, A.-G., und eines Gleichstromzählers der Union-Elektrizitätsgesellschaft Berlin	199
--	-----

N. Einige Beispiele für Gesamtprüfungen und Abnahmen in Zentralstationen.

Erstes Beispiel: Abnahmeversuche an Dampfkesseln und Dampfmaschinen der elektrischen Zentrale Regensburg	208
Zweites Beispiel: Abnahmeversuche an Kesseln und Dampfmaschinen in den Mülhauser Elektrizitätswerken	217
Drittes Beispiel: Abnahmeversuche an den Maschinen der elektrischen Zentrale Brunn i. M. (Dampfkessel, Dampfmaschinen, Dynamos)	229

Anhang.

Prüfungen an Hausinstallationen	239
Allgemeines. — Art der Isolationsmessungen. — Verschiedene Meßmethoden. — Aufsuchung von Isolationsfehlern.	
Spezielle Installationsvorschriften für eine Gleichstromzentrale für 2×220 Volt Spannung	244
Normalien für Gleichstromkabel (Tabelle)	267
Vertragsbedingungen betr. Lieferung von Gleichstromkabeln	268
Namen- und Sachregister	270

Einleitung.

Bald nach Einführung der Glühlampe trat man dem Gedanken des Baues elektrischer Zentralstationen näher, welche für jeden Konsumenten den für ihn erforderlichen Strom zu Beleuchtungs- und Kraftzwecken liefern. Es mußte somit analog dem Wasserleitungssystem ein elektrisches Speiseleitungssystem, von der Zentrale ausgehend, geschaffen werden. Ein solches System besteht im wesentlichen aus Speiseleitungen, in deren Verteilungszentren der Schwerpunkt des Stromverbrauches liegt, sowie den Verteilungs- und Ausgleichsleitungen. Die letzteren verbinden die verschiedenen Verteilungszentren untereinander; von den Verteilungsleitungen gehen die Hausanschlußleitungen zu den einzelnen Konsumenten ab. Zur Verwirklichung des Gedankens, von einem Punkte — einer Zentrale — aus ein größeres Gebiet mit elektrischer Energie in Form von Licht und Kraft zu versorgen, bedarf es großer elektrischer Energielieferer: Dynamomaschinen, Akkumulatoren und Transformatoren; die ersteren empfangen die zu ihrem Betriebe erforderliche mechanische Leistung von den Betriebsmotoren. Als Betriebskraft verwendet man, wenn eben möglich, aus wirtschaftlichen Gründen am besten Naturenergiequellen, welche direkt motorisch verwertet werden können, und unter diesen wiederum kommen fast ausschließlich die Wasserkräfte in Betracht. Die Ausnutzung derselben führt zum Betriebe durch Wasserräder und Turbinen. Da in den meisten Gegenden, für welche ein größerer Bedarf an elektrischer Energie vorliegt, keine geeignete Wasserkraft zur rationellen Ausnutzung zur Verfügung steht, so muß zur Heranziehung einer weiteren natürlichen Energiequelle, der Kohle, gegriffen werden. Die Umwandlung der aus derselben gewonnenen Wärmeenergie in elektrische Energie vermittelt Dampf- oder Gaskraft ist naturgemäß viel teurer als die Umwandlung einer Wasserkraft in elektrische Energie. Bei einer Dampfmaschine oder einem Gasmotor erfordert das Anheizen bzw. Anlassen allein schon eine größere Energiemenge, welche beim Betriebe durch Wasserräder oder Turbinen in Wegfall kommt. — So viel im allgemeinen. — Zum Inhalte der einzelnen Abschnitte des vorliegenden Buches hebe ich zunächst hervor, daß es sich speziell um Zentralen

mit Dampf- oder Gasbetrieb handeln soll. Um dem Stromabnehmer ein sicheres und dauernd gutes Funktionieren seiner Anlage zu garantieren, ist es notwendig, daß die einzelnen Teile der Zentralanlage, Maschinenaggregate, Akkumulatoren, Kabelnetz u. s. w., gewisse technische Bedingungen in Konstruktion und Anlage erfüllen. Es sollen daher die nachstehenden Kapitel maschinentechnischen und elektrotechnischen Messungen, welche bei Prüfung von kleineren Zentralen erforderlich sind, gewidmet sein. Die einzelnen zu erfüllenden Aufgaben bei Prüfungen derartiger Anlagen, sowohl für Dampfkessel, Dampfmaschinen, Gasgeneratoren, Gasmotoren, wie für elektrische Maschinen, Apparate u. s. w. finden sich jeweils im Anfang der betreffenden Kapitel im generellen erläutert und in den weiteren Abschnitten im einzelnen durchgeführt. Die einfacheren Isolations- und Spannungsverlustmessungen u. s. w. sind möglichst kurz behandelt, da diesen Punkten schon jahrelang durch die gegebenen Sicherheitsvorschriften große Aufmerksamkeit geschenkt wurde, wohingegen die oft viel schwerwiegenderen Faktoren der Nutzeffekte, sowie der anderen mechanischen und physikalisch-technischen Eigenschaften der Maschinen und Apparate erst in allerjüngster Zeit (im Jahre 1901) durch Festlegungen von Normalien für elektrische Maschinen und Transformatoren die wünschenswerte Berücksichtigung fanden (s. Elektrot. Zeitschr. 1901, S. 477). Dem Lieferanten von guten Maschinen u. s. w. wird eine solche Prüfung zur Ehre, dem Abnehmer und dem Sachverständigen, welcher mit der Prüfung vertraut wird, zur Freude gereichen, während bei Außerachtlassung genannter Faktoren unter Umständen nicht nur mangelhaftes Material und fehlerhafte Konstruktionen lange Zeit für brauchbar befunden werden, sondern auch dem Besitzer der Zentrale dauernd große unnötige Unkosten erwachsen können.

Der Charakter des Buches ist durchweg ein sehr einfacher; es werden nur elementare Vorkenntnisse der Mathematik und Physik (Magnetismus und Elektrizität) sowie der Maschinen- und Elektrotechnik vorausgesetzt. — Jedes Kapitel enthält, soweit dies erforderlich, einen Abschnitt mit theoretischen Erläuterungen; nach Aufstellung der grundlegenden Formeln werden alsdann mit besonderem Hinweis auf die Praxis Beispiele einzelner Maschinen und ganzer Aggregate elektrischer Zentralen mittlerer Größe, darunter auch kleinerer Betriebsmotoren, welche nicht direkt mit einer Zentrale im Zusammenhange stehen, deren Untersuchung jedoch prinzipiell gleich lehrreich ist wie diejenige größerer Motoren, durchgerechnet, so daß der Leser direkt in medias res eingeführt wird. Die Beispiele sind zum größten Teil vom Verfasser ausgeführte Untersuchungen, jedoch sind auch einzelne andere, welche für die Materie sehr wertvoll erschienen, aufgenommen.

A. Dampfkessel.

I. Allgemeine Versuchsbedingungen.

Bei der Wahl eines Kesselsystems und der Konstruktion desselben sind die Eigenschaften des zur Heizung zu benutzenden Brennstoffes sowie des zur Speisung vorhandenen Wassers maßgebend. Die Leistung einer Kesselanlage ist zu untersuchen auf das Maß der Dampferzeugung pro Quadratmeter Heizfläche¹⁾ und Stunde, auf die Verdampfungsziffer, d. h. auf die Zahl der Kilogramm Wasser von bestimmter Temperatur, welche durch 1 kg näher bezeichneten Brennstoffes in Dampf von gewisser Spannung verwandelt werden, und auf den Nutzeffekt, d. h. auf das Verhältnis der an den Kesselinhalt abgegebenen Wärmemenge zu dem Heizwerte des aufgewendeten Brennstoffes unter Berücksichtigung der einzelnen Wärmeverluste. Je vollständiger die im Brennstoff enthaltene Wärmemenge vom Kessel zur Dampfbildung verwendet wird, um so höher stellt sich der Nutzeffekt der Kesselanlage. Zur Beurteilung der oben näher bezeichneten Leistungsziffern einer Kesselanlage sind Untersuchungen bezüglich der Kohlenmenge, der Zusammensetzung der Kohle, des Heizwertes derselben, der Zugstärke bzw. der Luftmenge, der Temperatur der in die Feuerung eintretenden Luft und der Heizgase an verschiedenen Stellen der Feuerzüge, der Menge und des Wärmeverlustes der Herdrückstände, der Speisewassermenge und der zur Verdampfung nötigen Wärme, der Dampfeuchtigkeit und der Dampfspannung erforderlich. Diese Untersuchungen sind unter 1 a bis g und 2 a bis c näher erläutert. Anschließend hieran ist unter 3 ausgeführt, wie sich aus den Resultaten von 1 und 2 der Nutzeffekt der Kesselanlage ermitteln läßt. Die genaue Prüfung einer Dampfkesselanlage erfordert einen Vorversuch, welcher zur Einübung der zur Verfügung stehenden Hilfskräfte und zur Orientierung über die Leistungsfähigkeit der Apparate und Einrichtungen dient. Für die Ermittlung der Brennstoffmenge und der durchschnittlichen Leistung des Kessels, d. h. der erzeugten

¹⁾ Die Heizfläche ist gleich der Größe der Fläche, die einerseits von den Feuergasen, andererseits vom Wasser berührt wird; zu derselben gehören auch noch die in den Fuchs eingebauten Vorwärmer, deren Heizflächen jedoch einzeln anzuführen sind.

Dampfmenge, sollen die Mittelwerte zweier nacheinander ausgeführten Versuche bei ungleichmäßigen Betriebsverhältnissen — von je einem Tag bei Tagbetrieb, bezw. je einem Tag und einer Nacht bei Tag- und Nachtbetrieb — gültig sein; im Falle gleichmäßigen Betriebes genügt ein Versuch von zwölf Stunden. Bei Garantiversuchen ist die dauernde Untersuchung sowie die Fehlergrenze vorher vertragsmäßig — bei Aufstellung des Versuchsprotokolls oder bei Vertragsabschluß mit dem Lieferanten — zu bestimmen. Außerdem muß demselben bei Aufstellung des Vertrages eine Frist für Vorversuche zugesichert werden.

Ohne nähere Angabe ist unter Dampfdruck der den Druck der Atmosphäre übersteigende, d. i. der Dampfüberdruck zu verstehen. Mit Wasserstand kurzweg ist stets der tiefste Stand des Wasserspiegels bezeichnet. Ferner versteht man, beim Dampfkessel speziell, unter Dampfdruck den höchsten Druck. Als Maßeinheit desselben gilt die metrische Atmosphäre, d. h. der Druck von 1 kg auf 1 qcm. Zur Bestimmung der absoluten Dampfspannung muß der Atmosphärendruck mittels des Barometers gemessen, in metrische Atmosphären umgerechnet und zum Überdruck hinzu- (bezw. das Vakuum ab-)gerechnet werden. Alle Wärmemessungen sind auf das 100 teilige Thermometer nach Celsius zu beziehen. Die Zugstärke von Schornsteinen wird durch eine in Millimeter geteilte Wassersäule gemessen (1 mm = 0,0001 metrische Atmosphäre).

II. Gang der Untersuchung.

1 a. Kohlenmenge.

Das benötigte Brennmaterial wird auf einer genauen Wage abgewogen. Das Versuchspersonal muß überwachen, daß der Heizer nur die ihm zugewogene Kohle verheizt. Um den Fehler, welcher durch Ungleichheit der zu Anfang und am Schlusse der Versuche auf dem Roste befindlichen Kohlenmenge bedingt ist, möglichst auf ein Minimum zu beschränken, läßt man das Feuer, nachdem es etwa eine Viertelstunde vor Beginn und vor Schluß der Versuche gereinigt worden ist, so weit niederbrennen, daß der Rost nur noch mit einer dünnen Schicht glühender Koke bedeckt ist. Von jeder Kohlenzufuhr wird behufs späterer Untersuchung eine Probe in luftdicht verschlossenen Gläsern oder verlöteten Blechdosen aufbewahrt; aus dem Gesamtmaterial nimmt man dann eine Durchschnittsprobe, wobei man am besten folgendermaßen verfährt:

Das zerkleinerte Brennmaterial wird quadratisch ausgebreitet und durch Diagonallinien in vier Teile geteilt. Zwei gegenüberliegende Teile werden fortgenommen und die beiden anderen Teile in gleicher Weise wie zuvor behandelt; diese Anordnung wird so oft

wiederholt, bis eine Probemenge von etwa 5 kg übrig bleibt, welche dann zur chemischen Untersuchung gelangt (s. hierzu 1 b und 1 c). Nach jeder neuen Materialzufuhr wird das Gewicht der Verbrennungsrückstände festgestellt und am Schlusse des Versuchstages eine Durchschnittsprobe von der Asche und Schlacke zur späteren Untersuchung (s. sub 1 g) entnommen.

1 b. Zusammensetzung der Kohle.

Der Gehalt des Brennmaterials an Asche, hygroskopischem Wasser, Wasserstoff, Schwefel und Stickstoff wird durch chemische Analyse ermittelt. — Die Bestimmung des Wassergehaltes geschieht aus einer Anzahl während der Versuche gesammelter Proben des Brennstoffes, welche in luftdicht verschlossenen Gläsern oder Blechbüchsen bis zur Untersuchung aufzubewahren sind.

1 c. Heizwert der Kohle.

Ist in 1 kg Kohlenmaterial:

C kg Kohlenstoff, H kg Wasserstoff,
 S kg Schwefel, O kg Sauerstoff und
 W kg Wasser

enthalten, so erfolgt die Berechnung des Heizwertes nach der Annäherungsformel:

$$(1) \quad 8100 C + 29\,000 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 2500 S - 600 W$$

Wärmeeinheiten (Kalorien).

Außer der Heizwertbestimmung durch chemische Analyse verwendet man eine direkte — die kalorimetrische — Methode. Von der zu untersuchenden Kohle, z. B. Steinkohle, wird eine kleine Probe, die möglichst der Durchschnittsbeschaffenheit zu entsprechen hat, in einem geeigneten, allseitig gut schließenden und starken Gefäß, der sogen. Bombe, zur vollständigen Verbrennung gebracht; das Gefäß selbst taucht in einen Wasserbehälter mit schlecht leitender Einpackung. Aus der Temperaturerhöhung des Wassers wird unter Berücksichtigung der Gewichte und spezifischen Wärmen von Wasser, Gefäß und Behälter der Heizwert berechnet.

Sind z. B. die genannten Werte folgende:

	Gew. in kg	Spez. Wärme
Wasser	100	1
Verbrennungsgefäß . .	10	0,1
Wasserbehälter . . .	20	0,1

ist ferner das Gewicht der verbrannten Steinkohle 0,1 kg, die Temperaturerhöhung des Wassers etwa 7° C., so beträgt die erzeugte Wärmemenge in Kal.:

$$W = (100 \cdot 1 + 10 \cdot 0,1 + 20 \cdot 0,1) 7 \cdot \frac{1}{0,1} = 7210,$$

somit ist der Heizwert der untersuchten Steinkohle:

7210 Kal.

1 d. Zugstärke bzw. Luftmenge.

Zur Bestimmung der zur Verbrennung erforderlichen Zugstärke dient der Siegert-Dürsche Zugmesser, bzw. ein von F. Fischer konstruierter Apparat; letzterer besteht im wesentlichen aus einem U-förmigen Rohre, montiert auf einem Brette, auf welchem noch ein Maßstab eingesetzt ist, der sich in einem 4 mm tiefen Ausschnitte verschieben läßt. Bei Benutzung des Apparates wird das Rohr bis zur Hälfte mit gefärbtem Wasser gefüllt und der Maßstab so verschoben, daß der Nullpunkt mit dem unteren Meniskus der Flüssigkeit in beiden Schenkeln zusammentrifft. Ein Schenkel des Rohres ist in der Luft, der andere wird durch einen Gummischlauch mit dem Schornsteininnern verbunden und der Höhenunterschied beider Flüssigkeitsspiegel in Millimeter Wassersäule, d. h. die Zugstärke bestimmt.

Auf theoretischem Wege ergibt sich die erforderliche Luftmenge wie folgt:

Ein Kilogramm Brennmaterial erfordert zur vollständigen Verbrennung:

$$(2a) \quad \dots \quad \frac{8}{3} C + 8 H + S - O \text{ kg Sauerstoff}$$

$$(2b) \quad \text{bzw.} \quad \frac{\frac{8}{3} C + 8 H + S - O}{1,43} \text{ cbm Sauerstoff.}$$

Dies entspricht bei 21 Proz. Sauerstoffgehalt der Atmosphäre einem theoretischen Luftvolumen von:

$$(3) \quad \dots \quad L = \left(\frac{8}{3} C + 8 H + S - O \right) \cdot \frac{100}{30} \text{ cbm.}$$

Dieses rein theoretische Resultat ist für die Praxis nicht ausreichend, weil der Luft niemals ihr ganzer Sauerstoff vom Brennmaterial entzogen werden kann, da die Herstellung der Verbindung aller Teilchen der Luft mit allen Teilchen des Brennmaterials unmöglich ist. Man muß mitunter das Doppelte der angegebenen Luftmenge zuführen, um eine gänzliche Verbrennung der Kohle zu erzielen. (Näheres hierüber s. S. 7.)

1 e. Temperatur der in die Feuerung eintretenden Luft und der abziehenden Gase.

Die Temperatur der in die Feuerung eintretenden Luft wird nahe derselben gemessen, jedoch ist bei der Temperaturbestimmung das Thermometer vor Wärmestrahlung des Rostes zu schützen. Die Tem-

peraturbestimmung der Gase, die den Kessel verlassen, — also vor dem Rauchschieber mitten im Gasstrom — geschieht durch Quecksilberpyrometer mit Stickstofffüllung, deren Angaben mit einem Normalthermometer verglichen und korrigiert werden. Die Ablesungen des Thermometers erfolgen am besten bei Entnahme der Gasproben. Übersteigt die Temperatur 360° C., so muß das Kalorimeter zu Hilfe genommen werden.

1 f. Heizgasuntersuchung.

Bei vollständiger Verbrennung geben die Brennmaterialien nur Kohlensäure und Wasser; bei unvollkommener bilden sich Kohlenoxyd, Kohlenwasserstoff und auch freier Wasserstoff. Zur Feststellung des Gehaltes der Rauchgase müssen dieselben am Eintritt in den Schornstein mittelst eines Aspirators abgesaugt werden; diese angesaugten Gase werden entweder in Glasröhren eingeschmolzen, oder direkt in den Untersuchungsapparat eingeführt. Die aufgefangenen Rauchgase werden durch ein Glasrohr, welches in etwa 15 cm Länge mit Asbest gefüllt ist — wie zur Analyse organischer Körper gebräuchlich —, angesaugt. Der so erhaltene Ruß wird im Sauerstoffstrom verbrannt und aus der dabei entstandenen Kohlensäure der Kohlenstoff berechnet. Bei sehr starkem Rauche enthalten die Rauchgase etwa 2 Proz. des Kohlenstoffes der konsumierten Kohle.

Zur genauen analytischen Untersuchung der Rauchgase dient die von Dr. H. Bunte konstruierte Gasbürette (Journal für Gasbeleuchtung und Wasserversorgung 1877) und der Orsatsche Apparat von F. Fischer (Dinglers Polytechn. Journal, Bd. 227, S. 258). Die nachfolgenden Formeln betr. die Menge der Verbrennungsgase und der zugeführten Luft sind dem Ingenieur-Taschenbuch „Hütte“ entnommen.

Ergab die Gasanalyse:

k Proz.	Kohlensäure,
o „	Sauerstoff,
n „	Stickstoff,

so ist das Verhältnis der gebrauchten Luftmenge zu der theoretisch erforderlichen

$$(4a) \quad v = \frac{21 \cdot n}{21 \cdot n - 79 \cdot o} = \frac{21}{21 - 79 \cdot \frac{o}{n}}$$

Die tatsächlich verbrauchte Luftmenge kann in der Praxis auch aus dem Kohlensäuregehalt allein nach der Näherungsformel:

$$(4b) \quad v = \frac{18,9}{k}$$

bestimmt werden, indem man den Wert v mit der nach Formel 3, Seite 6, gefundenen theoretischen Luftmenge L multipliziert.

Die Menge der Verbrennungsprodukte wird folgendermaßen berechnet:

1 kg Kohle gibt:

$$(5) \quad \left\{ \begin{array}{l} 1,854 \cdot C = K \text{ cbm Kohlendioxid} \\ K o \frac{1}{k} = O \text{ " Sauerstoff} \\ K n \frac{1}{k} = N \text{ " Stickstoff} \end{array} \right.$$

von 0° bei 76 cm Druck.

Die Menge des in den Rauchgasen enthaltenen Wasserdampfes W wird berechnet aus dem Wassergehalt der Kohle w , dem durch Verbrennung des Wasserstoffs gebildeten Wasser ($9h$) und dem in der Verbrennungsluft enthaltenen Wasser. Die Gesamtmenge der Verbrennungsgase von 1 kg Kohle ist somit:

$$(6) \quad \begin{aligned} & 3,667 \cdot C + 1,430 \cdot O + 1,257 \cdot N + W \text{ kg} \\ & = K + \frac{K \cdot (o + n)}{k} + \frac{W}{0,805} \text{ cbm.} \end{aligned}$$

Wo man Undichtheiten des Mauerwerkes vermutet, ist es empfehlenswert, zur Feststellung derselben den Rost mit stark rauchendem Brennstoff frisch zu beschicken und den Zugschieber geschlossen zu lassen oder die offene Flamme eines am Mauerwerk entlang geführten Lichtes zu beobachten. Tritt Rauch durch die Mauerfugen, bezw. wird das Licht angesaugt, so ist obige Vermutung bestätigt.

1g. Ermittlung der Menge und des Wärmeverlustes der Herdrückstände.

Die Herdrückstände (Schlacken, Asche) werden während des Versuches gesammelt und am Ende desselben gewogen. Bei Bestimmung des Heizwertes bezw. des Wärmeverlustes der Herdrückstände werden für jedes Gramm Kohle, das dieselben nach Ausweis der chemischen Untersuchung noch enthielten, 8 *W. E.* gerechnet.

2a. Speisewassermenge und zur Verdampfung nötige Wärme.

Die Wägung des Speisewassers erfolgt in einem auf der Wage stehenden Behälter, in welchen man das Wasser in Mengen von etwa 500 bis 1000 kg aus der Leitung, bezw. dem Wasserreinigungsapparate einlaufen läßt. Behufs späterer Kontrolle muß die Zeit der Wägung, sowie Beginn und Ende einer jeden Speisung notiert werden. — Die Richtigkeit der Wage muß geprüft und ein event. Fehler in Korrektion gebracht werden.

Um weitere Korrekturen zu vermeiden, wird jeder Versuch so lange fortgesetzt, bis Wasserstand und Dampfspannung die gleichen

sind, wie zu Anfang des Versuches. Ferner ist es nicht gut, kurz vor Beginn, bezw. Schluß der Versuche den Kessel längere Zeit zu speisen, da dann gleiche Mischungs- und Temperaturverhältnisse schwer zu erzielen sind. Wenn obige Momente beobachtet werden, so wird der Wasserstand am Anfange und Schlusse der Versuche nur wenig schwanken, und außerdem wird die Temperatur und der Dampfgehalt des Kesselwassers in beiden Fällen nahezu gleich sein. Die durch ungleiche Wasserstandshöhe verursachten Fehler sind somit zu vernachlässigen. Eventuell auftretendes Tropfwasser muß in den Speisewasserbehälter zurückgeführt werden. — Rücklauf des Kesselwassers in den Speisewasserbehälter — bedingt durch undichte Ventile — muß vermieden werden. — Nicht benutzte, mit dem Kessel zusammenhängende Leitungen müssen durch Blindflanschen abgeschaltet werden, damit der Zutritt von nicht gewogenem, bezw. Austritt von nicht verdampftem Wasser unmöglich ist. Die Temperatur ist bei jeder Wägung des letzteren zu messen. Die Gesamtwärme des gesättigten Wasserdampfes, d. h. die Summe aus Flüssigkeits- und Verdampfungswärme (s. Des Ingenieurs Taschenbuch „Hütte“) wird durch die Regnaultsche Formel:

$$(7) \quad \lambda_1 = 606,5 + 0,305 t - s$$

Wärmeeinheiten ermittelt. Hierin bedeutet

t die der Fliegnerschen Tabelle entnommene Dampftemperatur und
 s die mittlere Speisewassertemperatur.

2 b. Dampffuchtigkeit.

Die Dampffuchtigkeit, d. h. das Verhältnis der vom Dampfe aus dem Kessel mitgerissenen Wassermenge zur Dampfmenge kann man auf folgende Weise bestimmen: In den Kessel wird eine 1,5 prozent. Kochsalzlösung eingespeist. Nach eintägigem Betriebe werden zwei Wasserproben gleichzeitig entnommen, die eine aus dem Kessel in der Nähe der Wasseroberfläche, die andere aus dem ersten Wasserabscheider der Dampfleitung; derselbe darf indes nicht auch vom Dampfe eines zweiten Kessels durchströmt werden. Diese Proben untersucht man auf ihren Salz- bezw. Chlorgehalt. Aus dem Salzgehalt im Dampfabscheider und demjenigen im Kessel berechnet man die Dampffuchtigkeit. Bei Entnahme des heißen Wassers aus dem Kessel bezw. dem Abscheider dürfen keine Verluste durch Verdampfung, die den Salzgehalt der Proben erhöhen würden, entstehen; dazu wendet man Kühlschlangen an, durch die das heiße Wasser fließt, bevor es in das Aufnahmegefäß gelangt. Die Ermittlung des Salz- bezw. Chlorgehaltes erfolgt durch Titrierung mit ein und derselben Lösung von Silbernitrat, wobei man Kaliummonochromat als Indikator benutzt. — Auf gleiche Weise ermittelt man den natürlichen Salzgehalt des Speise-

wassers. — Obiges Verfahren, mit Sorgfalt durchgeführt, wird in den meisten Fällen genügend genaue Resultate liefern.

2 c. Dampfspannung.

Die Betriebsspannung des Kessels ist durch ein Manometer, welches mit einem amtlich geprüften zu vergleichen ist, festzustellen, und die Angabe des Apparates entsprechend zu korrigieren. Die Dampfspannung muß alle zehn Minuten notiert werden und besonders am Anfang und Ende des Versuches denselben Wert haben.

3. Nutzeffekt eines Dampfkessels.

Der Nutzeffekt ergibt sich als Verhältnis:

$$(8) \frac{\text{der an den Kesselinhalt zur Dampfbildung abgegebenen Wärmemenge}}{\text{der in der verheizten Kohle enthaltenen Wärmemenge}}$$

Die erstere Größe (im Zähler des Bruches) ist die auf Seite 9 und 20 definierte Gesamtwärme, die nach der Regnaultschen Formel (7) mit Hilfe der Fliegnerschen Tabelle ermittelt wird.

Handelt es sich um überhitzten Dampf, so ist die gesamte nutzbar gemachte Wärme größer als die Gesamtwärme des gesättigten Dampfes. Die zusätzliche Wärmemenge der Überhitzung wird aus der Zahl der Überhitzungsgrade ermittelt; dieselbe läßt sich aus der gemessenen Dampfspannung und der gemessenen Temperatur des überhitzten Dampfes nach der Fliegnerschen Tabelle bestimmen. Die pro Kilogramm Dampf zugeführte Überhitzungswärme stellt sich als Produkt aus den Überhitzungsgraden und der spezifischen Wärme des überhitzten Dampfes dar. Für die letztere Größe kann der Wert 0,48 eingesetzt werden.

Die in der verheizten Kohle verfügbare Wärmemenge folgt aus der auf Seite 5 behandelten Heizwertbestimmung. Der Gang der Rechnung behufs Bestimmung des Nutzeffektes wird am besten durch das folgende Zahlenbeispiel erläutert.

Die Versuchsergebnisse einer Dampfkesseluntersuchung seien:

Brennmaterialverbrauch während der Versuchsdauer von 9,85 Stunden	1 664,00 kg
Herdrückstände (im Aschenabfall gesammelt)	139,50 „
dieselben in Prozenten der verheizten Kohle	
$\frac{139,50}{1664} =$	8,38
Kohlenstoff im Brennmaterial laut Analyse	47,91 Proz.
Verdampftes Speisewasser im ganzen	14 230,00 kg
Temperatur des Speisewassers	17,9° C.
Dampfspannung in Atmosphären absolut etwa	9,13 kg/qcm

1 kg Kohle verdampfte an Wasser:

$$\frac{14\,320}{1664} = 8,552 \text{ kg.}$$

Der Heizwert der verwendeten Kohle ist nach Formel (1) 7494 Kal.; danach berechnet sich die Wärmeausnutzung wie folgt: Die Gesamtwärme des Dampfes ergibt sich nach der Regnaultschen Formel (7) Seite 9. Die Temperatur (t) des Dampfes von der Spannung 9,13 Atmosphären ist nach der Fliegnerschen Tabelle 175° C. Da ferner die Temperatur des Speisewassers (s) 17,9° C. beträgt, so ergibt sich der Wärmewert von 1 kg Dampf zu:

$$\lambda_1 = 606,5 + 0,305 \cdot 175 - 17,9 = 641,9 \text{ Kal.}$$

Somit kommen auf 8,552 kg Dampf:

$$8,552 \cdot 641,9 = 5490 \text{ Kal.}$$

In den Herdrückständen gehen, wenn man 8 Kal. auf 1 g Kohle rechnet, pro Kilogramm Brennmaterial

$$83,8 \cdot 0,4791 \cdot 8 = 321 \text{ Kal.}$$

verloren.

Da in 1 kg Kohle 7494 Kal. enthalten sind, so ergibt sich folgende Wärmeverteilung:

Gesamtwärme von 1 kg Kohle	7494 Kal.
Zur Dampfbildung nutzbar gemachte Wärme . .	5490 „
Verloren in den Herdrückständen	321 „
Sonstige Verluste (freie Wärme im Kamin, Strahlung, unverbrannte Gase, Ruß u. s. w.) . . .	1683 „

Nutzeffekt des Kessels:

$$\frac{5490}{7494} = 0,733, \text{ d. h. } 73,3 \text{ Proz.}$$

Bei genauer Beobachtung der Momente unter 1 a bis g, 2 a bis c und 3 sind nur Fehler im Bereiche des Erlaubten möglich.

Prüfung eines liegenden Einflammrohrkessels mit Planrostinnenfeuerung und seitlichem Wellrohr (Blechwalzwerk Schulz-Knaudt, Aktiengesellschaft, Essen a. d. Ruhr¹).

I. Daten des Kessels.

Betriebsdruck 12 Atmosphären,
Heizfläche 60 qm.

¹) Die Prüfungsergebnisse sind dem „Offiziellen Berichte der Prüfungskommission der Elektrotechnischen Ausstellung in Frankfurt a. M. 1891“ entnommen, welcher der Verfasser als Assistent zugehörte.

Rostfläche 1,44 qm,
 Verdampfungsoberfläche 12,77 qm,
 Inhalt des Wasserraumes 15,2 cbm,
 Inhalt des Dampfraumes 4,4 cbm,
 Durchmesser des Wellblechflamrohr im Lichten 1250 bzw.
 1350 mm,
 Durchmesser des Kesselmantels im Lichten 2200 mm,
 Länge des Kesselmantels 7600 mm,
 Dicke des Kesselmantels und der Böden bzw. des Wellblech-
 flammrohres 25 bzw. 15 mm.

Die Längsnähte des Kesselmantels waren mit dreireihiger Doppel-
 laschennietung, die Rundnähte mit doppelreihiger Überlappungsnietung
 versehen. Die Einmündung der Speiseleitung erfolgte etwa 20 cm
 unter dem Wasserspiegel nahe am hinteren Kesselboden seitlich vom
 Flammrohrscheitel durch den Dampfraum, die Dampfentnahme an
 dem auf der hinteren Hälfte des Kessels befestigten Dome.

Die Fläche des Planrostes war etwas nach hinten geneigt und
 betrug deren Abstand vom Flammrohrscheitel etwa 80 cm.

Die Stärke des Mauerwerkes war:

für die Längsseite 64 cm,
 für die Rückseite 50 cm.

Der obere Teil des Kessels war durch Übermauerung und schlechte
 Wärmeleiter gegen Abkühlung geschützt.

An einer Längsseite des Kessels befand sich ein zweiter im Betrieb
 stehender Kessel, während die andere Seite frei stand.

II. Messungen und Ausrechnungen.

Kohlenmenge. Während einer Versuchsdauer von 9,858 Stunden
 wurde an Brennmaterial (gewaschene Nußkohle) 1705 kg verheizt; auf
 1 qm Rostfläche und eine Stunde berechnet betrug der Brennmaterial-
 verbrauch 120 kg.

Zusammensetzung der Kohle. Dieselbe betrug laut chemi-
 scher Untersuchung:

Kohlenstoff	80,08	Gewichtsprocente
Wasserstoff	4,44	"
Sauerstoff	4,61	"
Schwefel	1,30	"
Wasser	2,66	"
Asche	6,91	"

Heizwert der Kohle. Der Heizwert für 1 kg Kohle berechnet
 sich nach Formel 1 (Seite 5) wie folgt:

$$\frac{1}{100} \cdot \left\{ 8100 \cdot 80,08 + 29\,000 \cdot \left(4,44 - \frac{4,61}{8} \right) + 2500 \cdot 1,30 - 600 \cdot 2,66 \right\} = 7624 \text{ Kal.}$$

Erforderliche Luftmenge. Die theoretisch erforderliche Luftmenge pro Kilogramm Kohle ergibt sich nach Formel 3 (Seite 6) zu:

$$\left(\frac{8}{3} \cdot 0,8008 + 8 \cdot 0,0444 + 0,013 - 0,0461 \right) \cdot \frac{100}{30} = 8,2 \text{ cbm.}$$

Die tatsächlich verbrauchte Luftmenge wurde aus dem Kohlensäuregehalt der Abgase unmittelbar hinter der Feuerbrücke bzw. am Ende des Kessels ermittelt.

Die beiden Messungen gaben einen Kohlensäuregehalt k von 15,12 bzw. 11,92 Volumprozent. Nach Formel 4 b (Seite 7)

$$v = \frac{18,9}{k}$$

folgt aus obigen Zahlen ein Vielfaches (v) der verbrauchten Luftmenge gegenüber der theoretischen von:

1,25 hinter der Feuerbrücke,
1,588 am Ende des Kessels.

Die verbrauchten Luftmengen sind danach:

$$1,25 \cdot 8,2 = 10,25 \text{ cbm hinter der Feuerbrücke,}$$

$$1,588 \cdot 8,2 = 13 \text{ cbm am Ende des Kessels.}$$

Aus diesen beiden Ziffern geht hervor, daß in den Feuerzügen durch die Fugen des Mauerwerks noch 27 Proz. Luft nachgesaugt wurden.

Die Zugstärke in Millimeter Wassersäule betrug im Fuchs 8,48.

Temperaturen. Die Temperatur der eintretenden Luft wurde zu 27,4° C., die Temperatur der Abgase am Kesselende zu 314,7° C. gemessen, die letztere mittels eines Quecksilberpyrometers mit Stickstofffüllung.

Herdrückstände. Die Herdrückstände, die sich während des Versuches im Aschenfall ansammelten, hatten ein Gewicht von 273,6 kg, in Prozenten der verheizten Kohle 8,035.

Der Gehalt an Kohlenstoff betrug nach der chemischen Analyse 41,41 Proz.

Speisewasser. Das Speisewasser wurde durch Beobachtung des auf einer Wage stehenden Entnahmebehälters bestimmt. Es wurden im ganzen 14 694 kg verbraucht. Die Verdampfung pro Quadratmeter Heizfläche und Stunde war somit

$$\frac{14\,694}{60 \cdot 9,858} = 24,85.$$

Die Temperatur des Speisewassers betrug im Mittel $17,75^{\circ}\text{C}$.

Die Dampfspannung in Atmosphären Überdruck, mittels des hierzu besonders geeichten Betriebsmanometers gemessen, war im Mittel $8,465\text{ kg/qcm}$, absolut $9,465\text{ kg/qcm}$. 1 kg Kohle verdampfte an Wasser

$$\frac{14694}{1705} = 8,62\text{ kg.}$$

Auf Grund der vorstehenden Daten kann der Wirkungsgrad des Kessels und die Wärmeverteilung berechnet werden.

Die dem Wasser zugeführte Wärme ermittelt sich nach der Regnaultschen Gleichung (7) (siehe S. 9 und 11) wie folgt:

Der Dampfspannung $9,465\text{ kg/qcm}$ entspricht für gesättigten Dampf eine Dampftemperatur von $t = 176,52^{\circ}\text{C}$. Daher ist die Gesamtwärme λ_1 des Dampfes pro Kilogramm:

$$606,5 + 0,305 \cdot 176,52 - 17,75 = 642,59\text{ Kal.}$$

Bei einer Dampferzeugung von $8,62\text{ kg}$ pro Kilogramm Kohle beträgt die aufzuwendende Wärmemenge

$$8,62 \cdot 642,59 = 5539\text{ Kal.}$$

In den Herdrückständen gehen pro Kilogramm Brennmaterial verloren (siehe S. 8, 11 und 13)

$$80,35 \cdot 0,4141 \cdot 8 = 266\text{ Kal.}$$

Hieraus ergibt sich folgende Wärmeverteilung:

Gesamtwärme von 1 kg Kohle	7624 Kal.
Zur Dampfbildung nutzbar gemacht	5539 "
In den Herdrückständen verloren	266 "
Sonstige Verluste (durch freie Wärme im Kamin, Strahlung, unverbrannte Gase u. s. w.)	
$7624 - (5539 + 266) =$	1819 "

Der Nutzeffekt des Kessels ist somit:

$$\frac{5539}{7624} = 0,727.$$

Sämtliche vorstehenden Versuchsdaten und somit auch die berechneten Werte sind Mittelwerte aus zwei unter möglichst gleichen Umständen durchgeführten Dauerversuchen.

(Weitere Beispiele siehe Kapitel N.)

B. Dampfmaschinen.

Allgemeines.

Im Kapitel „Dampfmaschinen“ handelt es sich zunächst um Feststellung der von der Dampfmaschine abgegebenen mechanischen Arbeit, der indizierten Arbeit, des Wirkungsgrades, d. h. des Verhältnisses der durch die Bremsung zu ermittelnden Nutzarbeit zu der durch den Indikator zu bestimmenden indizierten Arbeit, fernerhin um Bestimmung des Dampfverbrauches und Vergleichung desselben mit der geleisteten Arbeit der Dampfmaschine. Wo in den unten folgenden Beispielen vollständige Zentralstationen, bestehend aus Dampfkessel, Dampfmaschine und Dynamo, in Frage kommen, konnten die verschiedenen Untersuchungen zu einem Ganzen — und zwar ausgehend von der in der Kohle aufgespeicherten Wärmeenergie bis zu der nutzbaren elektrischen Energie — vereinigt werden. Vielfach wurden auch die Untersuchungen der Dampfmaschine und des elektrischen Teiles getrennt behandelt. Auf diesem letzten Wege konnten die einzelnen Maschinen der Anlage zum Teil in der Fabrik geprüft werden. Bei einzelnen Anlagen verdient vermöge der Vertragsbestimmungen der eine oder andere Teil der Anlage besonderes Interesse und wurde alsdann nur dieser einer eingehenden Prüfung unterzogen. Um dem Leser ein Urteil über gute und schlechte Maschinen zu gewähren, haben naturgemäß auch die Prüfungen an letzteren Aufnahme gefunden. Für die Untersuchungen selbst gelten die Grundsätze und Anleitungen, welche von der gemeinschaftlichen Kommission des Vereins deutscher Ingenieure und des Verbandes der Dampfkesselüberwachungsvereine festgestellt sind.

1. Theoretischer Teil.

Die indizierte oder theoretische Leistung einer Dampfmaschine ist die Arbeit, welche der Dampf direkt auf den Kolben bei normaler Tourenzahl bzw. Kolbengeschwindigkeit überträgt. Diese Leistung ist aus den Indikator diagrammen zu berechnen. Die Art der Dampfverteilung, wie dieselbe aus dem Diagramm hervorgeht, ist im Abschnitt 3 dieses Kapitels näher besprochen. Die Reibungswiderstände der Maschinenteile kommen bei der indizierten Leistung nicht zur Geltung. Die mittlere Spannung p_r zur Überwindung der Reibungswiderstände ist nach Werner

$$(1) \quad p_r = 0,08 \cdot (2,35 + p_i)$$

woselbst p_i die mittlere indizierte Spannung bedeutet.

Bezeichnet n die Tourenzahl, s den Kolbenhub in Meter, O die wirksame Oberfläche des Kolbens in Quadratmeter, so ist die indizierte

Leistung der Dampfmaschine gegeben durch:

$$(2) \quad \dots \quad N_i = \frac{O \cdot 10000 \cdot p_i \cdot 2 \cdot s \cdot n}{60 \cdot 75} = 4,444 \cdot p_i \cdot O \cdot n \cdot s.$$

Es sei d der innere Durchmesser des Cylinders, d_s der Durchmesser der Kolbenstange in Meter, so gilt für die wirksame Kolbenfläche:

$$(3) \quad \dots \quad \dot{O} = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 - \frac{\pi}{4} \cdot d_s^2 = \frac{\pi}{4} \cdot (d^2 - d_s^2).$$

Ist die Kolbenstange nicht durchgehend oder hat dieselbe auf einer Seite einen anderen, kleineren Durchmesser wie d_s , so ist die wirksame Kolbenfläche auf beiden Seiten verschieden. Ist O_k bzw. O_d die Kolbenfläche auf der Kurbel- bzw. Deckelseite, so sind die indizierten Pferdestärken $(N_i)_k$ und $(N_i)_d$, — (entsprechend den mittleren indizierten Spannungen $(p_i)_k$ und $(p_i)_d$) —:

$$(4a) \quad \dots \quad (N_i)_k = 2,222 \cdot (O)_k \cdot n \cdot s \cdot (p_i)_k$$

und

$$(4b) \quad \dots \quad (N_i)_d = 2,222 \cdot (O)_d \cdot n \cdot s \cdot (p_i)_d.$$

In den meisten Fällen ist es am besten, das Mittel von $(p_i)_k$ und $(p_i)_d$ zu nehmen.

Gut konstruierte Maschinen sollen auf dem Vor- und Rückgange des Kolbens möglichst dieselbe Arbeit leisten; bei stehenden Maschinen ist meistens das Eigengewicht der hin und her gehenden Teile durch Veränderung der beiden Kolbenstangendurchmesser zweckmäßig ausgeglichen. Aus dem Diagramm kann man den indizierten oder sichtbaren Dampfverbrauch ermitteln.

$O \cdot s$ ist die Größe des Kolbenwegraumes in Kubikmeter. Der schädliche Raum wird in Prozenten des Kolbenweges bzw. der Diagrammlänge gegeben (etwa $\frac{1}{20}$ von der Länge des Diagrammes), somit auf den Cylinderquerschnitt reduziert. Diese Länge wird an der einen Seite des Diagramms als Verhältnis (m) angetragen. Ist der Dampf gesättigt, so läßt sich zu jeder Spannung das spezifische Gewicht (d. h. Gewicht pro Kubikmeter) aus der Fliegnerschen Tabelle aufsuchen.

Die Dampfmenge, welche bei einem Hube im Cylinder zurückbleibt und darauf an der Kompression teilnimmt, ist zu subtrahieren von der jedesmaligen Füllungsmenge bei Dampfeintritt, um den Dampfverbrauch pro Hub zu erhalten.

Es sei (siehe hierzu Fig. 1):

p_a die mittlere Admissions- oder Dampfeintrittsspannung,

γ_a das dazu gehörige spezifische Gewicht des Dampfes,

p_1 die Kompressionsspannung,

γ_1 das dazugehörige spezifische Gewicht des Dampfes,

p_2 die absolute Expansionsspannung am Ende der Expansion,

γ_2 das dazugehörige spezifische Gewicht,

s_1 Füllungsweg in Meter,

s Kolbenhub in Meter,

m der Koeffizient des schädlichen Raumes,

$\frac{s_1}{s} = \varepsilon$ das Füllungsverhältnis, dann ist das Füllungsvolumen

gegeben durch:

$$O \cdot (s_1 + s \cdot m) \text{ in Kubikmeter,}$$

wobei $O \cdot s \cdot m$ die Größe für den schädlichen Raum bezeichnet. Dieses Füllungsvolumen, multipliziert mit γ_a , gibt den Dampfverbrauch, einschließlich der Dampfmenge im schädlichen Raum bei der Kompressionsspannung p_1 ; demnach beträgt der indizierte Dampfverbrauch pro einfache Füllung in Kilogramm:

$$(5a) \quad D_i = O \cdot (s_1 + s \cdot m) \cdot \gamma_a - O \cdot s \cdot m \cdot \gamma_1 \\ = O \cdot [s_1 \cdot \gamma_a + s \cdot m \cdot (\gamma_a - \gamma_1)],$$

für $s_1 = s$ wird:

$$(5b) \quad D_i = O \cdot s [(1 + m) \cdot \gamma_a - m \cdot \gamma_1].$$

Man kann den Dampfverbrauch auch statt durch die spezifischen Gewichte γ_a und γ_1 durch γ_2 und γ_1 ausdrücken; die Formel lautet alsdann:

$$(6) \quad D_i = O \cdot s \cdot \{(1 + m) \cdot \gamma_2 - m \cdot \gamma_1\}.$$

Hierbei ist die Voraussetzung gemacht, daß Punkt 2 in Fig. 1 mit dem Hubende zusammenfalle, eine Annäherung, die in den meisten Fällen statthaft erscheint.

Dieser indizierte Dampfverbrauch ist verschieden von dem wirklichen Dampfverbrauch. In jeder Maschine sind Dampf- und Wärmeverluste bedingt durch Undichtheiten an Kolben, Stopfbüchsen und Dampfverteilungsorganen, ferner durch die schädlichen Räume im Cylinder, die Wärmeausstrahlung des Cylinders, die Auspuffwärme, sowie durch mechanisch aus dem Kessel mitgerissenes Wasser und Kondensation des Dampfes infolge Abkühlung in der Dampfleitung und im Cylinder; diese letzteren Verluste sind die wesentlicheren. Was die Verluste durch Undichtheiten betrifft, so können dieselben durch starkes Anbremsen der Kolbenringe vermindert werden; hierdurch werden jedoch die Reibungs-

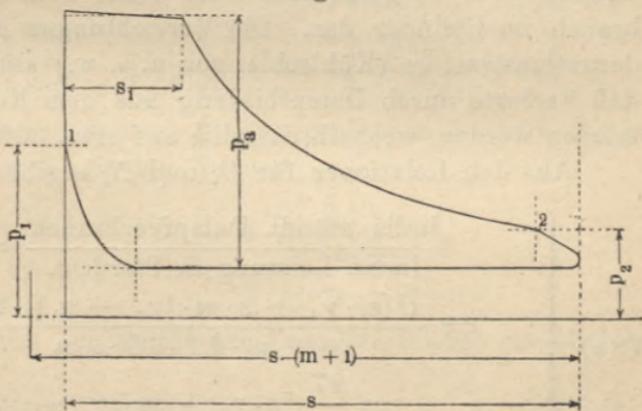


Fig. 1.

widerstände erhöht und infolgedessen der Nutzeffekt herabgesetzt, weshalb nur eine geringe Anbremsung der Kolbenringe ratsam ist.

Die Dichtheit der Kolben wird in zweckmäßiger Weise dadurch erzielt, daß man die Differenz zwischen Vorder- und Hinterdruck gering macht, was bei starker Anfangsspannung nur durch das Compoundprinzip möglich ist; hierbei wird die Druckdifferenz auf zwei Kolben verteilt. Völckers gibt den Gesamtdampfverlust für die ganze Leistung — in Abhängigkeit vom Cylinderdurchmesser d in Zentimeter und der mittleren indizierten Spannung p_i — durch die Formel:

$$(7) \quad 4,5 \cdot d \cdot \sqrt{p_i} \text{ Kilogramm pro Stunde } ^1).$$

Die Berechnung des Dampfverlustes nach der Völcker'schen Formel und des indizierten Dampfverbrauchs aus den Diagrammen ergibt den wirklichen Dampfverbrauch. Genauere Resultate erhält man durch Wägung des Speisewassers.

Die Speisungen müssen regelmäßig und möglichst ununterbrochen geschehen; kurz vor Beginn und kurz vor Schluß des Versuchs sind Speisungen zu vermeiden. Die Temperatur des Speisewassers ist kurz vor dem Eintritt in den Kessel bei jeder Speisung zu messen; alles Leckwasser an den Kesselgarnituren, sowie etwa ausgeblasenes Wasser ist aufzufangen und in Rechnung zu bringen. Eine Kontrolle des indizierten Dampfverbrauchs ergibt sich durch Bestimmung der Menge und der Temperatur des Kondensationswassers. Das Kondensationswasser der Dampfleitung soll vor dem Eintritt in die Maschine bezw. den Überhitzer abgefangen und von der Speisewassermenge abgezogen werden. Der so gefundene Wert stellt den tatsächlichen Dampfverbrauch im Cylinder dar. Die Vorrichtungen zum Abfangen des Kondensationswassers (Kühlschlangen u. s. w.) sind derartig einzurichten, daß Verluste durch Dampfbildung aus dem Kondensationswasser vermieden werden, weshalb dasselbe auf etwa 30° C. abzukühlen ist.

Aus den Relationen für D_i und N_i ergibt sich das Verhältnis:

$$(8a) \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{\text{Indiz. stündl. Dampfverbrauch}}{\text{Indiz. Leistung in Pferdest.}} = \frac{D_i}{N_i} = \\ = \frac{O [s_1 \cdot \gamma_a + s \cdot m \cdot (\gamma_a - \gamma_1)] \cdot 2 \cdot n \cdot 60}{p_i \cdot 4,444 \cdot O \cdot s \cdot n} = \\ = \frac{27}{p_i} \cdot [\varepsilon \cdot \gamma_a + m \cdot (\gamma_a - \gamma_1)] = \\ = \text{Dampfverbrauch in Kilogramm pro Stunde und Pferdestärke.} \end{array} \right.$$

¹⁾ Eine genaue theoretische Ermittlung der Dampfverluste ist nicht möglich; nähere Angaben hierüber siehe: Des Ingenieurs Taschenbuch „Hütte“, sowie: J. Hrabák und A. Kás, Hilfsbuch für Dampfmaschinen-Techniker.

Für $s_1 = s$ ist:

$$(8b) \quad \dots \quad \frac{D_i}{N_i} = \frac{27}{p_i} \cdot [(1 + m) \cdot \gamma_a - m \cdot \gamma_1].$$

Die Anwendung der Formel soll schon hier an einem Beispiel gezeigt werden: Die indizierte Leistung einer einzylindrigen Auspuffmaschine sei $N_i = 100$ PS; die mittlere absolute Admisionsspannung sei $p_a = 8$; die Endexpansionsspannung sei $p_2 = 1,6$, das Füllungsverhältnis $\varepsilon = \frac{1}{5}$, die mittlere indizierte Spannung $p_i = 3,06$, die Kompressionsspannung $p_1 = 5$, der Koeffizient des schädlichen Raumes endlich $m = 0,04$.

Aus der Fliegnerischen Tabelle findet man die Werte $\gamma_a = 4,1034$ und $\gamma_1 = 2,6412$ zu den entsprechenden Werten von p_a und p_1 . Mit Einsetzung dieser Größen ergibt sich der Dampfverbrauch pro Pferdekraft und Stunde zu:

$$\frac{D_i}{N_i} = \frac{27}{3,06} \cdot \left[\frac{1}{5} \cdot 4,1034 + 0,04 \cdot 1,4622 \right] = 7,76 \text{ kg.}$$

Unter Zuhilfenahme der Formel (6) für den Dampfverbrauch D_i erhält man:

$$(9) \quad \dots \quad \frac{D_i}{N_i} = \frac{27}{p_i} \cdot \{(1 + m) \cdot \gamma_2 - m \cdot \gamma_1\}.$$

Ist die Leistung auf der Deckel- und Kurbelseite verschieden, so ist der wirkliche Wert das Mittel aus beiden $\left(\frac{D_i}{N_i}\right)_d$ und $\left(\frac{D_i}{N_i}\right)_k$:

$$(10) \quad \frac{D_i}{N_i} = \frac{1}{(N_i)_k + (N_i)_d} \cdot \left[\left(\frac{D_i}{N_i}\right)_k \cdot (N_i)_k + \left(\frac{D_i}{N_i}\right)_d \cdot (N_i)_d \right].$$

Der Dampfverbrauch ist nach Grove größer und müßte der gefundene Wert D_i/N_i noch mit dem Faktor:

$$(11) \quad \dots \quad 1,1 \cdot \left(1 + \alpha \cdot \beta \cdot \frac{1 + \frac{0,1}{\varepsilon}}{2 + c_m} \right)$$

multipliziert werden, um den wirklichen Dampfverbrauch zu erhalten; hierin ist:

$\alpha = 1$, bzw. 0,87 bei Maschinen ohne bzw. mit Dampfmantel
und $\beta = 1$, „ 0,70 „ „ mit „ ohne Kondensation
zu setzen, während c_m die mittlere Kolbengeschwindigkeit bedeutet:

$$(12) \quad \dots \quad c_m = \frac{s \cdot n}{30}.$$

Wenden wir diese Korrektur auf das obige Beispiel an, so erhalten wir folgendes: Da die Maschine keinen Dampfmantel besitzt, so

ist $\alpha = 1$; da die Maschine mit Auspuff arbeitet, so ist $\beta = 0,70$; $c_m = 3$ m/sec. Der Korrektionsfaktor hat demnach den Wert:

$$1,1 \cdot \left(1 + 1 \cdot 0,70 \frac{1 + 0,1 \cdot 5}{2 + 3} \right) = 1,33$$

und der korrigierte (wirkliche) Dampfverbrauch wäre

$$z \cdot \frac{D_i}{N_i} = 7,76 \cdot 1,33 = 10,3 \text{ kg,}$$

somit um etwa 33 Proz. größer.

Man kann auch den Dampfverlust nach Formel (7), S. 18 berechnen. Dieselbe ergibt, da der Cylinderdurchmesser 31 cm beträgt, einen Verlust von:

$$4,5 \cdot 31 \cdot \sqrt{3,06} = 244 \text{ kg oder pro Pferd } \frac{244}{100} = 2,44 \text{ kg.}$$

Addiert man diesen Dampfverlust zu dem oben ermittelten theoretischen Dampfverbrauch 7,76 kg, so erhält man den wirklichen Dampfverbrauch zu 10,18 kg, ein Resultat, das mit der Korrektion nach Grove ziemlich gut übereinstimmt (siehe oben).

Der Dampfverbrauch läßt sich auch an der Hand bekannter Formeln auf anderem, theoretischem, Wege und zwar aus den Fliegnerischen Tabellenwerten bzw. der Regnaultschen und der Krauseschen Formel ermitteln. Es bezeichnen: A das Wärmeäquivalent der Arbeitseinheit

$$(13) \quad \dots \dots \dots 1/A = 424 \text{ mkg,}$$

q die Flüssigkeitswärme des Wassers, d. h. diejenige Wärmemenge, welche einem Kilogramm desselben zugeführt werden muß, um die Temperatur desselben ohne Änderung der Aggregatform von 0^0 auf t^0 zu erhöhen, r die Verdampfungswärme, bzw. latente Wärme, d. h. diejenige Wärmemenge, welche erforderlich ist, um 1 kg Wasser von t^0 entgegen dem konstanten äußeren Drucke in Dampf von der Temperatur t^0 zu verwandeln, λ die Gesamtwärme, d. h. die Summe aus der Flüssigkeits- und der Verdampfungswärme, ϱ die innere Verdampfungswärme, das ist der Teil der Verdampfungswärme, welcher zur Vermehrung der inneren Wärme verwandt wird, J die Dampfwärme, d. i. die Differenz der in 1 kg Dampf von t^0 und der in 1 kg Wasser von 0^0 enthaltenen Wärmemengen, p den spezifischen Druck des Wasserdampfes in Kilogramm pro Quadratcentimeter, v das Volumen von 1 kg des Dampfes in Kubikmeter, $\gamma = \frac{1}{v}$ das Gewicht von 1 cbm des Dampfes in Kilogramm, w das Volumen von 1 kg Wasser in Kubikmeter, u die Differenz $v - w$, so bestehen folgende Relationen:

$$(14) \quad \dots \dots \dots \lambda = q + \varrho + A \cdot p \cdot u;$$

hierin bedeutet $A \cdot p \cdot u$ die äußere Verdampfungswärme, d. h. den

Wärmewert der bei der Verdampfung von 1 kg Wasser zur Überwindung des konstanten äußeren Druckes verwandten Arbeit.

$$(15) \dots \dots \dots r = q + A \cdot p \cdot u,$$

$$(16) \dots \dots \dots J = q + q.$$

Außerdem besteht, wie schon oben (S. 9) erwähnt, nach Regnault für die Gesamtwärme des Dampfes:

$$(17) \dots \dots \lambda = 606,5 + 0,305 \cdot t \text{ Wärmeeinheiten,}$$

woselbst t die aus der Fliegnerschen Tabelle entnommene Dampf-temperatur bedeutet. Für die Beziehungen (14), (15) und (16) findet man für jede Dampfspannung oder Temperatur die entsprechenden Werte in der Fliegnerschen Tabelle in Kalorien angegeben. Den Dampfverbrauch pro Pferdekraftstunde erhält man mit Hilfe der Krauseschen Formel (Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure 1890, Nr. VII):

$$(18) \quad 75 \cdot 60 \cdot 60 \cdot A + 9780 \cdot \frac{p_2}{p_i} = C_1 \text{ (Kalorien pro Pferdekraftstd.)}$$

für Auspuffmaschinen bezw.

$$(19) \quad 75 \cdot 60 \cdot 60 \cdot A + 10600 \cdot \frac{p_2}{p_i} = C'_1 \text{ Kalorien}$$

für Kondensationsmaschinen.

Da nun die Anzahl Kalorien pro Kilogramm Dampf durch λ und ferner die erforderlichen Kalorien pro Pferdekraftstunde durch C_1 bezw. C'_1 gegeben sind, so erhält man den Dampfverbrauch in Kilogramm pro Pferdekraftstunde durch das Verhältnis:

$$(20) \dots \dots \dots \frac{C_1}{\lambda} \text{ bezw. } \frac{C'_1}{\lambda},$$

oder unter Mitberücksichtigung der Temperatur des Speisewassers nach Formel (7), S. 9:

$$(21) \dots \dots \dots \frac{C_1}{\lambda_1} \text{ bezw. } \frac{C'_1}{\lambda_1}.$$

Für unser obiges Beispiel würde die Krausesche Formel nachstehendes ergeben:

$$C_1 = 630 + 9780 \cdot \frac{1,6}{3,06} = 5740 \text{ Kalorien}$$

Gesamtwärme, die im Dampf enthalten ist.

Nun sind zur Erzeugung von 1 kg Dampf von 8 Atm. nach der Fliegnerschen Tabelle 658 Kal. erforderlich. Daraus berechnet sich der Dampfverbrauch pro Pferdekraft und Stunde bei der Speisewasser-temperatur von 0° C. zu:

$$\frac{5740}{658} = 8,72 \text{ kg.}$$

Man wird zu dem wirklichen Dampfverbrauch bei den meisten Maschinen gelangen, wenn man zu dem so ausgerechneten Wert noch etwa 10 Proz. hinzurechnet.

In der Praxis spielt die Kenntnis der vorstehenden Beziehungen keine so große Rolle wie die ökonomische Leistung oder das Güteverhältnis einer Dampfmaschine. Letzteres ergibt sich als der Quotient aus der unter normalen Verhältnissen produzierten Nutzleistung N_e in Pferdestärken und dem dabei pro Stunde verbrauchten Speisewasserquantum (gleichbedeutend mit Dampfverbrauch). Zur Feststellung dieses Verhältnisses müssen wir uns daher zunächst über die Nutz- oder Effektivleistung klar werden. Diese Nutzleistung kann durch Rechnung und auf mechanischem Wege durch Bremsung ermittelt werden. Es sind hierbei der Querschnitt des Cylinders, der mittlere Nutzdruck, der Füllungsgrad, die Kolbengeschwindigkeit und der Wirkungsgrad der Dampfmaschine maßgebende Faktoren.

Von diesen Faktoren sind alle außer dem Nutzdruck und dem Füllungsgrade als bekannt anzunehmen. Zur Ermittlung dieser müssen wir den Druck oder die Spannung des Dampfes, womit derselbe in die Maschine eintritt, und ferner das verhältnismäßige Cylindervolumen, welches der Dampf erfüllt, bevor er seine Expansion beginnt, kennen. Der Volldruck des Dampfes im Cylinder ist kleiner als der im Kessel, und zwar hängt das Verhältnis dieser beiden Größen ab von der Länge und dem Querschnitt der Dampfleitung. Bezeichnet man den Volldruck im Cylinder oder den mittleren Admissionsdruck mit p_a und denjenigen im Kessel mit p_k , so gelten nach Hrabák die empirischen Beziehungen:

$$(22) \quad \dots \dots \begin{cases} p_a = 0,8 p_k \text{ für Maschinen, welche durch Dampf-} \\ \text{drosseln regulieren, und} \\ p_a = 0,9 p_k \text{ für Maschinen, welche mit selbsttätig} \\ \text{variabler Füllung regulieren.} \end{cases}$$

Der absolute mittlere Arbeitsdruck p_{i0} im Cylinder bestimmt sich aus dem Diagramm, wie später gezeigt wird.

Der mittlere Nutzdruck p_n ist definiert durch die Beziehung

$$(23) \quad \dots \dots \dots N_e = 4,44 \cdot O \cdot p_n \cdot n \cdot s,$$

welche analog der Formel für die indizierte Leistung

$$N_i = 4,44 \cdot O \cdot p_i \cdot n \cdot s$$

gebildet ist.

Da $\frac{N_e}{N_i} = \eta$, so ist auf Grund obiger Gleichungen p_n auch definiert als

$$p_n = \eta \cdot p_i$$

p_i wird nach dem später beschriebenen Verfahren (S. 24 u. f.) aus der Fläche des Diagrammes ermittelt, wie Fig. 2 darstellt. Der oben

erwähnte absolute mittlere Arbeitsdruck p_{i0} dagegen entspricht der Diagrammfläche unter Hinzurechnung des Flächenstückes bis zur absoluten Nulllinie (siehe Fig. 3).

Man kann obiger Formel für p_n auch die Gestalt geben:

$$(24) \quad \dots \dots \dots p_n = \eta \cdot (p_{i0} - p_g),$$

worin p_g den mittleren Gegendruck vor dem Kolben bedeutet; mit Einsetzung empirischer Werte für diesen Gegendruck ($p_g = 1,1$ bzw. $0,2$ Atm.) lautet die Formel alsdann:

1. für Maschinen mit freiem Auspuff:

$$(25a) \quad \dots \dots \dots p_n = \eta \cdot (p_{i0} - 1,1) \text{ Atm.};$$

2. für Maschinen mit Kondensation:

$$(25b) \quad \dots \dots \dots p_n = \eta \cdot (p_{i0} - 0,2) \text{ Atm.}$$

Aus diesen empirischen Werten kann unter Zuhilfenahme des Diagrammes nach Formel (23) die Nutzleistung N_e berechnet werden.

Fig. 2.

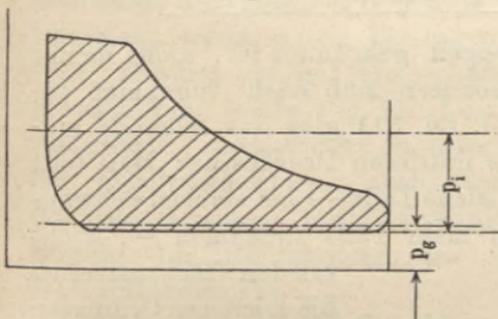
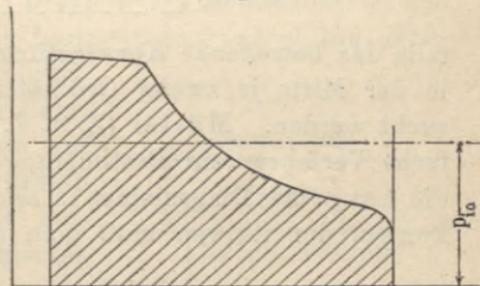


Fig. 3.



Die Nutzleistung und der Wirkungsgrad werden jedoch gewöhnlich experimentell durch gleichzeitige Ermittlung der indizierten Leistung, d. h. durch Aufnahme von Indikatordiagrammen und durch Bremsung der Maschine bestimmt; der Wirkungsgrad ergibt sich als das Verhältnis der Nutzleistung zur indizierten Leistung und ist um so größer, je geringer die passiven Widerstände der Maschine sind.

Im Hrabák und Kásschen Hilfsbuch über Dampfmaschinen finden sich einige empirische Näherungswerte für η je nach der Größe der Maschinenleistung für normal eingerichtete Maschinen.

2. Berechnung des mittleren indizierten Druckes aus den Indikatordiagrammen.

Aus einem Diagramm ermittelt man den mittleren Druck p_i auf folgende Weise:

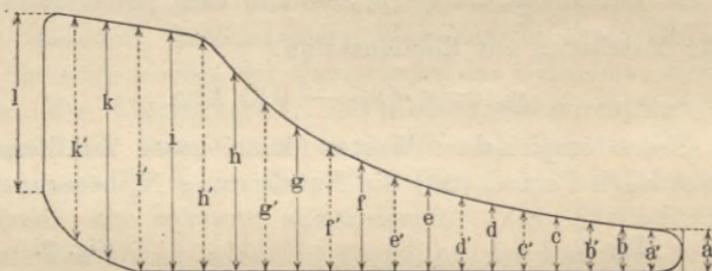
Man teilt die Basis des Diagrammes, d. i. der Dampfarbeitsfläche, in eine gerade Anzahl von mindestens zehn gleichen Teilen und er-

richtet in den Teilpunkten (siehe Fig. 4) die Senkrechten a, b u. s. w., deren Längen nach einer für die Atmosphäre angenommenen beliebigen Maßeinheit gemessen werden, also z. B. nach Zentimetern, und erhält so für den mittleren Druck den Wert:

$$\frac{1}{10} \cdot \left(\frac{a + l}{2} + k + i + h + g + f + e + d + c + b \right)$$

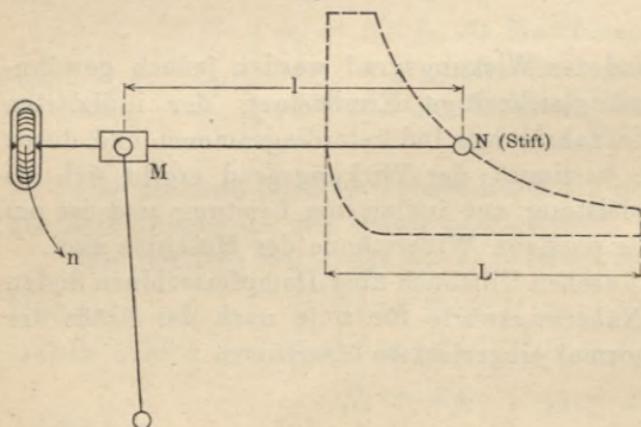
Hat das Diagramm eine in scharfen Krümmungen sich darstellende unregelmäßige Form, so muß man zwischen je zwei Ordinaten den Mittelwert direkt mit dem Zirkel abnehmen; dieser Mittelwert liegt,

Fig. 4.



falls das betreffende Kurvenstück doppelt gekrümmt ist, nicht immer in der Mitte je zweier Ordinaten, sondern muß nach Augenmaß gesucht werden. Müller (Z. d. V. D. I. Bd. 31) gibt das folgende einfache Verfahren zur Bestimmung des mittleren Druckes an: Man teilt die Länge des Diagrammes in zehn gleiche Teile — bei starken Schwankungen der Kurven muß man noch mehr Teile annehmen —, sticht

Fig. 5.



von den Flächenstreifen die mittleren Ordinaten mit dem Zirkel ab und addiert sie — ebenfalls mit dem Zirkel —, indem man die Längen $a_1 + b_1 + \dots + k_1$ (s. Fig. 4) aneinander anträgt und die Summe durch die Anzahl der Ordinaten dividiert. Beträgt z. B. die Gesamtlänge 200 mm, die Anzahl der Ordinaten 10

und ist der Maßstab der Indikatorfeder 10 mm = 1 kg pro Quadratcentimeter, so ist der mittlere Druck:

$$\frac{200}{10 \times 10} = 2,0 \text{ kg.}$$

Falls man ein Polarplanimeter zur Verfügung hat, ist die Feststellung des mittleren Druckes sehr einfach: Die mit dem Stifte N des

Apparates umschriebene Fläche ist proportional dem Produkte aus dem Wege u , d. h. dem Umfangswege, den das Planimeterrädchen während der Umschreibung der Fläche ausführt, und der Länge l des Armes MN . Der Bogen u ist an einer auf dem Rädchen angebrachten Kreisteilung leicht abzulesen. Die Länge l ist verstellbar.

Macht man $MN =$ der Länge L des Diagrammes, so liest man an dem Rädchen sofort die mittlere Höhe, bezw. den mittleren Druck ab, wie folgende Beziehungen beweisen:

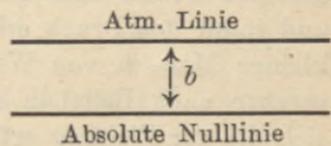
$$\text{Fläche } F = u \cdot L.$$

$$u = \frac{F}{L} = h = \text{Mittlere Höhe des Diagrammes.}$$

Der Indikatordruck mißt den Überdruck über die Atmosphäre. Vor dem Öffnen des Indikatorhahns ist der Überdruck gleich 0 und erhält man durch Andrücken des Indikatorstiftes N die Luftdrucklinie oder atmosphärische Linie.

Um den absoluten Druck zu erhalten, muß man den durch das Barometer angegebenen Luftdruck zum Dampfdruck hinzuaddieren, was graphisch leicht durch Eintragen der horizontalen „absoluten Nulllinie“ abwärts von der Atmosphärenlinie geschehen kann (siehe Fig. 6). b ist der Barometerstand, ausgedrückt in Kilogramm auf den Quadratcentimeter nach dem Maßstab des Diagrammes. Diese Nulllinie ist notwendig bei Bestimmung des indizierten Dampfüberdruckes.

Fig. 6.



Hat man eine Anzahl Diagramme aufgenommen, so stellt man behufs Berechnung folgende Tabelle auf und trägt die einzelnen Werte für jedes Diagramm ein:

Nr.	Fläche in qmm	Diagrammlänge	Mittlere Höhe	Mittlerer Druck	Indizierte Leistung

Über die Eichung einer Indikatorfeder möge an dieser Stelle noch kurz einiges gesagt sein, da eine häufige Kontrolle der Angaben der Federn unerlässlich ist. Bei einer längeren Versuchsdauer ist die Eichung vor und nach den Versuchen vorzunehmen; ergeben sich Unterschiede in den Angaben, so ist für den ganzen Versuch der Mittelwert der Eichungskonstanten maßgebend. Die Eichung einer Indikatorfeder hat entweder durch direkte Belastung oder an offenen Quecksilber- bezw. Justiermanometern bei einer der mittleren Dampf-

spannung des Versuches entsprechenden Temperatur zu erfolgen¹⁾. Eine Einrichtung zur Eichung einer Indikatorfeder unter Dampf sei nachstehend näher beschrieben.

Von dem Dampfkessel wird ein kleines Dampfrohr zu einem zum Teil mit Wasser gefüllten Behälter abgezweigt. An der einen Seite des Gefäßes (über dem Wasserspiegel) befindet sich eine Öffnung mit Anschraubbolzen zum Anschluß des zur Eichung benutzten genauen Manometers. Am unteren Teile des Gefäßes ist ein Auslaßhahn für das Wasser angebracht. Ein Stutzen am Deckel des Gefäßes dient zum Anschluß des Indikators; zwischen Stutzen und Indikator wird ein Zwischenstück mit Hahn eingefügt. In die Leitung vom Dampfkessel nach dem Gefäße ist ein Ventil eingebaut. Vor dem Manometer befindet sich ein Wassersack, der mit Wasser gefüllt sein muß. Der Zweck desselben ist leicht ersichtlich, wenn erst derjenige des ganzen Behälters dargetan ist.

Wird in das Gefäß eine gewisse Menge Dampf eingelassen, so wird sich derselbe zum Teil kondensieren und die Temperatur des Wassers erhöhen; alsdann wird er diejenige Spannung annehmen, die der augenblicklichen Temperatur des Wassers (für gesättigten Wasserdampf) entspricht. Läßt man eine weitere Menge Dampfes ein, so wird sich derselbe wieder zum Teil kondensieren, die Temperatur des Wassers und somit den Druck erhöhen. Umgekehrt hat man es durch Ablassen kleiner Mengen von Wasser in der Hand, die Spannung und Temperatur nach Belieben wieder zu verringern. Auf diese Weise läßt sich die zur Eichung erforderliche Regulierung der Spannung in weiten Grenzen einfach bewirken.

Der Wassersack vor dem Manometer hat den Zweck, eine innige Berührung zwischen Wasser und frisch eingeströmtem Dampfe an allen Stellen zu erzielen, damit nicht etwa der Dampf am Manometer eine andere Temperatur wie im Behälter aufweist.

Indem man nun, von der atmosphärischen Spannung ausgehend, nach und nach Dampf eintreten läßt, zeichnet man für jede Atmosphäre des Kontrollmanometers eine Linie auf den Papiercylinder.

Um den Einfluß der etwaigen Hemmung durch Reibung zu beseitigen, läßt man durch leichtes Nachhelfen von Hand (Auf- und Abwärtsbewegen des Kolbens) Wellenlinien sich bilden; fällt die Mittellinie dieser Wellenlinien mit der ohne Nachhelfen von Hand gewonnenen geraden Linie zusammen, so ist der Einfluß der Reibung unmerklich. Den Fehler durch Reibung kann man auch in der Weise eliminieren, daß man vorwärts und rückwärts (d. h. bei steigendem und fallendem

¹⁾ Siehe hierzu: Grundzüge und Anleitung für die Untersuchungen an Dampfkesseln und Dampfmaschinen zur Ermittlung ihrer Leistungen, aufgestellt vom Vereine Deutscher Ingenieure und dem Verbands der Dampfkesselüberwachungsvereine.

Druck) eicht; es sollen hierbei die bei einem bestimmten Manometerdruck erhaltenen Marken sich möglichst decken.

Den Gang der Rechnung bei derartigen Indikatoreichungen erläutert nachstehendes Zahlenbeispiel für Gewichtsbelastung der Feder.

Die zu eichende Feder wurde zuerst nur durch den Aufhängehaken belastet. Das Gewicht des letzteren betrug 0,555 kg. Es wurden sodann Gewichte angehängt in Stufen von 3 zu 3 kg. Die einzelnen Belastungen betragen somit

0,555 kg
 3,555 " "
 6,555 " "
 9,555 " "
 u. s. f.

Die Verlängerungen der Feder sollen den Gewichten proportional sein. Die Gewichte selbst werden unter Berücksichtigung der Fläche des Indikatorkolbens auf Kilogramm-Quadratcentimeter umgerechnet.

Der Durchmesser des Kolbens war 2 cm, die Fläche betrug daher

$$\frac{2^2 \cdot \pi}{4} = 3,142 \text{ qcm.}$$

Zuerst wurde die Nulllinie der Ausdehnungsskala ohne Belastung gezogen, darauf wurde belastet.

Man rechnet nun wie folgt:

Die Belastung sei z. B. 24,555 kg; die Belastung auf 1 qcm beträgt dann $\frac{24,555}{3,142}$ kg; die beobachtete Verlängerung sei a mm; es entspricht daher 1 kg/qcm eine Verlängerung von

$$\frac{a \cdot 3,142}{2,555} \text{ mm.}$$

Diese Größe ist die Konstante der Indikatorfeder. Die Konstante ist für sämtliche vorgenommenen Belastungen aus dem Belastungsdiagramm und der jeweiligen Verlängerung festzustellen. Sie betrug beim vorliegenden Versuche beispielsweise für die Belastung durch den Haken allein

$$\frac{1,352 \cdot 3,142}{0,555} = 7,66.$$

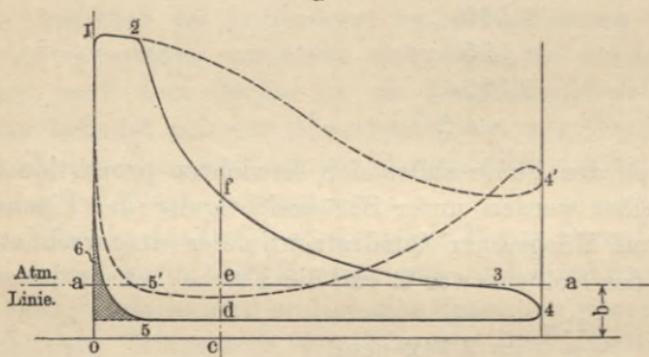
Hierbei ist 1,352 mm die Verlängerung für das Hakengewicht 0,555 kg. Die so für stufenweise größere Belastungen ermittelten verschiedenen Konstanten hatten die Werte

$$\left. \begin{array}{l} 7,66 \\ 7,66 \\ 7,65 \\ 7,7 \end{array} \right\} \text{ im Mittel: } 1 \text{ kg/qcm} = 7,67 \text{ mm.}$$

3. Folgerungen über die Dampfverteilung und die Güte einer Dampfmaschine aus ihren Indikatordiagrammen.

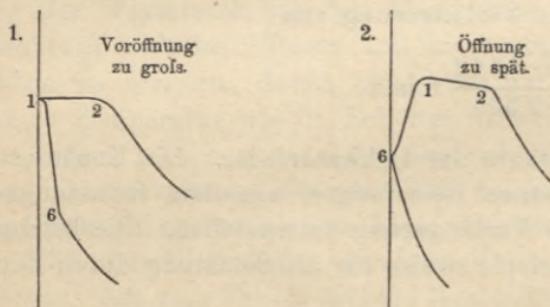
Untenstehende Figur (7) zeigt ein regelmäßiges Diagramm einer mit Expansion und Kondensation arbeitenden Dampfmaschine. Die mit 00 bezeichnete Linie ist die Vakuumlinie, während $a-a$ die atmosphärische oder äußere Luftdrucklinie darstellt. Die Ordinate b entspricht dem Drucke von 1 kg auf 1 qcm, $a-1$ gibt die Größe für den Anfangscylinerdruck an, $1-2$ den Bereich des vollen Anfangsdruckes, bei 2 beginnt die Expansion, bei 3 wird der Austrittskanal geöffnet und der Druck sinkt rasch bis zum Punkte 4, worauf der Kolben seinen Rücklauf unter einem Gegendrucke, der nahezu parallel zur Vakuumlinie ist, zurücklegt. Bei Punkt 5 wird der Austrittskanal geschlossen und kurz vor dem Ende des Hubes (im Punkte 6) der Eintrittskanal geöffnet, worauf der auf den Kolben wirkende Druck rasch bis Punkt 1 emporsteigt; danach wiederholt sich der beschriebene Vorgang.

Fig. 7.



Der zwischen das Diagramm und die Hochdruckordinate $1-0$ fallende schraffierte Raum gibt den durch die Kompression und das Voreilen erzeugten Ausfall in der Dampfarbeit an; die vom Diagramme eingeschlossene Fläche entspricht der geleisteten Dampfarbeit. Für jeden Punkt des Kolbenweges erhält man durch die Ordinaten den an dieser Stelle stattfindenden absoluten und wirksamen Arbeitsdruck, wie z. B. $c-f$ bzw. $d-f$. Die Länge $e-f$ gibt die Größe des Überdruckes über die Atmosphäre, $e-d$ die Größe des durch Kondensation erzielten Druckes und $c-d$ diejenige des Gegendruckes an. — Bei gleichzeitiger Aufnahme von Diagrammen an beiden Cylinderseiten werden dieselben bei einem guten Zustande der Maschine und guter Dampfverteilung in Form und Größe gleich sein. Eine wesentliche Verschiedenheit der Diagramme deutet auf mangelhafte Konstruktion der Steuerung.

Fig. 8.



Bei gleichzeitiger Aufnahme von Diagrammen an beiden Cylinderseiten werden dieselben bei einem guten Zustande der Maschine und guter Dampfverteilung in Form und Größe gleich sein. Eine wesentliche Verschiedenheit der Diagramme deutet auf mangelhafte Konstruktion der Steuerung.

An der Einströmlinie kann man erkennen, ob die Voreilung zur richtigen Zeit erfolgt. Es kommen folgende Fehler [siehe Fig. 8, 1) und 8, 2)] vor:

Der letzte Fehler [Fig. 8, 2)] ist sehr zu beachten. Während der erste [Fig. 8, 1)] weniger schädlich auf den Gang der Maschine wirkt, kann der letzte bedeutende Stöße in der Maschine verursachen. Am besten ist die Verteilung des Dampfes, wenn 6—1 senkrecht steht, oder auch etwas nach links oben neigt. Die Volldrucklinie 1—2 soll möglichst horizontal sein. Der Abfall der Volldrucklinie rührt entweder von zu starker Drosselung oder von zu kleinem Dampfraum her, doch ist dieser Fehler nicht schwerwiegend. Für die Expansionslinie 2—3 gilt allgemein die Relation: $p \cdot v^n = \text{const.}$ Der Exponent n ist bei verschiedenem Zustande des Dampfes und Cylinders veränderlich. So besteht bei überhitztem Dampf in einem die Wärme schlecht leitenden Cylinder $p \cdot v^{1/10} = \text{const.}$, bei gesättigtem Dampfe $p \cdot v^{1/6} = \text{const.}$, bei Dampfzylinder mit Dampfmantel $p \cdot v^{1/16} = \text{const.}$, bei etwas feuchtem Dampfe

(26) $p \cdot v = \text{const.}$ (normaler Zustand).

Bei sehr feuchtem Dampfe gilt $p \cdot v^{1/16} = \text{const.}$ Findet gegen Ende der Expansionskurve nochmals eine Erhebung statt, so läßt dies auf nochmaligen Dampfeintritt schließen. Dieser grobe Fehler tritt bei kleinen Füllungen durch zu kurze Steuerplatten ein. Eine weitere, möglichenfalls eintretende fehlerhafte Form zeigt das Diagramm 2—4'—5'—1 (in Fig. 7). Aus dieser Kurve geht hervor, daß der Expansionsschieber nicht rasch genug absperrt (2—4') und daß der Austrittskanal nicht zeitig genug geöffnet wird, so daß der Dampf nicht rasch genug entweichen kann (4'—5'); dieser Fehler ist sehr schwerwiegend wegen des beträchtlichen Dampfverlustes. Sobald die Expansion zu stark im Verhältnis zur Kondensationswirkung stattfindet, sinkt die Expansionskurve unter die Linie der Kondensation herab und bildet eine Schleife. Der Kolben erfährt bei seinem Laufe einen über den Arbeitsdruck hinausgehenden Gegendruck, indem der Kondensatordruck höher ist als der Arbeitsdruck im Cylinder, so daß die Maschine lediglich durch die lebendige Kraft ihrer bewegten Teile in Bewegung erhalten bleibt. Findet eine Schleifenbildung im Teile 1—2 der Kurve statt, so ist auf eine zu hohe Kompression des Dampfes vor der Wiederöffnung des Dampfkanals zu schließen, wodurch der im Cylinder verbliebene Auspuffdampf so komprimiert wird, daß dieser Druck den Druck des frischen Dampfes übersteigt. Diese beiden letzten, nicht unbedeutenden Diagrammfehler treten mitunter bei Auspuffmaschinen auf. Der Kurventeil 3—4 soll möglichst senkrecht sein.

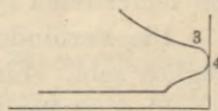
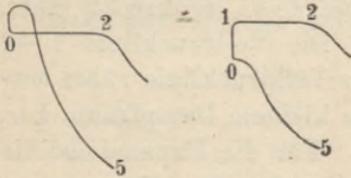


Fig. 9.

Obenstehende Kurvenskizze (Fig. 9) deutet auf zu spätes Ausströmen des Dampfes. Ist die Steuerung so gestellt, daß der Dampf

zu früh aus dem Cylinder entweichen kann, so wird die Diagrammkurve schnell fallen, wodurch ebenfalls ein Arbeitsverlust bedingt wird. Die Gegendrucklinie 4—5 soll möglichst niedrig liegen und horizontal verlaufen; fällt dieselbe ab, so tritt die Kondensation nur langsam ein, bzw. bei einer Auspuffmaschine läßt dieser Abfall auf Verzögerung

Fig. 10.



im Entweichen des Abstoßdampfes — bedingt durch zu langsames Öffnen des Austrittskanals — schließen.

Aus der Kompressionslinie 5—0 kann man erkennen, ob die Maschine gut gedichtet ist. Bei zu starker Kompression oder Undichtigkeit zeigen sich neben-

stehende Kurvenlinienfehler (Fig. 10).

Alle vorhergehend betrachteten Abnormitäten an Diagrammen bedingen mehr oder weniger einen bedeutenden Dampfverbrauch und Arbeitsverlust.

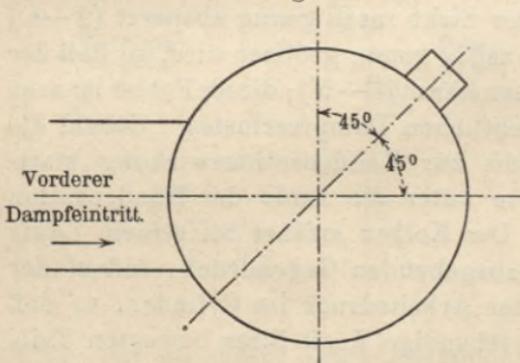
4. Das Indizieren.

Da die zweckmäßige Anbringung des Indikators am Cylinder und die Bewegung des Papiercylinders wichtige Faktoren zur Erhaltung von fehlerfreien Diagrammen sind, so lasse ich hierüber einiges folgen:

Die Verbindung zwischen Cylinder und Indikator soll so kurz als möglich sein. Eine längere Leitung beeinflusst das Diagramm, deshalb ist es bei großen Cylindern erforderlich, zwei Indikatoren anzubringen.

Ist nur ein Indikator in der Mitte des Cylinders angebracht und befinden sich die Dampfzuführungshähne an den Enden des betreffenden Verbindungsrohres, so tritt der Dampf zunächst an dem Indikator vorbei in das andere Rohrende und das so erhaltene Diagramm erweckt den Eindruck, als ob der Dampf zu spät in den Cylinder eingetreten wäre; es

Fig. 11.



ist daher zu empfehlen, sich des Dreiweghahnes zu bedienen, wodurch diese Mängel behoben werden. Die Zuführungsrohre zum Indikator sollen genügend weit sein, jedoch die Bohrung des Indikatorcylinders nicht überschreiten, weil sonst ein zu großer Raum mit Dampf vor Eintritt in den Indikator gefüllt wird. Die Anbringung des Indikators den Einflußkanälen gegenüber ist unzulässig, weil der Dampf hier in Bewegung ist, wodurch der Druck ein anderer wird und außerdem (besonders bei Röhrenkesseln) leicht feste Bestandteile mit sich

führt und in die Indikatorröhren treibt. Ganz oben am Cylinder bringt man den Indikator nicht gerne an, weil dadurch die Schnurführung erschwert wird. Es bleibt deshalb die Stellung unter 45° oben als am günstigsten übrig (siehe Fig. 11). Die Kolbenreibung infolge des Kolbengewichtes bei schräger oder horizontaler Stellung des Indikators kann vernachlässigt werden.

Ist ein Cylinder nicht von vornherein zur Anbringung eines Indikators eingerichtet, so ist es zweckmäßig, in den Deckel ein Messingrohr mit entsprechender Krümmung einzusetzen. Bei Cylindern mit Dampfmantel muß in ähnlicher Weise ein Rohr durch den Mantel hindurchgeschraubt werden. An dasselbe wird dann mit Hilfe einer Rotgußmuffe der Indikator angesetzt. Bei stehenden Dampfzylindern sind besondere Maßregeln nicht erforderlich.

Die Bewegung des Papiercylinders muß natürlich derart sein, daß die Diagrammabszissen den jeweiligen Kolbenwegen möglichst proportional sind. Man stellt dieses fest, indem man den Kolben in etwa fünf Stellungen in gleichen Abständen voneinander bringt. Diesen Stellungen entsprechend werden Punkte auf dem Papiercylinder gemacht, welche genau gleich weit voneinander entfernt sein müssen. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, daß während des Ganges, infolge der Elastizität der Schnur, eine Ungleichmäßigkeit der Bewegung entstehen kann; deshalb soll die Schnur möglichst unelastisch und kurz sein. Werden lange Schnuren benötigt, so wendet man oft Draht an, weil dieser sich am wenigsten verlängert. Außer diesen Fehlern kommen noch andere „kinematische“ vor, häufig infolge unsinniger Konstruktion. So hat sich beigezeichnete Konstruktion (Fig. 12), obwohl sie die Bedingung auf Proportionalität der Cylinderbewegung mit dem Kolben durchaus nicht erfüllt, bis heute erhalten.

P ist ein Zapfen am Kreuzkopf, L ein fester Punkt, bei H ist die Schnur des Indikators befestigt. Der Hebel selbst kann durch folgende Ver-

Fig. 12.

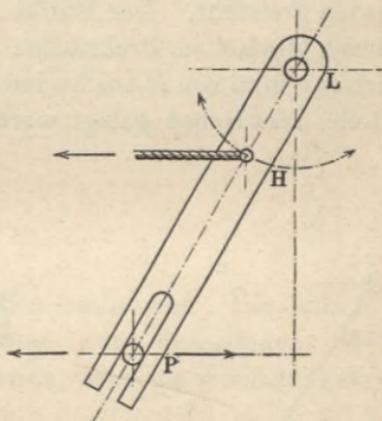
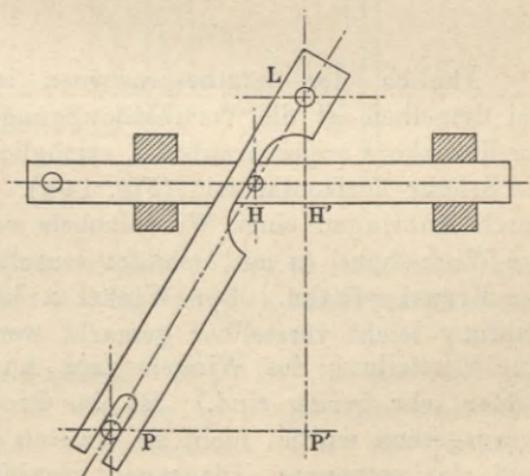


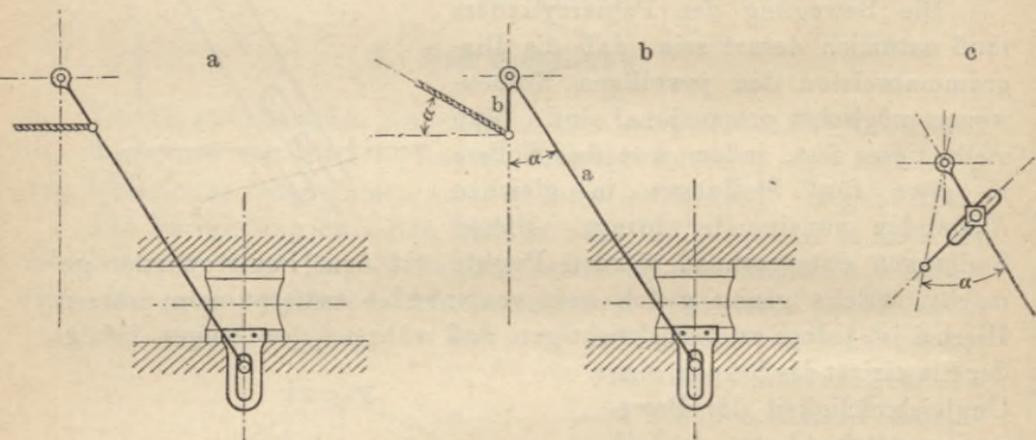
Fig. 13.



besserung brauchbar gemacht werden. In einen geeigneten Ausschnitt paßt ein Stift, der auf einem in Führungen horizontal bewegten Schieber befestigt ist. Am Ende des Schiebers greift die Indikatorschnur an (Fig. 13 auf voriger Seite). Der Ausschnitt könnte auch als Schlitz ausgebildet sein, was aber wegen der Federkraft des Papiercylinders nicht nötig ist.

Die Proportionalität der Bewegungen ist durch die Ähnlichkeit der Dreiecke LPP' und LHH' bewiesen. Dasselbe wird erreicht, indem man den Punkt L nur gegen seitliche Bewegung durch stark gespannte Drähte sichert, wohingegen eine Bewegung nach oben und unten freisteht. Der Punkt P ist dabei nicht durch Schlitz, sondern durch einfachen Drehzapfen mit dem Kreuzkopf in Verbindung. Die Schnur muß von H aus horizontal laufen, nötigenfalls muß eine stützende Rolle dazwischen gelegt werden.

Fig. 14.



Ähnlich der letztbesprochenen ist vorstehende Konstruktion. Bei derselben ist die Vertikalbewegung durch eine Coulisse, welche am Kreuzkopf angeschraubt ist, ermöglicht; auch hierbei muß zunächst die Schnur horizontal sein (Fig. 14 a). Die störenden Rollen können durch Anbringen eines Winkelhebels vermieden werden (Fig. 14 b); der Winkelhebel (a mit b) bildet denselben Winkel wie die Schnur mit der Kreuzkopfbahn. Der Winkel α kann mit entsprechender Einrichtung leicht verstellbar gemacht werden (Fig. 14 c). (Es genügt eine Einstellung des Winkels nach Augenmaß, da die entstehenden Fehler sehr gering sind.) Ist eine Proportionalität, wie sie anfangs vorausgesetzt wurde, nicht zu erzielen (bei alten Konstruktionen), so muß das verzernte Diagramm graphisch in richtiger Weise (entsprechende Ordinaten zu entsprechenden Abscissen korrigiert) aufgetragen werden.

Einrichtungen mit Reduktionsrollen, welche ein bestimmtes Übersetzungsverhältnis haben, oder Hubverminderungsrollen bewegen den

Papiercylinder so, daß der Hub des Kolbens auf dem Papiercylinder verkürzt (reduziert) erscheint.

In der Reduktionsrolle muß eine Spiralfeder angebracht sein, damit nicht die Feder im Papiercylinder die ganze Arbeit des Zurückbewegens auszuführen hat. Es muß dafür gesorgt werden, daß die Windungen der Schnur sich nicht übereinanderlegen, und zwar am besten dadurch, daß die Rolle sich auf einer mit

Gewinde versehenen Achse dreht, dessen Ganghöhe gleich der Dicke der Schnur ist. Weniger gut ist es, ein derartiges Gewinde in die Rolle einzuschneiden, das dann der Schnur eine zwangsläufige Führung gibt. Im ersten

Falle läuft die Schnur räumlich an derselben Stelle auf. Die selbstverständlich immer verschiedene Spannung der Spiralfeder bewirkt eine verschiedene Spannung der Schnur, was zu Fehlern Veranlassung gibt.

Diese werden vermieden durch die Schrötersche Einrichtung (Fig. 15). Derselbe lagert zwei Rollen so, daß die darüber laufende Schnur stets straff gespannt werden kann.

Diese Schnur (kraftschlüssig) wird an einer bestimmten Stelle am Kreuzkopf angeschlossen. Sie macht dann genau die Bewegungen des Kolbens hin und her mit. Die eine der beiden

Rollen, am besten die feste, wird mit einem kleinen Rade versehen, von dem aus mittels einer Schnur der Antrieb des Indikatorcylinders bewirkt wird.

Bei Anwendung der Differenzialrolle (Fig. 16) ist die Kolbenstange nach hinten verlängert; an dieselbe wird mit Hilfe einer sogenannten Schelle ein Rollenpaar angeschlossen. Über die größere Rolle ist fest eine an beiden Enden nach entgegengesetzten Richtungen hin befestigte Schnur (kraftschlüssig) gelegt, so daß ein Gleiten derselben ausgeschlossen ist. Der Rollenmittelpunkt bewegt sich dann wie der Kolben hin und her. Zwischen den Geschwindigkeiten v , c , den Rollenhalbmessern r_1 , r_2 und den Wegen s (einer horizontal am

Fig. 15.

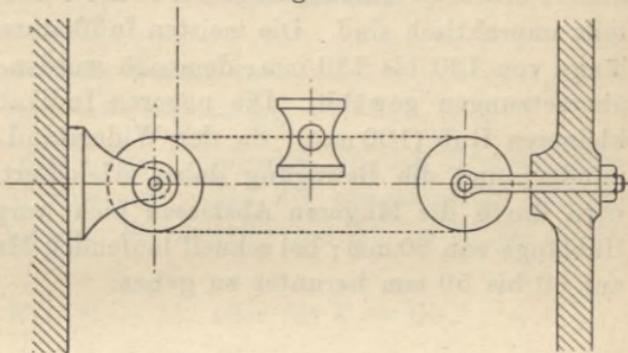
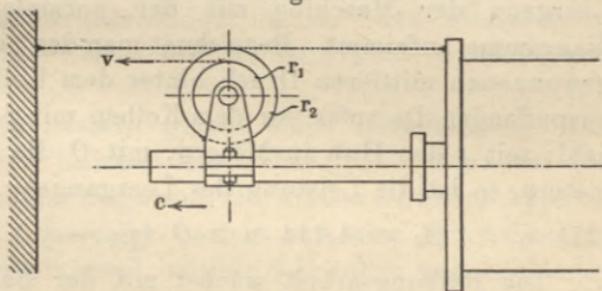


Fig. 16.



oberen Umfange des kleinen Rades ablaufenden Schnur) und S (des Kolbens) besteht folgende Beziehung:

$$\frac{v}{c} = \frac{r_2 - r_1}{r_2} = \frac{s}{S};$$

daraus ergibt sich also die Hubverminderung.

Die Bewegung des Papiercylinders geschieht auch noch durch andere Mittel (wie Zahnstangen u. s. w.), welche jedoch teils sehr teuer, teils unpraktisch sind. Die meisten Indikatoren liefern eine Diagrammlänge von 120 bis 130 mm; demnach werden dann ungefähr die Hubübersetzungen gewählt. Die neueren Indikatoren haben einen etwas kleineren Hub (100 mm), da der Widerstand der Massenträgheit vermindert und die Bewegung dabei erleichtert wird. Die Genauigkeit wird durch die längeren Abszissen nicht vergrößert. Es genügt eine Hublänge von 80 mm; bei schnell laufenden Maschinen schadet es nicht, auf 60 bis 50 mm herunter zu gehen.

5. Bestimmung der Nutzleistung einer Dampfmaschine.

Um zu dem Werte der Nutzleistung einer Dampfmaschine zu gelangen, müssen sämtliche Reibungswiderstände der bewegten Maschinenteile, wozu eventuell noch die Widerstände der Speisepumpe bzw. der Luft- und Kaltwasserpumpe hinzugerechnet werden, berücksichtigt werden. Die Widerstände beim Leergang der Maschine sind als konstante Zahlen anzusehen; dieselben werden ermittelt, indem man beim Leergang der Maschine mit der normalen Tourenzahl Indikator-diagramme aufnimmt. Bezeichnet man den aus dem Leerlaufdiagramm gewonnenen mittleren Druck hinter dem Kolben mit p_h , denselben des auspuffenden Dampfes vor dem Kolben mit p_v , mit n die Umdrehungszahl, mit s den Hub in Metern, mit O die Kolbenfläche in Quadratmetern, so ist die Leistung des Leerganges:

$$(27) \quad A_l = 4,444 \cdot n \cdot s \cdot O \cdot (p_h - p_v) \text{ Pferdestärken.}$$

Die Reibungsarbeit wächst mit der Belastung. Bezeichnet man mit N_e die Nutzleistung, so läßt sich die Reibungsarbeit durch $A_l + \eta' \cdot N_e$ ausdrücken, worin η' einen gewissen zusätzlichen Reibungskoeffizienten bedeutet; der Wert von η' hängt vom Zustande der Maschine ab. Die genaue Ermittlung dieses Wertes kann nur durch direkte Bestimmung der Nutzleistung der Maschine durch Bremsversuche und der indizierten Leistung geschehen. Man erhält sodann für η'

$$(28) \quad \eta' = \frac{N_i - N_e - A_l}{N_e} = \frac{N_i - A_l}{N_e} - 1.$$

In jedem Bremsdynamometer wird die mechanische Arbeitsleistung in Wärme umgesetzt; dieselbe wird nicht nutzbar verbraucht und muß

demnach, um Überhitzung zu vermeiden, durch Luft oder Wasser abgeleitet werden. — Es sei F die luftberührte Oberfläche, k der Wärme-
koeffizient (d. h. die Wärmemenge, welche in der Stunde pro 1° Tem-
peraturdifferenz und Quadratmeter Flächeneinheit ausgestrahlt wird);
setzt man weiter 424 kgm gleich einer Kalorie, so ist die pro Stunde
erzeugte Wärmemenge:

$$(29) \dots Q_1 = \frac{N_e \cdot 75 \cdot 3600}{424} = 636 \cdot N_e \text{ Kal.}$$

Die Bremsscheibe strahlt an Wärme aus:

$$(30) \dots Q_2 = F \cdot k \cdot (t - t_l),$$

wobei t_l die Temperatur der Luft, t diejenige an der Bremsscheibe
($t - t_l$ höchstens = 100° zulässig). Da die ausgestrahlte Wärme
(im stationären Zustande) gleich der zugeführten ist, so ist $Q_1 = Q_2$
zu setzen, d. h.

$$636 \cdot N_e = F \cdot k \cdot (t - t_l), \text{ oder für } k = 60$$

$$(31) \dots F = 0,106 \cdot N_e.$$

Die luftberührte Oberfläche F muß demnach mindestens $0,1 \cdot N$
sein. Häufig ist es notwendig, Wasserkühlung anzubringen; es wird
dann der Wärmeleitungskoeffizient größer. Die erforderliche Wasser-
menge beträgt pro Stunde in Liter:

$$(32) \dots W_k = \frac{636 \cdot N_e}{t_2 - t_1},$$

worin $t_2 - t_1$ der Temperaturunterschied des zu- und abfließenden
Wassers ist. Setzt man $t_2 - t_1 = 50^{\circ}$, so ist $W_k = \sim 13$ kg pro
Pferd und Stunde.

Bei allen Bremsdynamometern gelten obige Beziehungen. Ich
will hier, soweit es in den Rahmen des Buches paßt, kurz auf die
wichtigsten Bremsdynamometer eingehen. Der älteste derartige Apparat
ist der Pronysche Zaum. Derselbe besteht aus zwei Bremsbacken,
welche, die Bremsscheibe umfassend, mittels Schrauben gegeneinander
gepreßt werden, und von denen der eine mit einem Hebelarm versehen
ist. Dieser wird an seinem Ende mit Gewichten belastet. Beträgt
das Gewicht des Hebelarmes, reduziert auf seinen Endpunkt, G_1 kg
und das aufgelegte Gewicht bei horizontaler Lage des Hebels G_2 kg
und ist die Länge des Hebels l in Metern, so besteht bei der Touren-
zahl n für die Nutzleistung N_e in Pferdestärken folgende Gleichgewichts-
bedingung:

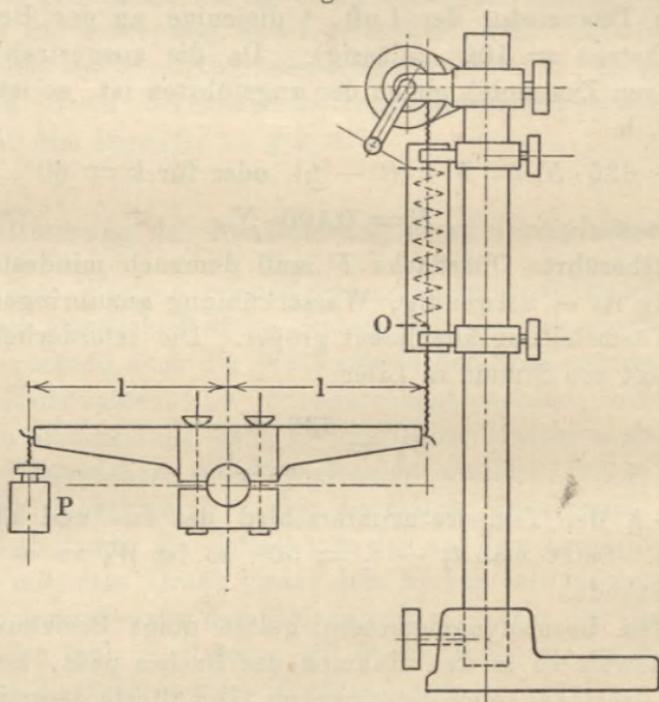
$$(33) \dots N_e = \frac{2 \cdot \pi \cdot l \cdot n}{60 \cdot 75} (G_1 + G_2).$$

Ist dieser Gleichgewichtszustand eingetreten, so ist das Reibungs-
moment gleich dem Dreh- oder Belastungsmoment.

Von mancherlei Verbesserungen der Bremsdynamometer verdient diejenige von Poncelet erwähnt zu werden. Bei dieser ist das Ende des Bremshebels durch eine Federwage gestützt und diese mit einer Registriervorrichtung verbunden, welche die Größe des Drehmomentes aufzeichnet. (Für Turbine und Wasserrad — bei ruhigem Gange — ist diese Einrichtung sehr gut verwendbar.)

Infolge des großen Gewichtes und notwendigen Raumes ist der Pronysche Zaum trotz seiner vielen Vorzüge oftmals nicht verwendbar. In solchen Fällen verwendet man mit Vorteil bis zu etwa 15 Pferd Maschinenkraft Baddynamometer von Navier, Hartig u. s. w., deren

Fig. 17.



Grundgedanke mit demjenigen des Pronyschen Zaumes übereinstimmt. Bei denselben wird das Drehmoment durch Federkraft gemessen und entsprechend registriert. (Man darf sich nicht verhehlen, daß die Messung durch Federkraft manche Fehler nicht ausschließt.)

Eine Vereinigung von Gewichts- und Federwagenmessung zeigt die praktische, von Wettler angegebene Bremsvorrichtung¹⁾. Dieselbe wurde zuerst bei Elektromotoren angewandt. Eine aus Holz gefertigte Bremse (siehe Fig. 17) von etwa 50 cm Hebelarmlänge trägt an dem einen Hebel das Gewicht P , das um etwa 1 kg leichter ist, als dem jeweiligen Drehmoment des Versuches entspricht. Das andere Hebelende wirkt ziehend auf eine in einem Messingrohr geführte Feder

¹⁾ Siehe Elektrotechn. Zeitschrift 1898, Heft 39.

von etwa 2 kg größter Spannung. Durch Einstellung der Feder wird immer die horizontale Lage der Bremshebel gesichert. Zu dem Zwecke ist an dem oberen Ende der Feder eine Schnur angebracht, die mittels einer Kurbel auf eine Rolle gewickelt wird. Die Hemmung der Rolle erfolgt durch ein Bremsband. Das Messingrohr ist geschlitzt und mit einer Skala versehen. Die Enden der Feder tragen Zeiger; der untere muß auf 0 einspielen, was der wagerechten Lage der Bremsvorrichtung entspricht; der Ausschlag des oberen Zeigers wird notiert und sein Gewichtswert G der Kurve entnommen, die man zuvor durch einfache Eichung der Feder festgestellt hat. Das Drehmoment ist dann $M = (P + G) \cdot l$.

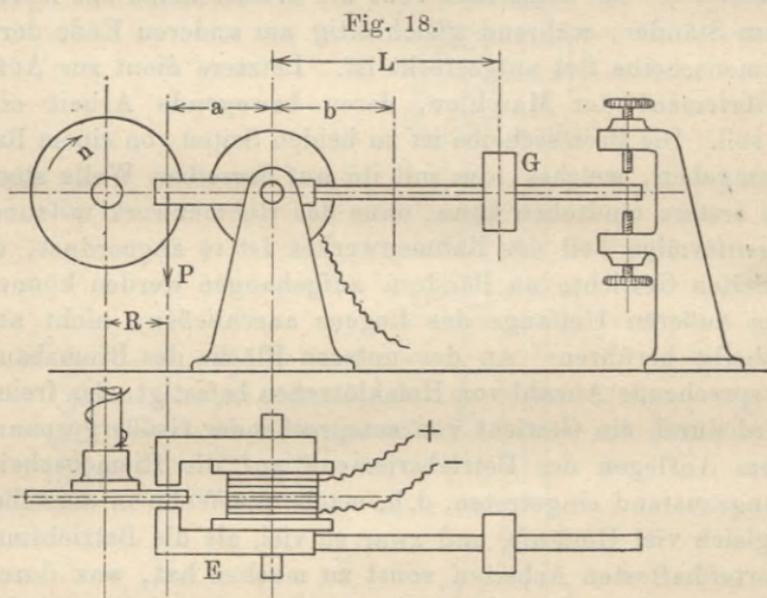
Vorzugsweise in England benutzt man das Imraysche Banddynamometer¹⁾. Bei demselben ruht die Bremsscheibe mit ihrer Welle auf einem Ständer, während gleichzeitig am anderen Ende der Welle eine Riemenscheibe fest aufgesteckt ist. Letztere dient zur Aufnahme des Treibriemens der Maschine, deren bewegende Arbeit ermittelt werden soll. Die Bremsscheibe ist zu beiden Seiten von einem Rahmenwerke umgeben, welches lose mit ihr auf derselben Welle steckt, so daß sich erstere umdrehen kann, ohne das Rahmenwerk mitzunehmen. Der bogenförmige Teil des Rahmenwerkes ist so angeordnet, daß zu beiden Seiten Gewichte an Bändern aufgehängt werden können, die sich dem äußeren Umfange des Bogens anschließen, nicht aber die Bremsscheibe berühren. An der unteren Fläche des Bremsbandes ist eine entsprechende Anzahl von Holzklötzchen befestigt; das freie Bandende wird durch ein Gewicht von entsprechender Größe gespannt. Ist nach dem Auflegen des Betriebsriemens auf die Riemenscheibe der Beharrungszustand eingetreten, d. h. macht die Welle in derselben Zeit immer gleich viel Umläufe, und zwar so viel, als die Betriebsmaschine beim vorteilhaftesten Arbeiten sonst zu machen hat, was durch richtiges Abmessen der Gewichtsgrößen zu erreichen ist, so halten die Gewichte der Reibung zwischen den Berührungsflächen das Gleichgewicht, und mit Ausnahme kleiner Schwankungen ändern die Gewichte und das Rahmenwerk ihre Lage nicht. — Imray bewirkte durch den Apparat das Herbeiführen einer selbständigen Ausgleichung für den Fall, daß sich die Reibung während eines und desselben Versuches ändert.

Andere Regulierungsmittel für denselben Zweck, wobei man unterhalb der Bremsscheibe liegende Hebelwerke in Anwendung brachte, zeigen die Bremsapparate von Appoldt und Balk²⁾. — Ein sehr empfehlenswertes Bremsbanddynamometer stellt die Konstruktion von Prof. Ernst Brauer dar. Das Bremsband ist mit dem inneren Ende an demjenigen Hebelpunkte angebracht, welcher zugleich die Aufhänge-

¹⁾ Siehe Rühlmann, Allgemeine Maschinenlehre.

²⁾ Siehe englische Patent-Specifications Nr. 1452.

stelle für das Gewicht bildet; das andere Ende ist in geringer Entfernung davon befestigt, während ein dritter Punkt, der Tangentialpunkt des Bandes, mit dem Hebelende durch eine Feder und einen Flaschenzug in Verbindung steht. Das freie Ende des Flaschenzugseiles kann man entweder in die Hand nehmen oder über eine feste Rolle in solcher Richtung führen, daß die Verlängerung des Seilendes durch die Achse der Bremscheibe geht. Durch die Art der Konstruktion ist es erreicht, ohne Veränderung des Beharrungsvermögens die Beweglichkeit des Bandes auf einen kleinen Schwingungsbogen zu beschränken. Falls bei zu großer Reibung das Bremsgewicht über die mittlere Lage gehoben wird, so erfährt die nach dem Fundament führende Schnur eine der Feder entgegenwirkende Spannung, und es



erfolgt bei der großen Hebelübersetzung eine entsprechende Verminderung der Spannung des Bremsbandes. Die Spannung der Schnur ist gegenüber dem Bremsgewichte zu vernachlässigen. Die freie Beweglichkeit des Bandes wird mittels zweier Bänder, welche vom untersten Punkte des ersteren zum Fundamente führen und dort befestigt sind, auf einen kurzen Bogen beschränkt; selbstredend wird der Gleichgewichtszustand durch dieses Sicherheitsmittel nicht beeinflußt.

Ein elektrisches Bremsdynamometer, die Wirbelstrombremse, für kleinere Motoren ist von Prof. A. Gran in Wien¹⁾ eingeführt worden (siehe Fig. 18). Ihre Wirkungsweise ist folgende: Auf die Welle des Elektromotors ist eine Kupferscheibe aufgesteckt. Zur Bremsung wird ein Elektromagnet *E* verwendet; dieser ist auf der Achse eines Wage-

¹⁾ Siehe E. T. Z. 1900, Heft 14.

balkens befestigt, auf dem das Laufgewicht G sitzt. Die Kraft P des Elektromagneten, mit der er auf die Scheibe wirkt, ist:

$$P = \frac{L - b}{a} \cdot G.$$

Hierin ist b der Abstand des Laufgewichts, bei welchem in nicht erregtem Zustande des Magneten und bei Ruhe das System im Gleichgewicht ist. Die Bremsarbeit ist:

$$N_e = P \cdot \frac{2R \cdot \pi \cdot n}{60 \cdot 75} \text{ in P.-S.}$$

Der Wirkungsgrad η z. B. für einen Gleichstrommotor ist danach:

$$\eta = \frac{P \cdot 2 \cdot R \cdot \pi \cdot n \cdot 0,736}{e \cdot i \cdot 60 \cdot 75},$$

worin $e \cdot i$ die dem Motor zugeführte elektrische Energie ist. Durch Regulieren der Erregung des Elektromagneten ändert man die Bremskraft P . Auf diese Weise kann man außerdem leicht bei jeder Belastung den Wirkungsgrad des Motors bestimmen. Der Vorteil bei dieser Art der Bremsung ist, daß, wenn nur der Erregerstrom des Elektromagneten konstant bleibt, die bremsende Kraft sich nicht ändert, was bei mechanischer Bremsung nicht völlig zu erreichen ist.

Ich komme jetzt auf die Dynamometer zur direkten Arbeitsmessung während des Betriebes, d. h. auf die sogenannten Einschaldynamometer, zu sprechen. Das Prinzip dieser liegt wieder darin, daß die unbekanntenen Kräfte der Maschine ins Gleichgewicht gebracht werden mit bekannten Kräften; diese sind entweder Schwerkraft oder Federkraft, erstere nur bei konstanten, letztere auch bei variablen Kräften. Das Einschaldynamometer mißt die Übertragungskraft auf dem Wege der Kraftleitung. Da die Energie auf dem Wege der Kraftleitung abfällt, muß genau die Stelle angegeben werden, woselbst das Dynamometer bei der Kraftmessung eingeschaltet war.

Um die Größe der Kraft einer rotierenden, horizontal gelagerten Welle zu bestimmen, muß der Zapfendruck ermittelt werden. Eine derartige Einrichtung zeigt das Dynamometer von Hachette (Fig. 19 auf folgender Seite), welches sich zum Messen an Arbeitsmaschinen, Elektromotoren u. s. w. eignet. Die beiden äußeren Zahnräder sind fest gelagert; das mittlere ist beweglich. Auf das Rad A arbeitet der Riemen der Kraftmaschine. Durch Vermittelung von B überträgt die Arbeit sich auf das Rad C , das die Arbeitsmaschine treibt. A und C bewegen sich in gleichem Drehsinn. B empfängt von beiden Seiten und in gleicher Richtung denselben Druck M , der eine fördernd wirkend, den anderen als Reaktionsdruck. Sobald Beharrungszustand eingetreten ist, vereinigen sich die beiden Drucke M zu einer Resultierenden $2M$, die auf den Zapfen wirkt. Durch ein geeignetes Gewicht Q wird jeweils der Gleich-

gewichtszustand hergestellt. Es besteht unter Berücksichtigung des Hebelgewichtes S und des Schwerpunktsabstandes s die Gleichung:

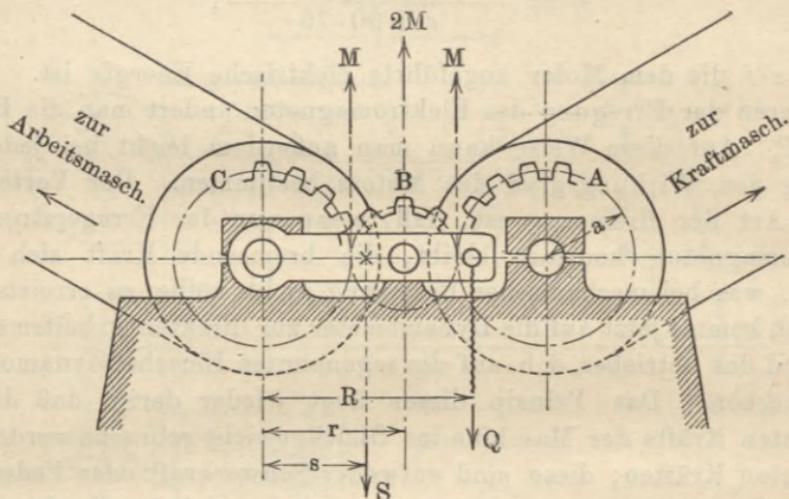
$$S \cdot s + Q \cdot R = 2 \cdot M \cdot r, \quad M = \frac{S \cdot s + Q \cdot R}{2 \cdot r}.$$

Da ferner $M \cdot a = 716200 \cdot \frac{N_e}{n}$, so ergibt sich für die Leistung N_e in P.-S.: \therefore

$$N_e = \frac{M \cdot a \cdot n}{716200} = \frac{a \cdot n}{2 \cdot 716200 \cdot r} (S \cdot s + Q \cdot R).$$

An Stelle einer mit dem Gewichte Q belasteten Wagschale kann auch eine Federwaage angewendet werden. Ein Nachteil obiger Kon-

Fig. 19.



struktion besteht darin, daß eine Hebung des Rades B dasselbe außer Eingriff mit A bringt. Bei dieser Hebung vergrößert sich der Teilkreis gegen A hin und die Kräfte M sind verschieden. Bei A ist der Hebelarm größer als bei C . Die Resultante bleibt daher nicht mehr $2M$ und wird verschoben.

Um den veränderlichen Eingriff zu vermeiden, haben Batchelder und White ¹⁾ ein Kegelhädergetriebe angewendet. Was oben für das Mittelrad B galt, bezieht sich hier auf die mittleren Kegelhäder. Daß statt eines kleinen Rades deren zwei angewendet werden, ändert an der Betrachtung nichts, macht indes die Lagerung des Hebels h in Punkt C der Hauptwelle entbehrlich. Das Gegengewicht g bewirkt, daß der Schwerpunkt des Hebels und der auf ihm sitzenden Teile samt Wagschale in den Punkt C fällt. Auf der Hauptwelle m sitzen fest die Riemenscheibe b und das Kegelhäder d , lose a und c ; diese selbst sind miteinander verkeilt; a' und b' sind Losscheiben. a ist mit

¹⁾ Siehe M. Rühlmann, Allgemeine Maschinenlehre, S. 230.

der Arbeitsmaschine verbunden, b mit der Kraftmaschine. Ist Hebel h dauernd in horizontaler Lage, was durch richtige Abmessung der Gewichte erreicht wird, dann wird die Arbeit vollkommen übertragen und drückt sich die Leistung N_e aus durch:

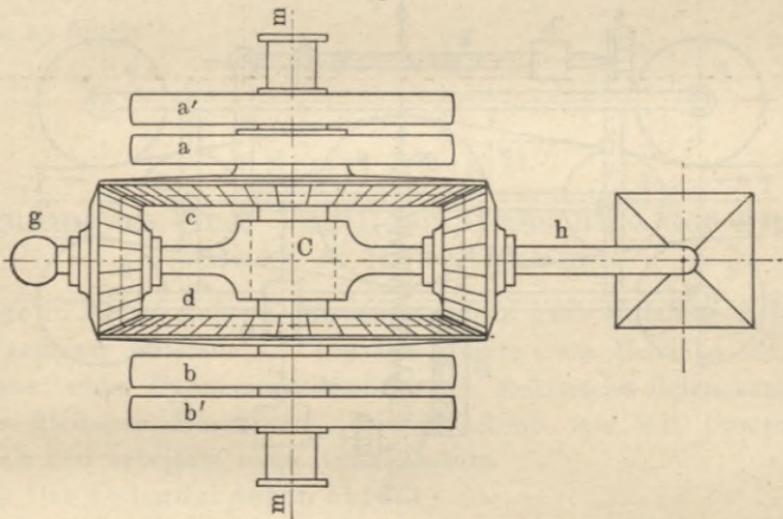
$$N_e = \frac{W \cdot l \cdot \pi \cdot n}{75 \cdot 60},$$

worin W das Gewicht, l den Hebelarm und n die Umdrehungszahl bedeuten.

Ein entsprechend modifizierter und verbesserter Apparat ist von Rieter in Winterthur konstruiert.

Eins der vorzüglichsten Dynamometer ist das mit Registrierapparat versehene, von Hartig konstruierte¹⁾. Bei demselben bewegen sich zwei Zahnräder zwischen konzentrischen Rädern, von denen

Fig. 20.



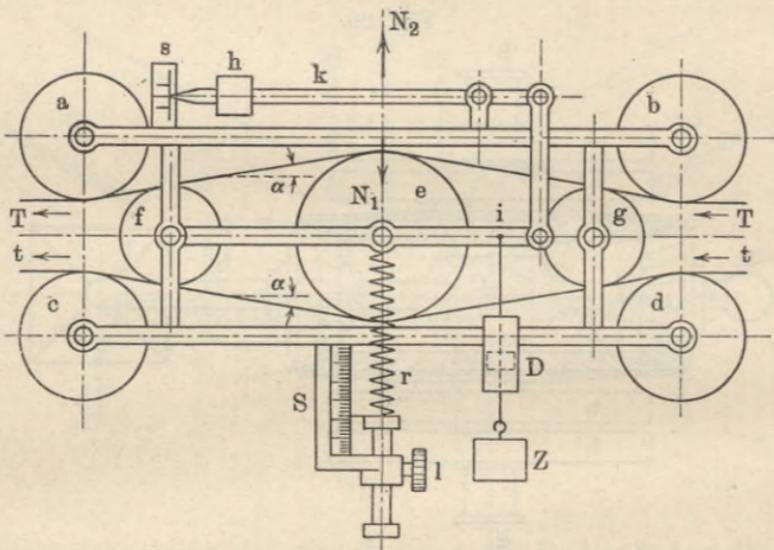
das eine, große Innenverzahnung, das andere, kleine Außenverzahnung hat. Die beiden ersteren sind durch einen Zentralarm miteinander verbunden. Das Hohlräder hat auch nach außen Verzahnung, welche in ein weiteres Zahnrad eingreift. Auf der Nabe des Zentralarms sitzt weiter nach vorn ein Zahnrad, das in eine Zahnstange eingreift. Letztere ist an einem nach der Form gleicher Festigkeit konstruierten Federpaar befestigt. Das kleinere der oben genannten beiden konzentrischen Räder treibt (mittels einer Riemenscheibe) auf die Arbeitsmaschine; das mit dem größeren (Hohlräder) in Eingriff befindliche Rad empfängt (ebenso) die Leistung von der Kraftmaschine. Die Neigung des Zentralarms und somit die Anspannung der Feder ist ein Maß für die übertragene Umfangskraft.

Ein weiteres, hauptsächlich für rasch laufende Wellen sehr geeignetes Dynamometer ist dasjenige von Hefner v. Alteneck (siehe

¹⁾ Siehe M. Rühlmann, Allgemeine Maschinenlehre.

Fig. 21). Dasselbe wird direkt am Treibriemen der Dampfmaschine angebracht und gestattet, aus der Differenz der Spannungen der beiden Riemenhälften die übertragene Kraft zu berechnen. Die beiden Hälften des Treibriemens laufen zwischen den Rollen *a*, *b*, *c*, *d* hindurch, welche dazu dienen, die beiden Riemenhälften beim Ein- und Austritt aus dem Apparat einander zu nähern, wogegen die Mittelrolle *e* den Zweck hat, die Riemenhälften auseinanderzuhalten, während die Rollen *f* und *g* die Gleichheit der Winkel (α) zwischen den beiden Riemenhälften bezwecken sollen. Das Gewicht der Rolle *e* wird durch das Gewicht bei *h* ausgeglichen vermittelst des Hebels *k* in Verbindung mit dem Rahmen *i*. Sobald der am Gewichtshebel befindliche Zeiger auf einen bestimmten Punkt einer bei *s* befindlichen Skala einspielt,

Fig. 21.



hat der Apparat die richtige Lage, und alsdann ist die Kraft, welche die Rolle *e* aus ihrer Mittellage herauszudrücken bestrebt ist, der Spannungsdifferenz der beiden Riemenhälften proportional. Die Feder *r*, deren Spannung an der Skala *S* angezeigt wird, gestattet, mit der Stellschraube *l* die Mittelrolle in die der Marke *s* entsprechende Stellung zurückzuführen, und zugleich gibt die Federspannung die Spannungsdifferenz der beiden Riemenhälften an. Durch das bei *Z* befindliche Gewicht wird die Wirkung der Feder unterstützt, und ist dieses natürlich in der Rechnung mit zu berücksichtigen. Bei *D* ist eine Dämpfung angebracht. Reduziert man die Wirkung der Feder und des Gewichtes auf gleichen Hebelarm, so erhält man die vom Seile übertragene Kraft in Kilogramm; dieselbe ergibt, mit der in Metersekunden angegebenen Umfangsgeschwindigkeit multipliziert, die zum Betriebe der Maschine dienende Leistung in Meterkilogrammsekunden. Je größer diese Kraft ist, desto mehr wird die Feder gespannt. Es bestehen folgende Relationen:

$$N_1 = 2 \cdot T \sin \alpha, \quad N_2 = 2t \cdot \sin \alpha$$

$$N_1 - N_2 = 2 \cdot (T - t) \cdot \sin \alpha.$$

$T - t$ (siehe Fig. 21) stellt die übertragene Kraft P dar, $N_1 - N_2$ ist der vertikale Druck auf die Achse der Rolle e infolge des Riemenzuges. Bezeichnet F die an derselben Achse wirkende äußere Gegenkraft, so gilt:

$$F = 2 \cdot P \cdot \sin \alpha.$$

F ist die Differenz aus der in der Feder wirkenden Kraft und dem auf den Angriffspunkt der Feder reduzierten Gewicht von Z . Weiter ist:

$$P = \frac{F}{2 \cdot \sin \alpha},$$

und da $\frac{1}{2 \cdot \sin \alpha}$ für den Apparat eine Konstante ist, die wir a nennen wollen, so folgt:

$$P = a \cdot F.$$

Erstes Beispiel.

Prüfung an einer Ventildampfmaschine der Firma Beck & Rosenbaum.

Die in Frage stehende Maschine wurde nach einjährigem Betriebe vom Verfasser untersucht. Dieselbe diente zum Betriebe einer Eismaschine, einer Dynamomaschine für die elektrische Beleuchtung und einiger kleinerer Maschinen. Die Maschine war mit Dampfmantel versehen und arbeitete ohne Kondensation.

a) Die Cylinderdaten sind:

Cylinderdurchmesser	375 mm,
Kolbenhub	750 „

Durchmesser der zu beiden Seiten durchgehenden Kolbenstange 50 mm, schädlicher Raum zu beiden Seiten je 4,2 Proz.

Die Untersuchung sollte sich auf folgende Fragen erstrecken:

1. Wie groß ist die mittlere indizierte Leistung?
2. Wie groß ist der dabei stattfindende Speisewasserverbrauch pro Stunde und indizierte Pferdestärke?
3. Wie groß ist der indizierte Dampfverbrauch pro Stunde und P.-S.?
4. Wie groß ist der Dampfverlust in Prozenten des Dampfverbrauches?
5. Auf Bestimmung des Dampfverbrauches nach der Krause'schen Formel und den Regnault'schen und Fliegnerschen Angaben zur Kontrolle des experimentell und rechnerisch bestimmten Wertes unter 3.

b) Beschreibung der Versuche:

Der Versuch, der sich auf Indizieren, Messung der Tourenzahl und Bestimmung der Speisewassermenge erstreckte, dauerte fünf Stunden. Sowohl die Aufnahme der Indikator diagramme wie die Messung der Tourenzahl an einem fortlaufend registrierenden Tourenzähler erfolgte von 10 zu 10 Minuten. Die Diagramme wurden an beiden Cylinderseiten aufgenommen. Wie zu erwarten, war der Unterschied in der Größe der beiderseitigen Diagramme vermöge der Gleichheit der effektiven Kolbenflächen jeweils gering und somit eine getrennte Berechnung der beiderseitigen Leistungen nicht erforderlich. Die unten zahlenmäßig gegebenen Diagrammflächen stellen jeweils die Mittelwerte dar. Die Bewegung des Indikatorpapiercylinders wurde durch eine Gegenkurbel, die am Kurbelzapfen angebracht war, bewirkt; dieselbe war mit kurzer Pleuelstange versehen derart, daß die Kolbenbewegung kinematisch genau übertragen wurde; letzteres wurde vor dem Versuch dadurch konstatiert, daß die beiden Mittelstellungen des Kreuzkopfes für vorwärts und rückwärts gehenden Kolben denselben Punkt des Diagrammes und zwar den Mittelpunkt der atmosphärischen Linie ergaben.

Der Dampfverbrauch wurde durch Messung des Speisewassers bestimmt, wozu ein schmiedeeisernes Reservoir von rechteckiger Grundform verwendet werden konnte. Geringe Undichtigkeiten der Speisepumpe konnten durch Auffangen und Messen des Verlustwassers berücksichtigt werden.

Der Dampfdruck im Kessel wurde an einem Kontrollmanometer abgelesen.

Der Barometerstand betrug während des Versuches 750 mm Hg oder 1,02 kg/qcm.

c) Gemessene Werte und Ausrechnung.

ad 1. — Die Diagramme, 31 an der Zahl, ergaben nach Planimetrierung folgende Flächeninhalte:

1. 1495 qmm	12. 1405 qmm	23. 1240 qmm
2. 1425 "	13. 1545 "	24. 1215 "
3. 1330 "	14. 1570 "	25. 1205 "
4. 1305 "	15. 1435 "	26. 1220 "
5. 1430 "	16. 1410 "	27. 1255 "
6. 1468 "	17. 1370 "	28. 1240 "
7. 1550 "	18. 1390 "	29. 1205 "
8. 1420 "	19. 1330 "	30. 1340 "
9. 1525 "	20. 1237 "	31. 1350 "
10. 1425 "	21. 1205 "	Sa. = 42 205 qmm
11. 1435 "	22. 1230 "	

Die Länge war bei allen Diagrammen ziemlich genau

$$l = 69 \text{ mm.}$$

Der mittlere indizierte Druck aus sämtlichen Diagrammen ergibt sich aus der Summe der Diagramminhalte 42205 qmm, der Zahl der Diagramme 31 und der Länge 69 mm als

$$(p_i) = \frac{42205}{69 \cdot 31} = 19,72 \text{ mm (s. S. 24 u. f.)},$$

oder in kg/qcm ausgedrückt, da der Diagrammaßstab 10 mm = 1 kg/qcm ist, zu

$$p_i = 1,972 \text{ kg/qcm.}$$

Die indizierte Dampfmaschinenleistung betrug nach Formel (2) und (3), s. S. 16 u. f.:

$$N_i = 4,444 \cdot p_i \cdot O \cdot n \cdot s.$$

Die einzusetzenden Werte sind: $O = \frac{\pi}{4} \cdot (0,375^2 - 0,050^2) = 0,10848 \text{ qm}$; Gesamtumdrehungszahl in fünf Stunden laut Angabe des Zählers = 19990, Touren pro Minute $n = 19990 : 300 = 66,6$.

Somit:

$$N_i = 4,444 \cdot 1,972 \cdot 0,10848 \cdot 66,6 \cdot 0,75 = 47,5 \text{ PS}_i.$$

Aus sämtlichen Diagrammen als Mittelwert berechnet ergaben sich folgende Werte für die Spannungen:

Mittlere Endspannung: 0,36 kg/qcm Überdruck;

oder, da der atmosphärische Druck 1,02 kg/qcm betrug, absolut:

$$p_2 = 0,36 + 1,02 = 1,38 \text{ kg/qcm,}$$

der mittlere Kompressionsdruck:

$$p_1 = 3,22 + 1,02 = 4,24 \text{ kg/qcm,}$$

der mittlere Admissionsdruck $p_a: 5,6 + 1,02 = 6,62 \text{ kg/qcm}$, die mittlere Dampfspannung im Kessel: $p_k: 6,07 + 1,02 = 7,09 \text{ kg/qcm}$. — ad 2. — Die Grundfläche des Speisewasserbehälters betrug 2,204 m \times 3 m, d. h. (mit Rücksicht auf die Abrundung der Kanten) 6,59 qm. Die Gesamtsenkung des Wasserspiegels während des Versuches war 478 mm.

Die mittlere Speisewassertemperatur ergab sich aus nachstehenden Messungen:

9 Uhr 15'	68° C.
10 " 15'	76 "
11 " 20'	78 "
12 " 15'	74 "
1 " —	75 "
2 " —	78 "

im Mittel 75° C.

Bei 75° C. ist das Volumen von 1 kg Wasser 1026 ccm = 0,001026 cbm.

Das Volumen des verbrauchten Wassers war nach Obigem

$$6,59 \times 0,478 = 3,15 \text{ cbm.}$$

Das Gewicht desselben

$$\frac{3,15}{0,001026} = 3070 \text{ kg.}$$

Davon ist das Speisewasser, das aus der Speisepumpe durch Undichtheit verloren ging, im Betrage von 42,4 kg abzuziehen.

Somit war der effektive Speisewasserverbrauch:

$$3070 - 42,4 = 3027,6 \text{ kg in fünf Stunden,}$$

oder pro Stunde und indizierte Pferdekraft (PS_i):

$$\frac{3027,6}{5 \cdot 47,5} = 12,75 \text{ kg.}$$

ad 3. — Der indizierte Dampfverbrauch berechnet sich nach der auf S. 19 gegebenen Formel (9):

$$\frac{D_i}{N_i} = \frac{27}{p_i} \cdot \{(1 + m) \cdot \gamma_2 - m \cdot \gamma_1\}.$$

Der Koeffizient des schädlichen Raumes ist, wie schon erwähnt, $m = 0,042$. Das spezifische Gewicht des Dampfes bei der Endkompressionsspannung 1,38 kg/qcm bzw. bei der Endkompressionsspannung 4,24 kg/qcm ist nach den Fliegnerschen Tabellen

$$\begin{aligned} \gamma_2 &= 0,788 \\ \text{bzw. } \gamma_1 &= 2,260. \end{aligned}$$

Mit Einsetzung dieser Werte erhält man die pro Stunde und PS_i verbrauchte Dampfmenge zu:

$$\frac{D_i}{N_i} = \frac{27}{1,972} \cdot \{(1,042) \cdot 0,788 - 0,042 \cdot 2,260\} = 9,94 \text{ kg.}$$

(Bei Anwendung der Groveschen Korrektur, Formel (11), S. 19, erhält man einen wirklichen Dampfverbrauch von 13,1 kg.)

ad 4. — Wir fanden den Verbrauch von Speisewasser pro Stunde und PS_i durch Messung zu 12,75 kg und aus den Diagrammen zu 9,94 kg. Daraus ergibt sich der Dampfverlust zu

$$12,75 - 9,94 = 2,81 \text{ kg,}$$

oder — in Prozenten des nutzbaren Dampfes ausgedrückt — zu:

$$\left(\frac{2,81}{9,94} \cdot 100 = \right) 28,3 \text{ Proz.}$$

ad 5. — Nach der Krauseschen Formel (18, S. 21) sind für eine indizierte Pferdekraftstunde an Wärme in Dampf aufzuwenden:

$$630 + 9780 \frac{p_2}{p_i} \text{ Kal.}$$

Setzt man für p_2 und p_i die oben angegebenen Werte ein, so ergibt sich:

$$630 + 9780 \frac{1,38}{1,972} = 7470 \text{ Kal.}$$

Aus diesem erforderlichen Wärmearaufwand und der in einem Kilogramm Dampf enthaltenen Gesamtwärme findet man die erforderliche Dampfmenge pro PS_i und Stunde. Die Gesamtwärme des Dampfes von der Admissionsspannung 6,62 kg/qcm setzt sich zusammen aus (s. Formeln (14), (15), (16), (17), S. 20 und 21):

der Flüssigkeitswärme $q = 163,6 \text{ Kal.}$

der inneren Verdampfungswärme $q = 447,8 \text{ „}$

und der äußeren Verdampfungswärme $A \cdot p \cdot u = 44,9 \text{ „}$

Daher Gesamtwärme = 656,0 Kal.

Demnach berechnet sich ein Dampfverbrauch pro PS_i und Stunde von

$$\frac{7470}{656} = 11,40 \text{ kg.}$$

Zu dem so gefundenen Werte für den Dampfverbrauch rechnet man meist noch einen Zuschlag von etwa 10 Proz.; alsdann erhält man 12,5 kg Dampf. Dieser Wert stimmt recht gut mit dem sub 2) bzw. 3) gefundenen Werte von 12,75 bzw. 13,1 kg überein.

Zweites Beispiel.

Leistungsversuch an einer Hochdrucklokomobile¹⁾ der Maschinenfabrik „Badenia“ vorm. Wm. Platz Söhne A.-G., Weinheim.

I. Hauptabmessungen der Maschine.

Cylinderdurchmesser 280 mm.

Kolbenhub 360 mm.

Durchmesser der Kolbenstange (einseitig) 42 mm.

Heizfläche 27,55 qm.

Rostfläche 0,66 qm.

II. Versuche.

Es sollten ermittelt werden:

Wirkungsgrad, somit effektive und indizierte Leistung der Maschine bei normaler Belastung, sowie Kohlen- und Speisewasserverbrauch.

¹⁾ Aus einem Abnahmebericht des großh. Baurats Pöhlmann entnommen.

Die Feststellung der effektiven Leistung geschah durch Bremsung; hierzu kam eine auf der Kurbelwelle befestigte Scheibe mit Bremsband in Anwendung.

Indikatorgramme wurden alle 20 Minuten auf beiden Cylinderseiten aufgenommen. Das Kesselspeisewasser und das Brennmaterial wurden laufend gewogen. Das letztere bestand aus Steinkohlenbriketts.

Die Versuchsergebnisse sind nachstehend zusammengefaßt.

1. Die Versuchsdauer betrug vier Stunden.
2. Die Dampfspannung im Kessel war 7 Atm., die mittlere Eintrittsspannung 6,75 Atm., die mittlere Cylinderfüllung 10,3 Proz.
3. Mittlere minutliche Umlaufszahl $n = 134$.
4. Die Bremsleistung betrug (bei einer Bremsbelastung von 135 kg 23 PS_e (s. S. 33 u. f. und S. 36).
5. Die indizierte Leistung, aus den Diagrammen berechnet, ergab sich im Mittel zu 26 PS_i (s. Formel (2) und (3), S 16 u. f.).
6. Daraus resultiert ein Nutzeffekt von $\frac{23}{26} = 88,5$ Proz.
7. Kohlenverbrauch im ganzen 140 kg.
8. Kohlenverbrauch pro Stunde und Quadratmeter Rostfläche $\frac{140}{4 \cdot 0,66} = 53$ kg.
9. Kohlenverbrauch pro Stunde und Bremspferd $\frac{140}{4 \cdot 23} = 1,52$ kg.
10. Speisewasserverbrauch im ganzen 1240 kg.
11. Speisewasserverbrauch pro Stunde und Bremspferd $\frac{1240}{4 \cdot 23} = 13,5$ kg.
12. Temperatur des Speisewassers im Entnahmegefäß 11° C.
13. Temperatur desselben an der Einführungsstelle des Speisewassers 72° C.
14. Verdampfung pro Stunde und Quadratmeter Heizfläche $\frac{1240}{4 \cdot 27,55} = 11,2$ kg.
15. Verdampfungsziffer $\frac{1240}{140} = 8,86$ kg; auf reine Kohle bezogen, d. h. nach Abzug von Asche und Schlacken (14,3 kg) $\frac{1240}{140 \cdot 14,3} = 9,9$ kg.

Drittes Beispiel.

Untersuchung einer 150 pferdigen Verbundlokomobile mit Kondensation von R. Wolf, Magdeburg-Buckau¹⁾.

Die Daten der Maschine sind folgende:

Durchmesser des Hochdruckcylinders 370 mm.

Durchmesser des Niederdruckcylinders 680 mm.

Hub 540 mm.

Normale Tourenzahl $n = 110$.

Spannung des Dampfes im Kessel normal 10 Atm.

Heizfläche 100 qm.

Rostfläche normal 1,55 qm.

Die Versuche erstreckten sich in der Hauptsache auf Bremsung und Verdampfung; nebenbei wurden auch Indikatordiagramme aufgenommen.

Der Versuch dauerte vier Stunden. Während desselben waren Wasserstand und Kesseldruck nahezu konstant. Die verheizten Kohlen hatten laut Analyse einen Heizwert von 7500 Kal. Die Rostfläche war für die Zeit des Versuches durch Abmauern auf 1,234 qm verkleinert.

Die Bremsung erfolgte mittels zweier auf der Schwungradwelle befestigter Brems scheiben. Die Hebellänge für die Bremsgewichte betrug 1,23 m. Die Gewichte selbst waren einschließlich der auf den Hebelarm 1,23 m reduzierten Hebelgewichte

für die rechte Scheibe 432 kg,

für die linke Scheibe 516 „

in Summa 948 kg.

Die durch einen Hubzähler bestimmte Tourenzahl ergab einen Mittelwert von 110,5.

Somit war die Nutzleistung nach Formel 33 (S. 35)

$$N_e = \frac{2 \cdot \pi \cdot l \cdot n}{60 \cdot 75} \cdot (G_1 + G_2) = \frac{2 \cdot \pi \cdot 1,23 \cdot 110,5}{60 \cdot 75} \cdot 948 = 180 \text{ P.-S.}$$

Der Kohlenverbrauch betrug während des Versuches 575 kg, in einer Stunde demnach $\frac{575}{4} = 143,75$ kg; pro effektive Pferdekraft und Stunde resultiert ein Verbrauch von

$$\frac{575}{4 \cdot 180} = 0,799 \text{ kg (Kohle).}$$

¹⁾ Siehe auch Aufsatz der Z. d. V. d. I., Bd. XXXIX und Bericht des Norddeutschen Vereines zur Überwachung von Dampfkesseln.

Das verdampfte Speisewasser war insgesamt 4954 kg; es wurde als Abfluß aus der Kondensation gemessen; die mittlere Speisewassertemperatur war 39°C.

Hiernach ergibt sich ein Speisewasserverbrauch pro effektive Pferdekraft und Stunde von

$$\frac{4954}{4 \cdot 180} = 6,88 \text{ kg (Wasser).}$$

1 kg Kohle endlich verdampfte

$$\frac{4954}{575} = 8,61 \text{ kg Wasser.}$$

Die gleichzeitig vorgenommenen Indikatorversuche Formel (2), (3), (4a) u. (4b), S. 16 an Vorder- und Hinterseite beider Cylinder ergaben innerhalb der Versuchszeit von 9h 27' bis 1h 27' folgende Werte:

10h 10'. Hochdr. vorn	43,69 P.-S.	11h 0'. Hochdr. vorn	44,37 P.-S.
„ hinten	39,38 P.-S.	„ hinten	43,39 P.-S.
Niederdr. vorn	58,77 P.-S.	Niederdr. vorn	55,45 P.-S.
„ hinten	57,5 P.-S.	„ hinten	53,27 P.-S.
	<u>199,34 P.-S.</u>		<u>196,48 P.-S.</u>
10h 32'. Hochdr. vorn	43,69 P.-S.	12h 0'. Hochdr. vorn	45,51 P.-S.
„ hinten	42,84 P.-S.	„ hinten	42,01 P.-S.
Niederdr. vorn	55,45 P.-S.	Niederdr. vorn	50,9 P.-S.
„ hinten	53,27 P.-S.	„ hinten	52,3 P.-S.
	<u>195,25 P.-S.</u>		<u>190,72 P.-S.</u>
		12h 40'. Hochdr. vorn	45,51 P.-S.
		„ hinten	42,84 P.-S.
		Niederdr. vorn	55,45 P.-S.
		„ hinten	52,3 P.-S.
			<u>196,10 P.-S.</u>

Aus diesen fünf Versuchen würde sich eine mittlere indizierte Leistung von 195,6 P.-S. ergeben.

(Weitere Beispiele siehe Kapitel N. sowie auch G.)

C. Gasmotoren.

Allgemeines.

Im Kleingewerbe war der Gaskraftbetrieb schon vor etwa 25 Jahren sehr verbreitet. Die stete Betriebsbereitschaft, einfache Bedienung, Fortfall der Konzessionserfordernis zur Aufstellung und die Bequemlichkeit der Energiezufuhr durch das stets vorhandene Leuchtgas sind die Hauptmomente für die schnelle Einbürgerung und Zunahme des Gasmotorenbetriebes. Eine nähere Betrachtung des Gasmotorenbetriebes

mit Leuchtgas führt zu dem Schlusse, daß die Betriebskosten nicht unerheblich sind. Größere Maschinentypen bis etwa 100 Pferdestärken lassen sich daher nur da mit Vorteil betreiben, woselbst der Gaspreis für motorische Zwecke sehr niedrig ist oder wo wegen Raummangels Dampfbetriebsmotoren ausscheiden müssen. In neuerer Zeit verwendet man für größere Gasmotorenanlagen sogenanntes Kraftgas, welches erheblich billiger als das Leuchtgas herzustellen ist; dasselbe hat noch den weiteren großen Vorteil, daß die zu betreibende Anlage unabhängig von einer Gasanstalt ist. Über die weiteren nennenswerten allgemeinen Punkte bezüglich Gasmotoren verweise ich hier noch auf den Abschnitt D.

Theoretischer Teil.

Der Kreisprozeß im Gasmotor ist ein unvollkommener, da die verfügbare Wärme nicht vollständig in Arbeit umgewandelt und demnach auch der theoretische Wirkungsgrad des idealen vollkommenen Gasmotors nicht erreicht wird.

Es gibt verschiedene Arten von Gasmotoren bzw. Betriebssysteme bei denselben. An dieser Stelle seien speziell nur solche Maschinen behandelt, bei welchen die Verbrennung bei konstantem Volumen mit vorhergehender Kompression erfolgt. Bei denselben ist der Wirkungsgrad sowohl von der Maximaltemperatur des Gases nach der Explosion als auch von der Kompression abhängig. Am rationellsten von allen Gasmaschinen arbeiten die Viertaktmaschinen, bei welchen für je zwei volle Kurbelumdrehungen durch die eintretende Gasexplosion ein Kolbenantrieb erfolgt. Die vierteilige Betriebsperiode geht so vor sich, daß beim ersten Hub die Aufnahme, beim zweiten die Kompression und beim dritten die Explosion der Ladung erfolgt, während durch den vierten Hub die Verbrennungsgase ausgetrieben werden. Der Regulator dient zur Konstanterhaltung der Umdrehungszahl durch Verhinderung einzelner Entzündungen — bei zu raschem Umlaufe — oder in vollkommenerer Weise durch geeignetes Variieren der Füllung — bis die normale Umdrehungsgeschwindigkeit wieder erreicht ist.

Im folgenden werde ich kurz die zur späteren Berechnung nötigen Daten und Formeln geben.

Nach dem Gay-Lussac-Mariotteschen Gesetze gilt:

$$(1) \quad \dots \dots \dots \frac{V}{V_1} = \frac{T}{T_1} \cdot \frac{p_1}{p},$$

worin T bzw. T_1 die absolute Temperatur $273 + t$ bzw. $273 + t_1$, p und p_1 bzw. V und V_1 die Drucke bzw. Volumina derselben Gewichtsmenge Gas bei t° bzw. t_1° C. bedeuten.

Bei Bestimmung der effektiven Leistung N_e in P.-S. benötigt man zur Berechnung der Bremsresultate die Formel:

$$(2) \dots \dots \dots P \cdot R = 716,200 \cdot \frac{N_e}{n},$$

bezw.

$$(3) \dots \dots \dots N_e = \frac{P \cdot R \cdot n}{716,200},$$

worin P in Kilogramm und R in Meter die Bremslast bzw. die Länge des Bremshebelarmes und n die Zahl der Umdrehungen pro Minute bezeichnen.

Die durch Bremsung geleisteten Kalorien ergeben sich aus:

$$(4) \dots \dots \dots N_e \cdot 75 \cdot 60 \cdot 60 \cdot A = \text{Kal.} \left(A = \frac{1}{424} \right).$$

Die indizierte Arbeit in Pferdestärken N_i resultiert aus:

$$(5a) \dots \dots \dots N_i = O \cdot 10\,000 \cdot p_i \frac{s_1 \cdot n}{30} \cdot \frac{1}{75};$$

hierin ist O die nutzbare Kolbenfläche in Quadratmeter; p_i der mittlere indizierte Druck in Kilogramm-Quadratcentimeter, n die Tourenzahl pro Minute, $s_1 = \frac{s}{4} =$ reduzierter Kolbenhub in Meter, da die eigentliche Arbeit nur bei jedem vierten Kolbenhub geleistet wird.

Handelt es sich um einen Gasmotor, der mit Auslassern (Aussetzen der Zündung) arbeitet, so ist der nach der Formel (5a) erhaltene Wert noch entsprechend umzurechnen; bezeichnet n' die Zahl der Zündungen, so ist, da normal auf zwei Umdrehungen eine Zündung kommt, der genannte Wert unter (5a) mit dem Verhältnis $\frac{n'}{n/2}$ zu multiplizieren.

Man kann auch statt mit der Tourenzahl von vornherein mit der Explosionszahl rechnen, um so mehr, wenn dieselbe, wie häufig geschieht, durch einen besonderen registrierenden Explosionszähler festgestellt wird. Die Formel (5a) nimmt sodann die Gestalt an:

$$(5b) \dots \dots \dots N_i = O \cdot 10\,000 \cdot p_i \frac{s \cdot n'}{60} \cdot \frac{1}{75}.$$

Der Wirkungsgrad ist das Verhältnis der effektiven Bremsarbeit N_e zur indizierten Arbeit N_i :

$$(6) \dots \dots \dots \eta = \frac{N_e}{N_i}.$$

Will man außer dem mechanischen Wirkungsgrade $\left(\frac{N_e}{N_i} \right)$ den Gesamtnutzeffekt der Gasmaschine, d. h. die Wärmeausnutzung des Gases ermitteln, so ist den vorstehenden Versuchen noch die Heizwertbestimmung für das verwendete Gas anzuschließen.

Zur kalorimetrischen Untersuchung des Gases benutzt man zweckmäßig das Junkerssche Kalorimeter. Der Vorgang des Versuches

ist, kurz gefaßt, folgender: In einer vertikal stehenden, von Kühlwasser umspülten Trommel wird das zu prüfende Gas (als Flamme) eine bestimmte Zeitlang verbrannt. Die entwickelte Wärme geht an das Kühlwasser über, dessen Menge G_1 in Kilogramm sowie Temperatur an Zu- und Abflußstelle (t_1 bezw. t_2) gemessen werden. Desgleichen wird der Gasverbrauch l in Liter innerhalb der Beobachtungszeit, die Temperatur t' des zufließenden Gases, der Gasüberdruck p' in Millimeter Quecksilbersäule und der Barometerstand b in Millimeter ermittelt. Der bei der Verbrennung entwickelte Wasserdampf schlägt sich an der Wand des Gefäßes nieder; dieses Wasser (Kondensation) wird aufgefangen und ebenfalls gewogen; dasselbe wiege G_2 kg.

Die Wärmemenge Q_1 , welche durch das Kühlwasser bei der Verbrennung von einem Liter Gas abgeführt wurde, ist:

$$(7) \dots \dots \dots Q_1 = \frac{1}{l} \cdot G_1 \cdot (t_2 - t_1) \text{ Kal.}$$

Hiervon ist abzuziehen die Wärmemenge, die im Wasserdampf der Verbrennungsprodukte enthalten war, weil dieselbe bei der Kondensation wieder frei geworden und an das Kühlwasser übergegangen ist; sie sei Q_2 und drückt sich, wenn λ (nach den Fliegnerschen Tabellen) die Gesamtwärme des gesättigten Wasserdampfes ist, aus als:

$$(8) \dots \dots \dots Q_2 = \frac{1}{l} \cdot G_2 \cdot \lambda,$$

λ ist für atmosphärischen Druck rund 600 Kal./kg.

Die pro 1 Liter Gas entwickelte Wärme ist demnach:

$$Q = Q_1 - Q_2 \text{ Kal.},$$

oder auf 0° C. und 760 mm Hg reduziert:

$$(9) \dots \dots \dots Q_0 = \frac{273 + t'}{273} \cdot \frac{760}{p' + b} \cdot Q \text{ Kal.}$$

Auf Grund dieser Heizwertbestimmung und des Versuches am Gasmotor ergibt sich die Wärmebilanz. Die rechnerische Durchführung derselben wird weiter unten (siehe S. 59 und 60) gezeigt werden.

Erstes Beispiel.

Untersuchung eines Gasmotors von 2 P.-S. Normalleistung, 140 mm Cylinderdurchmesser und 280 mm Kolbenhub.

I. Versuchsdaten.

Gasdruck mit Wassermanometer gemessen = 36 mm Wassersäule;
 Tourenzahl im Mittel von 30 Zählungen 164,5;
 Barometerstand 742,1 mm Hg;
 Temperatur der Luft 19° C.;

Temperatur des zu- und abfließenden Kühlwassers 13,2° C. bzw. 37,2° C.;

Oberfläche des Leitungsrohres für das abfließende Wasser, festgestellt behufs Berechnung des Strahlungsverlustes, = 0,47 qm.

In zwei Minuten fanden fünf Auslassungen statt. Bei Leerlauf erfolgten pro Minute 26 Ansaugungen, und da während zwei Umdrehungen normal eine Ansaugung erfolgen sollte und die Tourenzahl 164 war, so ergaben sich $\frac{164}{2} - 26 = 56$ Auslassungen.

Die Bestimmung der effektiven Arbeit erfolgte mittels des Brauerschen Bremsdynamometers. Die Bremsbelastung betrug 9 kg, der Hebelarm derselben 769 mm; der Hebelarm des Hebels an der Bremse 953 mm, das Gewicht des letzteren 0,79 kg; der Hebelarm des Hakens 709 mm, das Gewicht 0,572 kg; der Hebelarm der Feder 170 mm, das Gewicht 0,131 kg; der Hebelarm des Spannriemens (von Eisen) 1103 mm, das Gewicht 0,097 kg; der Hebelarm der Anschlüsse 769 mm, das Gewicht 0,645 kg. — Sämtliche Gewichte sind auf einen Hebelarm zu reduzieren und in Rechnung zu ziehen.

Die Untersuchung erstreckte sich auf folgende Ermittlungen:

1. Wieviel Kilogramm Wasser sind pro Stunde erforderlich?
2. Wieviel Kilogramm Gas sind pro Stunde erforderlich?
3. Wieviel Kalorien Wärmevermögen stehen insgesamt zur Verfügung?
4. Wieviel Kalorien bzw. Prozente des Gesamtwärmevermögens werden an das Wasser abgegeben?
5. Wie groß ist die effektive Arbeit in Pferdestärken?
6. Wie groß ist die indizierte Arbeit in Pferdestärken?
 - a) unter Nichtberücksichtigung der Auslasser,
 - b) unter Berücksichtigung der Auslasser.
7. Wieviel Kalorien bzw. Prozente des Gesamtwärmevermögens sind für die effektive Arbeit erforderlich?
8. Wieviel Kalorien bzw. Prozente des Gesamtwärmevermögens sind für die indizierte Arbeit erforderlich?
9. Wie stellt sich das Verhältnis $\frac{\text{Bremsarbeit}}{\text{indizierte Arbeit}}$ (Wirkungsgrad)?
 - a) unter Nichtberücksichtigung der Auslasser,
 - b) unter Berücksichtigung der Auslasser.
10. Wie stellt sich der Gasverbrauch beim Leerlauf?

II. Ausrechnungen der Versuchsergebnisse.

1. Der Kühlwasserverbrauch betrug im Mittel in einer Stunde 266,6 kg.

2. Der Gasverbrauch, abgelesen am Gasometer, ergab sich in einer Stunde, 11 Minuten und 15 Sekunden zu 3000 Liter, somit in einer

Stunde zu 2525 Liter. Dieser Gasverbrauch wurde festgestellt bei einem Luftdruck von 742,1 mm Barometerstand; demnach beträgt derselbe bei 760 mm Barometerstand pro Stunde nach Formel (1) S. 51

$$2525 \cdot \frac{742,1}{760} = 2465 \text{ l} = 2,465 \text{ cbm.}$$

Pro Kubikmeter Gas waren also $266,6 : 2,465 = 106 \text{ kg}$ Wasser nötig.

3. Der Heizwert des Gases betrug rund 6000 Kalorien, somit die gesamte Verbrennungswärme des verbrauchten Gases:

$$2,465 \cdot 6000 = 14790 \text{ Kal.}$$

4. Das Kühlwasser hatte sich von $13,2^\circ$ auf $37,2^\circ \text{ C.}$ und mit Berücksichtigung der Strahlung des Rohres für das abfließende Wasser auf $37,7^\circ \text{ C.}$ erhöht, also sind pro Stunde

$$266,6 \cdot (37,7 - 13,2) = 6540 \text{ Kal.}$$

oder 44,2 Proz. des Gesamtwärmevermögens an das Wasser abgegeben worden.

5. Bei Reduktion sämtlicher Gewichte auf den Hebelarm 769 mm erhält man eine Bremslast von 11,77 kg. Nach Formel (3) S. 52 ist somit die effektive Arbeit in PS_e :

$$N_e = \frac{11,77 \cdot 0,769 \cdot 164,5}{716,200} = 2,07 \text{ PS}_e.$$

6 a. Der mittlere indizierte Druck ergab sich aus dem Diagramm zu $p_i = 3,42 \text{ kg/qcm}$, die Oberfläche $O = \frac{\pi \cdot 0,140^2}{4} = 0,0154 \text{ qm}$,

$n = 164,5$, $s_1 = \frac{s}{4} = \frac{0,28}{4}$; somit ist die mittlere indizierte Leistung

bei Nichtberücksichtigung der Auslasser nach Formel (5) S. 52

$$N_i = 0,0154 \cdot 10000 \cdot 3,42 \cdot \frac{0,28 \cdot 164,5}{4 \cdot 30} \cdot \frac{1}{75} = 2,69 \text{ PS}_i.$$

6 b. Es würden ohne Berücksichtigung der Auslasser (5 innerhalb 2 Minuten, daher pro Minute 2,5) entsprechend einer Tourenzahl pro Minute von $\frac{164}{2} = 82$ an der Regulierwelle 2,69 P.-S. geleistet.

Diese Leistung reduziert sich jedoch unter Berücksichtigung der Auslasser im Verhältnis $\frac{82 - 2,5}{82}$, d. h. auf

$$2,69 \cdot \frac{79,5}{82} = 2,61 \text{ P.-S.}$$

7. Die durch Bremsung geleisteten Kalorien sind nach Formel (4) S. 52:

$$\frac{2,07 \cdot 75 \cdot 60 \cdot 60}{424} = 1316,5 \text{ Kal.}$$

oder in Prozenten des Gesamtwärmevermögens:

$$\frac{1316,5 \cdot 100}{14\,790} = 8,9 \text{ Proz.}$$

8. Der indizierten Arbeit entspricht bei Berücksichtigung bezw. bei Nichtberücksichtigung der Auslasser ein Energieaufwand in Kalorien (analog 6 a bezw. 6 b) von:

$$\frac{75 \cdot 60 \cdot 60}{424} \cdot 2,69 = 1711, \text{ bezw. } \frac{75 \cdot 60 \cdot 60}{424} \cdot 2,61 = 1660 \text{ Kal.}$$

oder in Prozenten des Gesamtwärmevermögens:

$$11,57 \text{ Proz., bezw. } 11,20 \text{ Proz.}$$

$$9. \text{ Der Wirkungsgrad} = \frac{\text{Bremsarbeit}}{\text{indizierte Arbeit}} \text{ (siehe Formel (6) S. 52)}$$

ergibt sich unter der Bedingung 9 a zu:

$$100 \cdot \frac{2,07}{2,61} = 77 \text{ Proz.,}$$

unter der Bedingung 9 b zu:

$$100 \cdot \frac{2,07}{2,69} = 79,4 \text{ Proz.}$$

10. Für Leerlauf reduziert sich der Gasverbrauch annähernd im Verhältnis der Ansaugungen $\frac{\text{bei Leerlauf}}{\text{bei Belastung}} = \frac{26}{79,5}$, woraus ein Verbrauch von 830 l pro Stunde folgt. Der vom Gasometer angezeigte Wert war etwas höher.

Der verhältnismäßig hohe Gasverbrauch des Motors erklärt sich aus seiner veralteten Konstruktion.

Zweites Beispiel.

Untersuchung eines 16pferdigen Gasmotors von Gebr. Körting-Körtingsdorf bezügl. Gasverbrauch¹⁾.

(270 mm Cylinderdurchmesser; 470 mm Kolbenhub.)

Die Zündflammenleitung war während des Versuches vor der Gasuhr abgezweigt, so daß der Verbrauch der Zündflamme nicht mitgerechnet wurde. Späterhin wurde derselbe durch eine besondere kleine Gasuhr zu 0,071 cbm pro Stunde bestimmt.

Der Barometerstand war während des Versuches 755 mm, die Gastemperatur in der Gasuhr 21° C., somit mußten die Angaben der

¹⁾ Siehe Offizieller Bericht der Prüfungskommission der Elektrotechnischen Ausstellung in Frankfurt a. M. 1891.

Gasuhr — um auf den mittleren Barometerstand von 760 mm und die mittlere Erdleitungstemperatur von 12° C. reduziert zu werden — mit

$$\frac{755}{760} \cdot \frac{273 + 12}{273 + 21} = 0,963$$

nach Formel (1) S. 51 multipliziert werden.

Das Mittel aus je drei Versuchen bei größter und halber Leistung, sowie bei Leerlauf ergab folgende Werte:

Bremsleistung	Reduzierter Gasverbrauch einschl. Zündflamme	Gas pro gebremste PS_e und Stunde
P.-S.	cbm	cbm
18,15 (größte Leistung)	11,303	0,623
9,50 (halbe Leistung)	7,295	0,768
0,00 (Leerlauf)	3,287	—

Bemerkung: Zur vollständigen Verbrennung von 1 cbm Gas waren 5,304 cbm Luft erforderlich.

Es ist interessant, das Resultat dieses Versuches mit demjenigen von Beispiel 4, Seite 61, welches sich ebenfalls auf einen Körting'schen Gasmotor, jedoch neuerer Konstruktion, bezieht, zu vergleichen.

Drittes Beispiel.

Prüfung eines Gasmotors von 4 P.-S. Leistung, 0,171 m Cylinderdurchmesser und 0,34 m Hub.

I. Ausführung des Versuches am Motor.

Die Bremsung des Motors erfolgte mittels Bremsband, die Bremslast betrug 21,311 kg, der Bremshebel 0,83 m.

Es wurden folgende Beobachtungen ausgeführt und geschahen die Ablesungen alle fünf Minuten:

1. Zeit.
2. Stand des Tourenzählers mit springenden Ziffern (Touren der Hauptwelle).
3. Stand des Explosionszählers.
4. Stand der Gasuhr.
5. Kühlwassermenge, durch Wägung ermittelt.
6. Temperatur der Luft.
7. Temperatur des Gases.
8. Temperatur der Abgase.
9. Temperatur des zufließenden Wassers.
10. Temperatur des abfließenden Wassers.
11. Luftdruck in Millimeter Hg.

12. Gasdruck in Millimeter H_2O (Überdruck).

13. Mittlerer indizierter Druck p_i in Kilogramm-Quadratzentimeter während des Arbeitshubes.

Der Versuch dauerte 1 Std. und 45 Min. = 105 Min.

II. Daten und rechnerische Auswertung.

1. Der fortlaufend registrierende Tourenzähler zeigte: zu Anfang der Beobachtungszeit 6257, am Ende der Beobachtungszeit 23 047; daher mittlere minutliche Tourenzahl

$$\frac{23\ 047 - 6257}{105} = \frac{16\ 790}{105} = \mathbf{160}.$$

2. Der registrierende Explosionszähler zeigte am Anfang: 42 820, am Ende 50 862; daher mittlere minutliche Explosionszahl

$$\frac{50\ 862 - 42\ 820}{105} = \mathbf{76,6}.$$

3. Stand der Gasuhr am Anfang 0,118, am Ende 6,516; somit Gasverbrauch in Kubikmeter pro Stunde einschließlich Zündflamme:

$$\frac{6,516 - 0,118}{105} \cdot 60 = \frac{6,398}{105} \cdot 60 = \mathbf{3,66\ cbm}.$$

4. Kühlwasserverbrauch = **236** kg/Std.

5. Mittlere Temperatur der Luft = $19,7^\circ\text{C}$.

6. Mittlere Temperatur des Gases = $18,8^\circ\text{C}$.

7. Mittlere Temperatur der Abgase = 437°C .

8. Mittlere Temperatur des zufließenden Wassers = 12°C .

9. Mittlere Temperatur des abfließenden Wassers = 53°C .

10. Barometerstand in Millimeter Quecksilbersäule 742.

11. Gasdruck im Mittel 31,8 mm Wassersäule oder in Millimeter Quecksilbersäule:

$$p' = \frac{31,8 \cdot 0,736}{10,000} = 2,34\text{ mm}.$$

12. Mittlere indizierte Leistung:

$$N_i = 0 \cdot 10\ 000 \cdot p_i \cdot \frac{s \cdot n'}{60} \cdot \frac{1}{75}$$

(nach Formel (5 b), S. 52).

Mit Einsetzung der Werte erhalten wir bei einem mittleren gemessenen $p_i = 3,488$:

$$N_i = \frac{\pi}{4} \cdot 0,171^2 \cdot 10\ 000 \cdot 3,488 \cdot \frac{0,34 \cdot 76,6}{60 \cdot 75} = \mathbf{4,625\ P-S_i}.$$

13. Mittlere Bremsleistung nach Formel (3), S. 52:

$$N_e = \frac{P \cdot R \cdot n}{716,200} = \frac{21,31 \cdot 0,830 \cdot 160}{716,200} = \mathbf{3,96\ P-S_e}.$$

14. Der Wirkungsgrad beträgt:

$$\eta = \frac{N_e}{N_i} = \frac{3,96}{4,625} = 85,7 \text{ Proz.}$$

III. Heizwertbestimmung des Gases mittels des Junkersschen Kalorimeters (siehe Seite 53).

Die Heizwertbestimmung wurde vorgenommen, um die im Gasmotor stattfindende Wärmeausnutzung bzw. die Wärmeverluste zu ermitteln.

Es wurden gemessen:

Gasverbrauch in Liter = $l = 12$.

Temperatur des zufließenden Wassers beim Kalorimeterversuch
 $t_1 = 12^\circ \text{C}$.

Temperatur des abfließenden Wassers beim Kalorimeterversuch
 $t_2 = 25,05^\circ \text{C}$.

(Diese beiden Werte sind die Mittel aus je neun Ablesungen während der Dauer des Heizwertversuches.)

Gewicht des verbrauchten Kühlwassers in Gramm = $G_1 = 4615$.

Gewicht des als Verbrennungsprodukt entstandenen Kondenswassers in Gramm = $G_2 = 13$.

Gasüberdruck in Millimeter Hg = $p'' = 1,4$.

Luftdruck in Millimeter Hg = $b = 743$.

Gastemperatur = $t'' = 18^\circ \text{C}$.

Aus diesen Messungen ergibt sich:

Die Wärmemenge, die durch das Kühlwasser bei der Verbrennung von 1 l Gas abgeführt wird, ist nach Formel (7), S. 53:

$$Q_1 = \frac{1}{l} G_1 (t_2 - t_1) = \frac{1}{12} \cdot 4615 \cdot 13,05 = 5019 \text{ g-Kal.}$$

Die Wärmemenge, welche durch die Kondensation des bei der Verbrennung entstandenen Wassers frei wird, ist nach Formel (8), S. 53:

$$Q_2 = \frac{1}{l} \cdot G_2 \cdot \lambda \text{ g-Kal. } (\lambda = 600, \text{ siehe Fliegnersche Tabellen}).$$

Daher:

$$Q_2 = \frac{1}{12} \cdot 13 \cdot 600 = 650 \text{ g-Kal.}$$

Die pro 1 l Gas entwickelte Wärme ist sonach:

$$Q = Q_1 - Q_2 = 5019 - 650 = 4369 \text{ g-Kal.},$$

oder reduziert auf 0° und 760 mm Hg nach Formel (9), S. 53:

$$\begin{aligned} Q_0 &= \frac{273 + t''}{273} \cdot \frac{760}{p'' + b} \cdot Q = \frac{273 + 18}{273} \cdot \frac{760}{1,4 + 743} = 4369 \\ &= \frac{291}{273} \cdot \frac{760}{744,4} \cdot 4369 = 4760 \text{ g-Kal.} \end{aligned}$$

IV. Wärmebilanz.

Auf Grund dieser Heizwertbestimmung und des Versuches am Motor ergibt sich die Wärmebilanz. Durch Umrechnung des Heizeffektes auf Druck und Temperatur, wie sie beim Motorversuch herrschten, resultiert nach Formel (9) ein Heizeffekt des Gases von:

$$Q' = \frac{273}{273 + t'} \cdot \frac{b + p'}{760} \cdot Q_0 = \frac{273}{273 + 18,8} \cdot \frac{742 + 2,34}{760} \cdot 4760$$

$$= \frac{273}{291,8} \cdot \frac{744,34}{760} \cdot 4760 = 4361 \text{ g-Kal.},$$

d. h. pro 1 cbm Gas 4361 kg-Kal. Somit ergeben 3,66 cbm Gas 15 960 kg-Kal.

Diese Wärme entwickelte sich nach obigem in einer Stunde, d. i. in $60 \cdot 60 = 3600$ Sekunden.

100 Kal. werden demnach in $\frac{60 \cdot 60 \cdot 100}{15\,960} = 22,56$ Sekunden erzeugt. Diese 100 Wärmeeinheiten (die in 22,56 Sekunden frei werden) verteilen sich wie folgt:

1. Indizierte Leistung in Kalorien in 22,56 Sekunden:

$$\frac{N_i \times 75 \times \text{sec}}{424} = \frac{4,625 \cdot 75 \cdot 22,56}{424} = 18,5;$$

2. Bremsleistung in Kalorien in 22,56 Sekunden:

$$\frac{N_e \times 75 \times \text{sec}}{424} = \frac{3,96 \cdot 75 \cdot 22,56}{424} = 15,8;$$

3. Abgabe an das Kühlwasser in Kalorien in 22,56 Sekunden:

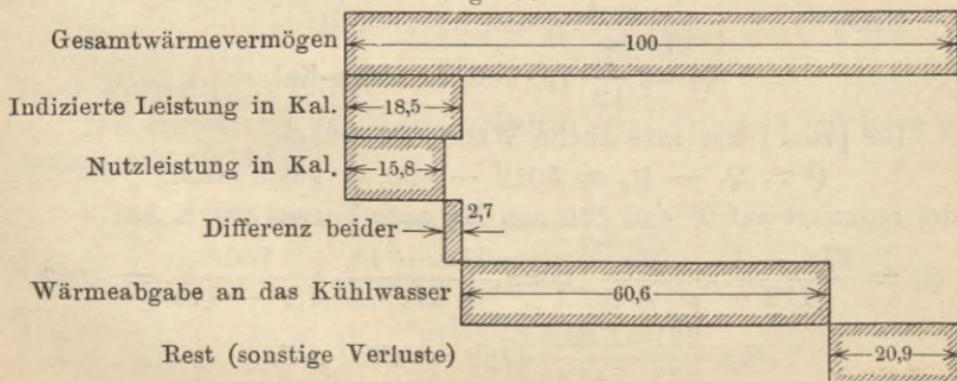
$$\frac{236 \cdot (t_2 - t_1) \cdot 22,56}{60 \cdot 60} = \frac{236 \cdot 41 \cdot 22,56}{3600} = 60,6;$$

die übrigen Verluste ergeben sich als:

$$100 - (18,5 + 60,6) = 100 - 79,1 = 20,9.$$

Diese Wärmebilanz sei graphisch durch Fig. 22 dargestellt.

Fig. 22.



Viertes Beispiel.

Vergleichversuche für den Gasverbrauch bei Leucht- und Kraftgasbetrieb, ausgeführt an Körtingschen Gasmotoren.

Die verwendeten Maschinen von gleicher Leistung (100 PS_e) gehören derselben Type an. Die eine wurde mit Leuchtgas, die andere mit Kraftgas betrieben. Die Bremsleistungen wurden mittels des Pronyschen Zaumes bestimmt und der Gasverbrauch verschiedenen Leistungen entsprechend festgestellt.

Die im einzelnen gemessenen sowie die durch Rechnung gefundenen Werte sind in Tabellen zusammengestellt. Die gebremste Leistung N_e ergibt sich jeweils aus der Bremsbelastung P , dem Hebelarm der Bremse R und der Tourenzahl n nach Formel (3), S. 52 zu:

$$N_e = \frac{P \cdot R \cdot n}{716,200} = \frac{P \cdot 2,400 \cdot n}{716,200} = 0,00335 \cdot P \cdot n.$$

Bremsprobe mit Leuchtgas.

	Touren	R in Meter	P in Kilo- gramm	PS_e	Gasver- brauch pro Stunde cbm	Gasver- brauch pro Stunde u. PS_e Liter
Größte Leistung .	130	2,400	261,6	114,0	58,02	509,0
Normale Leistung	130	2,400	230,0	100,0	53,16	531,6
Halbe Leistung .	132	2,400	130,1	75,5	38,04	661,6
Leergang	134	—	—	—	18,24	—

Gasdruck: 110 mm Wassersäule, Gastemperatur: 20° C., Luftdruck: 755 mm.

Bremsprobe mit Kraftgas.

	Touren	R in Meter	P in Kilo- gramm	PS_e	Gasver- brauch pro Stunde cbm	Gasver- brauch pro Stunde u. PS_e Liter
Größte Leistung .	130	2,400	261,7	114,0	216	1900
Normale Leistung	131	2,400	230,5	101,0	195	1930
Halbe Leistung .	134	2,400	130,9	58,8	150	2550
Leergang	136	—	—	—	66	—

Gasdruck: 100 mm, Gastemperatur: 20° C., Luftdruck: 749 mm.

Danach beträgt die Ausgiebigkeit des Leuchtgases für motorische Zwecke ungefähr das 3,5 ÷ 4fache von der des Kraftgases. In jedem einzelnen Falle hängt natürlich die Ausgiebigkeit sowohl des Leucht- wie des Kraftgases sehr von der zur Gaserzeugung verwandten Kohle ab und wird obiges Verhältnis somit in ziemlich weiten Grenzen schwanken.

(Weitere Beispiele siehe Kapitel D.)

D. Generatorgasanlagen.

Allgemeines.

Schon im vorigen Kapitel wurde auf die Bedeutung hingewiesen, welche die Verwendung des Kraftgases für den Betrieb durch Gasmotoren neuerdings gewonnen hat. Wenn auch schon in einer Reihe von Städten Elektrizitätswerke und Blockstationen mit Leuchtgasbetrieb errichtet worden waren, so wurde es doch als großer Nachteil empfunden, daß derartige Zentralstationen von einer anderen (der Gasanstalt) abhängen und zudem der zum Betriebe verwandte Rohstoff, das Leuchtgas, verhältnismäßig teuer war. Solche Stationen konnten daher nur unter besonders günstigen Voraussetzungen mit dem Dampfbetrieb in Wettbewerb treten.

Sobald nun der Gasmotor sich von der Gasanstalt unabhängig machen konnte, d. h. sobald ihm zum Betriebe ein billiges und in einfacher Weise herstellbares Betriebsgas zur Verfügung stand, mußte sich das Verhältnis ändern und die Verwendung des Gasmotors in Elektrizitätswerken eine ausgedehntere werden. Ein Betriebsgas, welches den genannten Bedingungen bis jetzt am besten entspricht, ist das Dowsongas, auch vielfach Generator- oder Kraftgas genannt, welches in der Mitte der 80er Jahre in Deutschland zuerst von der Gasmotorenfabrik Deutz zum Betriebe von Motoren verwendet wurde.

In wenigen Jahren sind zahlreiche Elektrizitätswerke mit Generatorgasbetrieb erbaut worden und hat sich diese Betriebsart vollkommen bewährt. Der Verbrauch an Brennmaterial (Anthracit und Koks) ist verhältnismäßig sehr gering. Besonders in solchen Fällen, in denen die Kosten des Transportes der Kohle hoch sind, und auch da, wo zu wenig und kein brauchbares Wasser zu haben ist, bietet der Betrieb mit Generatorgas große Vorteile.

Erzeugung des Generator- oder Kraftgases.

Das Kraftgas¹⁾ wird durch Einblasen von Luft und Wasserdampf in glühende Kohlen gewonnen. Diese letzteren kommen in einem geeigneten Ofen zu unvollkommener Verbrennung, d. h. das entstehende Verbrennungsprodukt ist zum größten Teile Stickstoff, Kohlenoxyd und Wasserstoff, neben denen geringere Mengen Kohlensäure und Kohlenwasserstoffe auftreten; der eingeleitete Wasserdampf zersetzt sich und liefert als brennbaren Bestandteil Wasserstoff.

Der zu vergasende Brennstoff — am besten gasarme Kohlenarten, wie Anthracit, Hüttenkoks, in geringerem Grade Gaskoks — wird in

¹⁾ Siehe auch: Die Motoren für Gewerbe und Industrie von A. Musil, o. ö. Professor an der K. K. Technischen Hochschule in Brünn.

einem cylindrischen Schachtofen, dem Generator, bei Rotglut verbrannt. Das Brennmaterial wird durch einen mit doppeltem Verschuß versehenen Fülltrichter von oben in den Ofen geschüttet. Den auf 300° überhitzten Wasserdampf liefert ein kleiner Dampfkessel. Der Dampf gelangt durch einen Injektor, in dem er atmosphärische Luft ansaugt, — gemischt mit letzterer — durch den Rost in die glühende Kohenschicht des Generators. Über derselben sammelt sich ein Gas, welches in Volumprozenten an:

Wasserstoff	etwa 18
Kohlenoxyd	„ 26
Kohlenwasserstoff	„ 2
Kohlensäure	„ 7
Stickstoff	„ 47

somit etwa 46 Proz. brennbare Bestandteile enthält. Die beim Anheizen des Generators entstehenden schlecht brennbaren Gase werden durch eine Ablaßleitung aus dem Generator ins Freie geleitet.

Die Erzeugung des Gases kann, wenn nötig, eine ununterbrochene sein. Ein Abschlacken des Rostes ist alle 5 bis 10 Stunden erforderlich.

Der Heizwert des Kraftgases ist bei Anthracitfeuerung 1200 bis 1500 Wärmeinheiten, d. h. etwa der vierte Teil desjenigen von Leuchtgas. Andererseits aber wird aus 1 kg Kohle bei Erzeugung von Kraftgas eine ungleich höhere Menge Gas (4 bis 5 cbm) gewonnen.

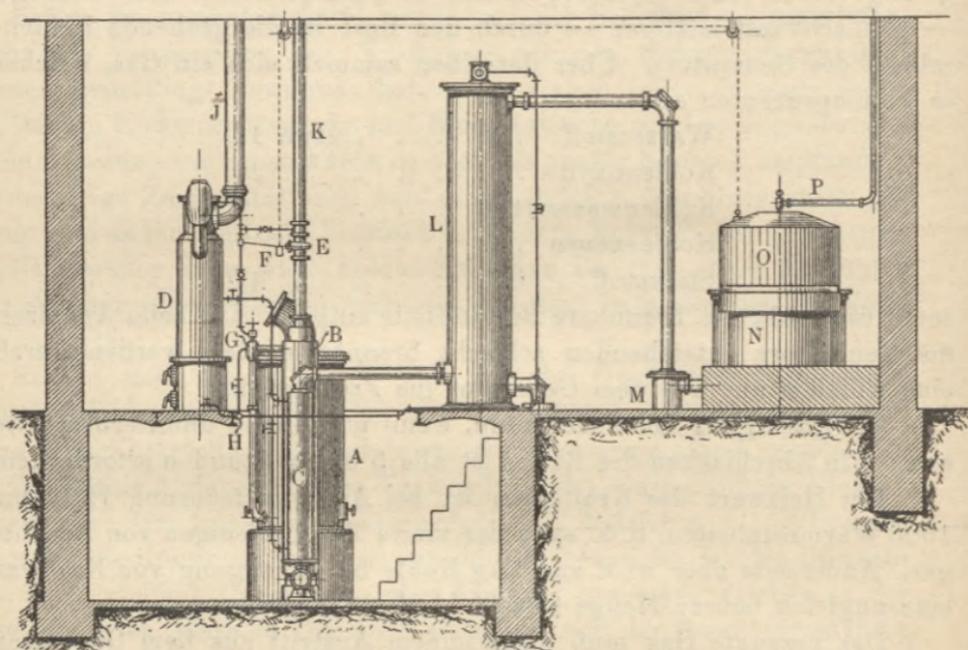
Das erzeugte Gas muß nach seinem Austritt aus dem Generator gekühlt und gereinigt werden. Um die Wärmeausnutzung möglichst vorteilhaft zu gestalten, wird bei den neuesten Systemen von Kraftgasanlagen das Gas zunächst durch das Röhrensystem des sogenannten Winderhitzers geleitet, in dem es seine Wärme an die zur Verbrennung der Kohlen dienende Luft abgibt, diese also vorwärmt. Das Gas nimmt sodann zu weiterer Wärmeentziehung seinen Weg durch den Speisewasservorwärmer. Behufs Reinigung von mitgenommener Asche und Teer tritt das Gas durch eine Wasservorlage und endlich durch einen Skrubber, ein hohes Gefäß aus Blech, welches bis oben mit Koks gefüllt ist; während letzterer von Wasser berieselt wird, strömt von unten das Gas durch denselben. Bei teerreichen Gasen wird außerdem noch ein Sägespänerreiniger eingeschaltet.

Ein größerer Gasbehälter zur Aufspeicherung des Gases ist nicht erforderlich; es genügt eine verhältnismäßig kleine Reglerglocke, welche als Regulator zwischen Gasverbrauch des Motors und Gaserzeugung dient. Von der Glocke aus gelangt das Gas zum Motor.

Die beschriebene Einrichtung wird durch beifolgende Skizze (Fig. 23 a. f. S.) einer Anlage (nach Körtingschem System) veranschaulicht und führt die Bezeichnung „Druckgasanlage“. Neuerdings haben auch mehr oder weniger vereinfachte Systeme von Generatoranlagen Verbreitung gefunden. Ich erinnere hier speziell an die „Sauggasanlagen“, bei welchen der besonders zu beheizende Dampfkessel durch einen von

den Generatorgasen selbst geheizten „Verdampfer“ ersetzt wird und der Gasbehälter in Wegfall kommt. Das Gas wird unmittelbar durch den Motor oder durch einen besonders betriebenen Ventilator aus dem Generator gesogen.

Fig. 23.



A Generator. B Winderhitzer. C Vorwärmer. D Dampfkessel.
 E Ablasshahn. F Verbindung von der Dampfleitung des Gebläses zum Gasdruckregler. G Gebläse. H Wasserleitung. J Schornstein. K Abzugsrohr ins Freie. L Koksskrubber. M Wassertopf. N Sägespänerreiniger. O Gasdruckregler. P Entlüftungsleitung.

Untersuchung der Kraftgasanlage des Elektrizitätswerkes Erlangen.

Die gesamte Kraftgasanlage der Zentrale Erlangen, einschließlich der Gasmaschinen ¹⁾, ist von Gebr. Körting-Körtingsdorf geliefert und dient als ausschließliche Betriebskraft für das Werk. Sie besteht aus zwei kompletten Anlagen von je 125 bis 140 P.-S.-Leistung. Die Motoren sind mit je einer Gleichstrommaschine direkt gekuppelt.

Durch die Abnahmeprüfungen sollte festgestellt werden, ob die garantierte Brennmaterialökonomie und der garantierte Wert des Wirkungsgrades der Motoren eingehalten seien, und wurden zu diesem Zwecke von dem Verfasser nachstehend beschriebene Versuche vorgenommen.

¹⁾ Die nachfolgenden Untersuchungen erstrecken sich auch auf die Prüfung der Gasmaschinen und könnten insofern unter das Kapitel „Gasmotoren“ aufgenommen sein. Da sich jedoch die Hauptuntersuchung auf die Brennmaterialökonomie der gesamten Gaskraftanlage bezog, so haben diese Untersuchungen im vorliegenden Kapitel Aufnahme gefunden.

I. Beschreibung der Versuche.

Am ersten Tage wurde der Maschinensatz I einer achtstündigen Dauerprobe bei normaler Belastung unterworfen; dieselbe erfolgte durch die direkt gekuppelte Nebenschluß-Dynamo. Der normalen Leistung des Gasmotors von 125 P.-S. entspricht unter Zugrundelegung des vertraglichen Wirkungsgrades der Dynamomaschine von 91 Proz. — dieser Wert wurde auch durch die besonderen Versuche an den elektrischen Maschinen¹⁾ festgestellt — eine Dynamoleistung von rund 84 KW. Diese Leistung wurde während des Versuches möglichst beibehalten. Die Ablesungen fanden von 15 zu 15 Minuten statt. Dampfdiagramme wurden in Zeitabschnitten von einer halben Stunde aufgenommen. Der Brennmaterialverbrauch — für den Generator mit Anthracitfeuerung und für den Dampfkessel mit Gaskoksfeuerung — wurde durch Wägung festgestellt. Der Verbrauch an Kühl- und Speisewasser (aus der städtischen Leitung entnommen) ergab sich durch Ablesung zweier geeichter Wassermesser (eines großen und eines kleinen Messers, beide parallel geschaltet).

Bei Beginn des Versuches wurde die Brennmaterialschicht im Generator gemessen; nach Beendigung desselben wurden Asche und Schlacken aus dem Generator entfernt und so viel Anthracit nachgeschüttet, bis die ursprüngliche Brennmaterialhöhe wieder erreicht war.

Vor dem Beginn des Versuches war der Motor zwei Stunden im Betriebe gewesen, davon die letzte Stunde bei Normalbelastung.

Am zweiten Versuchstage wurde der Maschinensatz II unter abgeänderten Bedingungen geprüft. Es sollte festgestellt werden, ob eine Erhöhung der Tourenzahl des Gasmotors — entsprechend einer Erhöhung der Klemmenspannung der Dynamo auf rund 500 Volt — bei mäßig erhöhter Belastung dauernd anstandslos durchzuführen sei.

Es wurde zunächst ein $3\frac{1}{2}$ stündiger Versuch bei einer mittleren Belastung von 86,4 KW. angestellt. Anschließend hieran wurde der Motor $4\frac{1}{2}$ weitere Stunden stärker belastet, derart, daß die durchschnittliche Belastung während des ganzen achtstündigen Betriebes 88,7 Kilowatt betrug, somit längere Zeit erheblich höher war, als der normalen Leistung entspricht.

Im übrigen wurde der zweite Versuch analog dem ersten durchgeführt.

II. Versuchstabellen und Resultate.

Es mögen zunächst die an den beiden Tagen vorgenommenen Messungen in Tabellen I und II folgen:

¹⁾ Siehe auch S. 110 und folgende.

Versuchstabelle I.

(Maschinensatz I.)

Gasmotor: Cylinderdurchmesser 500 mm. Hub 960 mm.

Versuchsdauer = 8 Stunden.

Zeit	Ampère	Volt	Touren	Kilowatt	Anthracit kg	Koks kg	Mittlerer indizierter Druck p_i kg/qcm	Bemerkungen
8 ^h	172,0	450,0	—	—	60	25	—	Generatorstand = 1,52 m
8 ¹⁵	180,0	470,0	122	84,60	—	—	4,72	
8 ³⁰	171,0	447,0	—	76,44	—	—	—	Wasserverbrauch:
8 ⁴⁵	172,4	462,5	—	79,74	—	—	4,76	12 ^h 30' großer Messer, Stand: 698,6 m ³
9	184,0	467,5	123	86,02	60	—	—	3 ^h 50' großer Messer, Stand: 709,7 m ³
9 ¹⁵	177,0	462,5	122	81,86	—	—	4,68	
9 ³⁰	180,0	470,0	—	84,60	—	—	—	
9 ⁴⁵	179,0	462,5	—	82,78	—	—	4,72	3,5 Stunden 11,1 m ³
10	181,0	472,5	—	85,52	—	—	—	
10 ¹⁵	180,0	465,0	122	83,70	—	—	4,60	12 ^h 30' klein. Messer, Stand: 260,24 m ³
10 ³⁰	178,0	466,5	—	83,04	60	—	—	3 ^h 50' klein. Messer, Stand: 263,45 m ³
10 ⁴⁵	177,6	465,0	121	82,58	—	—	4,48	
11	180,4	470,0	—	84,79	—	—	—	
11 ¹⁵	180,0	475,0	—	85,50	—	—	4,60	3,5 Stunden 3,21 m ³
11 ³⁰	180,2	472,5	—	85,14	—	—	—	
11 ⁴⁵	180,0	470,5	—	84,69	—	—	—	Somit Gesamtverbrauch:
12	180,0	472,0	—	84,96	—	—	—	in 3,5 Stunden = 11,1 + 3,21
12 ¹⁵	177,2	465,5	—	82,49	—	—	—	= 14,31, oder pro Stunde
12 ³⁰	177,0	467,5	—	82,75	—	—	—	= 4,09 m ³ , oder pro P.-S. und
12 ⁴⁵	178,8	467,5	—	83,59	60	30	—	Stunde = 32,62 Liter.
1	181,8	475,0	—	86,35	—	—	—	Brennmaterialverbrauch:
1 ¹⁵	182,0	475,0	—	86,45	—	—	4,56	Bei Beendigung des Versuches
1 ³⁰	180,0	470,0	—	84,60	—	—	—	waren übrig: 18,5 kg Koks;
1 ⁴⁵	180,0	470,0	—	84,60	—	—	4,60	nach Abschlackung des Generators,
2	180,0	468,5	—	84,33	—	—	—	wobei 44 kg Asche und Schlacke (mit etwas Löschwasser) entfernt wurden, wurden
2 ¹⁵	181,0	470,0	—	85,07	—	—	4,76	40 kg Anthracit nachgefeuert, um den ursprünglichen Stand zu erreichen; somit ist der Gesamtverbrauch:
2 ³⁰	180,0	471,5	—	84,87	—	—	—	
2 ⁴⁵	180,0	467,5	—	84,15	60	—	4 52	
3	177,0	465,0	119	82,30	—	—	—	
3 ¹⁵	180,4	472,5	—	85,24	—	—	—	
3 ³⁰	180,0	469,0	—	84,42	—	—	4,76 (3 ⁴⁰)	(300 + 55) — 18,5 + 40 = 376,5 kg Anthracit u. Koks.
3 ⁴⁵	180,0	470,0	121	84,60	—	—	4,64	
4	179,0	470,0	—	84,13	—	—	4,52	

Sa. 2685,90 | 300 | 55

2685,90 : 4 = 671,48 Kilowattstunden; 671,48 : 8 = 83,935 KW. mittl. Leistung.

Versuchstabelle II.

(Maschinensatz II.)

Gasmotor: Cylinderdurchmesser = 500 mm. Hub = 960 mm.

Versuchsdauer = 8 Stunden.

Zeit	Ampère	Volt	Touren	Kilowatt	Anthracit kg	Koks kg	Mittlerer indizierter Druck P_i kg/qcm	Bemerkungen
8 ^h	160,0	500,0	126,5	—	60	30	—	Generatorstand = 1,36 m
8 ¹⁵	162,0	495,0	125,0	80,19	—	—	—	
8 ³⁰	166,0	510,0	—	84,66	—	—	—	Wasserverbrauch:
8 ⁴⁵	171,0	520,0	127,5	88,92	—	—	—	8 ^h 20' großer Messer, Stand: 736,9 m ³
9	167,0	510,0	127,0	85,17	60	—	—	3 ^h 50' großer Messer, Stand: 762,2 m ³
9 ¹⁵	168,0	517,5	124,0	86,94	—	—	—	
9 ³⁰	169,0	512,5	126,0	86,61	—	—	—	
9 ⁴⁵	170,0	518,5	127,5	88,15	—	—	4,8	7,5 Stunden 25,3 m ³
10	169,0	519,0	126,5	87,71	—	—	—	
10 ¹⁵	168,5	515,0	127,0	86,77	60	—	4,8	8 ^h 20' klein. Messer, Stand: 273,27 m ³
10 ³⁰	170,6	526,0	126,0	89,74	—	—	—	5 ^h 30' klein. Messer, Stand: 280,86 m ³
10 ⁴⁵	169,0	517,0	126,0	87,37	—	—	4,6	
11	169,0	517,5	—	87,46	—	—	—	
11 ¹⁵	165,0	509,0	127,0	83,98	—	—	—	7,5 Stunden 7,59 m ³
11 ³⁰	168,0	515,0	—	86,52	60	—	4,76 (11 ²⁰)	
11 ⁴⁵	171,2	525,0	—	89,88	—	—	4,8	Somit Gesamtverbrauch:
12	170,4	525,0	128,0	89,45	—	—	—	in 7,5 Stunden = 32,9 m ³ ,
12 ¹⁵	175,0	528,0	—	92,40	—	—	—	oder pro Stunde = 4,4 m ³ ,
12 ³⁰	173,0	525,0	—	90,82	—	—	5,0	oder pro P.-S. und Stunde
12 ⁴⁵	171,0	525,0	127,0	89,78	—	—	4,68	= 33,2 Liter
1	169,4	522,5	—	88,51	60	—	—	Brennmaterialverbrauch:
1 ¹⁵	173,2	532,0	128,0	92,14	—	—	4,64	Anthracit . . . 420 kg
1 ³⁰	175,2	538,0	127,0	94,26	—	—	—	rückgewogen . . 44 „
1 ⁴⁵	174,0	533,5	—	92,83	—	—	4,88	
2	174,0	532,5	128,0	92,65	—	—	—	376 kg
2 ¹⁵	172,6	528,0	126,5	91,13	—	—	4,64	Koks 60 kg
2 ³⁰	170,0	520,0	—	88,40	60	30	—	rückgewogen . . 19 „
2 ⁴⁵	178,4	547,5	126,0	97,67	—	—	4,68	41 kg
3	172,0	528,5	—	90,80	—	—	—	
3 ¹⁵	170,0	525,0	126,5	89,25	60	—	—	Gesamtverbrauch:
3 ³⁰	168,0	515,0	—	86,52	—	—	—	376 + 41 = 417 kg
3 ⁴⁵	169,2	513,0	—	86,60	—	—	—	
4	167,0	512,5	—	85,60	—	—	—	

Sa. 2838,88 | 420 | 60

2838,88 : 4 = 709,72 Kilowattstunden; 709,72 : 8 = 88,715 KW. mittl. Leistung.

Die Brennmaterialökonomie ergibt sich nach diesen Versuchen wie folgt:

Bei normaler Belastung des Maschinensatzes I (83,935 KW.) resultierte laut Versuchstabelle I ein Verbrauch an Anthracit und Koks von
376,5 kg.

Hierbei war die gesamte geleistete elektrische Nutzarbeit
671,48 Kilowattstunden.

Daraus folgt ein Brennmaterialverbrauch pro Kilowattstunde von
 $376,5 : 671,4 = 0,56$ kg (garantiert waren 0,78 kg).

Bei der höheren Belastung des Maschinensatzes II (im Mittel 88,715 KW.) ergab sich nach Versuchstabelle II ein Brennmaterialverbrauch von

417 kg.

Die elektrische Nutzarbeit betrug
709,72 Kilowattstunden.

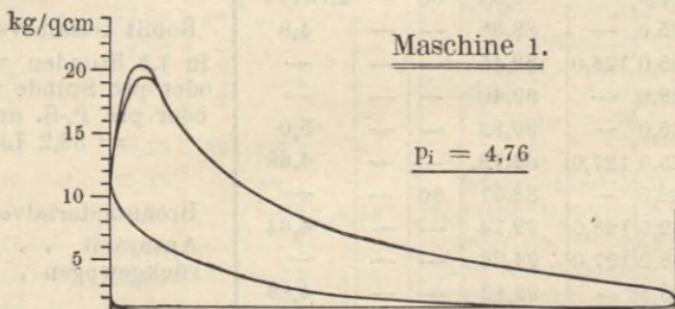
Daher Brennmaterialverbrauch pro Kilowattstunde:
 $417 : 709,72 = 0,588$ kg.

Es stieg somit der Brennmaterialverbrauch gegenüber dem ersten Versuch nur wenig.

Als Verbrauch an Kühl- und Speisewasser pro Stunde ergab sich am ersten Versuchstage 4,09 cbm, am zweiten 4,4 cbm; da die Leistung

Maschine I, Ablesung $2^h 15'$.

Fig. 24.



der Gasmotoren hierbei rund 125 bzw. 133 effektive Pferdestärken betrug, so folgt ein Verbrauch an Wasser pro P - S_e und Stunde von
 ~ 33 Liter (garantiert waren 50 Liter).

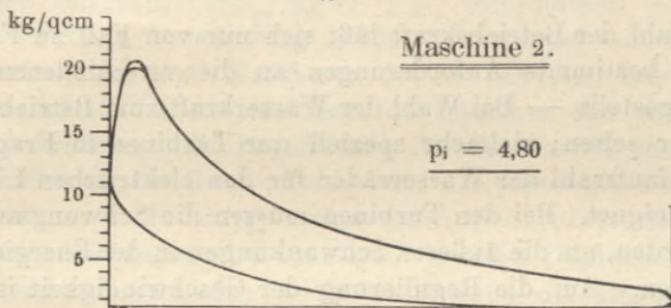
Der Wirkungsgrad der Gasmotoren läßt sich aus den Daten der Versuchstabellen und den Konstanten der Maschinen (Cylinderdurchmesser und Hub) unter Berücksichtigung des durch besonderen Versuch ermittelten Nutzeffektes der Gleichstrommaschinen von rund 91 Proz. bestimmen. Es ergab sich für beide Maschinen bei Berechnung des Wirkungsgrades für die verschiedenen Versuchszeiten ein solcher von

etwa 86 Proz.¹⁾ im Durchschnitt. Die Berechnung des Wirkungsgrades η der Gasmotoren sei für je eine Beobachtung an den beiden Versuchstagen durchgeführt und zu diesem Zwecke zwei Leistungen herausgegriffen, die annähernd den Mittelwerten der jeweiligen Versuchsreihe entsprechen.

Elektrische Leistung = 85,07 KW. . . $n = 121,6$ Umdrehungen pro Minute (Mittelwert aus sämtlichen Ablesungen) . . . $p_i = 4,76$ kg/qcm. Cylinderdurchmesser $d = 550$ mm. Hub $s = 0,96$ m.

Maschine II, Ablesung 11^h 45'.

Fig. 25.



Effektiv abgegebene Leistung des Motors bei einem Nutzeffekte der Dynamo von 91 Proz.

$$N_e = \frac{85,07}{0,91 \cdot 0,736} = 127 \text{ P S}_e.$$

Die indizierte Leistung bestimmt sich nach Formel (5) (S. 52):

$$N_i = O \cdot 10\,000 \cdot p_i \cdot \frac{s_1 \cdot n}{30} \cdot \frac{1}{75}.$$

$$\left(O = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,550^2}{4} = 0,23758 \text{ m}^2; s_1 = \frac{s}{4} = \frac{0,96}{4} = 0,24 \text{ m} \right)$$

$$N_i = 0,2376 \cdot 10\,000 \cdot 4,76 \cdot \frac{0,24 \cdot 121,6}{30 \cdot 75} = 146,6 \text{ P S}_i.$$

Aus N_e und N_i erhält man den Wirkungsgrad zu

$$\eta = \frac{N_e}{N_i} = \frac{127}{146,6} = \sim 0,866.$$

Kilowatt = 89,88 $n = 128,0$ $p_i = 4,80$.

$$N_e = \frac{89,88}{0,91 \cdot 0,736} = 134,2 \text{ P S}_e.$$

$$N_i = 0,2376 \cdot 10\,000 \cdot 4,8 \cdot \frac{0,24 \cdot 128}{30 \cdot 75} = 155,7 \text{ P S}_i.$$

¹⁾ Es ist hierbei zu berücksichtigen, daß der Wirkungsgrad von 86 Proz. ohne Lagerreibungsverluste zu verstehen ist, da dieselben in dem Nutzeffekte der Dynamo von 91 Proz. zum größten Teile schon enthalten sind.

$$\eta = \frac{N_e}{N_i} = \frac{134,2}{155,7} = 0,862.$$

Die diesen Werten entsprechenden Diagramme sind aus den Fig. 24 und 25 zu ersehen (siehe auch Kapitel G, viertes Beispiel).

E. Betriebskraft und Gleichförmigkeit des Ganges der Antriebsmaschinen.

Die Wahl der Betriebskraft läßt sich nur von Fall zu Fall treffen. Es werden bestimmte Anforderungen an die verschiedenen Betriebsmaschinen gestellt. — Bei Wahl der Wasserkraft zum Betriebe kommen Wasserräder selten, vielmehr speziell nur Turbinen in Frage, da die geringe Umlaufzahl der Wasserräder für den elektrischen Lichtbetrieb sich wenig eignet. Bei den Turbinen müssen die Schwungmassen groß gewählt werden, um die äußeren Schwankungen in der Energieaufnahme auszugleichen. Auf die Regulierung der Geschwindigkeit ist hier besonderes Gewicht zu legen. Bei großen Schwungmassen und normaler Regulierung wird der Gang der Turbine ein sehr regelmäßiger und sind Schwankungen, welche bei Dampftrieb durch den Kurbelantrieb bedingt sind, hier ausgeschlossen. Bei Antrieb durch Turbinen ist daher das Parallelschalten von Mehrphasenmaschinen leicht zu erreichen. Der Antrieb erfolgt durch Zahnradübersetzung oder auch in neuerer Zeit durch direkte Kuppelung. — Es bleiben also noch die Bedingungen für die Anforderungen an die Dampf- und Gasbetriebe zu besprechen. Die mechanische Energieübertragung erfolgt durch Riemen, Seile oder direkte Kuppelung. Die erstere Art (Riemen- oder Seilübertragung) hat den Vorteil für Lichtbetrieb, daß durch das elastische Mittelglied gewisse Schwankungen der Betriebsmaschine ausgeglichen werden; dieses ist besonders günstig, falls der Gleichförmigkeitsgrad derselben nicht groß ist und die auftretenden Schwankungen nicht auf andere Weise (durch eine Akkumulatorenbatterie) aufgenommen werden. Um die Riemengleitung bzw. den hierdurch bedingten Verlust möglichst zu vermindern, ist das Übersetzungsverhältnis der Umdrehungen, wenn irgend angängig, nicht größer als $\frac{1}{4} \div \frac{1}{5}$ zu wählen. Um den erwähnten Verlust ganz zu vermeiden und den Betrieb zu vereinfachen, endlich um an Raum für die Maschinenanlage zu sparen, zieht man den Antrieb durch Kuppelung dem indirekten Antriebe vor. Maschinen über 80 KW. werden selten noch durch ein elastisches Mittelglied zur Kraftübertragung verbunden. Die Tourenzahl der Betriebsmaschine muß sich naturgemäß derjenigen der Dynamomaschine anpassen. Die direkte Kuppelung bedingt besonders gleichmäßigen Gang des Motors. Es ist daher Zwillings- bzw. Mehrcylindermaschinen mit zwei-, eventuell

dreistufiger Expansion mit versetzten Kurbeln bei sehr großen Leistungseinheiten der Vorzug zu geben; außerdem sind die Schwungmassen groß genug zu wählen und das Schwungrad nahe an den Anker der Dynamo behufs Vermeidung störender seitlicher Bewegungen zu bringen. — Besonders bei Parallelbetrieb von Wechselstrommaschinen spielt das Moment der Gleichförmigkeit eine große Rolle ¹⁾. — Die relative Geschwindigkeitsänderung pro Umdrehung, d. h. der Ungleichförmigkeitsgrad muß klein sein, weil sonst, sobald eine höchste Grenze der Phasenverschiebung der Maschinen erreicht ist, dieselben nicht mehr im Tritt bleiben. — Für den Ungleichförmigkeitsgrad ist je nach den Betriebsverhältnissen ein Wert von $\frac{1}{80} \div \frac{1}{300}$ erforderlich. — Bei Gasmaschinen ist ohne Aufwendung großer Schwungmassen, bezw. übermäßige Verteuerung der Maschinen schwer ein kleinerer Ungleichförmigkeitsgrad als $\frac{1}{80}$ zu erreichen, da dieselben fast ausschließlich im Viertakt arbeiten. Die Regulierung der Tourenzahl geschieht hier durch Veränderung der Gasmischung oder der jeweiligen Füllung. Bei Parallelschaltung z. B. einer leerlaufenden Gasdynamo für Wechselstrom zu einer belasteten wird im allgemeinen der Ungleichförmigkeitsgrad bei beiden verschieden sein, auch wenn die Regulatoren auf dieselbe Geschwindigkeit reguliert sind; es sind somit während der Parallelschaltung bezw. während der Abschaltung einer Maschine große Spannungsschwankungen bezw. Fallen der Stromstärke auf den Nullwert nicht zu verhindern.

An die Regulatoren werden naturgemäß große Anforderungen gestellt. Dieselben sollen sehr geringe Reibung und große Umlaufzahlen haben. Durch richtige Einstellung der Gewichte muß synchroner Gang der beiden parallel zu schaltenden Wechselstrommaschinen erreicht werden. Die Wirkung bei Ent- oder Belastung soll gleichmäßig sein. Über Näheres betreffend Regulierung im Wechselstrombetriebe verweise ich auf das Niethammersche Werk ²⁾.

Es sei an dieser Stelle auf den Unterschied zwischen dem Ungleichförmigkeitsgrad und der durch die Geschwindigkeitsschwankungen bewirkten maximalen Winkelabweichung ³⁾ des Schwungrades hingewiesen.

Die maximale Winkelabweichung ist eine Summationswirkung, gewissermaßen die Integration der Geschwindigkeitsschwankungen über die Zeit, woraus erhellt, daß ihre Größe vom kurvenmäßigen Verlaufe

¹⁾ Siehe hierzu Friese, Zeitschrift für Elektrotechnik u. Maschinenbau, Heft 25 u. 26.

²⁾ Niethammer, Ein- und Mehrphasenwechselstrom-Erzeuger.

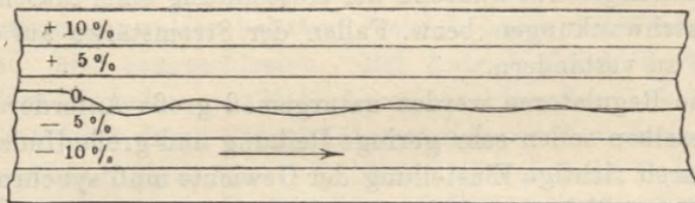
³⁾ Denkt man sich vom Mittelpunkte des Schwungrades einen Radius gezogen, der in derselben Zeit wie das Schwungrad einen Umlauf mit gleichförmiger Geschwindigkeit vollendet, so wird das Schwungrad relativ gegen den Radius um eine mittlere Lage hin und her pendeln, also Winkelabweichungen ergeben.

der Geschwindigkeitsänderung und nicht allein vom Maximalwerte derselben abhängt. Die beiden Größen stehen in keinem bestimmten festen Verhältnisse zueinander; beide können jedoch aus dem Tangentialdruckdiagramm ermittelt werden¹⁾. Immerhin kann man sagen, daß ein großer Ungleichförmigkeitsgrad im allgemeinen mit großer Winkelabweichung zusammenfällt, insbesondere würde eine Winkelabweichung vom Werte Null einen Ungleichförmigkeitsgrad von Null zur Voraussetzung haben.

Es gibt Fälle, in denen es weniger darauf ankommt, daß ein bestimmter Ungleichförmigkeitsgrad eingehalten ist, wie darauf, daß eine bestimmte größte Winkelabweichung nicht überschritten wird, so bei Parallelbetrieb von Wechselstromgeneratoren²⁾. — Um den Ungleichförmigkeitsgrad zu ermitteln, werden sogenannte Tachographen verwendet. Dieselben eignen sich allgemein zur Feststellung sehr schnell aufeinanderfolgender Geschwindigkeitsschwankungen von rotierenden Teilen, wie sie z. B. durch plötzliche Änderungen in der Belastung einer Betriebsmaschine bedingt sind.

Der Tachograph besteht aus einem sehr empfindlichen Tachometer mit automatischer, meist durch ein besonderes Uhrwerk betriebener Re-

Fig. 26.



gistriervorrichtung, welche den kurvenmäßigen Verlauf der Geschwindigkeit aufzeichnet. Je nach der Größe der zu messenden Geschwindigkeitsschwankung kommt eine Schreibvorrichtung für weiteren oder engeren Meßbereich und entsprechend ein gröber oder feiner geteiltes Papierband zur Aufnahme der Kurven in Anwendung. Im Betriebe sind die Tachographen an eine bestimmte (mittlere) Umlaufszahl gebunden und gehört daher zu jedem derartigen Apparat ein Satz von geeigneten leichten Holzscheiben, die je nach Erfordernis auf die Welle des Apparates aufgesetzt und von der zu untersuchenden Welle aus angetrieben werden, wodurch die geeignete Übersetzung hergestellt wird. Die auf dem Papierband aufgezeichneten Kurven zeigen die Geschwindigkeitsschwankungen direkt in Prozenten an. Der Ungleichförmigkeitsgrad ist demnach als Höhenunterschied zwischen höchstem und tiefstem Punkte — im Maßstabe der Papiereinteilung — aus der betreffenden periodischen Kurvenwelle abzulesen.

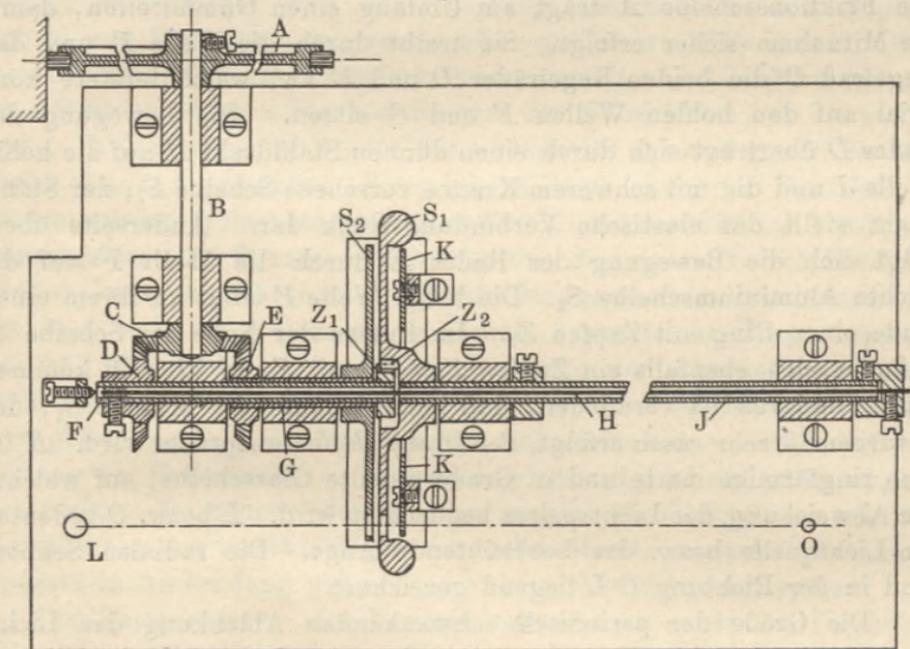
¹⁾ Siehe hierzu: Aufsatz von Klönne, Elektrot. Zeitschr. 1902, S. 287.

²⁾ Siehe Görges, Elektrot. Zeitschr. 1900, S. 193.

Der Verlauf einer mittels Tachographs aufgenommenen Kurve möge beispielsweise für die plötzliche Belastung einer Maschine durch Fig. 26 veranschaulicht werden. Für diesen Fall genügte eine Registriervorrichtung für weiten Meßbereich von ± 10 Proz. Die maximale Tourenschwankung von zirka 4 Proz. läßt sich mit genügender Genauigkeit ablesen. Zur Messung des Ungleichförmigkeitsgrades von Betriebsmaschinen wäre ein entsprechend kleinerer Meßbereich (etwa ± 3 Proz.) zu wählen.

Ein neuer Apparat zur Messung des Ungleichförmigkeitsgrades, oder richtiger gesagt, der Winkelabweichung, der von E. W. Mix ¹⁾ in der „Electrical World and Engineer“ zuerst beschrieben worden ist, sei durch beigefügte Skizze (Fig. 27) dargestellt und näher erläutert.

Fig. 27.



Vom Schwungrade der zu untersuchenden Maschine aus wird eine Friktionsscheibe getrieben, die ihrerseits mittelst eines Kegelrädertriebes und einer elastischen Kuppelung einer Scheibe von großem Trägheitsmomente eine praktisch konstante Umdrehungsgeschwindigkeit erteilt; von derselben Friktionsscheibe wird — jedoch ohne elastisches Zwischenglied — eine zweite leichte Scheibe angetrieben, die der Scheibe mit schwerem Kranze gegenübersteht und allen Änderungen in der Geschwindigkeit des Schwungrades genau folgt.

Die beiden Scheiben haben gleiche Achsenrichtung und gleiche mittlere Geschwindigkeit, jedoch verschiedenen Drehsinn; an der Peripherie tragen dieselben radiale Schlitze, die einander genau gegen-

¹⁾ Siehe auch Elektrot. Zeitschr. 1902, S. 280.

überstehen. Bei vollkommen gleicher Geschwindigkeit würden sich die Schlitze stets an derselben Stelle begegnen. Bei Änderungen in der Geschwindigkeit der leichten Scheibe verschiebt sich der Begegnungspunkt je nach dem Sinne der Änderung in der einen oder anderen Richtung. Stellt man auf die eine Seite der Scheiben eine Lichtquelle, auf die andere Seite einen matten Schirm, so wird ein Lichtspalt auf den Schirm projiziert, der dem veränderlichen Begegnungspunkte entsprechend um eine mittlere Lage hin und her pendelt.

Ist die Umdrehungszahl der Scheiben x mal so groß wie die des Schwungrades, so wird der Lichtspalt auf dem Schirme einen Winkel beschreiben, der ebenfalls x mal so groß ist als derjenige, welcher der Veränderlichkeit der Winkelgeschwindigkeit des Schwungrades entspricht. Die Konstruktion des Apparates ist aus der Figur zu ersehen. Die Friktionsscheibe A trägt am Umfang einen Gummireifen, damit die Mitnahme sicher erfolgt. Sie treibt durch die Welle B und das Kegelrad C die beiden Kegelräder D und E an, welche letztere konaxial auf den hohlen Wellen F und G sitzen. Die Bewegung des Rades D überträgt sich durch einen dünnen Stahldraht H auf die hohle Welle J und die mit schwerem Kranze versehene Scheibe S_1 ; der Stahldraht stellt das elastische Verbindungsstück dar. Andererseits überträgt sich die Bewegung des Rades E durch die Welle F auf die leichte Aluminiumscheibe S_2 . Die hohle Welle F trägt an ihrem einen Ende einen Ring mit Zapfen Z_1 . Im Innern der Nabe der Scheibe S_1 befindet sich ebenfalls ein Zapfen Z_2 , der mit Z_1 in Eingriff kommen kann; dadurch ist vermieden, daß beim Anlaufe der Scheibe S_1 , der naturgemäß sehr rasch erfolgt, der Draht H überanspruchung wird. K ist eine ringförmige matte und in Grade geteilte Glasscheibe, auf welcher die Abweichung des Lichtspaltes beobachtet wird. L bzw. O bedeuten die Lichtquelle bzw. das beobachtende Auge. Die radialen Schlitze sind in der Richtung OL liegend gezeichnet.

Die Größe der periodisch schwankenden Ablenkung des Lichtspaltes gibt also, wie oben ausgeführt, ein vergrößertes Bild der Winkelabweichung des Schwungrades und ist somit mehr oder weniger auch ein Maß für den Ungleichförmigkeitsgrad (siehe hierzu Beispiele im Kapitel N).

F. Messungen.

1. Allgemeine Bemerkungen über Messungen.

Vor den definitiven Versuchen müssen die zu prüfenden Maschinen bezw. die Transformatoren oder sonstigen Apparate mehrere Stunden mit voller Belastung betrieben werden. Erst wenn die Erwärmung des normalen Betriebes eingetreten ist, haben die Messungen Gültigkeit; jedoch ist es gut, wenn die Meßinstrumente schon während der Zeit dieser Vorversuche abgelesen werden, damit man ein richtiges Bild über den Betrieb erhält und somit bei den späteren Messungen während der einzelnen Versuchsreihen die Konstanterhaltung der Werte leichter zu erreichen ist. Als Belastung dienen Glüh- und Bogenlampen und Elektromotoren oder auch regulierbare Widerstände. Bei allen Maschinen- bezw. Transformatormessungen ist die Ermittlung der Arbeit im äußeren Stromkreise und des Nutzeffektes mit die wichtigste. Neben diesen sind noch die Größen für Spannung und Stromstärke u. s. w. festzustellen. Zur genauen Bestimmung der elektrischen Größen wurden früher bei gleichgerichteten Strömen vielfach Torsionsgalvanometer: bei Spannungsmessung mit geeigneten Vorschaltwiderständen bezw. bei Strommessung mit Manganinabzweigwiderständen von $\frac{1}{99}$, $\frac{1}{999}$, $\frac{1}{9999}$ Ohm sowie andere Apparate mit Magnetnadeln benutzt. Bei großen Stromstärken hat man den Abzweigwiderstand durch Wasser gekühlt und während der Ruhepausen (Nichtbeobachtung) kurz geschlossen. Der Spannungsstromkreis wurde — behufs Vermeidung der Erwärmung — nur während der eigentlichen Ablesungen geschlossen. In neuerer Zeit werden sowohl für Gleichstrom wie für Wechselstrom am zweckmäßigsten zu allen Messungen nur Präzisionsapparate in Anwendung gebracht. Näheres hierüber folgt später.

Die Temperaturen des Raumes müssen während der Versuche beobachtet und mit in Rechnung gezogen werden. Zur Bestimmung von Tourenzahlen werden Tachometer oder Tourenzähler benutzt. Für jede Belastung pflegt man bei Maschinenprüfungen unter Konstanterhaltung von Tourenzahl und äußerem Widerstand, sowie auch bei anderen Prüfungen, mehrere Einzelmessungen auszuführen bezw. entsprechend gleich viele Diagramme bei eventuell gleichzeitiger Dampfmaschinen- oder Gasmotorenprüfung aufzunehmen. Aus diesen Einzelmessungen werden am zweckmäßigsten Tabellen über die korrigierten Mittelwerte und aus den hieraus folgenden Berechnungen Tabellen über die Resultate der Messungen aufgestellt.

Zur Bestimmung des elektrischen Güteverhältnisses sind bei Nebenschluß- und Compoundmaschinen auch Stromstärke und Spannung im Nebenschlusse zu ermitteln. Außerdem müssen bei allen Maschinen die Widerstände der Anker- und Magnetschenkelwickelungen bekannt

sein. Meistens sind diese Widerstände von den Lieferanten gewissenhaft bestimmt. Falls die Angaben nicht sicher sind und man die Werte nicht erfahren kann, so sind entsprechende Widerstandsmessungen vorzunehmen. Die größeren Widerstände (Nebenschlußwicklung) sind leicht nach irgend einer genauen Widerstandsbestimmungsmethode (Wheatstone u. s. w.) oder am besten auf indirektem Wege zu ermitteln. Für die Bestimmung der kleinen Widerstandswerte (Anker- und Hauptwicklung der Magnete) erfolgt die Messung nur auf indirektem Wege. Als Stromquelle werden hierbei meist Akkumulatoren verwandt. Der Strom, den die Batterie liefert, wird durch den zu messenden Widerstand geleitet und aus der beobachteten Spannungsdifferenz an den Enden des Widerstandes und dem Strom im Stromkreise der Widerstand bestimmt. Es ist bei Messung von Ankerwiderständen darauf zu achten, daß die Bürsten auf dem Kollektor eine gute Kontaktfläche bilden. Am besten wählt man als Resultat den Mittelwert einer Anzahl von Messungen an verschiedenen korrespondierenden Kontaktflächen.

Wie schon erwähnt, kommen heute bei Prüfungen in Zentralen fast nur Präzisionsinstrumente oder, falls solche nicht vorhanden sind, Elektrodynamometer in Frage ¹⁾.

Zur Messung von Wechselströmen werden folgende Apparate benutzt:

1. das Elektrodynamometer,
2. das Elektrometer,
3. das Kalorimeter,
4. das Cardew-Voltmeter,
5. die Präzisionsgalvanometer mit weichem Eisen.

Auch bei Wechselstrom haben für die Praxis die Präzisionsinstrumente den Vorrang.

Ein gemeinsames Merkmal aller Instrumente für Wechselstrom ist, daß dieselben, soweit Strom- und Spannungsmessung in Betracht kommen, die Effektivwerte messen, d. h. die Wurzeln aus den quadratischen Mittelwerten:

$$(1) \quad \bar{J} = \sqrt{M(J^2)} = \sqrt{\frac{2}{T} \cdot \int_0^{\frac{T}{2}} J^2 \cdot dt}$$

und

$$(2) \quad \bar{E} = \sqrt{M(E^2)} = \sqrt{\frac{2}{T} \cdot \int_0^{\frac{T}{2}} E^2 \cdot dt}.$$

Es bedeuten hierbei J und E die Momentanwerte von Strom bzw.

¹⁾ Näheres über Messung von Strömen und Spannungen siehe: Kittler, Handbuch der Elektrotechnik, II. Band.

Spannung, $M(J^2)$ und $M(E^2)$ die entsprechenden Mittelwerte der Quadrate, \bar{J} und \bar{E} die Effektivwerte, T die Zeitdauer einer Periode und t die Zeit.

Dieselben Instrumente würden bei Gleichstrom direkt die Werte E und J messen.

Es ist nun die Frage von Wichtigkeit, ob durch das Produkt $\bar{E} \cdot \bar{J}$ die mittlere Arbeit A eines Wechselstromes in der Zeiteinheit oder ob dieselbe durch einen anderen Wert dargestellt wird. Es zeigt sich, daß

$$(3) \quad \dots \quad A = M(E \cdot J) = \frac{2}{T} \cdot \int_0^{\frac{T}{2}} E \cdot J \cdot dt$$

ist. Der zur Messung der Leistung eines Wechselstromes bestimmte Apparat muß derartig konstruiert sein, daß er den Mittelwert $M(E \cdot J)$ unmittelbar angibt.

Wenn ein Wechselstrom einen Leiter durchfließt, so wird durch das Elektrodynamometer die Größe $\sqrt{M(J^2)}$ bestimmt. Ist der betreffende Stromleiter, zwischen dessen Enden die Leistung des Stromes gemessen werden soll, induktionsfrei, so genügt die Kenntnis des Widerstandes R , um

$$(4) \quad \dots \quad A = M(J^2) \cdot R = \frac{M(E^2)}{R}$$

als Arbeitsleistung pro Sekunde zu bestimmen.

In vielen Fällen ist indes ein Apparat erwünscht, welcher den Mittelwert $M(E \cdot J)$ mißt, und welchen wir als Wattmeter bezeichnen.

Während das Kalorimeter nur in den Händen sehr geschickter Experimentatoren brauchbare Resultate liefert, so sind das Cardew-Voltmeter, das Elektrodynamometer und auch das Wattmeter sehr leicht zu handhabende Meßinstrumente.

Das Cardew-Instrument besteht aus einem etwa 1 m langen Rohre, in welchem ein feiner Platindraht von etwa 0,07 mm Stärke ausgespannt ist; derselbe wird vom durchgehenden Strom erwärmt; die hierdurch erfolgte Verlängerung des Drahtes wird auf einen Zeiger übertragen.

Das Elektrodynamometer und das Wattmeter werde ich noch eingehender behandeln, weil diese Instrumente eine vielseitige Verwendung haben.

In der Praxis wird man heute jedoch, wie schon erwähnt, für alle Messungen, sowohl für Gleich- wie für Wechselstrom, zur Ermittlung von Strom, Spannung und Leistung möglichst Präzisionsapparate benutzen. Bei diesen Apparaten werden alle Werte durch direkte Ausschläge gemessen; dieselben beruhen entweder auf der durch Stromwärme verursachten Verlängerung bezw. Durchbiegung eines strom-

durchflossenen Platinsilberdrahtes, welche auf ein drehbares System mit Messerzeiger übertragen wird, oder auf dem Prinzip einer stromführenden, im starken konstanten Magnetfelde sich drehenden Spule von Thomson bezw. Deprez-d'Arsonval. Die hierbei verwendeten Magnete sind von relativ großer Stärke, deren Konstanz durch zahlreiche zeitlich weit auseinanderliegende Kontrollmessungen erwiesen ist. Die Instrumente sind für aperiodische Einstellung gebaut und müssen vollkommen unabhängig von fremden Magnetfeldern sein. Diese Apparate werden von Weston, Hartmann und Braun, Siemens und Halske und anderen Firmen hergestellt. Die Präzisionsvoltmeter werden für jede beliebige Einteilung und Spannung, gewöhnlich mit mehreren Meßbereichen fabriziert. Die Instrumente besitzen einen hohen Widerstand, so daß der in ihnen verbrauchte Strom ein minimaler ist. Dieser Umstand gestattet eine vielstündige Einschaltung des Instrumentes ohne merklichen Rückgang der ersten Einstellung. Durch geeignete Zusatzvorschaltwiderstände kann der Meßbereich eines Instrumentes auf 1500 und mehr Volt ausgedehnt werden. Instrumente für einen Meßbereich werden bis zu etwa 30000 Volt fabriziert. Zur bequemen Benutzung werden auch Instrumente gebaut, welche die Bestimmung von Spannungen und Stromstärken mit einem Apparate gestatten (sogenannte Millivolt- und Ampèremeter). Man kann z. B. mit einem derartigen Apparat von $1\ \Omega$ Widerstand mit einer Skala von 150 Teilen entsprechend einer Empfindlichkeit (Meßwert eines Teilstriches) von 0,001 Volt bezw. 0,001 Amp. bei einem Vorschaltwiderstand von 9, 99, 999 bezw. Nebenschlußwiderstand von $\frac{1}{9}$, $\frac{1}{99}$, $\frac{1}{999}$, $\frac{1}{9999}$ Ohm — 1,5, 15, 150 Volt bezw. 1, 5, 15, 150 und 1500 Amp. messen. Die Nebenschlüsse bestehen aus Manganinblech und können ohne Zuhilfenahme von Drähten u. s. w. an das Instrument angeschlossen werden. Zur Messung von Stromstärken über 300 Amp. mit Nebenschluß ist es erforderlich, den Nebenschlußwiderstand mit entsprechender Kühlung (durch Paraffin) zu versehen.

Zur Spannungsmessung sowie indirekt auch zur Strom- und Energiemessung wird im Laboratorium auch noch das Elektrometer benutzt ¹⁾.

Das Instrument eignet sich für die Praxis wenig.

2. Das Elektrodynamometer.

Im allgemeinen ist, sobald man keinen Präzisionsapparat zur Verfügung hat, das Dynamometer vorzuziehen, zumal mit demselben in einfacher Weise auch Energiemessungen auszuführen sind. Ich will daher im folgenden die Verwendbarkeit des Elektrodynamometers näher untersuchen und zwar für verschiedene Zwecke.

¹⁾ Siehe Kittler, Heinke, Rühlmann.

1. Verwendung des Dynamometers zur Messung von Wechselströmen.

a) Wenn beide Rollen des Instrumentes im Hauptstromkreise liegen und senkrecht zueinander stehen, so gilt die Konstante, welche für Gleichströme bestimmt wurde, auch für Wechselströme. Wir messen dann den Mittelwert des Quadrates der Stromstärke $M(J^2)$, welcher proportional dem Torsionswinkel φ ist, und erhalten:

$$(5) \quad \bar{J} = \sqrt{M(J^2)} = C \cdot \sqrt{\varphi},$$

woselbst C die durch Gleichstrom bestimmte Konstante ist.

b) Wenn beide Rollen des Elektrodynamometers im Nebenschlusse liegen und der abgezweigte Strom beide Rollen hintereinander durchfließt, so ist der Koeffizient L_m der gegenseitigen Induktion und die Selbstinduktionskoeffizienten L_1 und L_2 der Widerstände W_1 und W_2 (des festen Widerstandes bezw. der in Serie geschalteten Rollen) in Rechnung zu ziehen.

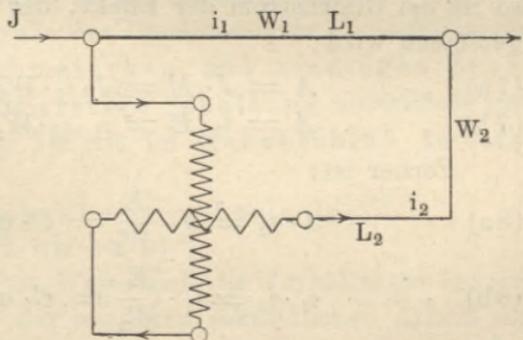
Bezeichnen wir mit I_{max} , i_{1max} und i_{2max} die Maximalwerte des Hauptstromes bezw. der Nebenströme i_1 und i_2 , so ist:

$$(6) \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{i_{2max}^2}{W_2^2 + \frac{4\pi^2}{T^2}(L_2 - L_m)^2} + \frac{i_{1max}^2}{W_1^2 + \frac{4\pi^2}{T^2}(L_1 - L_m)^2} \\ = \frac{I_{max}^2}{(W_1 + W_2)^2 + \frac{4\pi^2}{T}(L_1 + L_2 - L_m)^2} \end{array} \right.$$

Machen wir den Widerstand W_1 induktionsfrei, also $L_1 = 0$ und auch $L_m = 0$ und sorgen dafür, daß der Selbstinduktionskoeffizient L_2 gegen die Summe $W_1 + W_2$

der Widerstände klein wird, so können die Angaben des Elektrodynamometers im Nebenschlusse zur Messung von Wechselströmen gerade wie bei Messung von Gleichströmen benutzt werden. Die Bedingung, daß eine gegenseitige Induktion der in den Widerständen W_1 und W_2 zirkulierenden Ströme nicht stattfindet, wird dadurch erfüllt, daß man das Elektrodynamometer genügend weit von dem Widerstande W_1 entfernt.

Fig. 28.

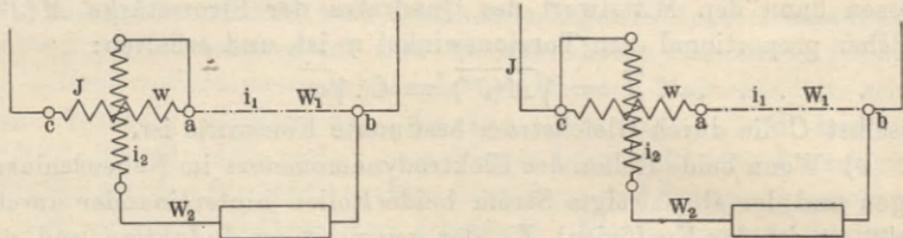


2. Verwendung des Elektrodynamometers zur Messung der elektrischen Energie.

Soll das Dynamometer als Wattmeter benutzt werden, so dient die eine Spule für den Durchgang des Hauptstromes (i_1 oder I), die andere für den Durchgang des Nebenschlußstromes (i_2), der ein Maß für die zu messende Spannung (E) ist. Das Wattmeter kann in

zweierlei Schaltungen gebraucht werden, je nachdem die Spannungsspule (Nebenschlußspule) vor oder hinter der Stromspule (Hauptspule) abgezweigt ist. Die beiden Schaltungen sind aus den Fig. 29 I und 29 II zu ersehen. Die dünnere (Nebenschluß-)Spule ist beweglich,

Fig. 29 I und 29 II.



während die dickere (Strom-)Spule feststehend angeordnet ist. Der Nebenschlußspule ist ein hoher Widerstand vorgeschaltet, da dieselbe nur für minimale Ströme bestimmt ist.

Bezeichnen wir mit:

I den ungeteilten Strom, der durch das Wattmeter fließt,

E den Spannungsabfall im Nebenschlusse, d. h. zwischen den Punkten a und b , bzw. c und b ,

i_1 den Strom im Stromverbraucher,

i_2 den Strom im Nebenschluß,

W_1 bzw. W_2 die Widerstände des Stromverbrauchers bzw. des Nebenschlusses,

w den Widerstand der Hauptstromspule,

φ den Ausschlag des Instrumentes,

C die Konstante des Instrumentes,

so ist bei Gleichstrom der Effekt, der durch das Elektrodynamometer gemessen wird:

$$(7a) \quad \dots \quad A = J \cdot E = J \cdot i_2 \cdot W_2 \quad (\text{in Schaltung I}),$$

$$(7b) \quad \dots \quad A = i_1 \cdot E = i_1 \cdot i_2 \cdot W_2 \quad (\text{in Schaltung II}).$$

Ferner ist:

$$(8a) \quad \dots \quad J \cdot i_2 = J \cdot \frac{E}{W_2} = C \cdot \varphi \quad (\text{in Schaltung I}),$$

$$(8b) \quad \dots \quad i_1 \cdot i_2 = i_1 \cdot \frac{E}{W_2} = C \cdot \varphi \quad (\text{in Schaltung II}),$$

oder:

$$(9a) \quad \dots \quad A = J \cdot E = C \cdot \varphi \cdot W_2 \quad (\text{in Schaltung I}),$$

$$(9b) \quad \dots \quad A = i_1 \cdot E = C \cdot \varphi \cdot W_2 \quad (\text{in Schaltung II}).$$

Dieser angezeigte Effekt A ist nun etwas verschieden von dem Verbrauche in W_1 , der gemessen werden soll. Um diesen zu erhalten, ist eine Korrektur erforderlich.

Bei Schaltung I ist nämlich der in der Messung ($A = J \cdot E$) enthaltene Strom J zu groß und zwar um den, allerdings kleinen, Betrag i_2

des Nebenschlusses; bei Schaltung II ist die in der Messung enthaltene Spannung E etwas größer, als dem Spannungsabfalle im Verbraucher entspricht, und zwar um den Betrag des Spannungsabfalles in der Hauptspule. Daher ist im ersten Falle der Wert $i_2^2 \cdot W_2$, im zweiten Falle $i_1^2 \cdot w$ in Abzug zu bringen, so daß die beobachteten Werte nach der Korrektur lauten:

$$(10a) \quad A' = A - i_2^2 \cdot W_2 \text{ für Schaltung I,}$$

$$(10b) \quad A' = A - i_1^2 \cdot w \text{ für Schaltung II.}$$

Handelt es sich nicht um die Messung des Verbrauches in einem Leiterstück ab , sondern um die Messung des abgegebenen Effektes einer Stromquelle zwischen c und b , so sind die Angaben A des Wattmeters zu klein; bei der ersten Schaltung ist zu dieser Angabe noch der Effektverlust in der Hauptspule ($J^2 \cdot w$), bei der zweiten derjenige in der Nebenschlußspule ($i_2^2 \cdot W_2$) zu addieren; somit lauten die korrigierten Werte in diesem Falle:

$$(11a) \quad (A') = A + J^2 \cdot w,$$

$$(11b) \quad (A') = A + i_2^2 \cdot W_2.$$

Die Ungenauigkeit der Wattmeterangabe hängt für die beiden Schaltungen von den jeweiligen Strom- und Spannungsverhältnissen ab. Die Korrektur kann in vielen Fällen vermieden werden durch die geeignete Wahl der Schaltung des Wattmeters.

Ob die eine oder andere Schaltungsweise des Elektrodynamometers angewandt werden muß, um Korrekturen überflüssig zu machen, entscheide man nach folgender Regel:

a) „Messung des Effektverbrauches zwischen a und b .

Bei hohen Spannungen und niedrigen Stromstärken wende man die Schaltung II an, da man dann den Energieverlust in der festen Spule des Dynamometers vernachlässigen kann; bei hohen Stromstärken und niedrigen Spannungen dagegen ist die erstere Schaltung vorteilhaft und kann man hierbei den Verlust im Nebenschluß vernachlässigen.

b) Messung der Effektabgabe zwischen c und b .

Die Regel ist umgekehrt wie bei a).“

Es fragt sich nun, in welcher Weise sich die Verhältnisse ändern, wenn es sich um die Messung der mittleren sekundlichen Arbeit von Wechselströmen handelt. Die feste Spule des Wattmeters werde von einem Wechselstrom mit der momentanen Stromintensität i_1 , die bewegliche Spule von einem solchen von der Stärke i_2 durchflossen, während gleichzeitig die momentane zu messende Spannung E sei. Dann ist die momentane Leistung $i_1 \cdot E$ und die mittlere Leistung $M(i_1 \cdot E)$, d. h. der Mittelwerte aus den Produkten der Momentanwerte. Die Angabe des Wattmeters dagegen entspricht einem Mittelwerte $M(i_1 \cdot i_2)$. Diese Angabe des Instrumentes ist bei Wechsel-

strömen vom Werte $M(i_1 \cdot E)$ verschieden. Die Abweichung kommt daher, daß man nicht ohne weiteres die Spannung E gleich dem Produkte aus Strom und Widerstand ($i_2 \cdot W_2$) setzen darf, sondern daß infolge der Selbstinduktion im Nebenschluß ein Glied hinzukommt, so daß man die Beziehung erhält:

$$(12) \quad \dots \dots \dots E = i_2 \cdot W_2 + L_2 \frac{di_2}{dt},$$

L_2 ist dabei der Selbstinduktionskoeffizient der beweglichen Spule, t die Zeit.

Multiplizieren wir die Gleichung mit i_1 , so erhalten wir:

$$E \cdot i_1 = i_1 \cdot i_2 \cdot W_2 + L_2 \cdot i_1 \cdot \frac{di_2}{dt}$$

oder, wenn wir die Mittelwerte der einzelnen Produkte bilden,

$$(13) \quad \dots \dots M(E i_1) = M(i_1 \cdot i_2 \cdot W_2) + L_2 \cdot M\left(i_1 \cdot \frac{di_2}{dt}\right).$$

Die linke Seite der Gleichung ist die zu messende Leistung A , das erste Glied der rechten Seite ist gleich $C \cdot \varphi \cdot W_2$, d. h. gleich der Angabe des Instrumentes. Es gilt somit für die im Leiterstück W_1 geleistete Arbeit:

$$(14) \quad \dots \dots a = C \cdot \varphi \cdot W_2 + L_2 \cdot M\left(i_1 \cdot \frac{di_2}{dt}\right),$$

worin $L_2 \cdot M\left(i_1 \cdot \frac{di_2}{dt}\right)$ das Korrektionsglied ist.

Benutzt man demnach zur Messung der mittleren Arbeit von Wechselströmen ein Wattmeter, so wird durch die direkten Angaben $C \cdot \varphi \cdot W_2$ des Instrumentes nicht die wahre mittlere Arbeit bestimmt, sondern diese ist größer oder kleiner als die Angaben des Wattmeters, je nachdem der Wert des Korrektionsgliedes positiv oder negativ ist.

Wir haben hierbei vorausgesetzt, daß:

1. in der Nebenschließung vom Widerstande W_2 außer der Selbstinduktion L_2 keine andere E. M. K. tätig ist, d. h. es soll die Nebenschließung durch die Vorgänge im Hauptstromkreise nicht beeinflußt werden, es soll keine gegenseitige Induktion der beiden Stromkreise statthaben,
2. in der Nebenschließung außer der beweglichen Spule des Wattmeters nur noch induktionsfreie Zusatzwiderstände verwendet werden, so daß der Selbstinduktionskoeffizient L_2 als konstant zu betrachten ist, und
3. die eventuell auftretende Kapazitätswirkung vernachlässigt werden kann.

Die allgemeine Lösung der Gleichung

$$a = C \cdot \varphi \cdot W_2 + L_2 \cdot M\left(i_1 \cdot \frac{di_2}{dt}\right)$$

hängt von dem periodischen Verlaufe der Ströme i_1 und i_2 ab und wird im allgemeinen sehr schwierig. Legen wir Sinusgesetze für den Verlauf der beiden Ströme zu grunde, so läßt sich die mittlere Arbeit in der Form schreiben:

$$(15) \quad \dots \dots a = C \cdot \varphi \cdot W_2 \cdot \frac{1 + \lambda_2^2}{1 + \lambda_1 \cdot \lambda_2},$$

wobei λ_1 und λ_2 die Bedeutung haben:

$$\left. \begin{aligned} \lambda_1 &= \frac{Z \cdot \pi \cdot L_1}{W_1} \\ \lambda_2 &= \frac{Z \cdot \pi \cdot L_2}{W_2} \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{Hierin bezeichnet } Z \text{ die} \\ \text{Zahl der Stromwechsel.} \end{array}$$

Je nachdem nun die Größe

$$\frac{1 + \lambda_2^2}{1 + \lambda_1 \cdot \lambda_2}$$

größer oder kleiner als 1 ist, müssen die Angaben des Instrumentes erhöht oder verkleinert werden.

Sind zwischen die beiden Punkte, zwischen denen der Effekt gemessen werden soll, Glühlampen eingeschaltet, so ist L_1 sehr klein und kann daher auch $\lambda_1 = 0$ gesetzt werden; der Korrektionsfaktor wird sodann:

$$(1 + \lambda_2^2)$$

und

$$(16) \quad \dots \dots a = C \cdot \varphi \cdot W_2 \cdot (1 + \lambda_2^2)$$

λ_2 kann klein gemacht werden dadurch, daß W_2 gegen L_2 sehr groß gewählt wird; dies wird erreicht, wenn wir der beweglichen Spule nur wenig Windungen geben und so viel, wie zulässig, induktionsfreien Widerstand vorschalten.

In diesem Falle können die Angaben des Wattmeters ($C \cdot \varphi \cdot W_2$) als genau gelten.

3. Effektmessung bei Mehrphasenströmen.

Auf die Effektmessung bei Mehrphasenströmen muß noch besonders eingegangen werden. Man erhält den Effekt einer Mehrphasenanlage, wenn man die Leistung der einzelnen Phasen mißt und die Summe der gefundenen Werte bildet. Dabei ist die Messung in einer Phase so zu verstehen, daß der Strom einer Phase durch die Stromspule des Wattmeters geleitet und die Spannungsspule an die Enden dieser Phase (d. h. des betreffenden Verbrauchsstromkreises) angelegt wird; z. B. bei Dreiphasenstrom in Sternschaltung wird die Stromspule in die Fernleitung, die Nebenschlußspule zwischen diese Leitung und den Nullpunkt des Systemes geschaltet; bei Dreiphasenstrom in Dreiecksschaltung legt man die Stromspule in eine Dreiecksleitung, die

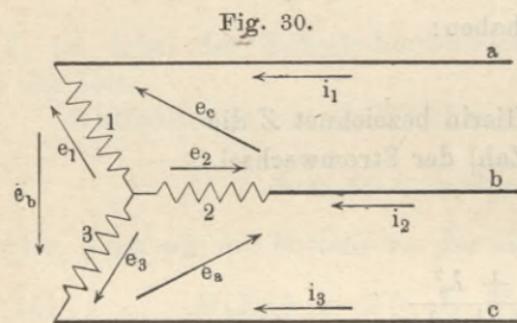
Spannungsspule zwischen die Fernleitungen, die von derselben ausgehen.

Die Messung ist nur in einer Phase vorzunehmen und die gemessene Größe zu verdreifachen, wenn alle Phasen gleich belastet sind.

Bei ungleich belastetem Dreiphasensystem kommt man auch mit zwei Wattmetermessungen aus. Dieselben können mit demselben Instrument nacheinander oder

besser unter Benutzung zweier Wattmeter zu gleicher Zeit ausgeführt werden. Dabei ist jedoch vorausgesetzt, daß ein ausgleichender Nullleiter nicht vorhanden ist, anderenfalls muß man drei Messungen ausführen.

Es bezeichne in Fig. 30 (Sternschaltung) e_1, e_2, e_3 die



Momentanwerte der Sternspannungen, i_1, i_2, i_3 diejenigen der Ströme in den Außenleitern a, b, c , so ist der momentane Wert der Leistung

$$(17) \quad w = e_1 i_1 + e_2 i_2 + e_3 i_3.$$

Da

$$(18) \quad i_1 + i_2 + i_3 = 0,$$

so kann man, ohne etwas zu ändern, zur Gleichung für w den Wert

$$- e_1 (i_1 + i_2 + i_3) = 0$$

addieren. Dieselbe nimmt dann die Gestalt an:

$$w = e_2 i_2 + e_3 i_3 - e_1 i_2 - e_1 i_3$$

oder:

$$w = i_3 (e_3 - e_1) - i_2 (e_1 - e_2).$$

Sind nun e_a, e_b und e_c die Momentanwerte der den Leitern a, b und c gegenüber liegenden Dreiecksspannungen, so ist

$$(19) \quad e_a = e_2 - e_3; \quad e_b = e_3 - e_1; \quad e_c = e_1 - e_2.$$

Durch Einsetzung der Werte e_b und e_c geht die Gleichung für w über in

$$(20) \quad w = e_b i_3 - e_c i_2.$$

Die totale Drehstromleistung wird somit

$$(21) \quad W = \frac{1}{T} \int_0^T i_3 \cdot e_b \cdot dt - \frac{1}{T} \int_0^T i_2 \cdot e_c \cdot dt,$$

worin T die Zeitdauer einer Periode bedeutet, oder

$$(22) \quad W = W_1 - W_2 = J_3 \cdot E_b \cdot \cos \psi_3 - J_2 \cdot E_c \cdot \cos \psi_2;$$

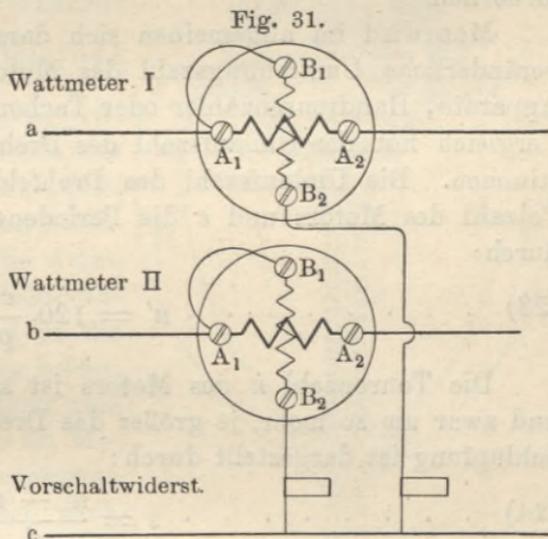
hierin bedeuten die J die Effektivwerte der Außenleiterströme und die

E die Effektivwerte der Spannungen zwischen denselben, ψ_3 und ψ_2 die Phasenwinkel zwischen J_3 und E_b bzw. J_2 und E_c .

Dieselbe Schlußgleichung läßt sich durch eine analoge Rechnung für Drehstrom in Dreiecksschaltung ableiten und gelten mithin die untenstehenden Folgerungen für Drehstrom — mit drei Leitern — allgemein.

Es läßt sich nach obigem Resultate die Leistung einer Drehstromanlage mit nur drei Leitern immer durch zwei Effekte W_1 und W_2 ausdrücken. Dieselben sind einzeln mit dem Wattmeter zu bestimmen, indem man in zwei Hauptleiter je ein Wattmeter mit der Stromspule schaltet, die Nebenschlußspulen dagegen je zwischen den vom Hauptstrom durchflossenen und den dritten Hauptleiter legt (s. Fig. 31).

Ob die Summe oder Differenz der beiden Einzeleffekte den totalen Effekt ergibt, hängt von Belastungsverhältnissen ab. Sind die beiden Wattmeter analog geschaltet — die analoge Schaltung trifft auch zu, wenn nur ein Wattmeter benutzt wird und die beiden Messungen durch Umschalten der Stromspule von einem Leiter auf den anderen mittels des hierzu gebräuchlichen Umschaltapparates ausgeführt werden —, so sind im allgemeinen die in den Spannungsspulen fließenden Ströme mit Rücksicht auf die den Formeln zu Grunde gelegte Positivrichtung der Spannungen ungleichsinnig; das zweite Glied W_2 hat infolgedessen gegenüber dem ersten Gliede einen negativen Wert, und die Summe der Einzelmessungen gibt den Gesamteffekt W an. Bei großen Phasenverschiebungen und Belastungsverschiedenheit der einzelnen Zweige kann der Fall eintreten, daß das zweite Instrument negative Ausschläge ergibt (im Vergleich zum ersten), und man muß dann, um positive Ausschläge zu erhalten, die Spannungsspule umgekehrt anschließen; in diesem Falle ist die Differenz aus den Teileffekten W_1 und W_2 zu bilden¹⁾. — Die oben erwähnte analoge Schaltung der beiden Wattmeter wird durch Fig. 31



¹⁾ Hierüber sowie über andere Methoden der Effektmessung siehe auch: Uppenborn, Kalender für Elektrotechniker; Voit und Heinke, Rühlmann, Wechselstromtechnik; Görner, Elektrot. Zeitschr. 1902, S. 364; Möllinger, Elektrot. Zeitschr. 1900, S. 573; Friese, Elektrot. Zeitschr. 1893, S. 209 u. 227.

veranschaulicht: Die Wattmeter I und II seien gleich gebaute Instrumente; A_1 und A_2 sind die Klemmen der Stromspule, B_1 und B_2 diejenigen der Spannungsspule; a , b und c stellen die drei Außenleiter dar.

4. Messung der Schlüpfung bei asynchronen Motoren.

Die Schlüpfung eines asynchronen Wechselstrommotors, d. h. der prozentuale Geschwindigkeitsunterschied des Rotors gegenüber dem Drehfelde im Stator, ist veränderlich mit der variablen Belastung des Motors; sie hängt außerdem, wo es sich um einen Motor mit Schleifringen, also um einen solchen mit regulierbarem Rotorwiderstande handelt, von der Größe dieses letzteren ab. Die Ermittlung des Zusammenhanges der Schlüpfung mit den genannten Größen wird bei der Untersuchung der Eigenschaften eines asynchronen Motors erforderlich.

Man wird im allgemeinen sich darauf beschränken können, die veränderliche Umdrehungszahl des Motors mit einem der üblichen Apparate, Handtourenzähler oder Tachometer, zu messen und durch Vergleich mit der Umlaufzahl des Drehfeldes die Schlüpfung zu bestimmen. Die Umlaufzahl des Drehfeldes drückt sich, wenn p die Polzahl des Motors und c die Periodenzahl des Generators ist, aus durch:

$$(23) \quad \dots \dots \dots n' = 120 \frac{c}{p}.$$

Die Tourenzahl n des Motors ist stets kleiner als dieser Wert und zwar um so mehr, je größer das Drehmoment ist (s. S. 134). Die Schlüpfung ist dargestellt durch:

$$(24) \quad \dots \dots \dots s = \frac{n' - n}{n'}.$$

Die rechnerische Bestimmung der Schlüpfung aus der Tourenzahl setzt voraus, daß die Umlaufzahl des Drehfeldes bzw. die Periodenzahl genau bekannt ist.

In vielen Fällen kann man sich jedoch, besonders wenn das Resultat sehr genau sein soll, auf die Konstanz der Periodenzahl nicht mit Sicherheit verlassen und muß in der einen oder anderen Weise eine Kontrolle für dieselbe haben, sei es durch Beobachtung der Umdrehungszahl des Generators selbst, sei es derjenigen eines synchronen Motors, der an dem betreffenden Netze liegt.

Es gibt nun Apparate, welche die Schlüpfung direkt zu messen gestatten. Ein neuerer dieser Apparate, der unmittelbar die Schlüpfung mißt, sei in folgendem beschrieben. Er beruht auf der Kuppelung zweier einfacher Tourenzähler. Fig. 32 stellt denselben im Schnitt dar. Der Zähler I mißt die synchrone Umdrehungszahl des Primärfeldes, indem er mittels der biegsamen Welle W entweder vom Gene-

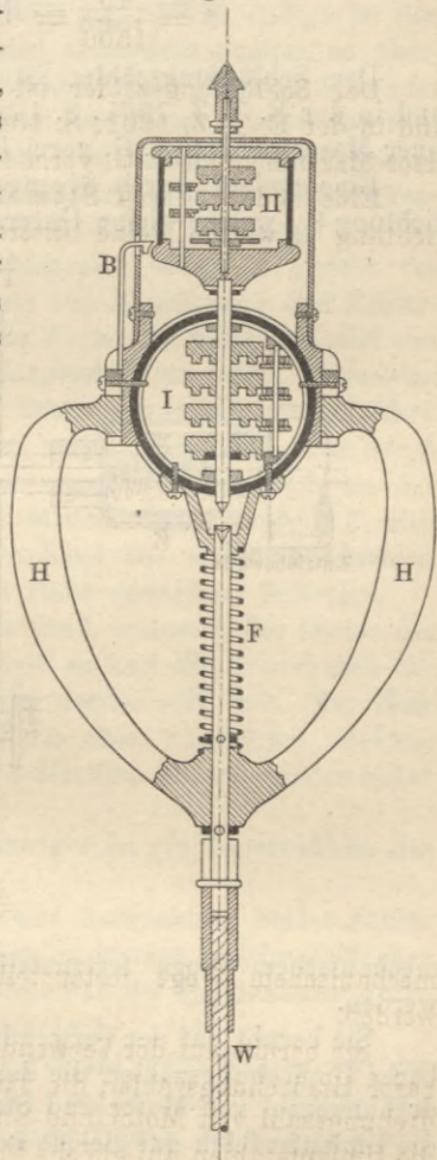
rator selbst oder von einem kleinen, eigens zu diesem Zwecke dienenden Synchronmotore von gleicher Polzahl wie der zu untersuchende asynchrone Motor angetrieben wird. Das Gehäuse des Zählers II, das cylindrisch ausgebildet ist, ist mit der Achse des Zählers I gekuppelt, macht also die synchronen Umdrehungen, während seine Achse die asynchronen Umdrehungen des Rotors ausführt und zwar in gleichem Drehsinne, in dem sich das Gehäuse bewegt. Das Zählwerk gibt somit die relativen Umdrehungen $n' - n$ des Rotors gegenüber dem Primärfelde des Motors an. Da, wie schon erwähnt, außerdem der Zähler I die Touren n' des Primärfeldes direkt anzeigt, so ist nur das Verhältnis beider Angaben $\frac{n' - n}{n'}$ zu bilden, und

diese Größe stellt die Schlüpfung dar. Die Welle W ist mit der Achse des kleinen synchronen Motors gekuppelt. Der Apparat selbst wird an den Handgriffen H gefaßt und gegen die Achse des asynchronen Motors gedrückt, wodurch der Eingriff der Achse I in die Welle W und die Mitnahme der beiden Zähler erfolgt. Die Feder F dient zum raschen Ausrücken der Zähler im Momente, wo der Apparat abgenommen und die Beobachtung beendet wird, die Bremse B zur sofortigen Arretierung des Gehäuses II, das möglichst leicht konstruiert sein muß. Der Gebrauch des Zählers möge an folgendem praktischen Zahlenbeispiele veranschaulicht werden: Die Schlüpfung eines vierpoligen asynchronen Drehstrommotors soll gemessen werden. Dem Motore werde Strom von 50 Perioden zugeführt. Aus der Polzahl $p = 4$ und der Periodenzahl $c = 50$ ergibt sich die synchrone Tourenzahl nach Formel (23) S. 86 zu:

$$n' = \frac{120 \cdot c}{p} = \frac{120 \cdot 50}{4} = 1500.$$

Diese Größe wird durch den Zähler I, wie oben beschrieben, am Generator oder an einem synchronen Hilfsmotore gemessen. Der Rotor

Fig. 32.



hingegen möge bei einer bestimmten Belastung eine Umdrehungszahl von $n = 1485$ pro Minute haben. Somit zeigt das Zählwerk II innerhalb einer Minute die Differenz $n' - n = 1500 - 1485 = 15$.

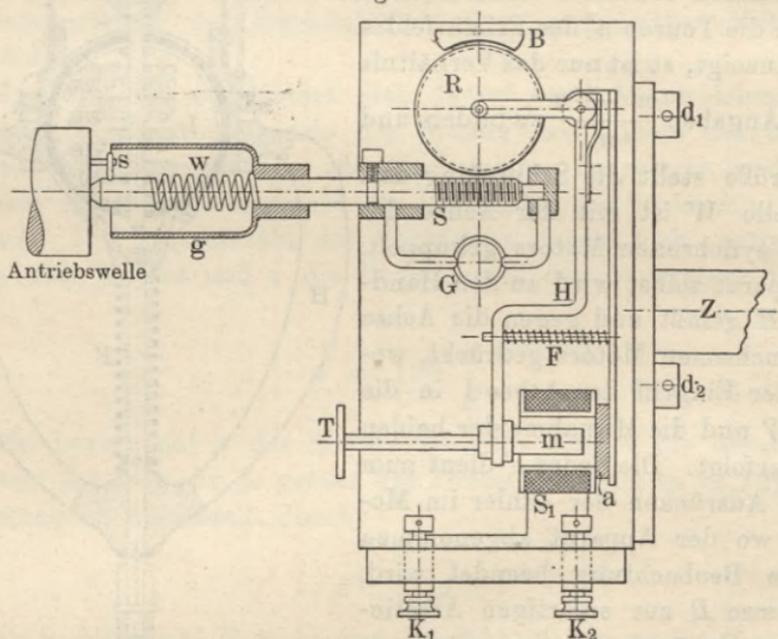
Daraus ergibt sich die Schlüpfung zu

$$s = \frac{15}{1500} = 0,01, \text{ d. h. zu 1 Proz.}$$

Der Schlüpfungszähler ist von Emil Ziehl-Berlin angegeben und in der E. T. Z. 1901, S. 1026 beschrieben; er wird von der Berliner Maschinenbau-A.-G. vorm L. Schwartzkopff gebaut.

Eine andere durch Siemens & Halske A.-G. eingeführte Einrichtung ¹⁾, welche kleine Unterschiede zweier Umdrehungszahlen auf

Fig. 33.



mechanischem Wege festzustellen gestattet, soll noch beschrieben werden.

Sie beruht auf der Verwendung zweier gleicher elektrisch einrückbarer Umdrehungszähler, die dazu bestimmt sind, gleichzeitig die Umdrehungszahl von Motor und Stromerzeuger zu messen. Rechnet man die Umlaufzahlen auf gleiche Polzahl um, so stellt die Differenz beider die Schlüpfungsdrehungszahl dar.

Der Apparat (schematische Skizze Fig. 33) besteht, ähnlich wie ein gewöhnlicher Zähler, aus Schnecke S und Schneckenrad R , welches das Zählwerk betätigt. Das Rad R ist durch den Winkelhebel H ausrückbar, und zwar ist es vermöge des Druckes einer Feder F im allgemeinen außer Eingriff mit der Schnecke. Durch eine mit Leder be-

¹⁾ Siehe R. Seemann, Elektrot. Zeitschr. 1899, S. 764.

klebte Hohlzylinderfläche B wird der Hub des Rades R begrenzt und dasselbe zugleich gegen Leerlauf gesichert.

Am Hebelarm H sind zwei durch ein Joch verbundene weiche Eisenkerne m befestigt; dieselben liegen hintereinander und tauchen in je eine Elektromagnetspule S_1 bzw. S_2 ; a ist der den Kraftlinienschluss bildende Anker. Die Wickelung der Spulen endigt in den Klemmen K_1 und K_2 . Sind die Spulen stromdurchflossen, so überwindet der Magnetismus die Federkraft von F , und das Rad R kommt zum Eingriffe mit der Schnecke S . Durch den Taster T kann das Einrücken auch von Hand bewirkt werden. Die Mitnahme der Schnecke erfolgt durch die Stifte s ; sie ist eine zwangsläufige, und die Schneckenwelle ist ohne erheblichen Druck in horizontaler Richtung mit der Antriebswelle zentriert. Ein Stück biegsame Welle w gleicht die etwaigen Mängel ungenauer Zentrierung von Maschinen- und Zählerachse bei der Montage aus. Die biegsame Welle und die Stifte s sind von einer lose auf die Welle gesteckten Schutzglocke g umgeben. Durch das Schmiergefäß G wird den Lagern der Schneckenwelle Fett zugeführt.

Der Apparat besitzt seitlich einen runden Zapfen Z , der durch die Schrauben d_1 und d_2 mehr oder weniger exzentrisch zu der Schneckenachse gestellt werden kann. Mittels dieses Zapfens Z wird der Zählapparat an einem Stative, bestehend aus einem senkrechten Gasrohre mit gußeisernem Fuße, in der Höhe verstellbar befestigt.

Die Schneckenachse des Apparates läuft während der Dauer des ganzen Versuches, bei welchem von Zeit zu Zeit die Tourenzahl der Maschine bzw. die Schlüpfung gemessen werden soll, mit. Zur Messung wird alsdann das Schneckenrad, wie oben ausgeführt, elektromagnetisch eingerückt und nach $1 \div 3$ Minuten ebenso wieder außer Betrieb gesetzt.

Sowohl am Motore wie am Stromerzeuger ist ein Tourenzähler der beschriebenen Art aufzustellen.

Die gleichzeitige elektrische Ein- und Ausrückung beider Zähler bietet den Vorteil, daß mit großer Genauigkeit eine gleiche Zeitdauer der Tourenregistrierung erzielt wird, ohne daß die Handhabung große Sorgfalt und Übung des Beobachters erfordert.

Für den allgemeinen Fall, daß die Polzahl p des Motors von der Polzahl p_1 des Generators verschieden ist, ergibt sich die Schlüpfung aus den mit den beiden Zählern gemessenen Touren des Motors n und des Generators n_1 zu:

$$(25) \quad \dots s = \frac{n_1 \cdot p_1 - n \cdot p}{n_1 \cdot p_1} = 1 - \frac{n \cdot p}{n_1 \cdot p_1}.$$

Ist z. B. für den Generator $p_1 = 10$ und $n_1 = 600$, für den Motor $p = 4$ und $n = 1470$, so folgt daraus eine Schlüpfung von

$$1 - \frac{1470 \cdot 4}{600 \cdot 10} = 1 - \frac{5880}{6000} = 0,02, \text{ d. h. von 2 Proz.}$$

Außer den rein mechanischen Methoden zur Messung der Schlüpfung, wie sie in den vorstehend beschriebenen Apparaten angewandt werden, kommen auch andere Methoden zur Anwendung, welche die Schlüpfung auf optischem und akustischem Wege zu bestimmen gestatten. Doch soll auf dieselben hier nicht näher eingegangen werden; ich verweise diesbezüglich auf die schon oben zitierte Arbeit von R. Seemann, E. T. Z. 1899, S. 764, ferner auf diejenige von Dr. Benischke, E. T. Z. 1899, S. 143.

G. Gleichstrommaschinen.

Von den Prüfungen an elektrischen Maschinen seien als die wichtigsten zunächst diejenigen an Gleichstrommaschinen behandelt. Diese letzteren kommen für elektrische Anlagen mittlerer Größe meistens und für alle kleineren Lichtanlagen fast ausschließlich in Betracht, sowohl wegen der Einfachheit und großen Betriebssicherheit des Gleichstromsystemes — indem in einfacher Weise Akkumulatorenbatterien als Reserve und zum Ausgleich der schwankenden Tagesbelastung Verwendung finden können —, als auch aus dem Grunde, weil für Kraftzwecke der Gleichstrommotor als der beste und anpassungsfähigste unter sämtlichen Elektromotoren zu betrachten ist. Der Gleichstrom muß erst da dem alternierenden Strome weichen, wo es sich um die Verteilung der Energie über größere Gebiete handelt.

Die wesentlichste Prüfung einer Gleichstromdynamomaschine besteht in der Feststellung des elektrischen und mechanischen Güteverhältnisses bei verschiedenen Belastungen.

Zu diesem Behufe wird die abgegebene elektrische Leistung (Effekt) gemessen und gleichzeitig die Antriebsmaschine indiziert oder — wenigstens bei kleineren Maschinen — vermittelt eines Einschalt-dynamometers der zugeführte Arbeitsbetrag bestimmt. Es wird somit das Verhältnis

$$(1) \dots \eta' = \frac{\text{Nutzbare elektrische Leistung}}{\text{Indizierte Leistung des Betriebsmotors}}$$

oder das Verhältnis (Wirkungsgrad)

$$(2) \dots \eta = \frac{\text{Nutzbare elektrische Leistung}}{\text{Effektive Leistung des Betriebsmotors}}$$

festgestellt.

Zur Bestimmung von η kann bei kleineren Generatoren und Motoren die direkte Bremsmethode angewandt werden. Hierbei sind für die magnetische und mechanische Beanspruchung, sowie die Tourenzahl und Leistung während der Prüfung möglichst die normalen Betriebsverhältnisse einzuhalten.

Für direkt gekuppelte Dynamos, sowie auch für größere mit Riemenantrieb kann das Verhältnis η näherungsweise für die Praxis dadurch bestimmt werden, daß von der bei Belastung indizierten Leistung der Antriebsmaschine die bei Leerlauf gemessene indizierte Leistung subtrahiert wird, wodurch man einen Näherungswert für die effektive Leistung erhält.

Während das zweite Verhältnis das mechanische Güteverhältnis oder den Wirkungsgrad η unmittelbar darstellt, sind im erstgenannten Verhältnis η' die Verluste des Antriebsmotors vollständig mit enthalten. Ist der Nutzeffekt η'' des Antriebsmotors (Dampfmaschine, Gasmotor, Elektromotor) für verschiedene Belastungen bekannt, so kann durch Division des Verhältnisses η' durch η'' der Wirkungsgrad η der Dynamo gewonnen werden.

Diese sogenannte indirekte Bremsmethode kann analog zur Prüfung eines Elektromotors bei bekanntem Wirkungsgrade eines vom Elektromotor angetriebenen Generators benutzt werden.

Das elektrische Güteverhältnis γ ist als das Verhältnis der im äußeren Stromkreise verfügbaren zur gesamten erzeugten elektrischen Energie definiert und wird durch Ermittlung der Arbeitsverluste, die durch den elektrischen Widerstand in Anker- und Erregerwicklung bedingt sind, erhalten. — Bezüglich einer weiteren indirekten elektrischen Methode zur Bestimmung des Wirkungsgrades verweise ich auf das im Kapitel J, S. 161 Gesagte.

Zur Feststellung des mechanischen Güteverhältnisses (Wirkungsgrades eines Generators) kann ferner folgende Methode, die sich sowohl durch Einfachheit wie Genauigkeit auszeichnet, zur Anwendung kommen:

Es sind sämtliche Verluste, die elektrischen, die mechanischen, sowie die Hysteresis- und Wirbelstromverluste, im Ankereisen zu ermitteln. Die Summe aus nutzbarer Leistung und Verlustarbeit entspricht der gesamten zugeführten Energie. Es ist somit die unmittelbare Messung der nutzbaren Leistung des Antriebsmotors (Dampfmaschine, Gasmotor, Elektromotor) nicht erforderlich. Die mechanischen, sowie die Eisenverluste¹⁾ erhält man in einfacher Weise durch einen Leerlaufversuch, d. h. man läßt die Maschine als Motor leer laufen und zwar bei normaler Tourenzahl und bei einer Spannung, welche der der Belastung entsprechenden inneren E. M. K. gleich ist; die genannten Verluste sind sodann mit großer Annäherung gleich der dem Anker bei Leerlauf zugeführten elektrischen Leistung, wenn man von letzterer noch den unbedeutenden Effektverlust durch die Ankerstromwärme des Leerlaufstromes in Abzug bringt. — Die elektrischen Verluste, Stromwärme in

¹⁾ Will man die Eisenverluste in Abhängigkeit von der Spannung getrennt ermitteln, so kann man in analoger Weise verfahren, wie im Kapitel H, S. 131, für Wechselstromgeneratoren angegeben, indem man die Dynamo mittels eines kleinen Elektromotors leerlaufend bei erregten und unerregten Feldmagneten betreibt.

den Anker- und Magnetwickelungen werden bei Belastung aus den jeweiligen Stromstärken, sowie den Kupferwiderständen bezw. auch aus Erregerstrom und Spannung ermittelt. Diese Effektivverluste zusammen mit den durch den Leerlaufversuch gewonnenen stellen den Gesamtverlust dar. Im einzelnen ist für diese Methode noch zu bemerken, daß bei Berechnung der Stromwärmeverluste die Widerstände in warmem Zustande zu grunde zu legen sind ¹⁾.

Die maximale Temperaturerhöhung im Anker und in den Magneten ermittelt man aus der Widerstandserhöhung; hierzu dient die Beziehung

$$(3) \quad w_1 = w_0 \cdot \{1 + 0,004 \cdot (t_1 - t_0)\}, \text{ d. h. } T = t_1 - t_0 = \frac{w_1 - w_0}{0,004 \cdot w_0}.$$

Es bedeuten w_0 und w_1 die Widerstände der Wickelungen im kalten bezw. warmen Zustande, t_0 und t_1 die entsprechenden Anfangs- bezw. Endtemperaturen; als Temperaturkoeffizient ist 0,4 Proz. in die obige Formel eingesetzt. Zur Kontrolle bestimmt man meist die Temperaturerhöhung in den Wickelungen, sowie an anderen Stellen der Maschine durch direkte Temperaturmessung mittels des Thermometers. Eine etwaige Erhöhung der Temperatur des Raumes, die während des Versuches stattgefunden hat, ist von der ermittelten Temperaturzunahme naturgemäß in Abzug zu bringen.

Die Erwärmung bezw. die Temperaturerhöhung eines Teiles einer Maschine über die umgebende Raumtemperatur ist von der Größe des Wärmeeffektes (der entwickelten Wärme), von der Größe der ausstrahlenden Fläche, dem Strahlungskoeffizienten und der Umfangsgeschwindigkeit der rotierenden Teile abhängig. Die Temperaturerhöhung ist eine Funktion der Zeit. Je nach der Größe der Maschine wird die stationäre Temperatur in wenigen (etwa 4) oder mehr (etwa 10 bis 20) Stunden erreicht. Niethammer berechnet die Erhöhung über die Raumtemperatur bei Dauerbetrieb nach der Formel

$$(4) \quad T = \frac{C \cdot A_v}{S (1 + 0,1 \cdot v)},$$

wobei S die abkühlende Oberfläche, A_v der Wattverlust, v die Geschwindigkeit des betreffenden Maschinenteiles, $C = 250$ bis 350 für rotierende Spulen ist; C für stillstehende Spulen ist gleich $(1 + 0,15 s)$ mal so groß zu setzen, worin s die Winkeldicke in Zentimetern bedeutet. Bei rotierendem Ankerkerne ist für die ausstrahlende Fläche S der äußere Cylinder ganz und von den freiliegenden Seiten- und der inneren Cylinderfläche $\frac{1}{4}$ zu rechnen. Jede Außenfläche ist mit ihrem mittleren $0,1 \cdot v$ zu multiplizieren. Für den Wert A_v sind die wirklich im Anker stattfindenden Verluste unter Abzug derjenigen der Endverbin-

¹⁾ Als Ergänzungen zu vorstehenden Ausführungen über Bestimmung des Wirkungsgrades verweise ich auf die jüngst erschienenen „Vorschläge der Maschinenkommission, betreffend Normalien für elektrische Maschinen und Transformatoren“, Elektrot. Zeitschr. 1902, S. 504.

dungen u. s. w. zu berücksichtigen. Bei Magnetspulen ist die äußere Spulenoberfläche ganz und die beiden Flanschen und die innere Oberfläche je zu $\frac{1}{4}$ zu berücksichtigen. Bei Kollektoren und Schleifringen findet die Erzeugung der Wärme auf der Oberfläche statt, daher relativ einfachere Ausstrahlung wie bei Ankern und Spulen ($C = 130$ bis 170). Die Ergebnisse der genannten Formel für T werden durch Anlegen des Thermometers, also durch direkte Temperaturbestimmung, speziell für Wickelungen durch Widerstandsmessungen in kaltem und warmem Zustande, wie schon oben ausgeführt, nachkontrolliert.

Dieser Wert der Temperaturerhöhung darf bei Dauerbetrieb bei kleineren und größeren Maschinen für die Magnetspulen nicht mehr als etwa 40°C . und für die Ankerwicklung nicht mehr als etwa 50°C . bzw. 40°C . über die Raumtemperatur betragen. Die Eisenbestandteile des Ankers bzw. der Magnete können, falls keine Rückwirkung auf die Spulen dadurch bedingt ist, etwa 10°C . mehr, d. h. 60°C . Temperaturerhöhung über diejenige des Raumes vertragen. Eine größere Erwärmung ist unzulässig, da der Isolationswert der Wickelungen mit Erhöhung der Temperatur sehr schnell abnimmt, wie z. B. nach einer angestellten Messung

bei 34°C}.	. . . . .	etwa 30 Megohm
„ 45°C}.	. . . . .	„ 13 „
„ 60°C}.	. . . . .	„ 6 „

Bezüglich anderer Untersuchungen, wie Prüfung der Isolation der Wickelungen, Aufnahme der Sättigungs- und verschiedener anderer Kurven, die meist nur im Laboratorium vorgenommen werden und im allgemeinen außerhalb des Rahmens der für Zentralstationen in Betracht kommenden Prüfungen liegen, verweise ich auf den Abschnitt Isolationsmessungen (S. 184 u. f.), sowie auf die in den Beispielen gelegentlich angeführten speziellen Untersuchungen.

Dagegen lasse ich, da bei den späteren Berechnungen einige Relationen zwischen den elektrischen Größen vorkommen, hier die betreffenden Hauptformeln für Gleichstromdynamos folgen. Dabei finden nachstehende Bezeichnungen Verwendung:

E elektromotorische Kraft in Volt,

e Klemmenspannung in Volt,

e_n Spannung zwischen den Enden der Nebenschlußwicklung (ohne Rheostat),

J Stromstärke im Anker in Ampère,

i_n Stromstärke im Nebenschluß in Ampère,

i Stromstärke im äußeren Stromkreise in Ampère,

$E \cdot J$ gesamte elektrische Leistung in Voltampère oder Watt,

$L_n = e \cdot i$ elektrische Nutzleistung in Watt,

$\gamma = \frac{e \cdot i}{E \cdot J}$ elektrisches Güteverhältnis,

r_a Ankerwiderstand in Ohm,

r_n Widerstand der Nebenschlußwicklung in Ohm,

r_h Widerstand in der Hauptschlußwicklung,

r Widerstand des äußeren Stromkreises in Ohm.

1. Hauptstrommaschine.

$$(5) \quad J = i = \frac{E}{r_a + r_h + r} = \frac{e}{r}$$

$$(6) \quad E = e + J \cdot (r_a + r_h) = e \left(1 + \frac{r_a + r_h}{r} \right)$$

$$(7) \quad \gamma = \frac{e}{E} = 1 - \frac{J \cdot (r_a + r_h)}{E} = \frac{J \cdot r}{J \cdot (r_a + r_h + r)} = \frac{1}{1 + \frac{r_a + r_h}{r}}$$

2. Nebenschlußmaschine.

$$(8) \quad J = \frac{E}{r_a + \frac{r \cdot r_n}{r + r_n}} = \frac{e}{r} \left(1 + \frac{r}{r_n} \right) = i + \frac{e}{r_n}$$

$$(9) \quad i = \frac{e}{r}; \quad i_n = \frac{e}{r_n}$$

$$(10) \quad E = e + J \cdot r_a = e \left(1 + \frac{r_a}{r_n} + \frac{r_a}{r} \right)$$

$$(11) \quad \gamma = \frac{e \cdot i}{E \cdot J} = 1 : \left[1 + \frac{r_a}{r} + \frac{r}{r_n} \left(1 + \frac{r_a}{r_n} \right) + 2 \frac{r_a}{r_n} \right]$$

3. Maschinen mit gemischter Wickelung.

a) Nebenschluß parallel zum Anker.

$$(12) \quad J = \frac{E}{r_a + \frac{(r + r_h) \cdot r_n}{r + r_h + r_n}} = \frac{e}{r} \left(1 + \frac{r + r_h}{r_n} \right) = i \left(1 + \frac{r_h}{r_n} \right) + \frac{e}{r_n}$$

$$(13) \quad i = \frac{e}{r}; \quad i_n = \frac{e + i \cdot r_h}{r_n}$$

$$(14) \quad E = e + J \cdot r_a + i \cdot r_h = e \cdot \left(1 + \frac{r_h + r_a}{r} + \frac{r_a}{r} \cdot \frac{r + r_h}{r_n} \right)$$

$$(15) \quad \gamma = \frac{e \cdot i}{E \cdot J} = 1 : \left[1 + \frac{r_a + r_h}{r} + \frac{r}{r_n} \left(1 + \frac{r_h}{r} \right) \cdot \left(1 + \frac{r_a}{r_n} + 2 \frac{r_a}{r + r_h} \right) \right]$$

b) Nebenschluß parallel zum äußeren Stromkreise

$$(16) \quad J = \frac{E}{r_a + r_h + \frac{r \cdot r_n}{r + r_n}} = \frac{e}{r} \left(1 + \frac{r}{r_n}\right) = i + \frac{e}{r_n}$$

$$i = \frac{e}{r}; \quad i_n = \frac{e}{r_n}$$

$$(17) \quad E = e + J \cdot (r_a + r_h) = e \cdot \left[1 + \frac{r + r_n}{r \cdot r_n} \cdot (r_a + r_h)\right]$$

$$(18) \quad \gamma = \frac{e \cdot i}{E \cdot J} = 1 : \left[1 + \frac{r_a + r_h}{r} \cdot \left(1 + \frac{r}{r_n}\right)^2 + \frac{r}{r_n}\right]$$

Erstes Beispiel.

Die Bestimmung des Wirkungsgrades einer älteren Compounddynamomaschine unter Anwendung des Einschalt dynamometers von Hefner-Alteneck ist einer von mir in einer kleinen elektrischen Privat-anlage vorgenommenen Prüfung entnommen.

Die Daten der Maschine sind:

Klemmenspannung	$e = 110$ Volt,
Stromstärke	$i = 16$ Ampère,
Leistung	$e \cdot i = 1760$ Watt,
Tourenzahl	$n = 1150$
Riemenscheibendurchmesser	$d = 160$ mm.

Die vom Riemen übertragene Arbeit L_r ist, wenn P die Umfangskraft und $v = \frac{\pi d n}{60}$ die Umfangsgeschwindigkeit bezeichnet,

$$L_r = v \cdot P = \frac{\pi d n}{60} \cdot P \text{ mkg/sec.}$$

Die Tourenzahl wurde während des Versuches konstant gehalten; somit ist auch v in der nachfolgenden Rechnung eine konstante Größe und beträgt

$$v = \frac{d \cdot \pi \cdot n}{60} = \frac{0,160 \cdot \pi \cdot 1150}{60} = 9,63 \text{ m/sec.}$$

P sind die einzelnen Gewichte, welche für die verschiedenen Arbeitsübertragungen am Dynamometer ¹⁾ (durch die Federspannung bedingt) abgelesen wurden.

Die elektrische Leistung wurde durch Strom- und Spannungsmessung (mittels eines Siemensschen und eines Weston-Präzisionsapparates) gewonnen.

Die gemessenen, sowie die daraus berechneten Werte der mechanisch zugeführten und der elektrisch geleisteten Energie sind aus umstehender Zusammenstellung zu ersehen:

¹⁾ Siehe hierzu S. 42 u. 43.

	Berechnung der eingeleiteten Arbeit: $L_r = v \cdot P$ kgm/sec.			Berechnung der elektrischen Leistung im äußeren Stromkreis $L_n = e \cdot i$ Watt		
	v	P	kgm/sec.	e	i	Watt
1.	9,63	8,5	81,9	—	0	Leerlauf
2.	9,63	10,3	99,2	71,1	1,93	137,5
3.	9,63	10,5	100,1	73,9	2,10	155,2
4.	9,63	11,0	106,0	76,5	3,02	231,0
5.	9,63	11,8	113,6	80,0	3,90	312,0
6.	9,63	13,9	133,9	87,4	5,70	498,0
7.	9,63	18,6	179,3	100,0	9,16	916,0
8.	9,63	21,9	210,9	103,3	11,26	1163,0
9.	9,63	23,4	225,3	104,6	11,92	1247,0
10.	9,63	25,4	244,6	107,6	13,96	1502,0
11.	9,63	28,3	273,0	108,7	15,46	1680,0
12.	9,63	28,9	278,0	110,6	16,00	1770,0

Da nun 1 kgm/sec = 9,81 Watt, so ist der Wirkungsgrad der Dynamo nach Formel (2) S. 90:

$$\eta = \frac{L_n}{9,81 \cdot L_r} = \frac{\text{Watt}}{9,81 \times \text{kgm/sec}}$$

Danach lassen sich für die verschiedenen Leistungen folgende Wirkungsgrade berechnen:

1.	Leerlaufsarbeit 81,9 kgm/sec = 1,092 PS.	7.	$\eta = \frac{916}{9,81 \cdot 179,3} = 0,521$
2.	$\eta = \frac{137,5}{9,81 \cdot 99,2} = 0,141$	8.	$\frac{1163}{9,81 \cdot 210,9} = 0,5625$
3.	$\frac{155,2}{9,81 \cdot 100,12} = 0,158$	9.	$\frac{1247}{9,81 \cdot 225,3} = 0,565$
4.	$\frac{231}{9,81 \cdot 106} = 0,222$	10.	$\frac{1502}{9,81 \cdot 244,6} = 0,626$
5.	$\frac{312}{9,81 \cdot 113,6} = 0,280$	11.	$\frac{1680}{9,81 \cdot 273} = 0,628$
6.	$\frac{498}{9,81 \cdot 133,9} = 0,380$	12.	$\frac{1770}{9,81 \cdot 278} = 0,648$

Zweites Beispiel.

Untersuchung der Gleichstrommaschinen der Palmengarten-Zentrale in Frankfurt a. M.

Das im folgenden gegebene Beispiel ist einer von mir vorgenommenen Prüfung an der Gesamt-Palmengarten-Anlage, ausgeführt von der E.-A.-G. vorm. Lahmeyer u. Co., Frankfurt a. M., entnommen.

Es wird daselbst hochgespannter Wechselstrom vermittelt mit Gleichstromgeneratoren gekuppelter asynchroner Wechselstrommotoren in Gleichstrom von 2×110 Volt umgewandelt. — Es läßt sich der Natur des Beispiels nach nicht gut vermeiden, schon jetzt die Hauptergebnisse der Messungen an diesen Wechselstrommotoren mit heranzuziehen, trotzdem die Behandlung der Wechselstrommessungen in einem späteren Kapitel erfolgen wird. — Zur Ladung der Batterie wird behufs Erhöhung der Spannung ein Motor-Zusatz-Generator verwandt.

Sämtliche Gleichstrommaschinen sind von der E.-A.-G. vormals Lahmeyer u. Co., die Wechselstrommotoren von Brown, Boveri u. Co. geliefert.

1. Resultate der Messungen an den Nebenschluß-Gleichstrom-Dynamos mit einer Leistung von 36 K.-W. bei $n = 670$ Umdrehungen pro Minute und 220 Volt Spannung.

Die an den Dynamos angestellten Messungen bezogen sich im wesentlichen auf Bestimmung des elektrischen und mechanischen Güteverhältnisses (Wirkungsgrades) bei verschiedenen Belastungen. Die verschiedenen elektrischen Werte wurden direkt mittels Präzisionsapparaten, System Weston bzw. Siemens und Halske, ermittelt. Ich gebe zur Übersicht die korrigierten Mittelwerte einer Versuchsreihe und die Resultate in Tabellen.

Korrigierte Mittelwerte.

Nr.	Spannung e des Generators in Volt	Strom i im äußeren Stromkreise in Ampère	Strom i_n im Nebenschluß in Ampère	Eingeführte Leistung des Wechsel- strommotors in Kilowatt	Eingeführte Stromstärke des Wechsel- strommotors in Ampère
I.	210	26	2,50	12,5	10,8
II.	215	50	2,70	17,3	12,2
III.	215	80	2,75	24,3	14,0
IV.	218	97	2,90	28,8	15,3
V.	219	120	3,15	35,0	17,5
VI.	219	156	3,46	44,5	20,8
VII.	222	159	3,50	46,0	21,4
VIII.	223	164	3,60	47,5	22,0

IX. Bei offenem Stromkreise und Nebenschlusse betrug der eingeführte Strom in dem treibenden Motor 9,5 Amp., der hierbei gemessene zugeführte Effekt 6,0 K.-W. Diese 6 K.-W. stellen somit die Leerlaufarbeit des Motors inkl. der Reibungsarbeit des Gleichstromgenerators dar. Der durch Leerlaufversuch der Gleichstrommaschine (als Motor, siehe S. 91) festgestellte Leerlaufseffekt war 2,4 K.-W.; er enthält die Reibungs- und Eisenverluste der Maschine.

Als Methode der Wirkungsgradberechnung war diejenige der Bestimmung aus den Verlusten (siehe S. 91) und durch Leerlaufversuch gewählt. Aus dem jeweiligen Ankerstrom und dem Ankerwiderstande ($r_a = 0,022$ Ohm) ergab sich der Kupferverlust im Anker, aus Erregerstrom und Klemmenspannung derjenige des Feldes. Aus diesen beiden Verlusten und der Nutzleistung des Generators folgte das elektrische Güteverhältnis γ . Das mechanische Güteverhältnis wurde durch Addition des Leerlaufverlustes 2,4 Watt, der für alle Belastungen konstant betrachtet werden kann, zu den Verlusten als Verhältnis

$$\frac{\text{Nutzleistung}}{\text{Nutzleistung} + \text{Verlustarbeit}}$$

gewonnen. Der Wirkungsgrad des ganzen Aggregates endlich bestimmte sich als Verhältnis: Gleichstromnutzleistung zu zugeführter Wechselstromenergie.

Resultate.

Nr.	Dynamowerte						Wirkungsgrad des ganzen Aggregates in Proz.
	Nutzbare elektrische Arbeit in Watt	Kupfer- verlust in der Feld- wicklung in Watt	Kupfer- verlust im Anker in Watt	Gesamte elektrische Arbeit in Watt	Elektrisches Güte- verhältnis in Proz.	Mechani- sches Güte- verhältnis in Proz.	
I.	5 460	525,0	17,86	6 003	91,00	65,20	43,6
II.	10 750	580,5	61,10	11 392	94,30	78,00	62,0
III.	17 200	591,2	150,64	17 942	96,00	84,90	70,8
IV.	21 146	632,6	309,56	22 078	96,23	86,60	73,4
V.	26 280	689,8	340,25	27 310	96,23	88,70	75,1
VI.	34 164	757,7	559,40	35 481	96,28	90,45	76,8
VII.	35 298	777,0	580,93	36 656	96,29	90,50	76,7
VIII.	36 572	802,8	617,97	37 993	96,26	90,60	77,0

Die oben beschriebene Rechnungsweise sei für den Versuch I nachstehend durchgeführt:

$$\text{Kupferverlust im Anker} \quad . \quad J^2 \cdot r_a = 28,5^2 \cdot 0,022 = 17,86 \text{ Watt}$$

$$\text{Kupferverlust in der Feld-} \\ \text{wicklung} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad e \cdot i_n = 210 \cdot 2,50 = 525,00 \text{ "}$$

$$\text{Elektrische Nutzleistung} \quad . \quad . \quad e \cdot i = 210 \cdot 26 = 5460,00 \text{ "}$$

$$\text{Gesamte elektrische Arbeit} = \sim 6003,00 \text{ Watt}$$

$$\text{Leerlaufeffekt} \quad . \quad . \quad . \quad = 2400,00 \text{ "}$$

$$\text{Gesamter dem Generator zugeführter Effekt} \quad . \quad . \quad = 8403,00 \text{ Watt}$$

Elektrisches Güteverhältnis (nach S. 91):

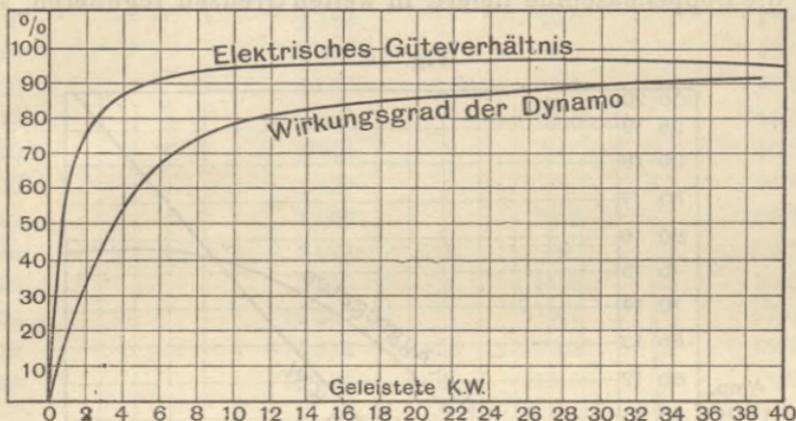
$$\gamma = \frac{5460}{6003} = 0,91.$$

Mechanisches Güteverhältnis (Wirkungsgrad):

$$\eta = \frac{5460}{8403} = 0,65.$$

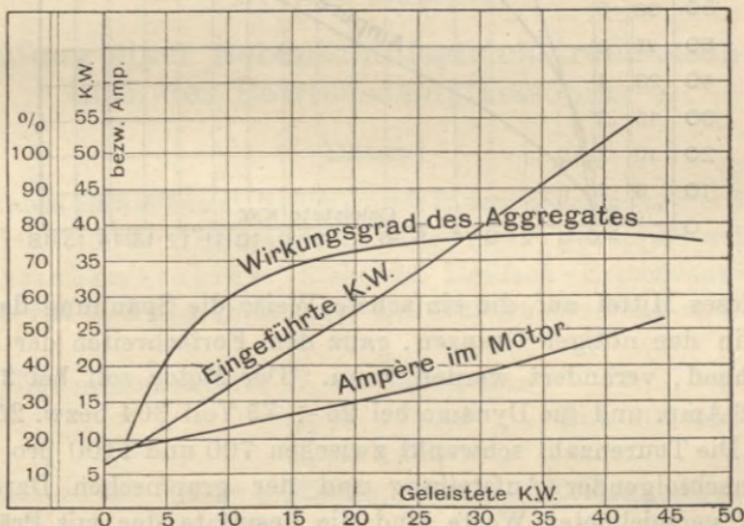
Wirkungsgrad des ganzen Aggregates: $\frac{5460}{12500} = 0,436$, d. h. 43,6 Proz.

Fig. 34.



Die Prüfung des Wechselstrom-Gleichstrom-Maschinenaggregates (Motorgenerators) ergab bei der normalen Leistung einen Wirkungsgrad

Fig. 35.



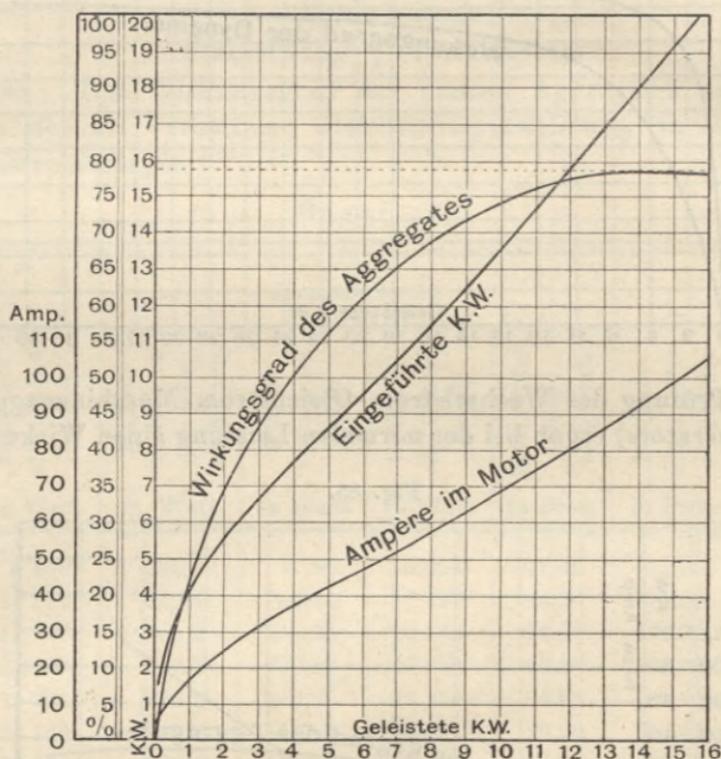
von 77 Proz.; der Wirkungsgrad des Wechselstrommotors ergab sich somit zu 85 Proz.

Die Leerlaufarbeit des Umformers beträgt, wie schon erwähnt, rund 6 K.-W.

2. Resultate der Messungen an dem Motor-Zusatz-Generator.

Der Motor-Zusatz-Generator dient dazu, einen 220 voltigen Gleichstrom in solchen von entsprechend niedrigerer Spannung zu transformieren. Durch Veränderung der Erregung läßt sich die Spannung, welche die Doppelmaschine liefert, in weiten Grenzen regulieren, so daß

Fig. 36.



durch dieses Mittel auf die einfachste Weise die Spannung des Ladestromes in den nötigen Grenzen, ganz dem Fortschreiten der Ladung entsprechend, verändert werden kann. Der Motor soll bei 220 Volt 49 ÷ 106 Amp. und die Dynamo bei 26 ÷ 75 Volt 304 bzw. 255 Amp. leisten. Die Tourenzahl schwankt zwischen 700 und 1100 pro Minute. Die in nachfolgender Aufstellung und der graphischen Darstellung (Fig. 36) verzeichneten Werte sind die Resultate der mit Präzisionsapparaten beobachteten Mittelwerte der Messungen.

Wie aus nachstehender Tabelle hervorgeht, ist der Wirkungsgrad dieses kleinen Maschinenaggregates maximal 78,9 Proz. Die Kurven geben einen Überblick über den Verlauf der primären Stromstärke im Motor (bei konstant 220 Volt Spannung) und der eingeführten elektrischen Energie bei Zunahme der geleisteten (sekundären) elektrischen Energie. Beide Kurven zeigen innerhalb der

Resultate.

Primärer elektrischer Effekt in Watt	Sekundärer elektrisch. Effekt in Watt	Effektverlust in der Erregung	Wirkungsgrad in Prozenten
1 378,1 (= 1,87 PS.)	0	0	0
4 940	862	13,2	17,5
5 859	2 184	32,0	37,4
6 110	2 610	36,2	42,6
6 920	3 040	52,4	43,9
7 370	3 520	75,5	47,8
7 820	3 950	—	50,5
8 200	4 480	—	54,8
10 829	7 066	78,2	65,0
11 448	8 021	—	70,2
12 992	9 152	87,3	70,6
16 119	12 297	119,3	76,4
18 419	14 512	130,5	78,9
20 553	16 170	146,5	78,8

Gebrauchsgrenzen gute Proportionalität zwischen primärer Stromstärke bzw. eingeführter elektrischer Energie und geleisteter elektrischer Energie.

Drittes Beispiel.

 Prüfung einer Nebenschlußgleichstrommaschine inkl. der Betriebsdampfmaschine ¹⁾.

Daten:

Dynamomaschine: Nebenschluß-Innenpolmaschine von Siemens und Halske, A.-G.; Feldsystem 12 polig; direkt gekuppelt mit der

Betriebsmaschine: Stehende Dreifach-Expansions-Dampfmaschine von G. Kuhn (Stuttgart) mit Schiebersteuerung und Kondensation;

Cylinderdurchmesser: $D_1 = 500,5$ mm }
 $D_2 = 770,5$ " } Hub 600 mm.
 $D_3 = 1200$ " }

Tourenzahl $n = 100$ pro Minute; mittlere Kolbengeschwindigkeit 2,00 m/sec.

Versuche:

Von einer Trennung des Leerlaufeffektes von Dampfmaschine und Dynamo mußte wegen der direkten Kuppelung abgesehen werden, und

¹⁾ Diese Prüfung ist dem offiziellen Ausstellungsberichte der Prüfungskommission der Elektrotechnischen Ausstellung zu Frankfurt a. M. 1891 entnommen, welcher der Verfasser als Assistent zugehörte.

Messungen an der Dampfmaschine.

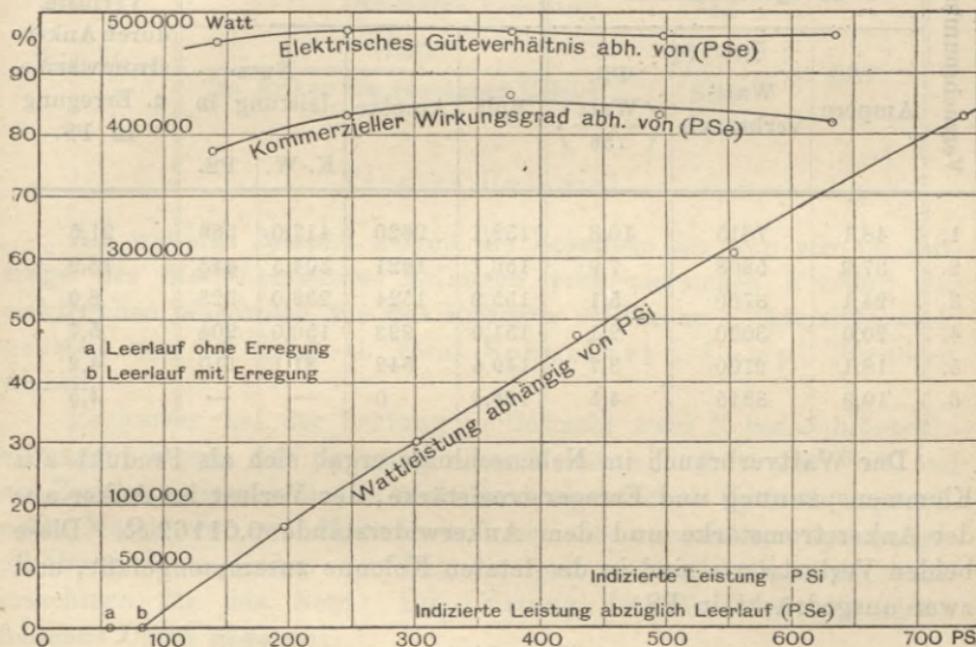
Versuchsnummer	Tourenzahl n	Cylinderseite	Mittlerer indizierter Dampfdruck			Indizierte Pferdestärken			Zusammen = N_i bei n Touren	Indizierte Leistung abzüglich Leerlauf in PS.	Bemerkungen
			Druckcylinder			Druckcylinder bei 100 Touren					
			Hoch-	Mittel-	Nieder-	Hoch-	Mittel-	Nieder-			
1	101,5	d k	4,396 4,229	1,994 1,864	0,913 0,921	111,8 108,6	121,8 114,6	136,1 137,4	741	685	
2	104,2	d k	3,980 3,650	1,350 1,281	0,580 0,597	101,4 93,7	82,7 79,2	86,8 89,6	555	498	
3	104,1	d k	3,272 3,128	0,991 0,992	0,433 0,428	83,4 80,4	60,8 61,2	64,9 62,3	430	378	
4	102,7	d k	2,580 2,300	0,720 0,710	0,270 0,272	65,6 59,2	43,8 43,9	40,6 40,9	302	246	
5	104,5	d k	1,960 1,390	0,470 0,470	0,150 0,160	49,9 35,8	28,8 29,0	22,5 24,1	199	142	
6	103,0	d k	1,160 0,460	0,210 0,200	0,043 0,046	29,5 11,8	12,9 12,1	6,5 6,9	82	25	Leerlauf bei erregten Magneten
7	104,0	d k	0,796 0,295	0,150 0,150	0,035 0,023	20,3 7,6	9,2 9,3	5,3 3,5	57	0	Leerlauf

wurde somit direkt nur das Verhältnis der Nutzleistung der Dynamo zur indizierten Leistung der Dampfmaschine festgestellt. Der gemeinsame Leerlaufverbrauch von Dampfmaschine und Dynamo bei unerregten Magneten wurde von der indizierten Leistung der ersteren bei Belastung jeweils in Abzug gebracht, woraus sich der im Anker umgesetzte Effekt ergab (siehe zu dieser Methode S. 90 u. 91).

Das Verhältnis der elektrischen Nutzleistung zu der so ermittelten Leistung ist in Fig. 37 als „kommerzieller“ Wirkungsgrad bezeichnet.

Stromstärke in der Erregerwicklung und Klemmenspannung wurden direkt durch Weston-Instrumente gemessen, während die Er-

Fig. 37.



mittlung des Gesamtstromes nach der indirekten Methode durch ein Westonsches Milliampèremeter (im Nebenschlusse zu einem festen Widerstande) erfolgte.

Es wurden sieben verschiedene Belastungszustände beobachtet, darunter der Leerlauf bei erregten Magneten und, wie schon erwähnt, der unerregte Leerlauf. Vor den Messungen war das Maschinenaggregat drei Stunden bei der höchsten Belastung in Betrieb gewesen. Die unten mitgeteilten Werte sind jeweils Mittelwerte aus einer Reihe von Ablesungen.

Hierbei sind die einzelnen indizierten Leistungen aus den jeweiligen mittleren Drucken der einfacheren Rechnung wegen für die Tourenzahl 100 berechnet und erst die Summe der sechs Einzelleistungen auf die wirklich festgestellte Tourenzahl n umgerechnet.

Zu der letzten Zahlenkolonne sei bemerkt, daß die bei $n = 104$ beobachtete Leerlaufleistung bei jeder Versuchsnummer auf die Touren-

zahl der betreffenden Leistung reduziert wurde, z. B. für Versuch 1 (Leistung 741 PS.) in folgender Weise:

Bei einer Tourenzahl von 101,5 beträgt die indizierte Leerlaufleistung

$$57 \cdot \frac{101,5}{104} = \text{etwa } 56.$$

Daher indizierte Leistung abzüglich Leerlauf = 741 - 56 = 685 PS.

Messungen an der Dynamomaschine.

Versuchsnummer	Erregerstromkreis			Nutzstromkreis				Verluste durch Ankerstromwärme u. Erregung in PS.
	Ampère	Wattverbrauch	PS. ($\frac{\text{Watt}}{736}$)	Volt	Ampère	Nutzleistung in		
						K.-W.	PS.	
1.	48,1	7615	10,3	159,1	2620	417,0	566	21,5
2.	37,2	5808	7,9	156,1	1921	304,5	413	13,9
3.	24,1	3760	5,1	155,9	1524	238,0	323	8,9
4.	20,0	3020	2,1	151,0	993	150,0	204	5,7
5.	18,1	2700	3,7	149,4	542	81,1	110	4,2
6.	19,9	3315	4,5	166,4	0	—	—	4,5

Der Wattverbrauch im Nebenschlusse ergab sich als Produkt aus Klemmenspannung und Erregerstromstärke, der Verlust im Anker aus der Ankerstromstärke und dem Ankerwiderstande 0,01162 Ω . Diese beiden Verlustwerte sind in der letzten Kolonne zusammengefaßt, und zwar ausgedrückt in PS.

Resultate.

Versuchsnummer	Elektrisches Güteverhältnis in Proz.	Verhältnis der elektrischen Nutzleistung zu		Watt pro Pferdestärke	
		der indizierten Leistung der Dampfmaschine in Proz.	der indizierten Leistung abzügl. Leerlauf in Proz.	d. indiziert. Leistung der Dampfmaschine	d. im Anker umgesetzten Effektes
1.	96,4	76,5	82,7	563	609
2.	96,4	74,5	83,3	549	611
3.	97,3	75,1	86,6	554	638
4.	97,2	67,6	83,0	497	609
5.	95,1	55,4	77,5	407	571

Die Resultate sind durch Kurven in Fig. 37 veranschaulicht (siehe auch unter Kapitel B.).

Der Zusammenhang der Größen in den Tabellen sei durch folgende Rechnung für Versuchsnummer 1 gezeigt:
Elektrisches Güteverhältnis (siehe S. 91).

$$\gamma = \frac{566}{566 + 21,5} = \frac{566}{587,5} = 0,964.$$

$$\text{Verhältnis: } \frac{\text{Elektrische Nutzleistung}}{\text{Indizierte Leistung}} = \frac{566}{741} = 0,765.$$

$$\text{Kommerzieller Wirkungsgrad: } \frac{566}{741 - 56} = \frac{566}{685} = 0,827.$$

$$\text{Verhältnis: } \frac{\text{Watt}}{\text{Indizierte Leistung}} = \frac{417000}{741} = 563.$$

$$\text{Verhältnis: } \frac{\text{Watt}}{\text{Im Anker umgesetzter Effekt}} = \frac{417000}{685} = 609.$$

Viertes Beispiel.

Als weiteres Beispiel mögen die Resultate der von mir im Auftrage des Stadtmagistrates Erlangen vorgenommenen Prüfung der elektrischen Maschinen für das Erlanger städtische Elektrizitätswerk, geliefert von der E.-A.-G. vorm. Schuckert u. Comp., Nürnberg, dienen.

Es kamen bei der Prüfung in Betracht zwei Nebenschlußgleichstromgeneratoren zur Speisung eines Netzes von 2×220 Volt und ein Zusatzaggregat von vier nach Schuckertschem Systeme angeordneten Maschinen: zwei Motoren und zwei Generatoren zur Spannungserhöhung beim Laden der Batterie und zugleich als Ausgleichsmaschinen für das Netz. Die Leistung der Maschinen ist durch folgende Daten gegeben:

Nebenschlußgleichstromgeneratoren:

197 Amp. \times 440 bis 500 Volt bei $n = 120$ Touren,

197 „ \times 550 „ „ „ $n = 132$ „

Zusatzdynamos:

10 | 100 | 130 Volt \times 163 | 163 | 55 Amp. bei $n = 740$ Touren.

Motoren:

220 \div 250 Volt \times 91 Amp. bei $n = 740$ Touren.

Der Übersicht halber seien in folgendem:

1. die Methode und Einrichtung der Messungen,
2. die Prüfungsprotokolle und Berechnungen,
3. die Resultate der Prüfungen

gegeben.

1. Es kam die auf S. 91 beschriebene Methode der Bestimmung der Verlustarbeiten zur Anwendung.

Die Widerstände der Maschinen wurden zunächst in kaltem Zustande gemessen, ebenso wurde die Raumtemperatur festgestellt; sodann erfolgte eine fünfstündige Dauerprobe unter normalen Verhältnissen. Nach derselben wurden die Widerstände sowie die Temperatur der Wicklungen — diese mit dem Thermometer — abermals bestimmt und anschließend hieran die Leerlaufversuche vorgenommen.

Bei der Belastungsprobe und den darauf folgenden Messungen bei Entlastung wurden:

die Klemmenspannung e , die Stromstärke im äußeren Stromkreise i ,

der Strom im Nebenschlusse i_n ,

die Magnetschenkelspannung e_n (ohne den Spannungsabfall im Rheostate) und die Tourenzahl n der Dynamomaschinen

bestimmt.

Zur Ermittlung der kleinen Widerstandsbeträge geschah die Messung auf indirektem Wege (s. S. 76). Die Magnetwiderstände in kaltem und in warmem Zustande ergaben sich aus der ersten Aufschreibung beim Einschalten, bzw. aus den letzten Werten — von Magnetschenkel-Strom und -Spannung — vor Entlastung. Bei Bestimmung der Ankerwiderstände wurden Bürstenkontakte und Zuleitungen mitgemessen.

Der Wirkungsgrad des Motorzusatzdynamoaggregates ergab sich als Verhältnis der nützlich erzeugten zur gesamten eingeleiteten Energie.

2. a) Aufnahmeprotokolle der Prüfungen an einer Nebenschlußdynamomaschine und der vier Maschinen des Zusatzaggregates: Dynamo I bzw. II und Motor I bzw. II.

Widerstände im kalten Zustande.

Nebenschlußdynamomaschine.

$$\left. \begin{array}{l} r_a = 0,136 \, \Omega \text{ ohne Bürsten} \\ r_a = 0,1435 \, \Omega \text{ mit Bürsten} \\ r_n = 52,3 \, \Omega \end{array} \right\} \text{Raumtemperatur} = 17^\circ \text{C.}$$

Dynamo I.

Motor I.

$$\left. \begin{array}{l} r_a = 0,023 \, \Omega \\ r_n = 52,2 \, \Omega \end{array} \right\} \text{Raumtemperatur} = 18^\circ \text{C.}$$

$$\left. \begin{array}{l} r_a = 0,0963 \, \Omega \\ r_n = 85,1 \, \Omega \end{array} \right\} \text{Raumtemperatur} = 18^\circ \text{C.}$$

Dynamo II.

Motor II.

$$\left. \begin{array}{l} r_a = 0,0225 \, \Omega \\ r_n = 47,7 \, \Omega \end{array} \right\} \text{Raumtemperatur} = 18^\circ \text{C.}$$

$$\left. \begin{array}{l} r_a = 0,094 \, \Omega \\ r_n = 85 \, \Omega \end{array} \right\} \text{Raumtemperatur} = 18^\circ \text{C.}$$

Belastungsprobe.

Nebenschlußdynamomaschinen.

<i>i</i>	<i>i_n</i>	<i>e</i>	<i>e_n</i>	<i>n</i>
200	5,50	590,0	288	142
197	5,24	592,0	286	144
199	5,50	616,2	308	148
200	5,45	616,2	308	148
207	5,60	631,8	320	150
200	5,40	633,0	318	152
200	5,30	627,0	320	154
200	5,30	627,0	320	154

Entlastungen nach fünfstündigem Dauerbetriebe.

<i>i</i>	<i>i_n</i>	<i>e</i>	<i>e_n</i>	<i>n</i>
207	5,30	631,8	320	152
149	5,02	631,8	300	152
102	4,85	637,8	288	153
55	4,75	639,0	280	153
196	4,50	556,2	266	152
150	4,23	556,2	254	152
0	3,80	556,2	228	152
0	4,80	658,8	288	156
0	4,90	651,0	292	157

Da die Tourenzahl des Antriebsmotors wegen höher gehalten werden mußte, als dem normalen Werte entspricht, so wurde die Spannung der Maschine proportional der erhöhten Tourenzahl vergrößert; dadurch wird die normale Erwärmung in den Magnetwickelungen erreicht.

Zusatzaggregat.

Ablesungen bei Dauerprobe.

Dynamo I					Motor I				
<i>i</i>	<i>i_n</i>	<i>e</i>	<i>e_n</i>	<i>n</i>	<i>i</i>	<i>i_n</i>	<i>e</i>	<i>e_n</i>	<i>n</i>
167	2,05	101,5	107,0	830	88,5	1,95	233	166	830
163	1,92	99,5	102,0	840	83,5	1,95	235	168	840
168	1,88	97,5	108,0	840	87,5	1,87	233	170	840
167	1,83	96,5	102,0	840	85,5	1,80	233	168	840
176	1,92	101,5	104,0	865	72,5	1,95	245	162	865
168	1,92	103,5	110,0	880	76,5	1,95	245	180	880
163	1,80	99,5	102,5	880	85,5	1,95	245	186	880
165	1,80	101,5	104,5	876	76,5	1,97	248	190	876

Dynamo II					Motor II				
<i>i</i>	<i>i_n</i>	<i>e</i>	<i>e_n</i>	<i>n</i>	<i>i</i>	<i>i_n</i>	<i>e</i>	<i>e_n</i>	<i>n</i>
167	2,12	100	100,0	830	86	1,93	234	164	830
170	2,09	100	102,0	840	85	1,91	236	167	840
167	2,03	101	101,5	840	80	1,83	234	168	840
167	2,02	101	101,0	849	85	1,80	232	166	840
165	1,99	101	101,0	865	95	1,85	246	174	865
171	2,12	105	105,0	880	100	1,88	246	178	880
167	1,95	100	102,0	880	80	1,95	246	184	880
168	1,97	102	103,0	876	83	1,97	249	190	876

Weitere Be- und Entlastungen nach fünfständigem Betriebe.

Dynamo I					Motor I				
<i>i</i>	<i>i_n</i>	<i>e</i>	<i>e_n</i>	<i>n</i>	<i>i</i>	<i>i_n</i>	<i>e</i>	<i>e_n</i>	<i>n</i>
162	1,78	98,5	101	876	81,5	1,90	247	180	876
120	1,78	103,0	102	896	60,0	1,95	249	188	896
160	2,08	99,5	119	766	88,5	1,98	219	220	766

Dynamo II					Motor II				
<i>i</i>	<i>i_n</i>	<i>e</i>	<i>e_n</i>	<i>n</i>	<i>i</i>	<i>i_n</i>	<i>e</i>	<i>e_n</i>	<i>n</i>
163	1,92	99,5	100	876	82	2,10	248	204	876
123	1,97	101,0	107	896	60	2,13	250	204	896
167	1,95	100,0	88	766	80	2,22	220	220	766

Widerstände im warmen Zustande.

Nebenschlußdynamomaschine.

$r_a = 0,1511 \Omega$ ohne Bürsten,	Ankertemperatur = 44,5° C.
$r_a = 0,1523 \Omega$ mit Bürsten,	Magnettemperatur = 40° C.
$r_n = 60,4 \Omega$	Raumtemperatur = 20° C.

Ferner wurde während der Vollbelastung der Übergangswiderstand vom Stromabgeber zu den Bürsten nebst Widerstand der Bürstenzuführungskabel bis zu den Maschinenklemmen bestimmt. Es geschah dies, indem der eine Draht eines fein geteilten Voltmeters mit einer Maschinenklemme verbunden wurde, während der andere Voltmeterdraht direkt unter der gleichpoligen Bürste an den Stromabgeber gehalten wurde. Die Messung erfolgte für beide Pole. Die ermittelte

Spannung zwischen den Maschinenklemmen und dem Stromabgeber betrug 0,75 Volt für den einen, 1,10 Volt für den anderen Pol bei einer Stromstärke von 195 Amp.; daraus folgt ein Übergangswiderstand für beide Pole nebst Zuleitungen von $1,85:195 = 0,0095 \Omega$.

Dynamo I.

$$\begin{aligned} r_a &= 0,0255 \Omega \\ r_n &= 56,75 \Omega \\ \text{Ankertemperatur} &= 44,5^\circ \text{C.} \\ \text{Magnettemperatur} &= 36^\circ \text{C.} \end{aligned}$$

Dynamo II.

$$\begin{aligned} r_a &= 0,0249 \Omega \\ r_n &= 52,65 \Omega \\ \text{Ankertemperatur} &= 45^\circ \text{C.} \\ \text{Magnettemperatur} &= 33^\circ \text{C.} \end{aligned}$$

Motor I.

$$\begin{aligned} r_a &= 0,1116 \Omega \\ r_n &= 94,7 \Omega \\ \text{Ankertemperatur} &= 49,5^\circ \text{C.} \\ \text{Magnettemperatur} &= 41,2^\circ \text{C.} \end{aligned}$$

Motor II.

$$\begin{aligned} r_a &= 0,109 \Omega \\ r_n &= 97,1 \Omega \\ \text{Ankertemperatur} &= 55^\circ \text{C.} \\ \text{Magnettemperatur} &= 44^\circ \text{C.} \end{aligned}$$

Aus diesen und den im kalten Zustande gemessenen Werten ergeben sich die Widerstandserhöhungen der Wicklungen, bzw. die Temperaturzunahmen (s. Formel 3, S. 92), unter Abzug der Raumtemperaturzunahme, wie folgt:

Nebenschlußdynamo:

Anker: 9,93 Proz. Widerstandserhöhung oder $24,8^\circ \text{C.}$ Temperaturzunahme über die Außentemperatur,
 Magnete: 14,3 Proz. Widerstandserhöhung oder $35,8^\circ \text{C.}$ Temperaturzunahme über die Außentemperatur.

Dynamo I.

Anker: 10,08 Proz. Widerstandserhöhung oder $25,2^\circ \text{C.}$ Temperaturzunahme über die Außentemperatur,
 Magnete: 7,92 Proz. Widerstandserhöhung oder $19,8^\circ \text{C.}$ Temperaturzunahme über die Außentemperatur.

Dynamo II.

Anker: 9,88 Proz. Widerstandserhöhung oder $24,7^\circ \text{C.}$ Temperaturzunahme über die Außentemperatur,
 Magnete: 9,58 Proz. Widerstandserhöhung oder $23,95^\circ \text{C.}$ Temperaturzunahme über die Außentemperatur.

Motor I.

Anker: 15,08 Proz. Widerstandserhöhung oder $37,7^\circ \text{C.}$ Temperaturzunahme über die Außentemperatur,
 Magnete: 10,48 Proz. Widerstandserhöhung oder $26,2^\circ \text{C.}$ Temperaturzunahme über die Außentemperatur.

Motor II.

Anker: 15,15 Proz. Widerstandserhöhung oder $37,9^\circ \text{C.}$ Temperaturzunahme über die Außentemperatur,

Magnete: 13,4 Proz. Widerstandserhöhung oder 33,5° C. Temperaturzunahme über die Außentemperatur.

Hierbei ist für 1° C. Temperaturerhöhung eine Widerstandserhöhung von 0,4 Proz. zugrunde gelegt.

An der Nebenschlußdynamo wurde den Spannungen 440, 500 und 550 Volt entsprechend je ein Leerlaufversuch behufs Ermittlung der Leerlauf- (Eisen- und Reibungs-) Verluste vorgenommen, siehe S. 91. Die Messungen ergaben die Werte:

J	<i>i_n</i>	<i>e</i>	<i>e_n</i>	<i>n</i>
3,4	4,3	471	252	119
3,7	5,4	531	316	121
3,75	5,26	582	310	131

Der Spannungsverlust im Anker nebst dem der Zuleitungen, von den Maschinenklemmen abgerechnet, beträgt bei Vollast ungefähr 31 Volt, wie sich aus den Werten für die normale Stromstärke und die Widerstände leicht ergibt. Die bei dem Versuche eingestellten Ankerspannungen *e* sind somit den bei Vollast auftretenden E. M. K.-Kräften gleich.

b) Bestimmung der Wirkungsgrade. Die Rechnung gestaltet sich für die Nebenschlußdynamo wie folgt:

I. Wirkungsgrad einschließlich der Verluste im Nebenschlußregulierwiderstände.

1. Bei 440 Volt Spannung:

Ankerverlust = $0,151 \cdot 201,5^2$	=	6 130 Watt
Bürstenübergangsverlust = $0,0095 \cdot 201,5^2$	=	386 "
Magnetverlust = $440 \cdot 4,5$	=	1 980 "
Leerlauf = $471 \cdot 3,4$	=	1 600 "
		10 096 Watt
Abzüglich Verlust für Reibung eines Lagers ¹⁾		
= $0,79 \cdot 736$	=	581 "
		9 515 Watt
Gesamtverluste	=	9 515 Watt
Nutzleistung = $440 \cdot 197$	=	86 700 "
		96 215 Watt

¹⁾ Beim Versuche wurde ein Lager mehr verwendet und war die Verteilung der Gewichte auf die Lager eine andere, als dem späteren Betriebe entsprach. Mit Rücksicht darauf berechnete sich unter Annahme eines Reibungskoeffizienten für die Lager von $\mu = 0,02$ die abzuziehende Lagerreibungsarbeit bei 120 Umdrehungen zu 0,79 PS, bei 132 Umdrehungen zu 0,89 PS.

Daraus der Wirkungsgrad:

$$\eta = \frac{86700}{96215} \cdot 100 = 90,1 \text{ Proz.}$$

2. Bei 500 Volt Spannung:

Ankerverlust = $0,151 \cdot 202,3^2$	=	6 180	Watt
Bürstenübergangsverlust = $0,0095 \cdot 202,3^2$	=	389	"
Magnetverlust = $500 \cdot 5,3$	=	2 650	"
Leerlauf = $531 \cdot 3,7$	=	1 965	"
		11 184	Watt
Abzüglich Verlust für Reibung eines Lagers ¹⁾)			
= $0,79 \cdot 736$	=	581	"
Gesamtverluste	=	10 603	Watt
Nutzleistung = $500 \cdot 197$	=	98 500	Watt
		109 103	Watt

Daraus der Wirkungsgrad:

$$\eta = \frac{98\,500}{109\,103} \cdot 100 = 90,28 \text{ Proz.}$$

3. Bei 550 Volt Spannung:

Ankerverlust = $0,151 \cdot 202,3^2$	=	6 180	Watt
Bürstenübergangsverlust = $0,0095 \cdot 202,3^2$	=	389	"
Magnetverlust = $550 \cdot 5,3$	=	2 915	"
Leerlauf = $582 \cdot 3,75$	=	2 182	"
		11 666	Watt
Abzüglich Verlust für Reibung eines Lagers ¹⁾)			
= $0,89 \cdot 736$	=	655	"
Gesamtverluste	=	11 011	"
Nutzleistung = $550 \cdot 197$	=	108 400	"
		119 411	Watt

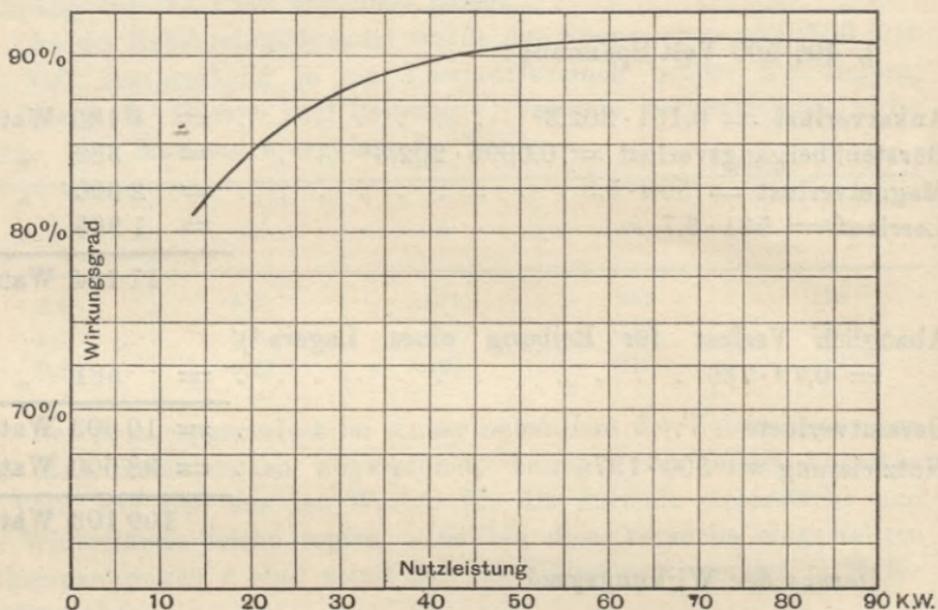
Daraus der Wirkungsgrad:

$$\eta = \frac{108\,400}{119\,411} \cdot 100 = 90,78 \text{ Proz.}$$

¹⁾ Siehe Anmerkung S. 110.

Die Kurve des Wirkungsgrades entsprechend verschiedenen Belastungen, ist bei einer Spannung von 500 Volt nachstehend auf-
gezeichnet.

Fig. 38.



II. Der Wirkungsgrad ohne die Verluste im Nebenschlufs- regulierwiderstände.

Bei Berechnung der Magnetverluste wurden nicht die Klemmen-
spannungen, sondern diejenigen zwischen den Enden der Wicklung
zugrunde gelegt. Es ergaben sich hiernach die Werte:

1. Bei 440 Volt Spannung $\eta = 90,8$ Proz.
2. " 500 " " $\eta = 91,07$ "
3. " 550 " " $\eta = 91,71$ "

Der Wirkungsgrad des Zusatzaggregates

bestimmt sich ohne weiteres aus der gesamten aufgewendeten und der
nützlich erzeugten Energie. Die Rechnung ist wie folgt.

Aufgewendete Energie:

Motor I = 219 · 88,5	= 19 381,5
Erregung für Motor I = 219 · 1,98	= 433,6
Motor II = 220 · 80	= 17 600
Erregung für Motor II = 220 · 2,22	= 488
Erregung für Dynamo I = 220 · 2,08	= 458
" " " II = 220 · 1,95	= 429
Gesamte aufgewendete Energie	<u>= 38 790,1</u>

Nutzleistung:

von Dynamo I	= 160 · 99,5	. . . . .	= 15 920
„ „	II = 167 · 100	. . . . .	= 16 700
			32 620

Daraus der Wirkungsgrad:

$$\eta = \frac{32\,620}{38\,790} \cdot 100 = 84,1 \text{ Proz.}$$

Dies entspricht einem Wirkungsgrade der einzelnen Maschinen (Motor oder Dynamo) von $\sqrt{84,1} = 91,7$ Proz.

3. Die Resultate der Prüfungen sind:

Die Nebenschlußdynamo ergab einen Wirkungsgrad, der etwa von halber bis zu normaler Belastung sich zwischen 90 und 91 Proz. bewegt. Für das Zusatzaggregat resultiert bei normaler Belastung ein Wirkungsgrad von 84,1 Proz.

Die Temperaturerhöhungen über die Anfangstemperatur betragen nach fünfstündigem Betriebe für die Nebenschlußdynamo:

im Anker	24,8° C.
in den Magneten	35,8° C.

Die Höchstwerte der Temperaturerhöhungen über die Anfangstemperatur beim Zusatzaggregate sind:

für den Anker des Motors II	37,9° C.
„ die Magnete des Motors II	33,5° C.;

die Minimalwerte sind:

für die Magnete der Dynamo I	19,8° C.
„ den Anker der Dynamo II	24,7° C.

Die vertraglich geforderten Garantien waren:

Für die Nebenschlußgeneratoren: 91 Proz. Nutzeffekt bei normaler Belastung.

Für die Maschinen des Zusatzaggregates: 72 Proz. Gesamtnutzeffekt.

Maximale Temperaturerhöhung sämtlicher Wickelungen bei Dauerbetrieb: 40° C.

Die Garantien sind somit nach obigen Prüfungsresultaten eingehalten, zum Teil sogar wesentlich überschritten.

Die analog durchgeführten Versuche an der zweiten Nebenschlußdynamo ergaben ebenso günstige Resultate.

Fünftes Beispiel.

Prüfung eines Gleichstromcompoundgenerators der Union-Elektrizitäts-Gesellschaft.

Die Maschine war für eine Leistung von 300 K.-W. bei 100 Touren bestimmt; die Spannung soll bei Vollast von 545 Amp. 550 Volt, bei Leerlauf 500 Volt betragen, Polzahl = 6.

Zunächst wurden die Widerstände der Anker- und Magnetwickelungen in kaltem Zustande, nach sechsständigem Dauerbetriebe bei Vollbelastung in warmem Zustande gemessen, sowie die Temperaturen der einzelnen Maschinenteile und die des Versuchsraumes ermittelt. — Die Messungen erstreckten sich weiterhin auf Ermittlung der Sättigungskurve und der Compoundierungskurven, und zwar bei den letzteren für konstante Spannung von 550 Volt. — Schließlich wurden die einzelnen Verluste bei verschiedenen Belastungen und konstanter Spannung von 550 Volt festgestellt und daraus die entsprechenden Wirkungsgrade — indes ohne Berücksichtigung der mechanischen Verluste — berechnet.

Temperaturen und Widerstände.

Zimmer	19° C.			
Ankerkern	51° C.,	über Zimmertemperatur	32° C.	} Messungen mittels des Thermometers.
Ankerwicklung	38° C.,	" "	19° C.	
Ankerflansch	26° C.,	" "	7° C.	
Kollektor	49° C.,	" "	30° C.	
Spulen	38,5° C.,	" "	19,5 C.	
Rahmen	23° C.,	" "	4° C.	
Ablaufpolspitze	36° C.,	" "	17° C.	
Anlaufpolspitze	31° C.,	" "	12° C.	

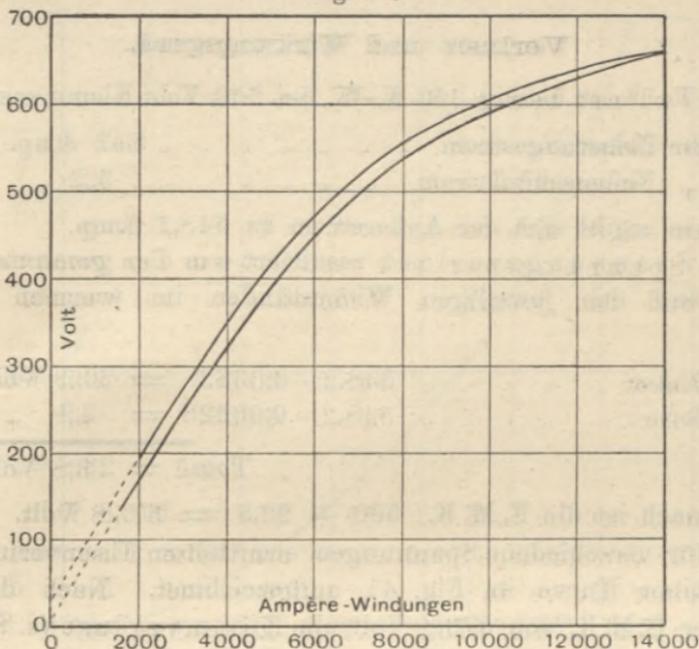
Widerstand	Kalt	Warm	Innere Erwärmung
Anker	0,0338 Ω	0,0382 Ω	32,5° C.
Serie	0,00476 Ω	0,00528 Ω	27,5° C.
Nebenschluß	103,2 Ω	118,5 Ω	36,2° C.

Die innere Erwärmung wurde mit einem Temperaturkoeffizienten von 0,004 aus der Widerstandserhöhung berechnet.

Sättigungskurve.

Bei 500 Volt sind im Mittel 6700 Ampèrewindungen notwendig, bei 550 Volt deren 8100. Der rückkehrende Ast der Kurve liegt infolge von Hysteresis höher (siehe Fig. 39).

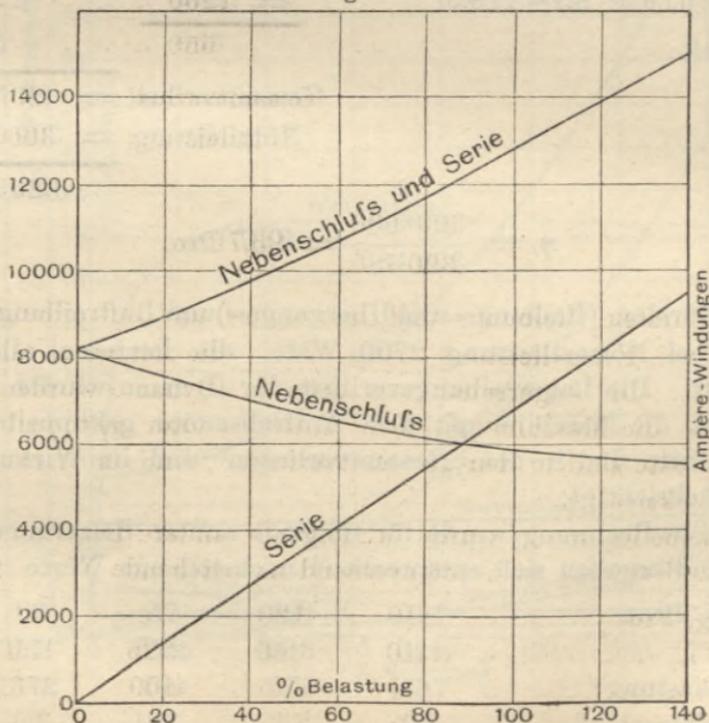
Fig. 39.



Compoundierungskurven.

Die Kurven (s. Fig. 40) wurden für konstante Spannung von 550 Volt aufgenommen. Bei 550 Volt und 545 Amp. (300 K.-W.) sind 12800 Ampèrewindungen im ganzen erforderlich.

Fig. 40.



Verluste und Wirkungsgrad.

Die Vollast betrug 300 K.-W. bei 550 Volt Klemmenspannung;

der Belastungsstrom 545 Amp.

„ Nebenschlußstrom 3,2 „

Daraus ergibt sich der Ankerstrom zu 548,2 Amp.

Der Spannungsverlust resultiert aus den genannten Stromstärken und den jeweiligen Widerständen im warmen Zustande wie folgt:

Anker $548,2 \cdot 0,0382 = 20,9$ Volt

Serie $548,2 \cdot 0,00528 = 2,9$ „

Total = 23,8 Volt

Demnach ist die E. M. K.: $550 + 23,8 = 573,8$ Volt.

Die für verschiedene Spannungen ermittelten Eisenverluste finden sich in einer Kurve in Fig. 41 aufgezeichnet. Nach dieser entspricht der E. M. K. von 573,8 Volt ein Eisenverlust (s. S. 91) von 5350 Watt.

Verluste durch Stromwärme:

Anker: $548,2^2 \cdot 0,0382 = 11\,500$ 11 500 Watt

Serie: $548,2^2 \cdot 0,00528 = 1580$ 1 580 „

Nebenschluß und Rheostat = $550 \cdot 3,2 = 1750$

Nebenschluß: $3,2^2 \cdot 118,5 = 1200$. . . 1 200 „

Rheostat: 550 . . . 550 „

Gesamtverlust = 20 180 Watt

Nutzleistung = 300 000 „

320 180 Watt

$$\eta = \frac{300\,000}{320\,180} = 93,7 \text{ Proz.}$$

Die Bürsten- (Reibungs- und Übergangs-) und Luftreibungsverluste betragen bei Normalleistung 2700 Watt, die letzteren allein etwa 1000 Watt. Die Lagerreibungsverluste der Dynamo wurden nicht ermittelt, da die Maschine mit dem Antriebsmotor gekuppelt war. — Diese Verluste sind in den „Gesamtverlusten“ und im Wirkungsgrade nicht berücksichtigt.

Dieselbe Rechnung wurde für folgende andere Belastungen durchgeführt und ergaben sich entsprechend nachstehende Werte für η :

Belastung, Proz.	140	120	75	50	25
K.-W.	420	360	225	150	75
Ampèrebelastung	764	655	409	273	136,4
Ampèrenebenschlus . . .	3,0	3,1	3,4	3,6	4,0

Fig. 41.

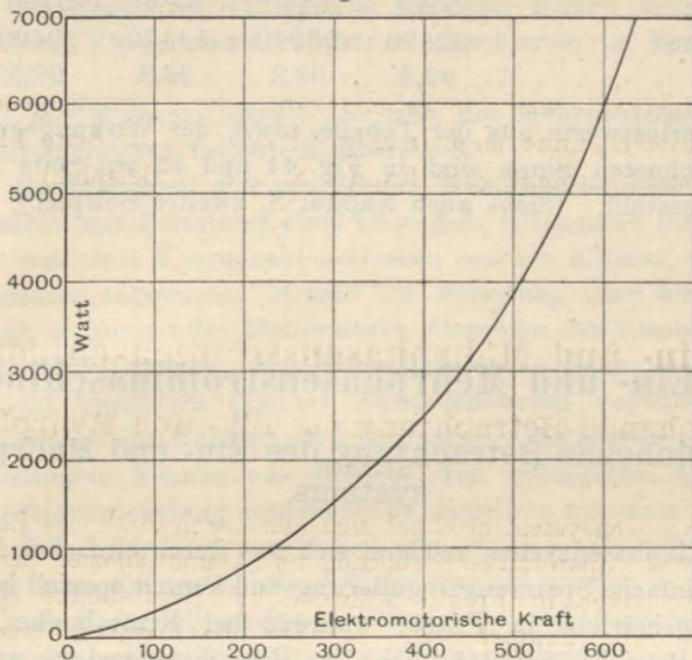
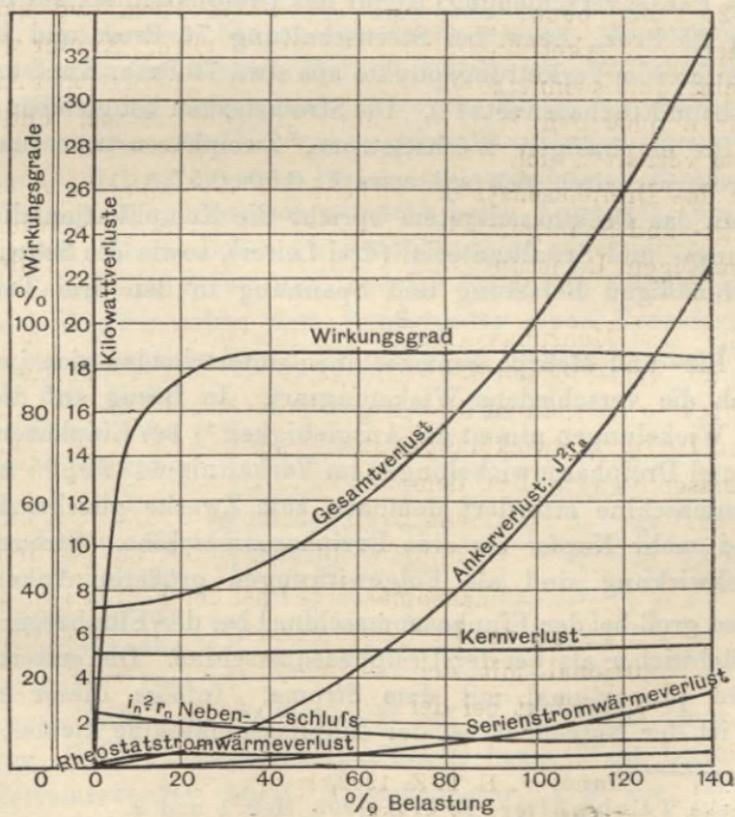


Fig. 42.



Ampèreanker	767	658,1	412,4	276,6	140,4
Kernverlust	5520	5450	5200	5100	4950
Gesamtverlust	32670	25940	14470	10400	8000
η in Proz.	92,8	93,3	93,8	93,5	90,4

Die Verlustwerte aus der Tabelle, sowie der Wirkungsgrad η im oben bezeichneten Sinne sind in Fig. 41 und 42 auf Seite 117 graphisch dargestellt. (Siehe auch Kapitel N, zweites Beispiel.)

H. Ein- und Mehrphasenstrommaschinen.

1. Vergleichende Betrachtung des Ein- und Mehrphasensystems.

Das Einphasensystem zeichnet sich aus durch einfaches Leitungsnetz und einfache Spannungsregulierung und kommt speziell bei reinem Beleuchtungsbetriebe in Frage, während bei Kraftabgabe oder gemischtem Betriebe hauptsächlich das Dreiphasensystem angewandt wird. Unter gleichen Verhältnissen (Leistung, Verlust, Gebrauchsspannung, Phasenverschiebung) ist für das Dreiphasennetz bei Dreieckschaltung 25 Proz., bzw. bei Sternschaltung 75 Proz. und bei neutralem Leiter vom Verkettungspunkte aus etwa 70 Proz. Kupfer weniger nötig als beim Einphasennetze¹⁾. Die Stromstärken bei gleicher Arbeitsleistung für einphasigen Wechselstrom, Zweiphasenstrom und Dreiphasenstrom verhalten sich wie etwa 1:0,50:0,57.

Gegen das Dreiphasensystem spricht die Komplikation durch das Mehrleitungs- und Schaltmaterial (drei Leiter), sowie die Schwierigkeit der gleichmäßigen Belastung und Spannung in den drei Teilen des Netzes.

Die Ein- und Mehrphasenmaschinen unterscheiden sich im Wesen nur durch die verschiedene Wickelungsart. In Bezug auf die mehrphasigen Wickelungen nimmt die Ausgiebigkeit²⁾ bei Einphasen-, Zweiphasen- und Dreiphasenwickelungen im Verhältnis 64:90:95 zu. Eine Einphasenmaschine erfordert demnach zum Zwecke gleicher Leistung bedeutend mehr Kupfer als eine Dreiphasenmaschine. Streuung und Ankerrückwirkung sind als Folgewirkungen größeren Ankerstromes ($\sqrt{3}$ mal so groß bei der Einphasenmaschine) bei der Einphasenmaschine viel beträchtlicher als bei der Dreiphasenmaschine. Die erstere wächst annähernd proportional mit dem Strome. Infolge dieser größeren Verluste ist der Nutzeffekt bei der Einphasenmaschine kleiner.

¹⁾ Siehe Teichmüller, E. T. Z. 1902, Heft 1 und 2.

²⁾ Siehe H. Görges, E. T. Z. 1892.

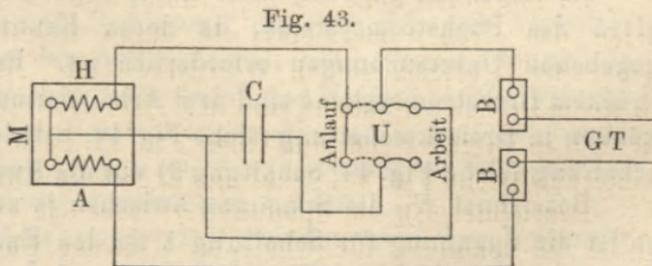
Die magnetische Beanspruchung bzw. die erforderlichen Eisenmengen der Maschinen für gleiche Leistung stehen bei Einphasenwechselstrom, Zweiphasenwechselstrom, Drehstrom im Verhältnis von 1:0,70:0,66.

Was die Motoren betrifft, so sind die Mehrphasenmotoren den Wechselstrommotoren bedeutend überlegen.

Ein Hauptnachteil der synchronen Wechselstrommotoren ist der, daß dieselben mit Belastung ohne besondere Hilfsmittel nicht angehen und nur mit einer Tourenzahl betrieben werden können, welche dem Synchronismus entspricht. Sobald die Belastung über einen Höchstwert steigt, so kommt der Motor durch Abnahme der Tourenzahl außer Tritt und bleibt stehen. Um diese Motoren in Gang zu setzen, ist, soweit nicht besondere (kleine) Antriebsmotoren verwandt werden, eine Hilfsphase oder Kunstphase erforderlich. Die hierzu notwendigen Hilfswicklungen können aus Drähten von geringerem Querschnitte als die Betriebswicklung bestehen, da dieselben nur zum Anlaufe im Betriebe sind. Die Phasenverschiebung zwischen Haupt- und Hilfswicklung kann auf verschiedene Weise erreicht werden — z. B. Hauptwicklung als Trommelwicklung, Hilfswicklung als Grammwicklung, oder Kapazität in Parallelschaltung zur Hauptwicklung. — Hauptsache bei dem ersteren Verfahren ist, daß die verschiedenen Wicklungen verschiedene Selbstinduktion besitzen.

Bei asynchronen Einphasenmotoren werden, wenigstens bei den größeren Typen (bei kleinen Motoren genügt ein Andrehen von Hand, um die Bewegung einzuleiten), dieselben Mittel wie bei synchronen Einphasenmotoren zur Erzeugung einer Kunstphase beim Anlassen angewandt. Brown benutzt bei seinem asynchronen Einphasenmotor einen Flüssigkeitskondensator von sehr hoher Kapazität, um den zum Ingangsetzen erforderlichen Phasenunterschied zu erreichen. Da zum Anziehen ein hoher Strom und niedrige Spannung erforderlich ist, so verwendet Brown neben dem Kondensator einen Transformator, so daß nur ein schwacher Strom bei normaler Spannung eingeführt wird, während der Motor

starken Strom von niedriger Spannung aufnimmt. Nebenstehende Figur (43) zeigt die Schaltung des Motors (ohne Transformation). Die eingetragenen Be-



zeichnungen bedeuten: *M* Motor, *H* und *A* die Hilfs- bzw. Arbeitswicklung, *C* die Flüssigkeitskapazität, *G* bzw. *T* die Leitungen zum Wechselstromerzeuger bzw. Transformator, *BB* die Sicherungen, *U* Umschalter.

In der mittleren Lage des Umschalters ist der Motor ausgeschaltet. Die Arbeitswicklung liegt mit der Hilfswickelung und der Kapazität, die untereinander parallel geschaltet sind, in Serie.

Der Verlust durch Stromwärme ist beim asynchronen Einphasenmotor etwa doppelt so groß wie beim asynchronen Drehstrommotor. Im Belastungszustande sind die Ankerströme beim Dreiphasenstrommotor annähernd dem Quadrate der Schlüpfung, d. h. des relativen Tourenverlustes, proportional, und dieser letztere ist nahezu ein proportionales Maß für die Arbeitsleistung.

Bei Prüfung ergibt sich, daß bei gleichem Gewichte eines Einphasen- und eines asynchronen Mehrphasenmotors der erstere etwa 30 Proz. weniger zu leisten im stande und sein Nutzeffekt niedriger ist, wie der des letzteren.

Aus vorstehendem erhellt, daß bei Dreiphasenmaschinen gegenüber Einphasenmaschinen die Ausnutzung für gleiche Leistung eine bessere, die Verluste geringere, die Nutzeffekte höhere, keine Hilfsmittel für das Ingangsetzen der Motoren (selbst mit Belastung) und geringerer Kostenaufwand erforderlich sind. Ferner ist beim Dreiphasensystem durch Rückwirkung der Motoren der Spannungsabfall geringer, die Leerlaufstromstärke niedriger und der Bau (da event. Schleifringe und Bürsten entbehrlich sind) einfacher und hierdurch der Betrieb sicherer.

Hinsichtlich der anderen wertvollen technischen Vergleiche über Mehrphasenmaschinen verweise ich auf das Kappsche und Niethammersche Werk¹⁾, da weitere Erläuterungen über diesen Punkt nicht in den Rahmen dieses Buches gehören.

2. Das Drehstromsystem (Dreiecksschaltung, Sternschaltung).

Im folgenden gebe ich noch einige Eigenschaften und Schaltungsarten des Drehstromsystems, da deren Kenntnis für die späterhin gegebenen Untersuchungen erforderlich ist. Bei der Stromentnahme in einem Drehstromsysteme sind drei Arbeitsleitungen vorhanden. Diese können in Dreiecksschaltung (siehe Fig. 44, Schaltung 1) oder in Sternschaltung (siehe Fig. 44, Schaltung 2) auf die Nutzwiderstände arbeiten.

Bezeichnet E_H die Spannung zwischen je zwei Leitungen (a, b, c), so ist die Spannung für Schaltung 1 an den Enden 1, 2, 3 gleich der Spannung zwischen den Hauptleitungen a, b, c :

$$(1) \quad \dots \dots \dots E_H = E_n.$$

¹⁾ Gisbert Kapp, Elektrische Kraftübertragung. Niethammer, Wechselstromerzeuger.

Der Strom in der Nutzleitung J_n ist aber kleiner als der Strom in der Hauptleitung J_H und zwar ist

$$(2) \quad J_H = 2 \cdot \cos 30^\circ \cdot J_n = \sqrt{3} \cdot J_n = 1,732 \cdot J_n.$$

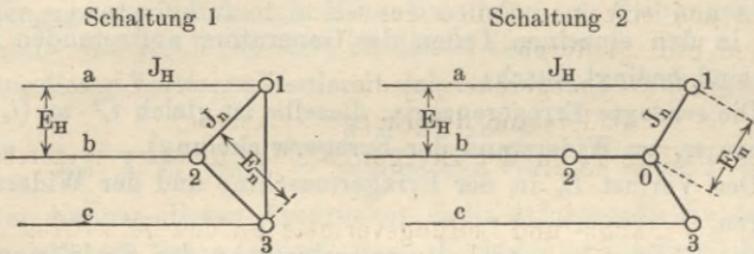
Für Schaltung 2 wird

$$(3) \quad J_H = J_n,$$

während die Spannung E_n von 1 nach 0, 2 nach 0, 3 nach 0 kleiner ist als die Spannung E_H zwischen a , b , c , und zwar besteht die Beziehung

$$(4) \quad E_H = 2 \cdot \cos 30^\circ \cdot E_n = \sqrt{3} \cdot E_n = 1,732 E_n.$$

Fig. 44.



Die Energieleistung des Drehstromsystemes ist bei gleichbelasteten Zweigen in Watt:

$$(5a) \quad W_\Delta = 3 \cdot J_n \cdot E_H \cdot \cos \varphi = 3 \cdot J_n \cdot E_n \cdot \cos \varphi \quad (\text{für Schaltung 1}),$$

$$(5b) \quad W_\lambda = 3 \cdot J_H \cdot E_n \cdot \cos \varphi = 3 \cdot J_n \cdot E_n \cdot \cos \varphi \quad (\text{für Schaltung 2}),$$

wobei $\cos \varphi$ der sogenannte Leistungsfaktor, φ der Phasenverschiebung zwischen Nutzstrom J_n und Nutzspannung E_n bedeutet; unter Berücksichtigung der Beziehungen zwischen J_H und J_n bzw. E_H und E_n erhält man:

$$(6) \quad W_{(\Delta \text{ oder } \lambda)} = 1,732 \cdot J_H \cdot E_H \cdot \cos \varphi.$$

Der Leistungsfaktor $\cos \varphi$ schwankt, je nachdem Licht- oder Motorenbetrieb vorherrschend ist, zwischen 1 und 0,70.

Es empfiehlt sich, um Mißverständnissen vorzubeugen, beim Mehrphasensystem allgemein mit „Spannung“ die oben definierte verkettete Spannung E_H (zwischen den Außenleitern), mit „Sternspannung“ dagegen die Spannung zwischen Außenleiter und Nullpunkt (Verkettungspunkt) zu bezeichnen. Diese Bezeichnungen seien auch in nachstehenden Ausführungen eingehalten, sofern nicht aus besonderen Gründen ausdrücklich andere Benennungen gebraucht werden.

Bezeichnet V den Spannungsverlust zwischen zwei Hauptleitungen, R den Widerstand einer Leitung, p_v bzw. p_a den prozentualen Spannungs- bzw. Arbeitsverlust, so bestehen folgende Beziehungen:

$$(7) \quad V = \sqrt{3} \cdot R \cdot J_H \cdot \cos \varphi$$

und

$$(8) \quad p_v = p_a \cdot \cos^2 \varphi.$$

Der prozentuale Spannungsverlust ist also gewöhnlich kleiner als der prozentuale Arbeitsverlust; hingegen ist für $\cos \varphi = 1$

$$p_v = p_a.$$

Für $\cos \varphi = 0,7$ wird der Spannungsverlust

$$p_v = 0,49 \cdot p_a,$$

also etwa die Hälfte des Arbeitsverlustes.

3. Effektverluste und Wirkungsgrad eines Mehrphasengenerators.

Die in den einzelnen Teilen des Generators auftretenden Effektverluste sind bedingt durch:

1. Die erzeugte Erregerenergie; dieselbe ist gleich $i_e^2 \cdot w_e$ ($i_e =$ Erregerstrom, $w_e =$ Widerstand der Erregerwicklung).

2. Den Verlust E_e in der Erregermaschine und der Widerstandsregulatoren.

3. Die Übergangs- und Leitungsverluste an den Schleifringen des rotierenden Ankers $E_{\ddot{u}}$.

4. Den Ohmschen Verlust $p \cdot J^2 \cdot w_a$ im Anker ($J =$ effektiver Ankerstrom pro Phase, $w_a =$ Ankerwiderstand pro Phase, $p =$ Phasenzahl).

5. Wirbelstromverluste E_w in den Ankerleitern. (Durch Unterteilung der Ankerleiter wird diese Größe reduziert).

6. Hysteresis und Wirbelstromverluste¹⁾ E_{H+W} im Eisen. Die Steinmetzschen Formeln haben hier keine genaue Giltigkeit. Der erstere Verlust ist experimentell zu bestimmen, da derselbe mit der Induktion, der Periodenzahl und der Eisensorte sehr variiert. Der Wirbelstromverlust kann annähernd nach der Formel von Steinmetz bestimmt werden. Die Größe der Induktion ist mit Rücksicht auf die zulässige Temperaturerhöhung und den Wirkungsgrad zu wählen. Je besser die Abkühlung ist und je kleiner der Wirkungsgrad sein darf, desto größer kann die Induktion gewählt werden.

7. Lagerreibungsarbeit R_{la} . Dieser Verlust hängt lediglich von der Beschaffenheit, der Temperatur und dem verwendeten Öle des Lagers ab. Die Dettmarsche Formel liefert bei einem spezifischen Lagerdrucke bis etwa 35 kg gute Resultate. Sie lautet:

$$(9) \quad \text{Lagerreibungsarbeit in Watt } R_{la} = 49,05 \cdot r \cdot d \cdot l \cdot \sqrt{v^3}$$

(d Zapfendurchmesser in Zentimeter, l Zapfenlänge in Zentimeter, v Umfangsgeschwindigkeit des Zapfens in Meter-Sekunden, $r =$ etwa 0,015 [Reibungskoeffizient]). Über die Lagerreibungsarbeit als Funktion

¹⁾ Siehe Fußnote Seite 120.

der umgebenden Temperatur finden sich wertvolle Angaben im Niet-hammerschen Werke „Wechselstromerzeuger“.

8. Die Luftreibungsarbeit R_{lu} wächst stark mit zunehmender Umlaufgeschwindigkeit, kann also bei hoher Tourenzahl bedeutend werden. Im übrigen kann man sie nur schätzungsweise bestimmen.

9. Die Bürstenreibung R_b auf den Schleifringen bzw. dem Kommutator der Erregermaschine. Dieser Verlust läßt sich angenähert in Watt bestimmen durch die Relation:

$$(10) \quad R_b = 9,81 \cdot q \cdot d_r \cdot u \cdot k_r$$

(q Bürstenquerschnitt in Quadratcentimeter, d_r spezifischer Druck der Bürsten in Kilogramm-Quadratcentimeter, im Mittel etwa 0,130; u Umfangsgeschwindigkeit in Meter-Sekunden, k_r Reibungskoeffizient, für Metall- und Kohlenbürsten, im Mittel etwa 0,3.)

Aus diesen Verlusten bestimmt sich der Gesamtwirkungsgrad durch:

$$(11) \quad \eta = \frac{p \cdot J \cdot E_k \cdot \cos \varphi}{p \cdot J \cdot E_k \cdot \cos \varphi + \text{Summe der Verluste unter 1 bis 9}}$$

Der Nenner dieses Ausdruckes stellt naturgemäß die dem Generator zugeführte Gesamtenergie dar. E_k bedeutet hierin die Klemmenspannung (in dem Sinne, daß dieselbe z. B. bei verkettetem Dreiphasenstrom in Sternschaltung zwischen Außenleiter und Verkettungspunkt, d. h. als Sternspannung gemessen wird).

Bezüglich Erwärmung und Abkühlung einer Wechselstrommaschine verweise ich auf das für Gleichstrommaschinen Gesagte (siehe S. 92 und 93).

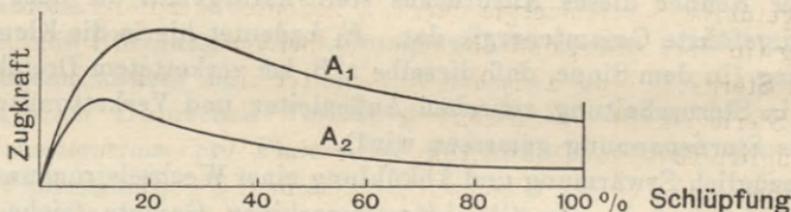
4. Theoretische Bemerkungen über asynchrone Drehstrommotoren.

Um das Verständnis für die späteren Versuche zu klären, seien hier noch einige Erläuterungen und Formeln für die asynchronen Drehstrommotoren gegeben. Für den Drehstrommotor ist ein Hauptmoment eine große Anzugskraft mit geringem Watt- bzw. Stromverbrauche. Mit zunehmender Erregerstrom- (Statorstrom-)Stärke wird die Streuung im Motor vermehrt und infolge der zunehmenden Streuung — Selbstinduktion im Stator und im Rotor — die Zugkraft vermindert. Der große Einfluß ist aus folgenden von Kapp¹⁾ aufgezeichneten Kurven (Fig. 45 auf folgender Seite) zu ersehen. Kurve A_1 stellt die Zugkraft eines Motors, bei dem die Streuungsinduktion in der Statorwicklung bei voller Belastung 15 Proz. der zugeführten Spannung beträgt, in Abhängigkeit von der Schlüpfung dar. Die Kurve A_2 gilt sodann für einen Motor, bei dem der Wert der Streuungsinduktion der doppelte ist.

¹⁾ Gisbert Kapp, Elektrische Kraftübertragung.

Nach Kapp bestimmt sich die Selbstinduktion der Primärwicklung folgendermaßen: Die Ankerachse wird festgekeilt und die primäre Spannung so niedrig gehalten, daß die Stromstärke des Stators nicht höher ansteigt als bei voller Belastung des Motors. Die relative Umdrehungszahl des Rotors gegen das primäre Feld ist sodann gleich der Umdrehungszahl dieses letzteren; bei der hohen relativen Geschwindigkeit, mit der sich in diesem Falle die Leiter des Rotors durch das Feld bewegen, ist nur ein schwaches Feld zur Erzeugung kräftiger Ströme im Rotor erforderlich. Die erregende Kraft für die resultierende Induktion B und die elektromotorische Gegenkraft, welche vom resultierenden Felde B herrührt, sind somit annähernd gleich Null. Ferner ist der Spannungsverlust durch den primären Leitungswiderstand gering. Man kann daher unter Vernachlässigung dieses Spannungsverlustes sowohl wie der elektromotorischen Gegenkraft annehmen, daß die zugeführte Spannung nur zur Überwindung der Selbstinduktion für die normale Stromstärke i_1 dient; der gemessene Spannungswert

Fig. 45.



stellt daher den durch die Streuung bewirkten Spannungsverlust dar. Das Verhältnis der nutzbaren zu der in der Primärwicklung erzeugten Induktion heißt der Streuungsfaktor. Je näher diese Größe dem Werte 1 kommt, desto besser ist der Motor. Dieser Faktor ist aus dem Verhältnisse der Magnetwindungen und Ankerwindungen und der dazu gehörigen, durch Spannungsmesser bestimmten induzierten elektromotorischen Kräfte zu ermitteln. Wird z. B. durch die Statorwicklung von 90 Windungen ein Strom von gegebener Wechselzahl und Spannung geschickt und beträgt die mit Spannungsmesser bestimmte elektromotorische Kraft 102 Volt und wird im Anker mit 60 Windungen bei einer bestimmten Geschwindigkeit eine effektive gemessene elektromotorische Kraft von 60 Volt erzeugt, so ist der Streuungsfaktor

$$\frac{90 \cdot 60}{60 \cdot 102} = \text{rund } 0,88;$$

es gelangen somit von 1000 im Stator erzeugten Kraftlinien 880 in die Rotorwicklung, die anderen schließen sich im Luftraume zwischen Feld- und Ankerwicklung und gehen also verloren.

Die zugeführte Energie eines Drehstrommotors ist

$$(12) \quad \dots \dots \dots W = 3 \cdot e_1 \cdot i_1 \cdot \cos \varphi,$$

und der Leistungsfaktor des Motors bei voller Belastung ist

$$(13) \quad \dots \dots \dots \cos \varphi = \frac{W}{3 \cdot e_1 \cdot i_1},$$

worin e_1 und i_1 die Effektivwerte von Spannung und Stromstärke, gemessen in den drei Statorwickelungen, und W die mit dem Wattmeter gemessene Energie bedeuten.

Bezeichnet ω_{st} bezw. ω_r die Winkelgeschwindigkeit des Drehfeldes im Stator bezw. des Rotors, so besteht die Relation:

$$(14) \quad \dots \quad \frac{\omega_{st} - \omega_r}{\omega_{st}} = s = \text{Schlüpfung des Motors.}$$

Nennen wir das Drehmoment D , den Widerstand der Statorwicklung pro Phase w_1 , so ist der Wirkungsgrad η des Drehstrommotors rechnerisch gegeben durch

$$(15 a) \quad \dots \dots \dots \eta = \frac{D \cdot \omega_r}{D \cdot \omega_{st} + \frac{3 \cdot i_1^2 \cdot w_1}{9,81}},$$

wobei $D \cdot \omega_r = W_n$ die vom Motor nutzbar abgegebene Energie, welche durch Bremsung ermittelt werden kann, $D \cdot \omega_{st}$ die vom Rotor aufgenommene Energie und $3 \cdot i_1^2 \cdot w_1$ die in der Primärwicklung in Wärme umgesetzte Energie bedeuten. Bei Vernachlässigung dieser letzteren Größe wird

$$(15 b) \quad \dots \dots \dots \eta = \frac{\omega_r}{\omega_{st}} = 1 - s,$$

d. h. der Wirkungsgrad des Motors ist eine Funktion der Schlüpfung und zwar fällt derselbe mit Zunahme der Schlüpfung.

Naturgemäß drückt sich der Wirkungsgrad auch durch folgende Relation aus:

$$(16) \quad \dots \dots \dots \eta = \frac{D \cdot \omega_r}{3 \cdot e_1 \cdot i_1 \cdot \cos \varphi}.$$

5. Experimentelle Untersuchungen an Mehrphasengeneratoren.

Ich gebe im folgenden die wichtigsten Faktoren der Prüfungen und den Gang der Untersuchungen bei Ein- und Mehrphasenmaschinen an.

Ein für die Praxis an Wechsel- und Drehstromgeneratoren wichtigster Faktor ist die Feststellung der Leerlaufcharakteristik E und der Kurzschlußcharakteristik J_0 und des hieraus zu ermittelnden Spannungsabfalles.

Bei geöffnetem äußeren Stromkreise, d. h. unbelasteter Maschine, fällt die mit dem Voltmeter gemessene Klemmenspannung E_k mit der

in den Armaturspulen induzierten elektromotorischen Kraft E zusammen. Die E. M. K. ist jedoch proportional $N \cdot w \cdot \frac{n}{60}$, woselbst N die wirksame Zahl der Kraftlinien, w die Windungszahl der Armatur und n die Tourenzahl pro Minute bedeuten. Da der Ankerkoeffizient c_a sowie die Tourenzahl n Konstante sind, so stellt die Kurve der induzierten Spannung E , die sich ausdrückt als

$$(17) \quad \dots \quad E = N \cdot w \cdot c_a \cdot \frac{n}{60} = M \cdot c_a \cdot \frac{n}{60},$$

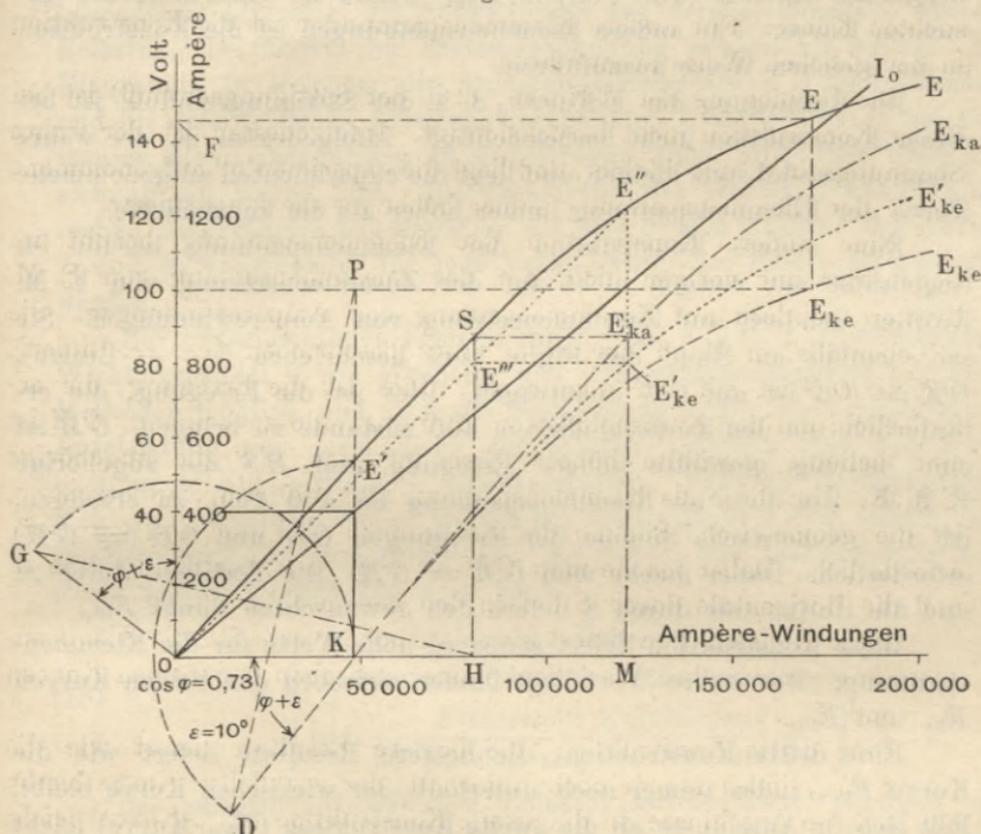
angenähert die Magnetisierungskurve dar. Infolge der Streuung und der auftretenden Wirbelströme, entsprechend einem hohen Werte des Erregerstromes i_e , können die Werte für E etwas unterhalb der Magnetisierungskurve liegen; meistens sind diese Abweichungen nur sehr gering, und E wächst meistens annähernd proportional i_e .

Falls die Tourenzahl nicht ganz konstant bleibt, ist eine entsprechende Korrektur des abgelesenen Wertes für E einzuführen, gegeben durch das Verhältnis der $\frac{\text{normalen}}{\text{abgelesenen}}$ Tourenzahl mal dem beobachteten Wert für E . — Ist die Kurve E als Funktion von i_e bei normalem konstanten n experimentell bestimmt, so ist die nächste Aufgabe, den Kurzschlußstrom J_0 ebenfalls als Funktion der Erregung i_e (bei der nämlichen konstanten Tourenzahl n) darzustellen. Zunächst schließe man den Generator durch ein geeignetes Ampèremeter direkt an den Maschinenklemmen kurz, wobei die Erregung ausgeschaltet ist, und reguliere auf die normale Tourenzahl n ; dann gebe man vorsichtig kleine Erregung und beobachte die entsprechenden Werte von J_0 am Ampèremeter. Man kann J_0 bis etwa 300 Proz. des normalen Belastungsstromes anwachsen lassen, jedoch darf hierbei die Versuchsdauer nur kurz sein. Hat man auf diese Weise die Kurven $E = f(i_e)$ und $J_0 = F(i_e)$ gewonnen, so läßt sich auf einfachem, konstruktivem Wege die entsprechende Klemmenspannungskurve E_k für eine beliebige Belastungsstromstärke J sowie äußere Phasenverschiebung als Funktion der Erregung i_e ableiten. Aus der Differenz von E und E_k findet man den weiterhin für die Praxis sehr wichtigen Wert für den Spannungsabfall unter verschiedenen Belastungen. Durch direkte Vergleichung der so gefundenen Werte von E_k mit den experimentell gemessenen Werten wird man eine Abweichung finden. Die Konstruktion des Spannungsabfalles bzw. der Größe der Klemmenspannung für einen gegebenen Belastungsstrom und gegebenes $\cos \varphi$ möge hier folgen (siehe Fig. 46).

Der Konstruktion ist eine 105 K.-W.-Drehstrommaschine zu grunde gelegt, deren E -Kurve und J_0 -Kurve bekannt sind. Die äußere Phasenverschiebung (zwischen Ankerstrom und Klemmenspannung) $\cos \varphi$ ist 0,73, die normale Ankerstromstärke 400 Amp., die normale Klemmen-

spannung 120 Volt ($3 \cdot 400 \cdot 120 \cdot 0,73 = 105$ K.-W.). Die 400 Amp. trage man im Maßstab der Kurve J_0 auf der Ordinatenachse an und ziehe durch den Punkt 400 die Horizontale bis zur Kurzschlußcharakteristik. Die Senkrechte vom Schnittpunkt mit dieser Kurve schneidet die Abszissenachse in K . Auf der Abszissenachse sind in der Figur nicht Stromstärken, sondern die Ampèrewindungen der Erregung aufgetragen, was aber höchstens einen Unterschied im Maßstab bedeutet. OK sind nun die Ampèrewindungen, die erforderlich sind, um den Kurzschlußstrom 400 Amp. durch die Armatur zu treiben. Diesen

Fig. 46.



Ampèrewindungen entspricht eine erzeugte Spannung (E. M. K.) von der Größe KE' ; dies ist der innere Spannungsabfall pro Phase¹⁾, der dem Strome 400 Amp. entspricht. Soll nun eine Klemmenspannung von z. B. 100 Volt erzeugt werden und zwar bei demselben Strome, so ist diese mit obigem Spannungsabfalle zusammzusetzen, um die erzeugte E. M. K. zu erhalten. Die Zusammensetzung ist geometrisch zu verstehen, da beide Größen nicht die gleiche Phase haben. Die

¹⁾ Sämtliche Spannungswerte in der Figur sind pro Phase, d. h. pro Wicklung zu verstehen; im vorliegenden Falle (Sternschaltung) zwischen Klemme und Nullpunkt der Schaltung; in demselben Sinne ist der Ausdruck Klemmenspannung gebraucht.

Verschiebung beträgt $90 + \varphi + \varepsilon$; φ ist der Verschiebungswinkel zwischen Klemmenspannung und Ankerstrom, ε ein Winkel, der von konstruktiven Verhältnissen abhängt, und den man meist zu 10° annimmt. KD trägt man unter $\varphi + \varepsilon$ gegen die Abszisse geneigt an und schlägt um K einen Kreisbogen mit KE' , wodurch man D erhält. Weiter wird $KP = 100$ Volt gemacht und die Resultante $DP = OF$ auf der Ordinatenachse angetragen. Der Schnittpunkt der Horizontalen durch F mit der Kurve E gibt die zu der E. M. K. E gehörige Erregung (Größe FE). Die Vertikale durch diesen Punkt schneidet die Wagrechte durch P (100 Volt) in E_{ke} . Dieses ist ein Punkt der gesuchten Kurve. Für andere Klemmenspannungen ist die Konstruktion in der gleichen Weise auszuführen.

Die Umbiegung der E -Kurve, d. h. der Sättigungseinfluß, ist bei dieser Konstruktion nicht berücksichtigt. Infolgedessen ist der wahre Spannungsabfall stets kleiner, und liegt die experimentell aufgenommene Kurve der Klemmenspannung immer höher als die konstruierte.

Eine andere Konstruktion der Klemmenspannung beruht im Gegensatz zur vorigen nicht auf der Zusammensetzung von E. M. Kräften, sondern auf Zusammensetzung von Ampèrewindungen. Sie sei ebenfalls an Hand der Figur kurz beschrieben (— · — · Linien). $OK = OG$ ist auf OG anzutragen. Dies ist die Erregung, die erforderlich ist, um den Kurzschlußstrom 400 zustande zu bringen. OH ist eine beliebig gewählte höhere Erregung und HS die zugehörige E. M. K. Um diese als Klemmenspannung bei 400 Amp. zu erzeugen, ist die geometrische Summe der Erregungen OG und OH ($= GH$) erforderlich. Daher mache man $OM = GH$. Die Vertikale durch M und die Horizontale durch S liefern den gewünschten Punkt E_{ka} .

Diese Konstruktion liefert etwas zu hohe Werte für die Klemmenspannung. Der wahre Wert liegt immer zwischen den beiden Kurven E_{ke} und E_{ka} .

Eine dritte Konstruktion, die bessere Resultate liefert wie die Kurve E_{ke} , indes immer noch unterhalb der wirklichen Kurve bleibt, läßt sich im Anschlusse an die zweite Konstruktion (E_{ka} -Kurve) leicht ausführen. Die Konstruktion ist aus den punktierten Linien zu ersehen. Man verlängere die Vertikale ME_{ka} bis E'' , ziehe $E''O$. Vom Schnittpunkte E''' von OE'' mit SH ziehe man eine Horizontale bis zum Schnitte mit der Linie ME'' . Die Konstruktion ergibt den Punkt E_{ke} ; für mehrere Punkte ausgeführt, liefert die Konstruktion die Kurve E'_{ke} . Für die Praxis ist ferner von Wichtigkeit die äußere Charakteristik, d. h. die Klemmenspannung E_k als Funktion der Belastung, sowohl bei induktiver wie bei induktionsfreier Belastung.

In Verträgen mit den unternehmenden Firmen wird meistens die Einhaltung einer bestimmten Größe des Spannungsabfalles bei konstanter Erregung und Tourenzahl sowohl bei induktionsfreier wie bei induktiver Belastung zwischen unbelastetem und vollbelastetem Gene-

rator verlangt. Dieser garantierte Wert kann leicht durch die äußere Charakteristik für jede Belastung ermittelt werden. Bei induktiver äußerer Belastung muß man Stromstärke-, Spannungs- und Energiemessungen vornehmen. Der Kosinus der Phasenverschiebung ergibt sich dann als Verhältniszahl von Watt: Volt \times Ampère. Mit der Größe der Phasenverschiebung nimmt naturgemäß die Ankerstromrückwirkung und Streuung und somit der Spannungsabfall zu. Diesem Faktor ist besonders bei Motorenbetrieb Beachtung zu schenken.

In Zentralstationen hat man die Aufgabe, die Klemmenspannung bei veränderlicher Belastung konstant zu halten. Es ist somit von besonderem Interesse, die Abhängigkeit des Erregerstromes i_e von der Belastung bei konstanter Klemmenspannung kennen zu lernen. Ein Diagramm, in welchem die Belastungsstromstärken J als Abszissen und die erforderlichen Erregungsintensitäten i_e als Ordinaten bei konstanter Klemmenspannung E_k aufgetragen sind, gibt über diese Beziehung ein klares Bild. Die Steigerung des Wertes i_e kann an der soeben ausgeführten Konstruktion als horizontaler Abstand der Kurven E und E_k voneinander für jede Veränderung der Belastung gefunden werden.

Zur experimentellen Ermittlung des auf S. 122 u. 123 definierten Wirkungsgrades η von Wechsel- und Drehstromgeneratoren sind zwei Methoden möglich, und zwar die Bestimmung von η als Verhältnis der Nutzleistung zur mechanisch zugeführten Leistung und von Nutzleistung zu Nutzleistung + Effektverlusten. Falls die Erregerenergie nicht von derselben Welle, welche die mechanische Arbeit leistet, abgegeben wird, so muß dieser Teil der Arbeit zur mechanischen Leistung addiert werden und η ist dann

$$(18) \quad \dots \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{Elektrische Nutzleistung} \\ \text{mechanische Energie} + \text{Erregerenergie} \\ \left[\frac{\text{Elektrische Nutzleistung}}{\text{El. Nutzleistung} + \text{Verlustrarbeit}} \right] \end{array} \right.$$

Bei selbstinduktionsfreiem Belastungswiderstande genügen die Messungen von effektiver Spannung und Stromstärke. Tritt Selbstinduktion im äußeren Kreise auf, so ist noch ein Energiemesser erforderlich. Der Leistungsfaktor Kosinus φ findet sich, wie schon erwähnt, als Quotient $\frac{\text{Energiewert}}{\text{Spannung} \times \text{Strom}}$. (Über die Behandlung und Schaltung sowie Korrektur des Energiemessers siehe S. 81 und folgende). Die Erregerenergie bestimmt sich aus der Beziehung

$$i_e \cdot e_e = i_e^2 \cdot w_e,$$

wo e_e die Spannung, welcher die Erregerwicklung ausgesetzt ist, und w_e den Widerstand der Erregerwicklung bedeuten. Ist zu der Erregerwicklung noch ein Regulierwiderstand praktisch erforderlich, so ist

derselbe mit in den Wert von w_e einzurechnen. Die Messung der mechanisch zugeführten Energie wird bei kleinen Maschinen für jede Belastung meist mit Riemendynamometer (s. unter 5, S. 35 u. f.) erfolgen. Die übertragene Zugkraft und somit der Wert von η können auf diesem Wege nur mit einer Genauigkeit von etwa 1 bis 3 Proz. ermittelt werden.

Genauer kann η für jede Belastung festgelegt werden, wenn der Wechsel- oder Drehstromgenerator von einem mit ihm gekuppelten Gleichstrommotor angetrieben wird, für welcher letzteren die Nutzeffekte für verschiedene Belastung bekannt sind. Die Bestimmung geschieht durch Messung der elektrischen Gleichstrom- und sekundären Wechsel- oder Drehstromenergie und entsprechende Umrechnung mit den bekannten Werten der Gleichstrommotorwirkungsgradkurve. — Ist ein geeigneter Gleichstrommotor nicht vorhanden, so ermittelt man zunächst aus dem Mittelwerte des Indikatordiagrammes und den weiteren Konstanten der gekuppelten Antriebsmaschine das PS_i bei unerregtem Leerlaufe des Generators. In diesem so gefundenen Werte ist selbstredend der Leerlaufseffekt der Dampfmaschine mit enthalten, und zwar ist dieser Betrag der größere, weshalb man in praxi den Effekt für den unerregten Leerlauf der Dynamo mit zu dem Leerlaufseffekte der Dampfmaschine rechnet. Der gefundene Wert von η für den Generator wird tatsächlich etwas zu hoch genommen.

Eine genauere Methode zur Ermittlung des η ist jedenfalls die schon bei Gleichstrommaschinen und späterhin bei Transformatoren empfohlene, nämlich die Bestimmung aus den Effektverlusten. Die rechnerische Bestimmung und die Formel für η bei Ein- und Mehrphasengeneratoren habe ich in diesem Kapitel schon gegeben. Ich will hier noch angeben, wie man die verschiedenen Werte der Effektverluste experimentell findet.

Zunächst wird die Leerlaufsarbeit durch Leerlaufversuche festgestellt. Dieselbe ist einerseits bestimmt durch die Reibungsarbeit l_u bei unerregten Feldmagneten und andererseits durch die Arbeit l_e bei erregten Feldmagneten. Unter der Annahme, daß die Erregermaschine auf der Generatorwelle sitzt, erhält man nach Abzug des Erregereffektes $i_e^2 \cdot w_e$ von der Leerlaufsarbeit l_e die Reibungs-, Hysterisis- und Wirbelstromarbeit. Der Wert $l_e - l_u - i_e^2 \cdot w_e$ stellt alsdann die Hysterisis- und Wirbelstromarbeit allein dar. Sitzt die Erregermaschine nicht auf der Generatorwelle, so ist die Erregerarbeit $i_e^2 \cdot w_e$ naturgemäß nicht erst vom Werte l_e in Abzug zu bringen. — Die Leerlaufsarbeit läßt sich entweder durch das Riemendynamometer¹⁾ oder genauer durch Antrieb des Generators mittels eines Elektromotors (Gleichstrom) bestimmen, dessen Leistung nicht größer als die Effektverlustgröße des Generators zu sein braucht. Am besten wird der

¹⁾ Siehe Kittler, Band I: Messung mechanischer Arbeit.

Generator — wenn möglich — direkt mit dem Gleichstrommotor gekuppelt, da bei Riemenübertragung, wie schon erwähnt, eine variable Verlustgröße, nämlich die Riemengleitungsarbeit, mit in Frage kommt. Meistens werden die Verluste und die Wirkungsgrade des Gleichstrommotors bei verschiedenen Belastungen bekannt sein, und sind somit die Effekte, welche dem Generator zugeführt werden, gleich dem Effekte des Motors multipliziert mit dem Wirkungsgrade des letzteren. Ist der Wirkungsgrad nicht bekannt, so bestimmt man den dem Motoranker zugeführten elektrischen Effekt $J \cdot e$ (Ankerstrom mal Klemmenspannung) bzw. $J_1 \cdot e_1$, d. h. den Effekt, bevor bzw. während die zu messende Leistung auf den Generator übertragen wird. Nach Abzug der jeweiligen Verluste durch Ankerstromwärme von den genannten beiden Effekten des Motors ist die Differenz derselben gleich dem an den Generator übertragenen Effekte.

Bei obigen Versuchen ist natürlich die normale Tourenzahl zu wählen, da die Leerlaufsarbeit direkt eine Funktion der Tourenzahl ist.

Der zweite Teil der Leerlaufsarbeit des Generators (für Hysterisis und Wirbelströme) ist außer von der Tourenzahl auch abhängig von der Erregungsstromstärke i_e . Es fragt sich nun, ob der bei Leerlauf ermittelte Eisenverlust ohne weiteres auch für Belastung Geltung hat. Das ist nicht der Fall. Die Eisenverluste E_{H+W} sind, soweit sie die Verluste durch Hysterisis betreffen, nahezu der 1,6. Potenz der Induktion B im Eisen proportional und somit mittelbar eine Funktion der Erregung i_e . Es wäre nun von Interesse, die Eisenverluste in Abhängigkeit von der Erregung genau kennen zu lernen. Da jedoch bei Belastung mit konstanter Tourenzahl die Induktion B nicht nur von i_e , sondern auch von der Ankerstromstärke J abhängig ist, und man andererseits in der induzierten E. M. K. E im Anker eine Größe hat, die B direkt proportional ist, so stellt man zweckmäßig die Eisenverluste als Funktion der Größe E in einer Kurve dar. (E läßt sich meist durch Anbringung einer Hilfsspule messen). Die Kurve selbst kann bei Leerlauf ermittelt werden, bei dem das jeweilige $E = E_k$ ist. Man mißt die verschiedenen Spannungen des Generators bei variabler Erregung und die dem treibenden Gleichstrommotor zugeführten Effekte. Nach Abzug der Stromwärme im Anker des Motors ergibt die Differenz der Effekte bei erregtem und unerregtem Leerlaufe die Eisenverluste E_{H+W_L} für Leerlauf. Diese sind als Ordinaten zu den Spannungen als Abszissen aufzutragen. Der so gefundene Verlust E_{H+W_L} für den Leerlauf trifft nun, wie schon angedeutet, für belasteten Anker nicht mehr genau zu und bedarf, streng genommen, einer Korrektur. Denn da infolge der Ankerrückwirkung eine Verzerrung der Spannungskurve eintritt, so wird das Maximum der E. M. K. und somit in demselben Maße die maximale Induktion B eine Ver-

änderung erleiden. Der aus genannter Kurve, entsprechend dem gemessenen Effektivwerte E , entnommene Wert E_{H+W_L} für die Eisenverluste vergrößert sich im Verhältnis $\left(\frac{B}{B_L}\right)^2$ und ergibt

$$E_{H+W} = E_{H+W_L} \cdot \left(\frac{B}{B_L}\right)^2 = E_{H+W_L} \cdot \left(\frac{E_{max}}{E_{max_L}}\right)^2,$$

wenn B bzw. B_L die maximale Induktion im Ankereisen beim Belastungsstrom J bzw. bei offenem Ankerstromkreise, E_{max} bzw. E_{max_L} die entsprechenden Maximalwerte der im Anker induzierten E. M.-Kräften bedeuten. Letztere Werte können durch Aufnahme der Spannungscurven ¹⁾ bei Belastung und Leerlauf ermittelt werden.

Der so ermittelte Eisenverlust, zusammen mit den Verlusten des unerregten Leerlaufes und weiterhin den schon oben erwähnten Verlusten im Anker des Generators und in der Erregermaschine, ergibt den Gesamtverlust bei belasteter Maschine. Bezüglich des Ohmschen Verlustes $p \cdot J^2 \cdot w_a$ im Anker sei noch bemerkt, daß der Ankerwiderstand pro Phase w_a in bekannter Weise durch indirekte Widerstandsmessung mit Gleichstrom bei warmer Wickelung bestimmt wird; unter Berücksichtigung der Wirbelstromverluste im Kupfer und des etwaigen Einflusses der Eigenimpedanz ²⁾ ist der gefundene Wert von w_a mit etwa 1,5 zu multiplizieren, um den tatsächlich wirksamen Wert des Widerstandes zu erhalten.

6. Experimentelle Untersuchungen an asynchronen Mehrphasenmotoren.

Ich gehe jetzt über zu der Bestimmung der gleichen Größen bei Ein- und Mehrphasenmotoren. Die Leerlaufarbeit wird ermittelt, indem man dem unbelasteten Motor einen Strom von normaler Spannung bei konstanter normaler Periodenzahl zuführt. Wird die Spannung vom Werte Null an allmählich gesteigert, so erhält man durch Auftragen der Spannungen als Abszisse und der dazugehörigen primären Stromstärken bzw. der durch Wattmetermessung bestimmten zugeführten Energie als Ordinaten die sogenannte Magnetisierungskurve bzw. die Kurve der Verluste; dieselben bestehen der Hauptsache nach aus den Eisen- und den Reibungsverlusten sowie zum kleinen Teile aus dem Kupferverluste, welcher durch den Primärstrom bedingt ist. Für die normale Spannung findet man aus der Stromkurve den entsprechenden Wert für den Leerlaufstrom. Da ferner durch den Belastungs-

¹⁾ Näheres hierüber siehe: C. Heinke, Wechselstrommessungen und magnetische Messungen.

²⁾ Siehe hierzu: Vorstehend genanntes Werk von Heinke.

versuch die Stromstärke für die Normalleistung des Motors bestimmt ist, so ist der prozentuale Wert des Leerlaufstromes von dem Vollaststrom auch gegeben. (Der Leerlaufstrom beträgt etwa 20 bis 35 Proz. des Vollaststromes, dient aber zum größten Teile nur zur Magnetisierung, d. h. er ist bis auf einen kleineren Teil wattlos.)

Außerdem kann festgestellt werden, bei welcher Spannung der Motor seine normale Tourenzahl erreicht. —

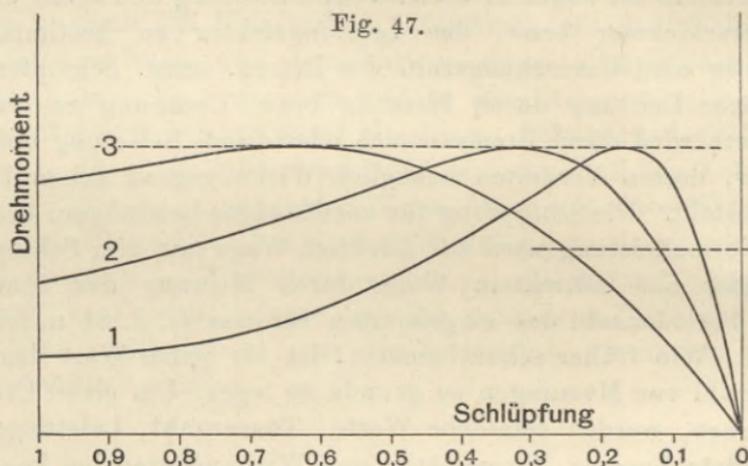
Sodann wird der Motor von Leerlauf auf seine normale und zwei- bis dreifache Leistung (eventuell bis zum Abschnappen desselben, sofern die zulässige Erwärmung nicht vorher schon überschritten wird), gebracht, wobei der Stromverbrauch, die Spannung und mittels Energiemessers die zugeführte elektrische Leistung und somit auch die Phasenverschiebung bezw. der Leistungsfaktor zu bestimmen ist. Gleichzeitig sind Umdrehungszahl des Rotors, bezw. Schlüpfung und mechanische Leistung durch Messung bezw. Rechnung zu ermitteln. Die letztere wird durch Bremsversuch oder durch Belastung mit einem Generator, dessen Verhalten bezüglich Wirkungsgrad genau bekannt ist, festgestellt. Die Schlüpfung für verschiedene Leistungen, besonders für die Normalleistung wird auf direktem Wege mit dem Schlüpfungszähler oder auf indirektem Wege durch Messung der Tourenzahl und der Periodenzahl des eingeleiteten Stromes (s. S. 86 u. folgende) bestimmt. Wie früher schon bemerkt, ist für jeden Wert das Mittel einer Anzahl von Messungen zu Grunde zu legen. Um einen Überblick zu gewinnen, werden sämtliche Werte, Tourenzahl, Leistungsfaktor, aufgewendete Energie, Stromstärke und Wirkungsgrad bei konstanter Spannung als Funktionen der jeweiligen effektiven Leistungen durch Kurven dargestellt. —

Wird die Riemenscheibe des Motors durch entsprechende Bremsbelastung an der Drehung verhindert und der zugeführte Strom allmählich durch Vergrößerung der Spannung gesteigert, so nimmt der Strom im Rotor proportional dem Primärstrom zu. Die Verschiebung des Rotorstromes gegen den Primärstrom beträgt dabei nahezu 180° . Die Stromkurve — in Abhängigkeit von der Spannung — verläuft geradlinig bis zur erfolgten Sättigung des Eisens; sodann tritt eine Krümmung derselben ein. Das Anzugsdrehmoment ergibt sich als Produkt von Bremskraft und Hebelarm derselben, wenn sich der Hebel der Bremse im labilen Gleichgewichte befindet. — Die Abhängigkeit des Primärstromes und des Drehmomentes für den Anlauf von der jeweiligen zugeführten Spannung kann man durch entsprechende Kurven graphisch darstellen. Handelt es sich um einen Motor mit Schleifringen, also mit veränderlichem Rotorwiderstand, so ist die Anzugskraft bezw. das entsprechende Drehmoment für verschiedene Widerstände des sekundären Stromkreises verschieden und zwar entspricht einem größeren Widerstande ein größeres Anzugsmoment. Ferner fällt das maximale Drehmoment, das im übrigen für einen

Motor unabhängig vom Widerstande immer dieselbe Größe hat, bei höherem Rotorwiderstande mit einem höheren Werte der Schlüpfung zusammen. In der beigefügten Skizze (Fig. 47) ist der Verlauf der Drehmomentkurve für veränderliche Schlüpfung dargestellt und zwar für drei Widerstände des Rotorstromkreises, die sich wie 1:2:4 verhalten. Das Drehmoment ist für einen gegebenen Motor lediglich eine Funktion des Verhältnisses:

$$\frac{\text{Schlüpfung } s}{\text{sekundären Widerstand } w_2},$$

und ist somit für gleiche Drehmomente die Schlüpfung proportional dem Widerstande w_2 . Auf Grund dieser Beziehung gewinnt man aus



einer Drehmomentkurve diejenige für ein anderes w_2 durch entsprechende Veränderung der jeweiligen Abszissengrößen. In der Figur sind die beiden oberen Kurven 2 und 3 entsprechend der Zunahme des Widerstandes durch Verdoppelung bzw. Vervielfachung der Schlüpfungswerte der Kurve 1 erhalten. Die Anzugskraft (Schlüpfung $s = 1$) nimmt mit dem Widerstande w_2 zu. Der Wirkungsgrad des Motors dagegen ist bei hohem sekundären Widerstande geringer, da in der sekundären Wickelung der Verlust durch Stromwärme bei dem höheren Widerstande bedeutender ist ¹⁾.

Von weiteren Werte für die Praxis sind ferner die Temperaturerhöhungen bei normalen und anderen Dauerbelastungen und bei intermittierendem Betriebe. Diese Temperaturwerte können als Funktion der Zeit für eine bestimmte Leistung oder auch bei Wahl der gemessenen Endtemperaturen als Funktion der Pferdestärken zur Darstellung gebracht werden. Alle weiteren für den Betrieb interessanten Faktoren lassen sich in ähnlicher Weise in Kurvenform graphisch wiedergeben.

¹⁾ Siehe auch: Kapp, Elektrische Kraftübertragung, zweite Auflage, Kapitel IX.

Erstes Beispiel.

Prüfung an einem Drehstromgenerator der Union Elektrizitäts-Gesellschaft.

Die vorliegende Maschine war für eine (verkettete) Spannung von 230 Volt bei einer normalen Stromstärke von 314 Ampère (Sternschaltung) bestimmt; sie leistete bei induktionsfreier Belastung ($\cos \varphi = 1$):

$$\sqrt{3} \cdot 230 \cdot 314 = 125\,000 \text{ Watt.}$$

Die Maschine wurde zunächst einer siebenstündigen Dauerprobe bei normaler, induktionsfreier Belastung unterworfen, worauf die nachfolgend beschriebenen Messungen vorgenommen wurden.

Temperaturerhöhung und Widerstände.

Die Temperaturerhöhungen, mit dem Thermometer gemessen, ergaben:

1. Statoreisen	+ 3° C.
2. Statorkupfer	+ 9° C.
3. Rotoreisen	+ 2° C.
4. Schleifringe	+ 30° C.
5. Rahmen	+ 1° C.

Die Widerstände waren:

	Kalt	Warm
1. Im Stator pro Wickelung	—	0,00769 Ω
2. Im Feld ohne Bürsten	8,66 Ω	9,45 Ω
3. Im Feld mit Bürsten	—	9,69 Ω

Danach berechnet sich die Temperaturerhöhung in den Feldspulen zu + 23° C. bei Annahme eines Temperaturkoeffizienten von 0,004.

Bei Berechnung der Stromwärmeverluste wurden die Widerstände im warmen Zustande zu grunde gelegt.

Zur Bestimmung des Wirkungsgrades (ohne Berücksichtigung der mechanischen Verluste) sind bei verschiedenen Belastungen folgende Verluste ermittelt worden:

1. Stromwärmeverlust im Anker,
2. „ in den Spulen,
3. „ im Rheostat,
4. Eisenverlust (Hysteresis und Wirbelströme).

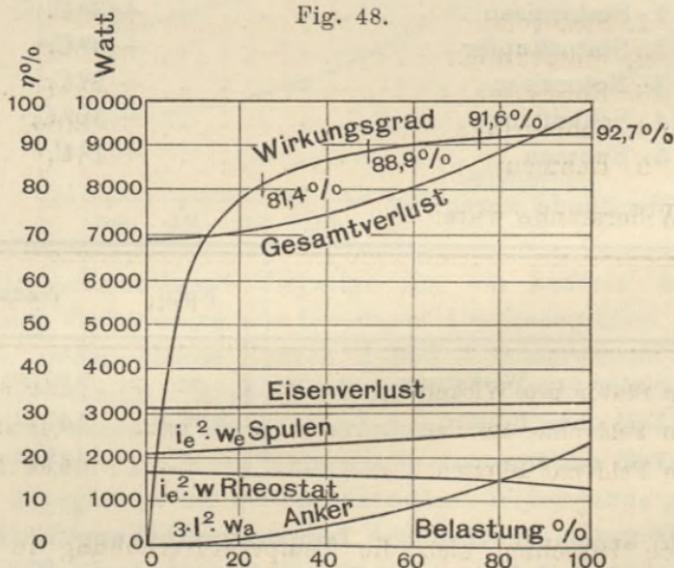
Der Wirkungsgrad wurde für induktionsfreie Belastung gerechnet und dementsprechend bei den Versuchen induktionsfreie Widerstandsbelastung verwendet.

Der Übersichtlichkeit halber seien hier gleich die Resultate der Verlust- und Wirkungsgradberechnung zusammengestellt. Die Besprechung der einzelnen Faktoren soll sich daran anschließen.

Wirkungsgrad und Verluste (siehe Fig. 48).

Belastung in Proz. und Watt	$3 \cdot J^2 \cdot w_a$ (Anker) in Watt	$i_e^2 \cdot w_e$ (Spulen) in Watt	$i_e^2 \cdot w$ (Rheostat) in Watt	Eisen- verlust in Watt	Gesamt- verlust in Watt	η in Proz.
10 Proz. = 12500	20	2145	1575	3190	6930	64,4
25 „ = 31250	140	2225	1565	3210	7140	81,4
50 „ = 62500	570	2405	1535	3240	7750	88,9
75 „ = 93750	1300	2580	1515	3270	8665	91,6
100 „ = 125000	2275	2820	1445	3300	9840	92,7

Fig. 48.



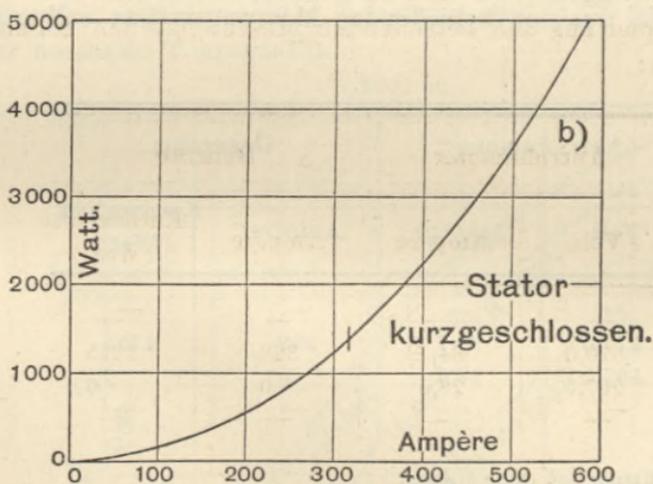
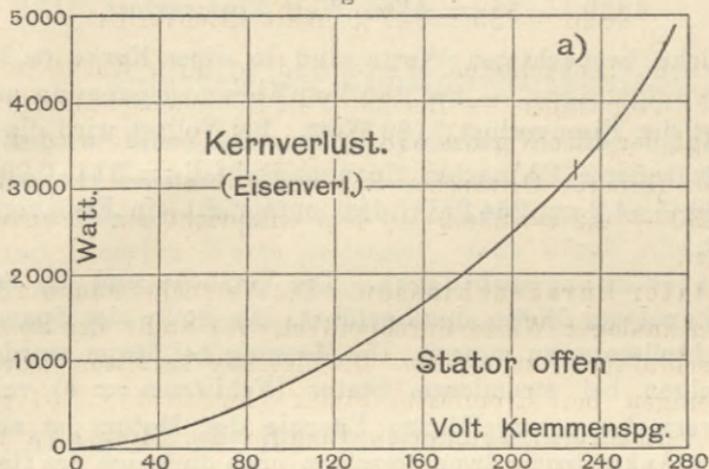
Die Stromwärmeverluste erhielt man, wie in der Tabelle angedeutet, jeweils aus Stromstärke und Widerstand. Bezüglich der Werte für die Eisenverluste siehe nachstehende Ausführungen unter a).

Eisenverluste.

a) Stator offen. Zur Ermittlung der Eisenverluste wurden Leerlaufversuche vorgenommen. Für jede gewünschte Klemmenspannung des Generators wurde die dem Antriebsmotor (Gleichstrommotor) zugeführte elektrische Energie bei Erregung mit derjenigen verglichen,

welche dem Motor bei der Klemmenspannung 0 des Generators (Erregung 0) zuzuführen ist. Die Differenz der beiden Energieen, vermindert um die zusätzliche Ankerstromwärme im Motor, ergibt den Eisenverlust; der Ankerwiderstand des Motors betrug dabei $w' = 0,0641 \Omega$. (Vergleiche S. 131 u. 132).

Fig. 49.



Als Beispiel seien folgende Werte einer Messungsreihe herausgegriffen:

Antriebsmotor (Gleichstrom)		Generator	
Volt	Ampère	Volt (Klemmenspannung)	Eisenverlust in Watt
—	—	—	—
567,5	28,0	0	0
567,5	36,5	275	4785
—	—	—	—

$$\begin{aligned}
 329^2 \cdot 0,00769 \cdot 3 &= 2498 \text{ Watt (Stromwärmeverl. im Stator)} \\
 + (34,7^2 - 28^2) \cdot 0,0641 &= + 27 \text{ „ (zusätzlicher Verl. im Motor)} \\
 &\underline{\hspace{10em}} \\
 &2525 \text{ Watt} \\
 3880 - 2525 &= 1355 \text{ Watt.}
 \end{aligned}$$

Bei normalem Strome ist der Kernverlust 1350 Watt (s. Fig. 49 b auf S. 137).

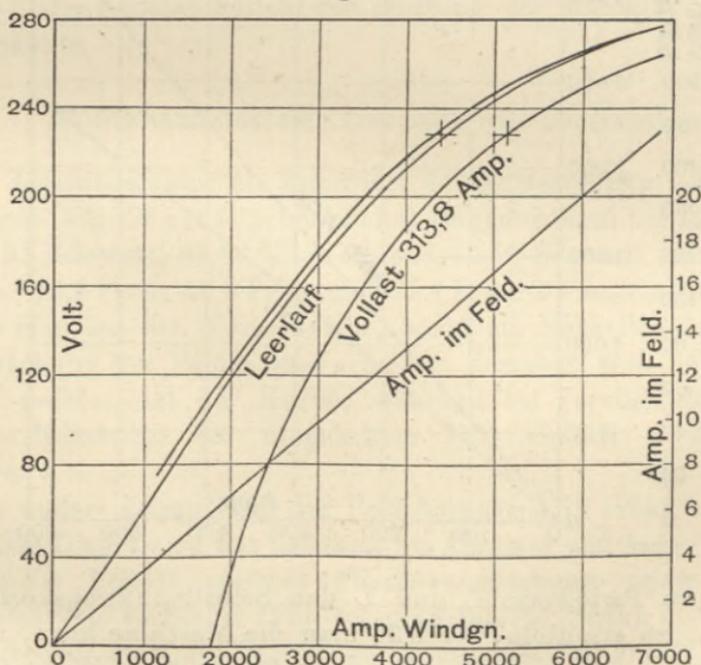
Aufnahme der Leerlaufcharakteristik.

(Äußerer Stromkreis offen; Spannung in Abhängigkeit von der Erregung bei konstanter normaler Tourenzahl). Die Spannung 230 Volt erforderte eine Erregung von 4410 Amp.-Wdgn; sie wurde von 0 bis zu einem höchsten Werte gesteigert, dann durch Abnahme der Erregung vermindert. Der rückkehrende Ast der Kurve zeigt höhere Werte infolge von Hysterisis (remanenter Magnetismus) im Eisen der Magnetpole (s. Fig. 50).

Aufnahme der Belastungscharakteristik (s. S. 126).

(Spannung in Abhängigkeit von der Erregung (in Amp.-Wdgn.) bei normaler induktionsfreier Belastung von 313,8 Amp. und bei konstanter normaler Tourenzahl).

Fig. 50.



Die Kurve liegt tiefer als diejenige bei Leerlauf (s. Fig. 50): bei gleichen Amp.-Wdgn. sind die Spannungswerte infolge von Spannungsabfall im Anker, veranlaßt durch den Ankerstrom, kleiner, oder bei

gleicher Spannung sind mehr Amp.-Wdgn. aufzuwenden, z. B. für volle Spannung von 230 Volt sind 5120 Amp.-Wdgn. erforderlich. Diese Erregung würde bei Leerlauf (offenem, äußeren Stromkreise) eine Spannung von 249 Volt ergeben; daher ist die Regulierung der Maschine $249 - 230 = 19$ Volt = 8,26 Proz.

Einige weitere Messungen, die an der Maschine vorgenommen wurden, mögen, obschon sie mehr theoretisches wie praktisches Interesse haben, bei dieser Gelegenheit besprochen werden.

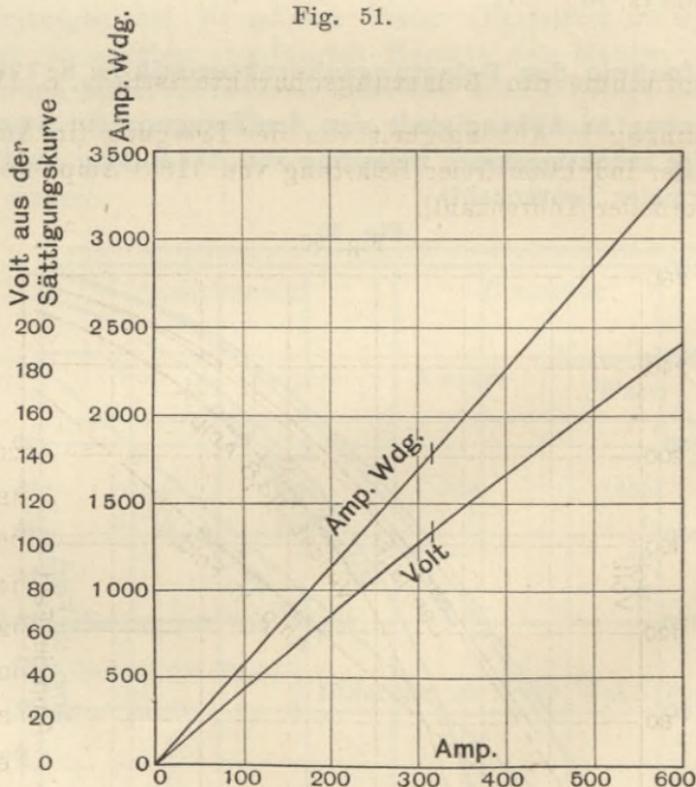
Impedanz (s. Fig. 51).

Um die Impedanz der Maschine

$$\left(\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}\right) = \frac{\text{Spannungsabfall im Anker}}{\text{Strom}},$$

worin R den Ohmschen Widerstand, $\omega = 2\pi c$ die Wechselgeschwin-

Fig. 51.



digkeit ($c =$ Periodenzahl) und L den Selbstinduktionskoeffizienten bezeichnen, zu ermitteln, schließt man die Maschine kurz, stellt die zur Erzeugung des normalen Stromes nötigen Amp.-Wdgn. fest und sucht die den Amp.-Wdgn. entsprechende Klemmenspannung bei offenem Stator auf. Beides ist aus dem schon vorhandenen ersten Kurvenbild (Sättigungskurve) zu entnehmen, und finden sich dort die Werte:

313,8 Amp. — 1780 Amp.-Wdgn. — 105,6 Volt.

Der Quotient $\frac{105,6}{313,8} = 0,3365$ ist die Impedanz.

Dasselbe wurde für eine Reihe anderer Stromstärken durchgeführt, wie nachfolgende Tabelle zeigt:

Ampère im Anker	Amp.-Wdgn.	Volt aus der Sättigungskurve
138,2	725	46,2
204,7	1140	69,0
256,2	1415	85,8
301,2	1710	103,0
346,0	1955	117,0
386,7	2205	131,0
464,0	2645	154,0
509,0	2900	168,0
555,5	3180	181,2
600,5	3450	194,0

Die Maschine wurde auch induktiv belastet (sowohl bei nacheilendem wie auch voreilendem Strome); hierbei wurde bei konstanter (normaler) Klemmenspannung der Belastungs- und der Erregungsstrom gemessen. Bei Konstanthalten der Leistung der Maschine ergab sich die sogenannte

Feldcharakteristik (bei 230 Volt konstant),

d. h. der Leistungsfaktor als Funktion der Felderregung. Es wurden vier Kurven (Fig. 52 auf folgender Seite) aufgenommen: bei 122,25 Kilowatt, 90,92 Kilowatt, 61,57 Kilowatt und 32,10 Kilowatt, entsprechend 97,9 Proz., 72,8 Proz., 49,3 Proz. und 25,7 Proz. der normalen Leistung.

Wie man aus den Kurven sieht, wirkt ein Nacheilen des Stromes auf Schwächung des Feldes und erfordert demnach eine höhere Erregung — rechter Ast der Kurve, während bei Voreilen des Stromes (Kapazitätsbelastung) der umgekehrte Fall eintritt — linker Ast der Kurve.

Eine andere Darstellung der Feldcharakteristik erhält man, wenn man in dem Diagramme aus Leistung als Abszisse und Amp.-Wdgn. als Ordinate die Punkte gleicher Phasenverschiebung (d. h. gleichen Leistungsfaktors) verbindet (Fig. 53 auf folgender Seite).

In diesem letzteren Diagramme geben die Punkte, für welche Leistungsfaktor und prozentuale Leistung gleichen Wert haben, die Kurve der konstanten Volt-Amp.; z. B. für $\cos \varphi = 0,60$ und 60 Proz. der Vollast L_0 einerseits, $\cos \varphi = 1$ und Vollast L_0 andererseits gilt:

$$\sqrt{3} \cdot E \cdot J \cdot 0,60 = 0,60 L_0$$

$$\sqrt{3} \cdot E \cdot J' \cdot 1,00 = 1,00 L_0,$$

d. h. $EJ = E \cdot J'$.

Für induktionslose Belastung ($\cos \varphi = 1$) sind die Werte für die Erregung der Leerlaufs- und Belastungscharakteristik zu entnehmen.

Fig. 52.

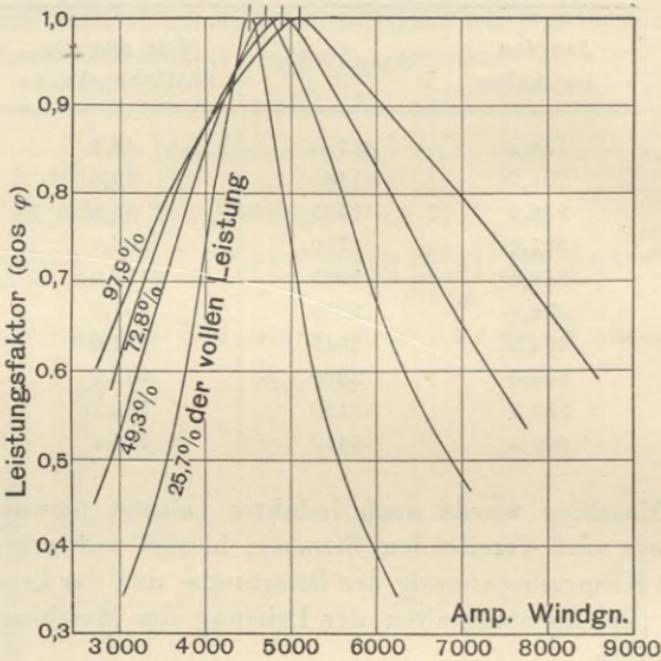
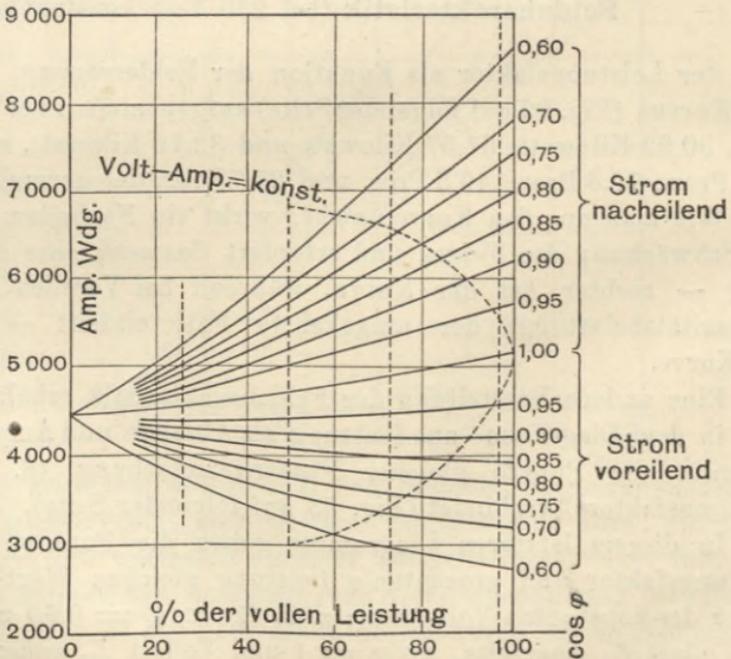


Fig. 53.



Belastung bei konstanter Felderregung (17,25 Amp.).

Hierbei wurden Strom (Ampère), Spannung (Volt) und Leistung (Kilowatt) im äußeren Stromkreise gemessen und durch folgende drei Kurven (siehe Fig. 54) veranschaulicht: 1. Kilowatt in Abhängigkeit von Ampère; 2. Kilowatt in Abhängigkeit von Volt; 3. Volt in Abhängigkeit von Ampère; als 4. graphische Darstellung wurde die Kurve Volt in Abhängigkeit von Ampère aus Fig. 51 (Impedanz) entnommen und, nach Schätzung verlängert, in das Diagramm eingetragen.

Die oben genannten Messungen wurden nur bis zur Stromstärke, 550 Ampère, ausgeführt, da eine höhere Belastung nicht zulässig erschien. Die maximale Stromstärke würde eintreten, wenn die Maschine kurz geschlossen würde; ihre Größe ergibt sich aus der Verlängerung der Impedanzkurve, entsprechend einem Voltwerte von 249, zu 850 Ampère; hierbei sind naturgemäß Klemmenspannung und Leistung Null. Die Kurven sind bis zu diesem (ideellen) Zustande verlängert. Die maximale Leistung der Maschine bei normaler Erregung von 17,25 Amp. ergibt sich zu 184 Kilowatt = 147,1 Proz. der normalen Leistung. Die gemessenen Werte sind

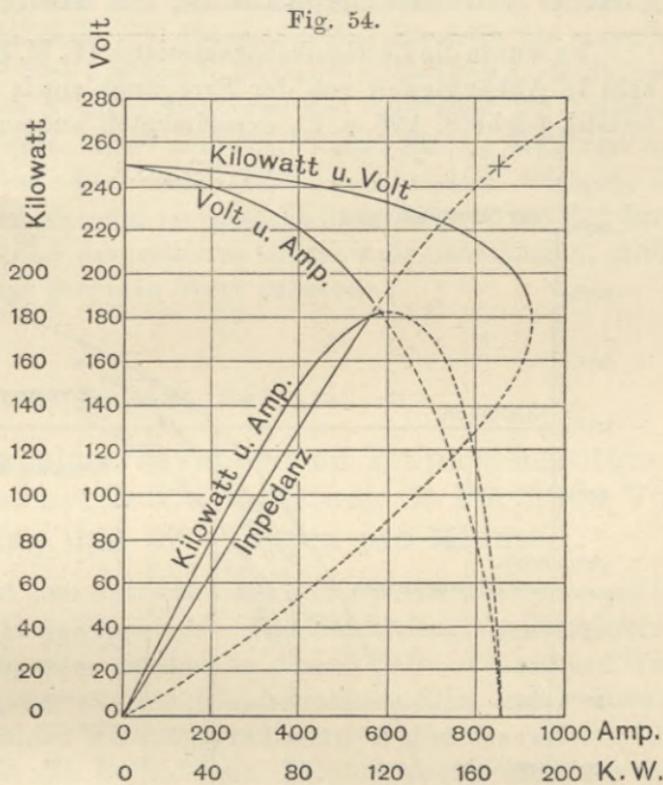


Fig. 54.

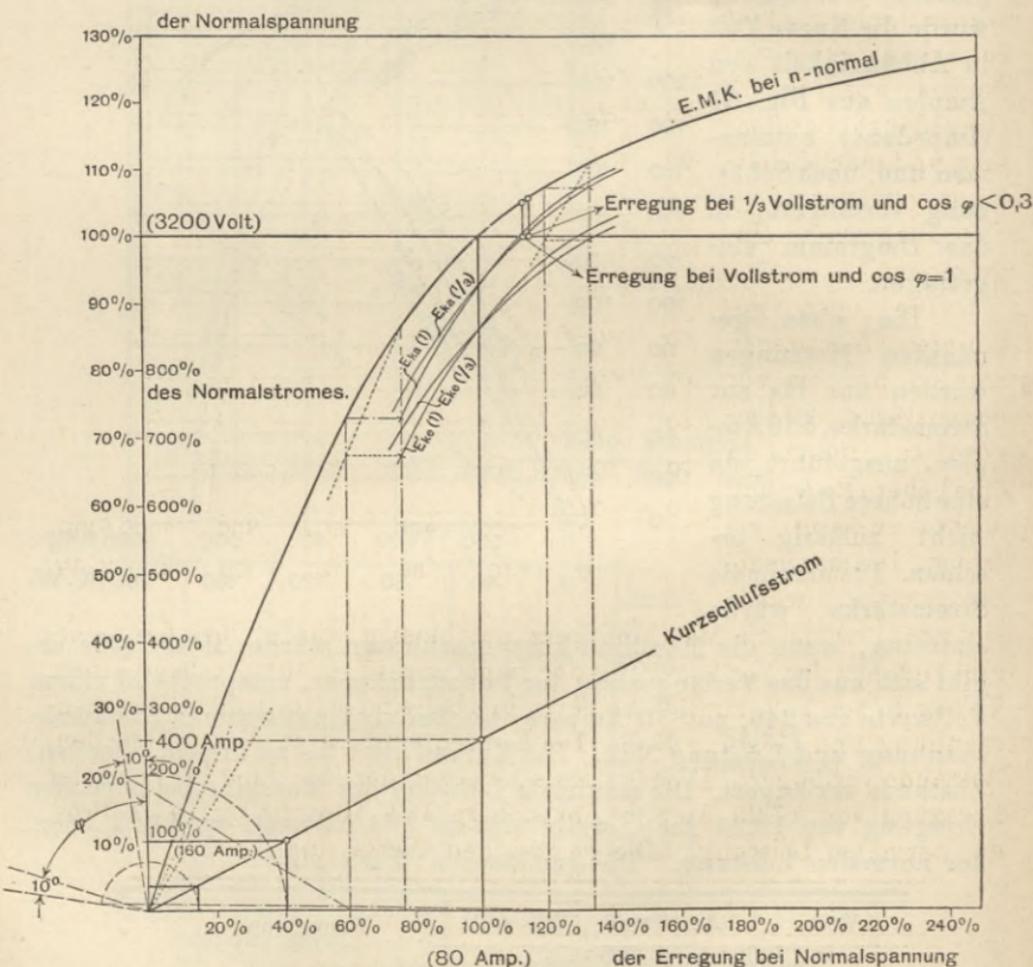
Volt	Ampère	Kilowatt	Bemerkungen
Im äußeren Stromkreise			
249	0	0,00	aus der Sättigungskurve
245	106	45,00	
243	105	63,05	
238	252	104,00	
234	290	117,50	
219	405	135,60	
189	555	181,70	aus der Impedanzkurve
0	850	0,00	

Zweites Beispiel.

Untersuchung an einem Drehstromgenerator der E.-A.-G. vorm. Schuckert & Co.: Leistung 3×160 Amp. bei 3200 Volt Sternspannung, 83 Touren, 50 Perioden.

Es wurde die Leerlaufcharakteristik (E. M. K. bei normaler Tourenzahl in Abhängigkeit von der Erregung) sowie die Kurzschlußcharakteristik (siehe S. 125 u. f.) experimentell aufgenommen, siehe Fig 55;

Fig. 55.



ferner wurden bei normaler Klemmenspannung¹⁾ 3200 Volt zwei Messungen bei belasteter Maschine für nahezu gleiche Erregungen ausgeführt, und zwar 1. bei Vollstrom (160 Amp.) und $\cos \varphi = 1$, 2. bei $\frac{1}{3}$ des Vollstromes und $\cos \varphi = 0,3$; die hierzu erforderlichen Er-

¹⁾ Sämtliche Spannungswerte sind hier, auch ohne daß dies ausdrücklich gesagt ist, als Sternspannungen zu verstehen.

regungen sind in der Figur 55 angegeben. Die jeweiligen Ordinatenstrecken zwischen diesen eingetragenen Werten und der Kurve der E. M. K. stellen den Spannungsabfall innerhalb der Maschine und die entsprechenden Abszissenstücke die Mehrerregung infolge der Belastung der Maschine dar. An Hand der beiden aufgenommenen Kurven sind nun die Kurven E_{ka} und E'_{ke} der Figur 46, welche die Grenzlagen darstellen, innerhalb deren die Belastungscharakteristik für einen bestimmten Strom und eine bestimmte Phasenverschiebung verläuft, nach der dort angegebenen Konstruktion bestimmt und zwar für Vollstrom und $\cos \varphi = 1$ [Kurven $E_{ka}^{(1)}$ und $E'_{ke}^{(1)}$] und für $\frac{1}{3}$ Vollstrom und $\cos \varphi = 0,3$ [Kurven $E_{ka}^{(1/3)}$ und $E'_{ke}^{(1/3)}$]. Aus dem Verlaufe der Kurven ist zu ersehen, daß der tatsächliche Spannungsverlust der durch die oberen Kurven (E_{ka}) dargestellten Grenze sehr nahe kommt, mithin einen verhältnismäßig geringen Wert aufweist.

Drittes Beispiel.

Untersuchung eines asynchronen Einphasenmotors von Brown Boveri & Co., Leistung 55 PS, 2800 Volt Spannung und 670 Touren pro Minute.

Der Motor dient zum Antriebe einer 36 K.-W.-Gleichstrommaschine, mit welcher er direkt gekuppelt ist. Die Ermittlung der Nutzleistung sowie des Wirkungsgrades geschah in diesem Falle in einfacher Weise aus den Belastungswerten der Gleichstrommaschine unter Berücksichtigung der bekannten Wirkungsgradkurve für dieselbe (siehe S. 133). Diese letztere sowie die zugehörigen Ablesungswerte sind aus dem früher erwähnten Beispiele (siehe S. 97 u. f.) zu ersehen. Es resultierte z. B. aus der Nutzleistung der Dynamo (5460 Watt) und dem Wirkungsgrade derselben (65,2 Proz.) für diese Belastung eine nutzbare Leistung des Motors von 8374 Watt ($= 11,39 PS_e$). Da nun die gemessene, in den Motor eingeführte Leistung 12,5 K.-W. betrug, so ist der Wirkungsgrad des Motors bei einer Leistung von $11,39 PS_e$

$$\eta = \frac{8374}{12500} = 0,67.$$

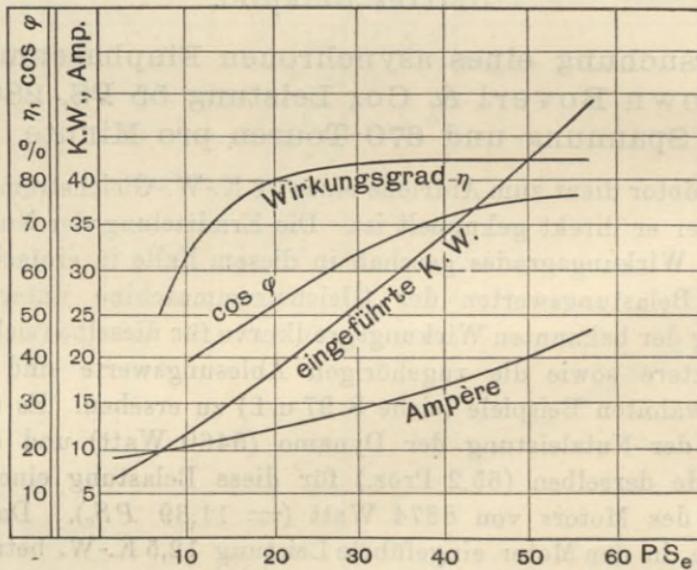
Der Leistungsfaktor und die Phasenverschiebung ergeben sich aus der gleichzeitig gemessenen, primär zugeführten Stromstärke von 10,8 Ampère und der konstanten zugeführten Spannung von 2800 Volt zu

$$\cos \varphi = \frac{12500}{2800 \cdot 10,8} = 0,413.$$

Die Resultate dieser Rechnung für sämtliche Ablesungen seien umstehend in einer Tabelle zusammengestellt und durch entsprechende Kurven veranschaulicht (siehe Fig. 56 auf folgender Seite).

	Nutzleistung		Zugeführte Stromstärke i_1 in Ampère	Zugeführte Spannung e_1 in Volt	Scheinbar zugeführte Leistung als Produkt $e_1 \cdot i_1$	In den Motor eingeführte Leistung, mit dem Wattmeter gemessen, in Watt	Leistungsfaktor $\cos \varphi$ in Prozenten	Wirkungsgrad in Prozenten
	in PS_e	in Watt						
I.	11,39	8 374	10,8	2800	30 240	12 500	41,3	67,0
II.	18,74	13 780	12,2	2800	34 160	17 300	50,6	79,7
III.	27,53	20 260	14,0	2800	39 200	24 300	62,0	83,4
IV.	33,20	24 420	15,3	2800	42 840	28 800	67,2	84,9
V.	40,26	29 630	17,5	2800	49 000	35 000	71,4	84,7
VI.	51,30	37 770	20,8	2800	58 240	44 500	76,5	84,9
VII.	53,00	39 000	21,4	2800	59 920	46 000	76,8	84,8
VIII.	54,80	40 370	22,0	2800	61 600	47 500	77,1	85,0

Fig. 56.



(Siehe auch Kapitel G, zweites Beispiel.)

Viertes Beispiel.

Untersuchung eines asynchronen Drehstrommotors der Union Elektrizitätsgesellschaft von 15 PS, 1000 Touren, 500 Volt.

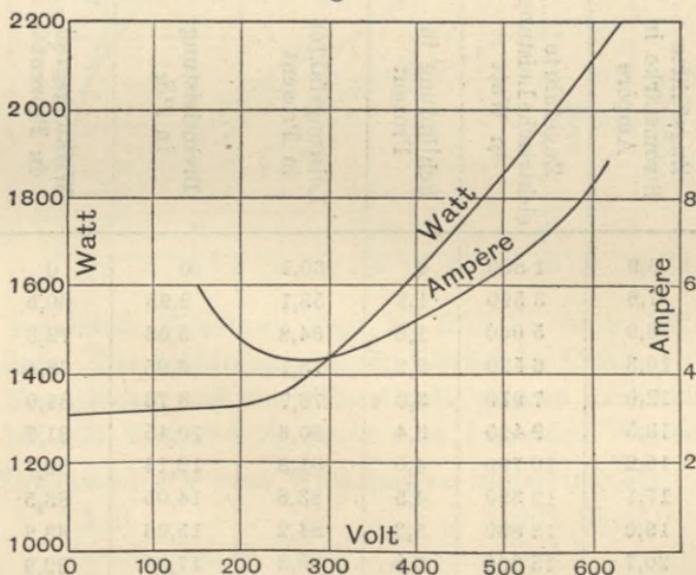
Es wurden zunächst die Verluste bei Leerlauf ermittelt. Die zugeführte Leistung in Watt sowie die Stromstärke in Ampère wurden als Funktion der eingeführten Spannung beobachtet (siehe S. 132 und

133). Die Werte sind in nachstehender Tabelle zusammengefaßt und in einem Diagramme dargestellt (siehe Fig. 57).

Leerlauf.

Volt	Watt I ¹⁾ (Wattmeter I)	Watt II ¹⁾ (Wattmeter II)	Watt total ¹⁾	Ampère
590,0	3032	939	2093	8,16
557,6	2702	700	1996	—
519,2	2350	480	1870	6,74
470,0	2002	213	1793	6,01
418,0	1726	9	1717	5,50
360,0	1412	143	1555	4,92
302,4	1217	280	1497	4,62
260,0	1025	360	1385	4,38
218,2	916	429	1345	4,57
143,0	905	427	1332	4,75
181,8	—	—	—	4,95
166,0	—	—	—	5,33
155,8	—	—	—	5,69

Fig. 57.



Bei der normalen Spannung von 500 Volt ergaben sich durch Messung und Berechnung folgende Werte für:

1. Leerlaufstrom in einer Wicklung, d. h. zwischen Leitung und Verkettungspunkt 6,42 Amp.
2. Leerlaufarbeit 1865 Watt
3. Lager- und Schleifringreibungsarbeit 1320 "

¹⁾ Siehe über Effektmessung bei Drehstrom S. 83 und folgende.

4. Kupferverlust im Stator $3 \cdot i_1^2 \cdot w_1$ bei 6,42 Amp.
 ($w_1 = 0,46 \div 0,47 \Omega$ in einer Wickelung, siehe
 hierüber unten) 58 Watt
5. Der Eisenverlust im Stator ist somit:
 1865 — 1320 — 58 = 487 „

Bezüglich der hohen Reibungsarbeit ist zu bemerken, daß der untersuchte Motor ganz neu war, und daß erfahrungsgemäß bei der betreffenden Type die Reibung bei längerem Betriebe auf etwa die Hälfte zurückgeht.

Der Wirkungsgrad bei variabler Belastung wurde durch Messung der zugeführten elektrischen Leistung und der Bremsleistung in PS_e , diese letztere aus Drehmoment (bezw. Bremsbelastung) und Tourenzahl, der Leistungsfaktor durch gleichzeitige Bestimmung von Stromstärke und Spannung (S. 133), die Schlüpfung endlich aus der Tourenzahl und der Umdrehungszahl des Drehfeldes ermittelt. Die wichtigsten Resultate der Messungen zeigt folgende Tabelle sowie die beigegefügte graphische Darstellung (siehe Fig. 58 auf folgender Seite).

Wirkungsgrad.

Zugeführte Spannung in Volt (verkettet)	Zugeführte Stromstärke in Ampère	Zugeführte elektrische Leistung in Watt	Schlüpfung in Prozent	Leistungsfaktor in Prozent	Bremsleistung in PS_e	Wirkungsgrad in Prozent	Primärer Kupferverlust $3 \cdot i_1^2 \cdot w_1$ in Watt
500	6,9	1 800	0	30,1	0	0	65,5
500	7,6	3 590	1,2	53,1	2,95	60,5	79,7
500	8,9	5 060	1,8	64,8	5,03	72,3	109,0
500	10,3	6 520	2,2	73,1	6,95	78,4	144,0
500	12,0	7 970	3,0	76,7	8,78	81,0	196,0
500	13,5	9 420	3,4	80,6	10,45	81,7	247,0
500	15,2	10 790	4,0	81,8	12,14	82,7	334,0
500	17,1	12 390	4,5	83,8	14,05	83,5	397,0
500	19,0	13 860	5,3	84,2	15,66	83,2	490,0
500	20,7	15 360	6,0	85,3	17,30	82,9	581,0
500	22,7	16 620	6,4	84,6	18,63	82,5	699,0
500	24,0	17 910	6,5	86,1	19,88	81,6	782,0

Der Zusammenhang der verschiedenen Größen sei beispielsweise durch folgende Rechnungen für die Leistung 15,66 PS veranschaulicht:
 Der Leistungsfaktor ergibt sich zu:

$$\cos \varphi = \frac{\text{Watt}}{\sqrt{3} \times \text{Volt} \times \text{Amp.}} = \frac{13\,860}{1,732 \cdot 500 \cdot 19} = 0,842.$$

Die effektive Leistung in PS_e ergab sich, wie schon oben erwähnt, aus dem Bremsgewichte, dem Bremshebel und der Tourenzahl

$$N_e = \frac{2 \cdot \pi \cdot l \cdot n}{60 \cdot 75} (G_1 + G_2)$$

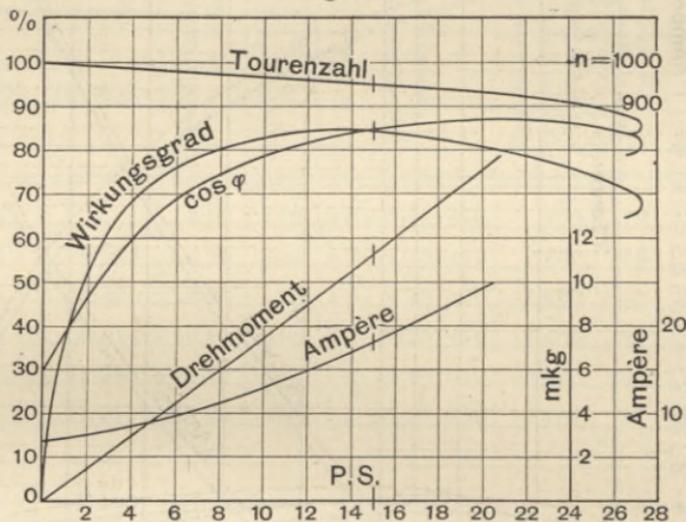
(siehe Formel (33), S. 35), die Schlüpfung aus den Beziehungen (24), S. 86, und (14), S. 125.

$$\frac{\omega_{st} - \omega_r}{\omega_{st}} = \frac{n' - n}{n'} = \frac{1000 - 947}{1000} = 0,053.$$

Der Wirkungsgrad η zu:

$$\eta = \frac{PS_e \cdot 0,736}{\text{eingeführte Leistung in Watt}} = \frac{15,66 \cdot 0,736}{13\,860} = 0,832.$$

Fig. 58.



Die maximale Belastung liegt bei 27,5 PS (d. h. bei 83,4 Proz. Überlastung). Die Schlüpfung betrug hierbei 15 Proz.

Die Erwärmung und die Widerstände wurden nach vierstündigem Betriebe bei 500 Volt und 18 Ampère zu folgenden Werten ermittelt:

Stator: Widerstand von zwei Wickelungen hintereinander

kalt	0,802 Ohm,
warm: bei + 34° C.	0,903 „

Rotor: Widerstand von zwei Wickelungen hintereinander

kalt	0,01014 Ohm,
warm: bei + 29° C.	0,01125 „

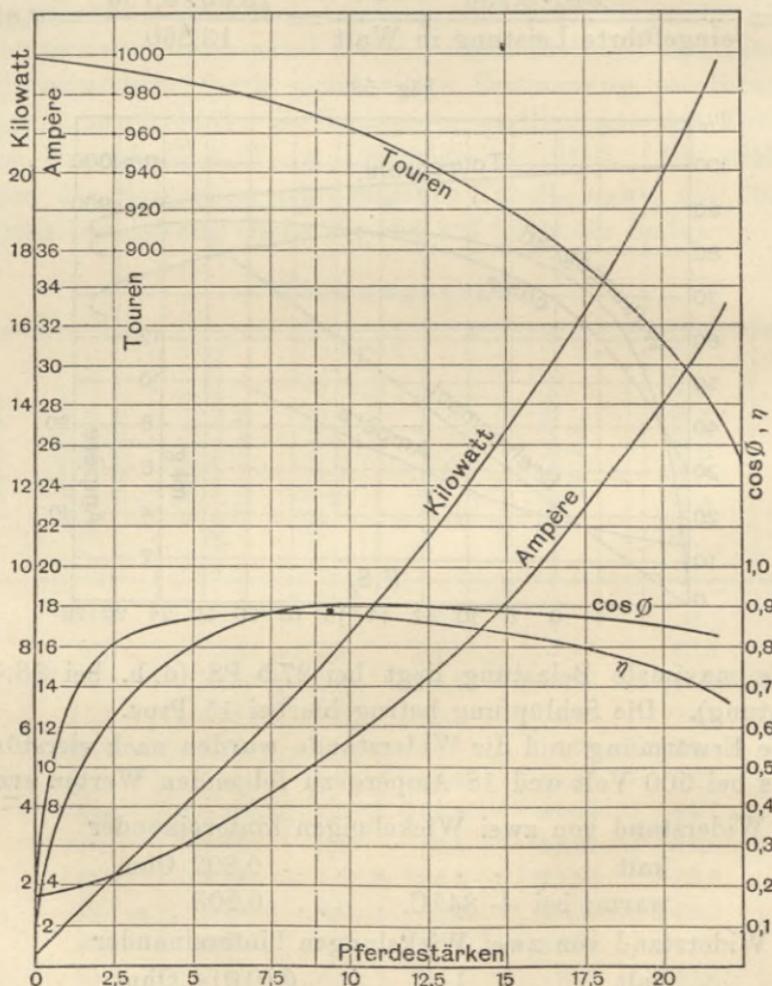
Statoreisen	+ 22° C.
Statorwicklung	+ 17° „
Rotoreisen	+ 24° „
Schleifringe	+ 54° „
Rahmen (Joch)	+ 12° „

Fünftes Beispiel.

Untersuchung eines asynchronen Drehstrommotors von der E.-A.-G. vorm. Schuckert & Co., Leistung 9 PS, 470 Volt Spannung und 1000 Umdrehungen pro Minute.

Es wurde gleichzeitig die gebremste Leistung in PS_e , die zugeführte elektrische Leistung in K.-W. mittels Wattmeters, die eingeführte Stromstärke i_1 in der Hauptleitung, die Spannung e_1 (zwischen

Fig. 59.



den Hauptleitungen) sowie die Tourenzahl bzw. Schlüpfung des Rotors gemessen (siehe S. 133). Die entsprechenden Werte sind nachstehend tabellarisch und graphisch (Fig. 59) zur Darstellung gebracht. Aus der eingeführten Energie W , der Stromstärke i_1 und der (konstanten) Spannung e_1 resultiert der Leistungsfaktor $\cos \phi$ bzw. die Phasenverschiebung aus der Nutzleistung und der eingeführten Leistung des

Wirkungsgrad η des Motors. Diese Werte ergeben sich für die normale Leistung von 9 PS zu:

$$\cos \varphi = \frac{W}{\sqrt{3} \cdot i_1 \cdot e_1} = \frac{7500}{1,732 \cdot 10,25 \cdot 470} = 0,90, \text{ d.h. } 90 \text{ Proz.}$$

$$\eta = \frac{PS \cdot 736}{W} = \frac{9 \cdot 736}{7500} = 88,3.$$

Die nachstehende Tabelle gibt die sämtlichen genannten Größen für verschiedene Leistungen.

	Nutzleistung		Zugeführte Stromstärke i_1 in Ampère	Zugeführte Spannung e_1 in Volt	Scheinbar zugeführte Leistung in Watt	Zugeführte elektrische Energie nach Angabe des Wattmeters in Watt	Leistungsfaktor $\cos \varphi$ in Prozenten	Schlüpfung in Prozenten	Wirkungsgrad in Pro- zenten
	in PS _e	in Watt							
I.	0	0	3,58	470	$\sqrt{3} \cdot 3,58 \cdot 470$	350	12	0,2	0
II.	3	2 208	4,80	470	$\sqrt{3} \cdot 4,80 \cdot 470$	2 660	68	0,8	83,0
III.	5	3 680	6,40	470	$\sqrt{3} \cdot 6,40 \cdot 470$	4 220	81	1,5	87,3
IV.	9	6 624	10,25	470	$\sqrt{3} \cdot 10,25 \cdot 470$	7 500	90	3,2	88,3
V.	15	11 040	18,40	470	$\sqrt{3} \cdot 18,40 \cdot 470$	13 300	89	7,8	83,0
VI.	19	13 990	26,00	470	$\sqrt{3} \cdot 26,00 \cdot 470$	18 400	87	13,1	76,0

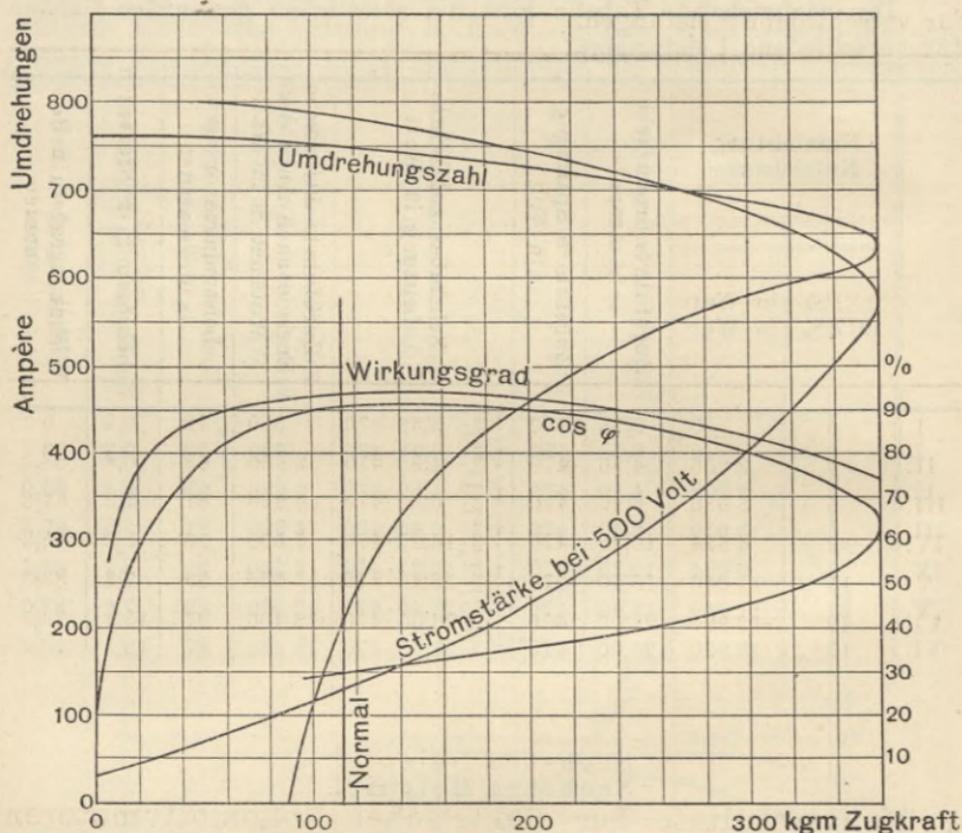
Sechstes Beispiel.

Prüfungsergebnisse der elektrischen Lokomotivmotoren der Jungfraubahn.

Nachstehende Betriebskurven (siehe Fig. 60 a. f. S.) entsprechen den Lokomotivmotoren der Jungfraubahn und sind einem Berichte der Maschinenfabrik Oerlikon, der Erbauerin, entnommen. Das Beispiel dürfte deshalb von besonderem Interesse sein, weil es einer ganz neuen Anlage auf dem Gebiete des Bahnbetriebes entnommen ist. Für den Betrieb der Jungfraubahn ist Drehstrom von 450 ÷ 550 Volt (verketteter) Spannung bei 38 Perioden verwendet. Die Lokomotive wird durch zwei sechspolige Drehstrommotoren von je 120 PS normaler Leistung bei 750 Umdrehungen pro Minute angetrieben. Aus der Kurve für Tourenzahl, deren oberer Teil den Betriebszustand des Motors darstellt, ist zu ersehen, daß bei etwa 635 Umdrehungen — entsprechend dem Maximum der Zugkraft — das Abschnappen des

Motors eintritt; wird die Belastung noch weiter gesteigert, so ist der Motor nicht mehr betriebsfähig und kommt rasch bei abnehmender Zugkraft zum Stillstande. Der untere Ast der Tourenkurve gilt somit für den Zustand des Anlaufes. Das Verhalten des Motors ist hinsichtlich Tourenzahl, primär aufzuwendender Stromstärke, Leistungsfaktor $\cos \varphi$ und Wirkungsgrad η in Abhängigkeit von der Zugkraft aus dem Dia-

Fig. 60.



gramme (Fig. 60) ersichtlich. Der Leerlaufstrom der Motoren beträgt bei 500 Volt 25 Ampère und die Leerlaufarbeit 4200 Watt.

Bei einem gebremsten Drehmomente von 115 kgm und einer Tourenzahl von 750 pro Minute, d. h. einer normalen gebremsten Leistung von 120 PS, wurde eine Stromstärke von 121 Amp. und eine zugeführte Leistung von 95,2 K.-W. gemessen, so daß sich ein Wirkungsgrad von

$$\eta = \frac{120 \cdot 0,736}{95,2} = \sim 0,93$$

und ein Leistungsfaktor von

$$\cos \varphi = \frac{95\,200}{\sqrt{3} \cdot 121 \cdot 500} = \sim 0,91$$

ergeben.

Die Schlüpfung bei normaler Belastung betrug 1,5 Proz., der Energieverlust in der Primärwicklung 2,5 Proz. von der zugeführten Energie.

(Siehe auch Kapitel N, drittes Beispiel.)

I. Transformatoren.

1. Allgemeines über den Transformator.

Der Transformator dient zur Umsetzung von Wechselstromenergie auf die jeweils erforderliche Spannungshöhe. Er besteht aus einem in der Regel geschlossenen Eisenkerne und zwei getrennten Wickelungen, die den ersteren umschließen. Diese beiden Wickelungen, die primäre und sekundäre, dienen zur Aufnahme der umzuwandelnden bzw. zur Abgabe der umgesetzten elektrischen Energie. Bezeichnet man die vorkommenden magnetischen, elektrischen und konstruktiven Größen mit:

B die maximale magnetische Induktion im Eisenkerne pro Quadratcentimeter,

N die Anzahl der eingeschlossenen Kraftlinien,

c die Periodenzahl des pulsierenden Stromes bzw. des Feldes,

n die Windungszahl der Spule (n_1 für die Primär-, n_2 für die Sekundärspule),

E den effektiven Mittelwert der elektromotorischen Kraft, die durch das pulsierende Feld in einer Wickelung induziert wird, in Volt,

dann besteht folgende Relation:

$$(1) \dots \dots \dots E = 4,44 \cdot c \cdot n \cdot N \cdot 10^{-8}.$$

Die periodisch sich ändernde E. M. K. ist in jedem Augenblicke proportional der Geschwindigkeit der Kraftlinienänderung; dieselbe erreicht somit im Augenblick des Polwechsels den höchsten Wert, und beträgt die Verschiebung zwischen dem Maximum des Feldes und dem Maximum der E. M. K. $\frac{1}{4}$ Periode. — Jeder Wechselstrom läßt sich in drei Teilströme¹⁾ zerlegen und zwar:

1. den Erreger- oder wattlosen Strom,
2. den Wattstrom,
3. den Ladestrom.

Dieser letztere hat keine Bedeutung in der Praxis, es sei denn, daß durch hohe Potentialdifferenzen der Einfluß der elektrostatischen Kapazität bzw. des elektrostatischen Feldes so groß würde, daß der Ladestrom nicht zu vernachlässigen wäre.

¹⁾ Siehe auch v. Dolivo-Dobrowolsky, E. T. Z. 1892, Heft 17.

Die Ströme unter 1. und 2. können als rechtwinklig zueinander stehende Komponentenströme zu einer Resultierenden vereinigt werden, wie Fig. 61 erläutert.

Der Winkel φ gibt die Phasenverschiebung des resultierenden Stromes gegen die E. M. K., welche mit dem Wattkomponentenstrom in Richtung zusammenfällt. Durch Belastung des Transformators mit

Glühlampen (induktionslose Belastung) nimmt die Wattkomponente zu; der $\cos \varphi$ nähert sich dem Werte 1 und somit der Unterschied der scheinbaren Stromstärke und der berechneten dem Werte Null.

In der Praxis kommt hauptsächlich das Verhalten eines an das Netz einer

Zentrale angeschlossenen Transformators in Frage, und ist der Wirkungsgrad eines konstant betriebenen Transformators wesentlich verschieden von dem Wirkungsgrade des Transformators in der Versuchstation bzw. der elektrotechnischen Fabrik. Der erstere, d. h. der Jahresnutzeffekt ist bedeutend ungünstiger. Man muß hier mit Faktoren rechnen, welche von außerhalb des Transformators liegenden Verhältnissen — jährliche Brennstunden der installierten Lampen u. s. w. — abhängig sind. Nachstehend sei zur Erläuterung des eben Gesagten ein einfaches Beispiel aus der Praxis angeführt.

Ein Transformator mit einer maximalen Nutzleistung von 60 K.-W. war im Jahre etwa 400 Stunden zum Betriebe eines Motors mit im Mittel 80 Proz. belastet. Die Ohmschen oder Stromwärme- sowie die Eisenverluste waren je etwa 1,5 Proz. Dann ist:

die nutzbare Jahresenergie

$$400 \cdot (60 \cdot 0,8) = 400 \cdot 48 = 19\,200 \text{ K.-W.-Stdn.}$$

Die Energieverluste:

durch Ohmschen Widerstand

$$400 \cdot 48 \cdot 0,015 = 400 \cdot 0,72 = 288 \text{ K.-W.-Stdn.}$$

durch Magnetisierungsarbeit ¹⁾ — die

während des ganzen Jahres, d. h.

24 · 365 = 8760 Stunden zu leisten ist —

$$8760 \cdot 60 \cdot 0,015 = 7\,884 \text{ K.-W.-Stdn.}$$

Die Gesamtjahresenergie demnach 27 372 K.-W.-Stdn.

Der Gesamtnutzeffekt (Jahresnutzeffekt):

$$\frac{19\,200}{27\,372} = 0,701 \text{ oder } 70,1 \text{ Proz.}$$

¹⁾ Es tritt noch ein weiterer Verlust während der Betriebspausen auf, nämlich der Ohmsche Verlust des Leerlaufstromes. Derselbe ist jedoch meist so unbedeutend, daß er gegenüber den anderen Verlusten vernachlässigt werden kann. Zu seiner Ermittlung ist die Kenntnis des Leerlaufstromes erforderlich.

Der momentane Nutzeffekt bei 80 Proz. Belastung ist dagegen

$$\frac{48}{48 (1 + 0,015) + 60 \cdot 0,015} = 0,967 \text{ oder } 96,7 \text{ Proz.}$$

Aus dem Beispiele erhellt, von welcher Bedeutung es ist, wenn der Aufwand für Magnetisierungsarbeit möglichst reduziert wird.

Ein dem obigen Beispiele ähnlicher Fall lag bei der Projektierung der Palmengartenzentrale (Frankfurt a. M.), bei welcher der Verfasser seinerzeit als Sachverständiger und Bauoberleiter tätig war, vor; es war die Frage zu entscheiden, ob der vorhandene hochgespannte Wechselstrom mit oder ohne Transformierung für motorische Zwecke verwendet werden sollte.

Es laufen in der genannten Zentrale zwei Einphasenmotoren, direkt an das Hochspannungsnetz angeschlossen; sie dienen zum Antriebe der Gleichstromumformer für die Ladung einer Akkumulatorenbatterie. Der normale Energieverbrauch jedes Motors ist 47 K.-W.

Falls die Motoren mit Niederspannung gespeist würden, wären zwei Transformatoren mit je 47 K.-W.-Leistung erforderlich. Der Wirkungsgrad der in Betracht kommenden Transformatoren beträgt etwa 97 Proz., nämlich je 1,5 Proz. auf Magnetisierungsarbeit und auf Verluste im Kupfer. Das Elektrizitätswerk müßte die Magnetisierungsarbeit während des ganzen Jahres, die Verlustarbeit durch Stromwärme während der Zeit des Betriebes der Motoren aufwenden.

Der Motor I lief nach dem Betriebsprotokolle während eines Jahres 1245 Stunden, der Motor II 1182 Stunden. Die Motoren waren im Mittel mit etwa 70 Proz. ihrer Normalleistung belastet, d. h. mit rund 33 K.-W.

Bei Motor I betragen:

die nutzbare Jahresenergie 1245 · 33 = 41 085 K.-W.-Std.

Die Energieverluste:

durch Ohmschen Widerstand . 1245 · 33 · 0,015 = 616 „

durch Magnetisierungsenergie 365 · 24 · 47 · 0,015 = 6 176 „

Gesamtjahresenergie 47 877 K.-W.-Std.

$$\text{Gesamtjahresnutzeffekt: } \frac{41\,085}{47\,877} = 0,858.$$

Bei einem Preise von 9 Pfennig pro Kilowattstunde als Selbst-erzeugungskosten durch Aufwand an Wasser, Heiz- und Schmiermaterial hätte das Elektrizitätswerk

$$(47\,877 - 41\,085) \cdot 0,09 = 611,3 \text{ Mk.}$$

bei Transformatorenbetrieb für diesen Motor mehr aufwenden müssen. Hiervon ist der Aufwand an Kosten durch Stromwärme mit 55,4 Mk. und durch Magnetisierungsarbeit mit 555,9 Mk. beteiligt:

Bei Motor II betragen:

die nutzbare Jahresenergie $1182 \cdot 33 = 39\,006$ K.-W.-Stdn.

Die Energieverluste:

durch Ohmschen Widerstand . $1182 \cdot 33 \cdot 0,015 = 585$ „

durch Magnetisierungsarbeit $356 \cdot 24 \cdot 47 \cdot 0,015 = 6\,167$ „

Gesamtjahresenergie $45\,758$ K.-W.-Stdn.

$$\text{Gesamtjahresnutzeffekt: } \frac{39\,006}{45\,758} = 0,852.$$

Daher kostet die Verlustarbeit bei Aufstellung eines Transformators
 $(45\,758 - 39\,006) \cdot 0,09 = 607,7$ Mk.

Daran ist der Aufwand an Kosten durch Ohmschen Widerstand mit 52,6 Mk. und durch Magnetisierungsarbeit mit 555,1 Mk. beteiligt.

Man sieht, daß in diesem Beispiele, trotzdem wegen der hohen Betriebsstundenzahl und einer der normalen ziemlich nahekommenen Belastung die Verhältnisse für Transformatorbetrieb günstig liegen, die Verluste durch Magnetisierungsarbeit doch immerhin noch etwa das zehnfache der Verluste durch Ohmschen Widerstand betragen.

Aus Vorstehendem resultiert, daß man bei dauernd eingeschaltetem Transformator bestrebt sein muß, den Durchschnitts-Jahresnutzeffekt des Transformators möglichst hoch zu erhalten und auf den Nutzeffekt bei maximaler Belastung nicht den Hauptwert legen soll; natürlich ist letzterer mit Rücksicht auf die Spannungsschwankungen, die zwischen hoher und niedriger Belastung auftreten, auch auf das zulässige Maß zu beschränken.

Da die Eisenverluste eine so große Rolle spielen, so soll an diesem Platze auf dieselben etwas näher eingegangen werden. Die Eisenverluste setzen sich aus den Hysteresis- und Wirbelstromverlusten zusammen. Die Wirbelströme sind dadurch bedingt, daß die Kraftliniendichte in einem Eisenkerne, der von einer Wicklung umgeben ist, in welcher ein pulsierender Strom fließt, am Umfange größer als im Innern ist; dadurch entstehen elektrische Potentialdifferenzen zwischen den einzelnen Punkten des Querschnittes und infolgedessen elektrische Ausgleichsströme, sogenannte Wirbelströme, die ihre Energie in Form von Wärme betätigen. Diese Ströme selbst können durch Unterteilung des Eisenkernes und Trennung der verschiedenen Schichten desselben voneinander durch Papierlagen, Oxydschichten oder Anstrich bei entsprechender Wahl dünner Bleche auf ein geringes Maß reduziert werden.

Die Wirbelstromverluste sind nicht nur von der Unterteilung des Eisens, sondern auch von der Periodenzahl c und der Induktion B abhängig. Es sei z. B. bei einer Periodenzahl $c = 60$ und einer maximalen Induktion $B = 5000$ die Blechdicke 0,6 mm; bei $c = 30$ und $B = 4000$ und gleicher Blechdicke sind die im Eisen auftretenden E. M.-Kräfte, welche die Wirbelströme verursachen, nur $\frac{4000 \cdot 30}{5000 \cdot 60} = 0,4$ fach

so groß. Die Verluste sind nur dem Quadrate der E. M. K. proportional und betragen somit nur das 0,16 fache des obigen Wertes.

Sollen die Verluste den gleichen Betrag erreichen wie im ersten Falle, so kann die Blechdicke im Verhältnis $1 : \sqrt[3]{0,16} = \sim 1,84$ größer gewählt werden, da die Verluste mit der dritten Potenz der Blechdicke wachsen. Die Blechstärke wird daher $0,6 \cdot 1,84 = \sim 1,10$ mm. Bei den üblichen geringen Blechstärken sind die Wirbelstromverluste im Verhältnisse zu den Hysteresisverlusten sehr klein, so daß eine gesonderte Behandlung derselben nicht erforderlich ist.

Der Hysteresis (Ummagnetisierungs-) verlust ist in erster Linie von der Induktion, welche das pulsierende Feld während einer Periode aufweist, sodann aber auch von der Periodenzahl c abhängig. Nach Steinmetz drückt sich der Hysteresisverlust in Watt pro cm^3 durch die Formel

$$(2) \dots \dots \dots \alpha \cdot c \cdot B^{1,6} \cdot 10^{-7}$$

aus; α bedeutet einen Koeffizienten, der von der Beschaffenheit des verwendeten Eisens abhängt. Derselbe ist mit der Eisensorte sehr variabel und kann für bestes Schmiedeeisen gleich 0,0020 bis 0,0025 gesetzt werden.

Die Form der Kurve, welche B bzw. N als Funktion der Zeit darstellt, ist nicht von Einfluß auf den Hysteresisverlust¹⁾. Es gibt sehr viele Kurvenformen, welche alle das gleiche Maximum erreichen. Inbezug auf Hysteresisverlust sind dieselben alle gleichwertig, nicht aber inbezug auf die induzierte E. M. K. Es ist daher wichtig zu wissen, welche Kurvenform der von der Wechselstrommaschine erzeugten E. M. K. das kleinste B bzw. N im Transformator bei gleicher effektiver E. M. K. hervorbringt. Eine Untersuchung in dieser Richtung liefert folgendes Resultat:

Für sinusförmigen Verlauf der E. M. K. gilt bekanntlich die unter (1) schon gegebene Beziehung

$$E = 4,44 \cdot c \cdot n \cdot N \cdot 10^{-8},$$

welche den Zusammenhang zwischen E und N darstellt. Ist die Kurve der E. M. K. spitzer wie die Sinuskurve, so ist der Zahlenfaktor in obiger Gleichung größer als 4,44; bei flacherem Verlaufe der Kurve ist er kleiner. Für die Induktion B bzw. für N sind diese Verhältnisse notwendig umgekehrt, und geben somit spitze Kurven der E. M. K. zu geringeren Verlusten im Transformator Anlaß wie abgeflachte.

2. Bestimmung des Wirkungsgrades und der Effektverluste.

Die soeben besprochenen im Transformator auftretenden Effektverluste sowie die durch Ohmschen Widerstand bedingten Verluste lassen sich auf folgende Weise bestimmen:

¹⁾ Siehe Kapp, Transformatoren für Wechselstrom und Drehstrom.

Der Gesamteffektverlust ergibt sich aus der Differenz der Wattmetermessung des primär zugeführten (E_1) und des sekundär verbrauchten Effektes (E_2). Zieht man von diesem Differenzwerte den berechneten Stromwärmeeffekt der Primärwicklung $i_1^2 \cdot r_1$ und der Sekundärwicklung $i_2^2 \cdot r_2$ ab, so erhält man den Hysteresis- und Wirbelstromverlust.

Der Wirkungsgrad η ist gleich dem Verhältnisse des sekundär verbrauchten zu dem primär zugeführten Effekte, d. h.

$$(3) \dots \dots \dots \eta = \frac{E_2}{E_1}.$$

Bei sekundärer induktionsfreier Belastung kann man an Stelle einer Wattmetermessung sekundär auch mittels Volt- und Ampèremeter die Spannung e_2 und die Stromstärke i_2 feststellen. Es besteht sodann die Relation für den Wirkungsgrad:

$$(3) \dots \dots \dots \eta = \frac{E_2}{E_1} = \frac{i_2 \cdot e_2}{E_1} = \frac{i_2 \cdot e_2}{i_1 \cdot e_1 \cdot \cos \varphi}$$

Hierin bedeutet i_1 bzw. e_1 den primären Strom bzw. die primäre Spannung und φ den Winkel der Phasenverschiebung des primären Stromes gegen die primäre Klemmenspannung. Der scheinbar zugeführte Effekt ist $i_1 \cdot e_1$ und das Verhältnis des wirklichen mit dem Wattmeter bestimmten Effektes E_1 zum scheinbaren Effekt, welches als Leistungsfaktor bezeichnet wird, ist

$$(4) \dots \dots \dots \cos \varphi = \frac{E_1}{i_1 \cdot e_1}.$$

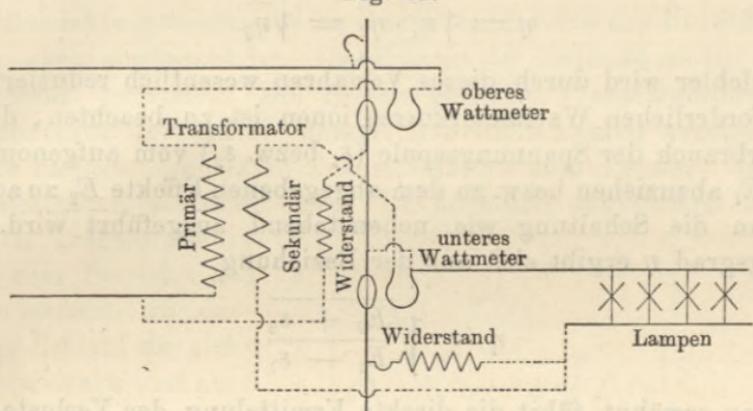
Die Methode der direkten Messung von primärer und sekundärer Energie hat indes den Nachteil, daß Fehler von etwa 2 Proz. in den gemessenen Größen und Ungenauigkeiten nie ausgeschlossen sind. Schon bei Prüfung von Gleichstrommaschinen wurde konstatiert, daß man zu genaueren Resultaten kommt, wenn die Verluste unmittelbar bestimmt werden und daraus der Wirkungsgrad berechnet wird. Der Vorteil der letzteren Bestimmungsart ist um so augenscheinlicher, je größer der Wirkungsgrad, d. h. je kleiner im Verhältnisse die Verluste sind. Der Transformator hat nun unter den in der Technik gebräuchlichen Energieumwandlern den höchsten Wirkungsgrad, und ist es somit besonders wünschenswert, die Verluste bei demselben direkt zu ermitteln. Es ist daher ratsam, den Wirkungsgrad durch folgende Relation

$$(5) \dots \dots \dots \eta = 1 - \frac{E_1 - E_2}{E_1} = 1 - \frac{E_d}{E_1}$$

festzustellen. E_d bedeutet hier den Verlust im Transformator; das Verhältnis $\frac{E_d}{E_1}$ ist von der Größenordnung von etwa 0,03; somit ergibt sich bei einem Fehler von etwa 1 Proz. für die Größe E_d oder E_1 ein solcher für den Wirkungsgrad η im Betrage von etwa 0,03 Proz.

Dieses Ergebnis führt naturgemäß zu der Anwendung der Differentialwattmetermethode von Kenelly¹⁾. Wie aus der untenstehenden Schaltung (Fig. 62) hervorgeht, mißt das obere Wattmeter die eingeleitete, das untere die abgegebene elektrische Energie. Die beweglichen Spulen beider Wattmeter sind nun starr verbunden. Bei gleicher Empfindlichkeit beider Wattmeter entspricht sodann die Ab-

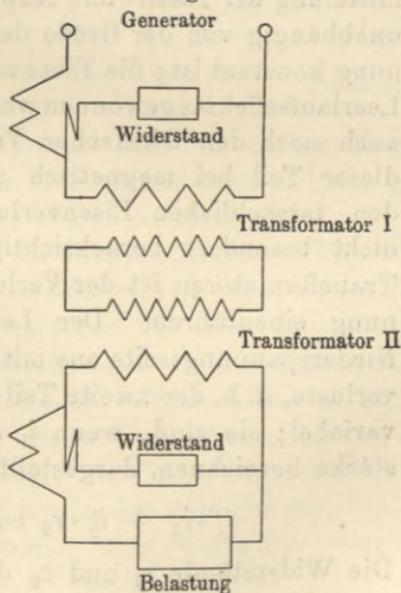
Fig. 62.



lenkung des Torsionskopfes der Differenz der Effekte, d. h. dem gesamten Verluste E_d . Um die gegenseitige Induktion der oberen festen auf die untere bewegliche und der oberen beweglichen auf die untere feste Spule zu eliminieren, werden die Spulen der Wattmeter rechtwinklig gegeneinander aufgestellt und außerdem Hilfsspulen eingeschaltet, durch welche eine Kompensation (der Induktion) bewirkt wird. Die Kompensation sowohl als auch die Abgleichung der Wattmeter durch eingefügte induktionsfreie Widerstände müssen vor jeder Messung erfolgen.

Stehen zwei gleiche Transformatoren zur Verfügung — was in der Praxis ja seltener, in einer elektrotechnischen Fabrik jedoch fast immer der Fall sein wird —, so kann man in folgender Weise vorgehen. Man schaltet die beiden Hochspannungswickelungen gegeneinander (Fig. 63) und mißt an den Niederspannungswickelungen den zugeführten bzw. den geleisteten elektrischen Effekt. Das Verhältnis des geleisteten zum zugeführten Effekte, d. h. der gesamte Wirkungsgrad η_g ist dann dem

Fig. 63.



¹⁾ Siehe Elektrot. Zeitschr. 1893, S. 164.

Produkte der einzelnen Wirkungsgrade (η_1, η_2) der beiden Transformatoren gleich, d. h.

$$\eta_g = \eta_1 \cdot \eta_2,$$

η_1 und η_2 sind als nahezu gleich anzunehmen. Ist ein kleiner Unterschied vorhanden, so ergibt die Wurzel aus η_g als Wirkungsgrad der einzelnen Transformatoren einen Mittelwert aus η_1 und η_2 ,

$$\eta = \sqrt{\eta_1 \cdot \eta_2} = \sqrt{\eta_g}.$$

Der Meßfehler wird durch dieses Verfahren wesentlich reduziert. Bei etwa erforderlichen Wattmeterkorrekturen ist zu beachten, daß der Effektverbrauch der Spannungsspule (ε_1 bzw. ε_2) vom aufgenommenen Effekte E_1 abzuziehen bzw. zu dem abgegebenen Effekte E_2 zu addieren ist, wenn die Schaltung wie nebenstehend ausgeführt wird. Der Wirkungsgrad η ergibt sich aus der Beziehung

$$\eta = \sqrt{\frac{E_2 + \varepsilon_2}{E_1 - \varepsilon_1}}.$$

Wie schon erwähnt, führt die direkte Ermittlung der Verluste behufs Bestimmung des Wirkungsgrades zu genaueren Resultaten als die eben beschriebene Methode; es seien daher diese Methoden hier behandelt.

Die einfachste dieser Methoden beruht auf der getrennten Ermittlung der Eisen- und Kupferverluste. Die ersteren sind so gut wie unabhängig von der Größe der Belastung, sofern nur die primäre Spannung konstant ist; die Eisenverluste können also durch Bestimmung des Leerlaufeffektes gewonnen werden. Allerdings enthält der Leerlaufeffekt auch noch den Ohmschen Verlust durch den Leerlaufstrom, doch ist dieser Teil bei magnetisch geschlossenen Transformatoren gegenüber den tatsächlichen Eisenverlusten verschwindend klein und braucht nicht besonders berücksichtigt zu werden; bei magnetisch offenen Transformatoren ist der Verlust durch Leerlaufstrom (i_e) in die Rechnung einzuführen. Der Leerlaufeffekt wird zweckmäßig von der Niederspannungsseite aus mit einem Wattmeter gemessen. Die Kupferverluste, d. h. der zweite Teil der Effektverluste, sind mit der Belastung variabel; sie sind, wenn i_1 und i_2 die primäre und sekundäre Stromstärke bezeichnen, dargestellt durch:

$$i_1^2 \cdot r_1 + i_2^2 \cdot r_2 \text{ bzw. für Leerlauf durch } i_r^2 \cdot r_1.$$

Die Widerstände r_1 und r_2 der Primär- und Sekundärwicklung werden, wenn nicht schon bekannt, nach einer der üblichen Methoden ermittelt. Die zusammengehörigen Werte der Ströme i_1 und i_2 können für verschiedene Belastungen durch entsprechende Ampèremessungen bestimmt werden.

Hinsichtlich der theoretischen Beziehungen der Abhängigkeit des

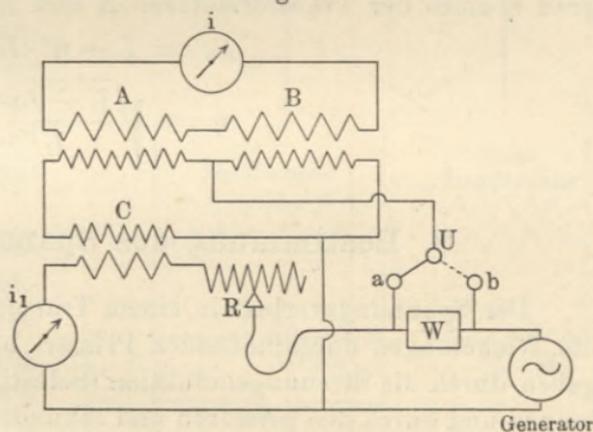
Eisenverlustes von der Spannung und der Wechselzahl verweise ich auf das Heinke'sche, Kapp'sche und Feldmann'sche Werk ¹⁾.

Kapp gibt eine Methode an, bei der die Gesamtverluste direkt bestimmt werden. Die Methode wird analog auch zur Bestimmung der Verluste in Gleichstrommaschinen angewandt. Allerdings müssen in beiden Fällen zwei ganz gleiche Transformatoren bzw. Gleichstrommaschinen unter Annahme gleichen Wirkungsgrades beider Maschinen bzw. Transformatoren vorhanden sein. Bei kleinen Unterschieden im Nutzeffekte gelangt man zu einem Mittelwerte des Nutzeffektes, was häufig auch erwünscht ist. Das Prinzip der Methode ist für die Transformatoren folgendes: Die beiden gleichen Transformatoren werden hintereinander geschaltet, derart, daß die sekundär abgegebene elektrische Energie des ersten Transformators zum Betriebe des zweiten Transformators verwandt wird. Die sekundär abgegebene Energie des zweiten Transformators

wird zum Betriebe des ersten benutzt. Ein derartiger Umlauf der elektrischen Energie ist aber nur möglich, wenn zur Deckung der Verluste in den beiden Transformatoren eine weitere Energiequelle (jedoch nur in der Größenordnung der Verluste) in den Kreis eingefügt wird. Zu dem Zwecke wird die sekundäre Wickelung eines kleinen Transformators mit den beiden Hochspannungswickelungen der zu prüfenden Transformatoren in Serie geschaltet. Die Schaltung ist in folgender Weise auszuführen:

Die Transformatoren *A* und *B* sind zu untersuchen (siehe Fig. 64). Der Spannungsabfall in den beiden Transformatoren wird durch die Spannung des Zusatztransformators *C* kompensiert. Der Spannungsabfall ist eine Funktion des zirkulierenden Stromes *i*. Durch geeignete Regulierung der Spannung von *C* mittels des Widerstandes *R* kann man den normalen Strom *i* erreichen. Da aber die Spannung von *C* nur die Verluste deckt, so muß man auch, um die richtige (normale) Klemmenspannung zu erhalten, die Spulen in der gezeichneten Weise mit den Klemmen des Generators verbinden. Das Wattmeter *W* mißt

Fig. 64.



¹⁾ Heinke, Wechselstrommessungen und magnetische Messungen. — Gisbert Kapp, Transformatoren für Wechselstrom und Drehstrom. — Feldmann, Wirkungsweise, Prüfung und Berechnung der Wechselstromtransformatoren.

in Stellung *a* des Umschalters *U* eine Leistung L_1 , in Stellung *b* eine kleinere Leistung L_2 . L_1 ist der gesamte dem Generator entnommene Effekt, L_2 ist nur der Teil, welcher dem Widerstande *R* und dem Zusatztransformator *C* zugeführt wird. Ist $i_1^2 \cdot R$ der Wattverlust im Vorschaltwiderstande und η' der Wirkungsgrad des Zusatztransformators, so ist die sekundäre Leistung desselben $(L_2 - i_1^2 \cdot R) \cdot \eta'$. Der Generator gibt unmittelbar $L_1 - L_2$ an die Transformatoren *A* und *B* ab. Der gesamte Verlust in den beiden Transformatoren *A* und *B* ist:

$$L_1 - L_2 + (I_2 - i_1^2 \cdot R) \cdot \eta' = L_v.$$

Ist weiter die normale Leistung je eines Transformators (*A* oder *B*) gleich L , so ergibt sich aus der Art der Energieübertragung — da $\eta \cdot L$ die sekundäre Leistung des Transformators *A* (Niederspannungsseite) und zugleich die primäre Leistung des Transformators *B*, $\eta^2 \cdot L$ die sekundäre Leistung von *B* (Hochspannungsseite) ist — der Wirkungsgrad η eines der Transformatoren *A* und *B*, wie folgt:

$$L_v = L - \eta^2 \cdot L$$

$$\eta = \sqrt{\frac{L - L_v}{L}}.$$

3. Bestimmung des Spannungsabfalles.

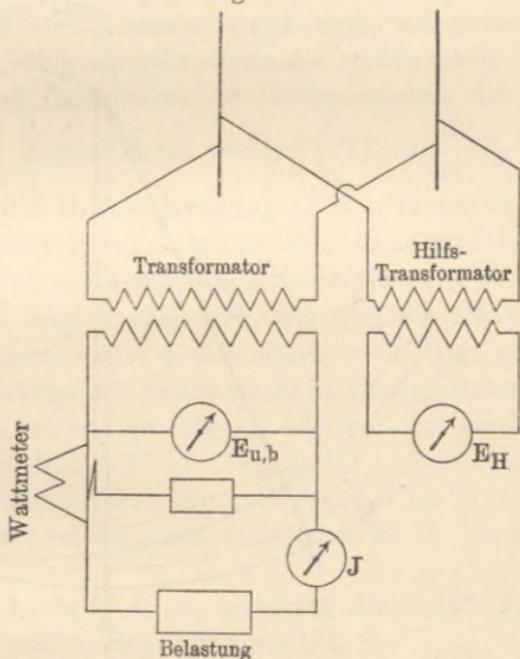
Der Spannungsverlust in einem Transformator, bedingt durch den die Wickelungen durchfließenden Primär- bzw. Sekundärstrom, ist gegeben durch die Streuungsinduktion (Selbstinduktion) in beiden Wickelungen und durch den primären und sekundären Ohmschen Spannungsabfall, der sich jeweils durch das Produkt aus Stromstärke und Widerstand ausdrückt. Der sekundäre Spannungsabfall zwischen Vollast und Leerlauf darf eine gewisse Grenze nicht überschreiten, damit die sekundär angeschlossene Beleuchtungsanlage bei Konstanthaltung der Primärspannung ohne weitere Regulierung keinen zu großen Spannungsschwankungen unterworfen ist. Der Gesamtspannungsverlust im Transformator, der als gleichbedeutend mit dem sekundären Spannungsabfalle zwischen Vollast und Leerlauf angesehen werden kann, da der Spannungsverlust bei Leerlauf praktisch gleich Null ist, beträgt bei guten Konstruktionen und sekundär induktionsfreier Belastung etwa 3 Proz. Ist es möglich, die primäre Spannung konstant zu erhalten, so genügt es, mit einem geeigneten genauen Voltmeter die sekundäre Spannung bei Leerlauf und bei voller Belastung zu messen, und resultiert aus der Differenz beider Voltmeterablesungen der Spannungsabfall. Jedoch ist diese Art der Messung wenig zuverlässig, da man meist für die Konstanz der Primärspannung keine Garantie hat, und außerdem eine genaue direkte Messung der Hochspannung im allgemeinen Schwierigkeiten bereitet. Man nimmt daher zur Bestimmung des

Spannungsabfalles, wenn möglich, einen kleinen Transformator von gleichem Übersetzungsverhältnisse zu Hilfe (siehe Fig. 65). Der zu untersuchende und der Hilfstransformator werden mit ihren Hochspannungswickelungen parallel an das Primärnetz angeschlossen und an ersterem sekundär die Belastungsstromstärke J , die Spannung E und der Leistungsfaktor $\cos \varphi$ durch die entsprechenden Instrumente bestimmt. Ist die Ablesung der sekundären Spannung am Versuchstransformator E_u im unbelasteten und E_b im normal belasteten Zustande, sowie E_H die sekundäre Spannung am Hilfstransformator, bezeichnet d_1 den Unterschied der Ablesungen E_u und E_H , d_2 denjenigen von E_b und E_H , so ist $d_2 - d_1$ gleich dem Spannungsabfalle des Versuchstransformators infolge Belastung. Es ist nur erforderlich, die beiden Voltmeter jeweils zu gleicher Zeit abzulesen. Die Werte des Spannungsabfalles können als Funktion der Belastungsstromstärke für induktionsfreie und induktive Belastung ermittelt und dargestellt werden.

Die Methode von Scatertgood ist auch zu empfehlen, sobald man einen Normaltransformator zur Verfügung hat. Es möge genügen, auf den betreffenden Aufsatz in der Zeitschrift „Electrician“, 1893, bzw. der „Elektrot. Zeitschr.“ 1894, S. 104 hinzuweisen.

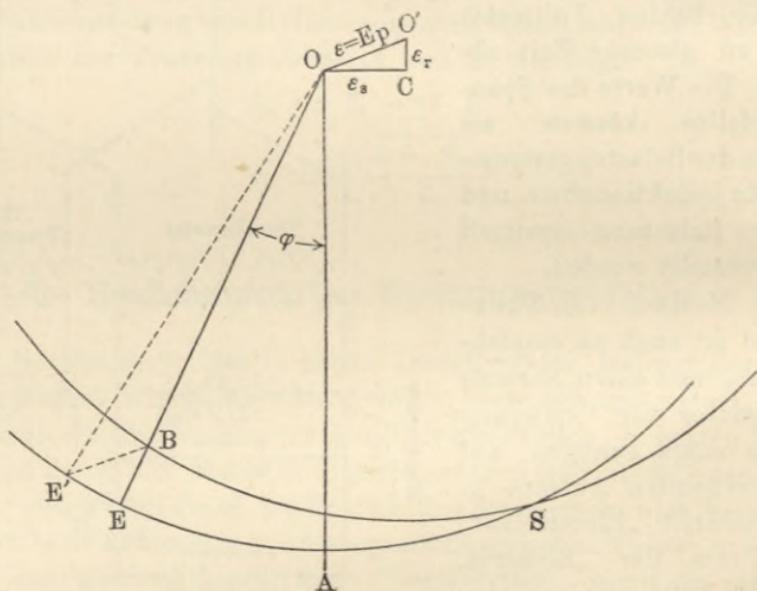
In sehr einfacher Weise läßt sich der Spannungsabfall zwischen Vollast und Leerlauf für verschiedene Phasenverschiebung nach der Kappschen Methode graphisch darstellen. Der große Vorteil dieser Darstellung beruht darin, daß nur ein einfacher Kurzschlußversuch durchzuführen ist. Die sekundäre Wickelung des Transformators wird durch ein Ampèremeter kurz geschlossen, wobei naturgemäß die Primärspannung entsprechend niedrig zu halten ist. Die letztere wird sodann so eingestellt, daß der sekundäre Strom J_s seine normale Stärke annimmt. Die hierbei gemessene Primärspannung sei E_p . Man kann nun annehmen, daß bei demselben Belastungsstrom — unabhängig von der Größe der Spannung — der Gesamtspannungsverlust ε der beiden Spulen, herrührend von den beiden Streuungsinduktionen und den beiden Ohmschen Widerständen der Spulen, konstant sei, somit auch gleich demjenigen bei Kurzschluß und, da hierbei die sekundäre

Fig. 65.



Klemmenspannung $E_s = 0$ ist, gleich der bei Kurzschluß gemessenen Primärspannung E_p sei. Es sei hierzu bemerkt, daß es eine bei Transformatorproblemen übliche und sehr zweckmäßige Vereinfachung ist, sämtliche Spannungs- und Stromgrößen auf das Übersetzungsverhältnis (Verhältnis der Windungszahlen) 1:1 zu reduzieren, d. h. entweder alle Größen in Hochspannung oder alle in Niederspannung auszudrücken; man kann dann primäre und sekundäre Größen rechnerisch und graphisch zusammensetzen. In diesem Sinne kann man auch sagen, daß die primär gemessene Spannung E_p gleich der Summe aus primärem und sekundärem Spannungsverluste sei, wobei die Niederspannungsgrößen auf Hochspannung reduziert seien durch Vergrößerung im Verhältnisse $\frac{h}{n}$;

Fig. 66.



hierbei bedeuten h und n die entsprechenden Windungszahlen der Hochspannungs- bzw. Niederspannungswickelung. Ist ε_s die E. M. K. der Streuungsinduktionen (primär plus sekundär) und ε_r der gesamte Ohmsche Spannungsabfall (primär plus sekundär), so kann man, wie oben schon erwähnt, setzen:

$$(6) \dots \dots \dots E_p = \sqrt{\varepsilon_s^2 + \varepsilon_r^2} = \varepsilon.$$

Die Größen ε_s und ε_r sind geometrisch zusammensetzen, indem ε_s stets normal zum Belastungsstrom gerichtet ist, ε_r dagegen in die Richtung desselben fällt. Hierbei ist die Annahme gemacht, daß Primär- und Sekundärstrom um 180° gegeneinander verschoben seien, was für Vollbelastung zulässig ist. Somit fallen auch die primären und sekundären Teilbeträge von ε_r bzw. ε_s praktisch in gleiche Richtung und addieren sich algebraisch.

Es sei in dem Diagramme OA die sekundäre Stromstärke nach

Größe und Richtung, OB die sekundäre Klemmenspannung, unter dem Winkel φ gegen den Strom verschoben. Das Dreieck des Spannungsverlustes $OC O'$ — in Hochspannung ausgedrückt — ist vollständig bestimmt durch E_p und ε_r . Der letztere Wert ergibt sich aus den schon bekannten oder noch zu ermittelnden Widerständen der beiden Wickelungen r_p und r_s und den bei Kurzschluß gemessenen normalen Belastungsstromstärken J_p und J_s zu

$$(7) \quad \varepsilon_r = J_p \cdot r_p + \frac{h}{n} \cdot J_s \cdot r_s.$$

Ist das Übersetzungsverhältnis $\frac{h}{n}$ nicht schon aus den Dimensionen des Transformators bekannt, so läßt es sich leicht durch einen Leerlaufversuch als Verhältnis der beiden Klemmenspannungen mit großer Annäherung gewinnen. ε_s ergibt sich als dritte Seite des rechtwinkligen Dreiecks. Natürlich muß auch OB mit dem auf Hochspannung reduzierten Werte in das Diagramm eingezeichnet werden ($OB = \frac{h}{n} \cdot E_s$).

Aus OB und $O O'$ ergibt sich die Primärspannung $O' B$. Trägt man $BE = O O'$ nach Größe und Richtung bei B an, so ist $O' B$ auch gleich $O E' = O E$. In praktischen Fällen ist nun die Primärspannung $O E$ als konstant zu betrachten, und fragt es sich nun, wie sich die sekundäre Spannung OB mit dem Phasenwinkel φ verändert. — E liegt auf einem Kreise um O . Da ε bei konstantem (normalem) Belastungsstrom nach Größe und Richtung konstant ist, so liegt B offenbar auf einem zweiten Kreise mit demselben Radius $O E = O E'$ um O' . BE stellt für variables φ jeweils den arithmetischen Spannungsabfall im Transformator oder zwischen Vollast und Leerlauf (ausgedrückt in Hochspannung) dar.

Liegt OB rechts von der Linie OA , so bedeutet dies, daß der sekundäre Strom gegen die sekundäre Spannung voreilt.

Die beiden Kreise schneiden sich im Punkte S , der im Gebiete der Phasenvoreilung des Stromes liegt. Für den diesem Punkte entsprechenden Wert der Phasenverschiebung ist der Spannungsabfall $= 0$; jenseits dieses Punktes übersteigt (bei wachsender Phasenverschiebung) die sekundäre Klemmenspannung die primäre, d. h. der Spannungsabfall wird negativ.

4. Rechnerische Untersuchung eines Transformators.

Die Durchführung der Experimente behufs Untersuchung eines Transformators ist einfach, solange genau geeichte Apparate in der erforderlichen Zahl und Größe zur Verfügung stehen; dies ist jedoch in der Praxis nicht immer der Fall; man sucht häufig mit den vorhandenen Meßinstrumenten ein Resultat zu erzielen und hegt alsdann den Wunsch, dieses Ergebnis, falls die Daten des Transformators zu

ermitteln sind, rechnerisch zu kontrollieren. Häufig muß man sich auch mit der Rechnung ¹⁾ allein zufrieden geben.

Es seien daher die Hauptformeln und weiter unten ein Beispiel zur rechnerischen Bestimmung eines Transformators im folgenden gegeben.

Es bezeichnen:

n_1 die Zahl der Windungen primär.

n_2 die Zahl der Windungen sekundär.

r_1 Widerstand der Wickelung primär.

r_2 Widerstand der Wickelung sekundär.

i_1 Stromstärke primär in Ampère.

i_2 Stromstärke sekundär in Ampère.

i_0 wattloser (Erreger-)Strom in Ampère.

$i_0 \cdot \sqrt{2}$ Maximalwert desselben.

i_e Wattkomponente des Leerlaufstromes (zur Deckung der Hysteresis- und Wirbelstromverluste und der Kupferverluste).

l_m mittlere magnetische Länge des Kraftlinienweges in cm.

H Maximalwert der magnetisierenden Kraft.

α Koeffizient der Hysteresis für Eisen. (Derselbe ist bei guten Eisenblechen $0,0025 \div 0,0027$; sonst $0,0031 \div 0,0034$.)

μ Permeabilität des Eisens.

B Maximalwert der Kraftliniendichte pro cm^2 .

N Maximalwert der Kraftlinienzahl.

E_{max} Maximalwert der in einer Wickelung induzierten E. M. K.

E der mittels Voltmeter bestimmte (effektive) Mittelwert der E. M. K.

c die Periodenzahl.

$\omega = 2\pi c$ die Polwechselgeschwindigkeit.

Vol. das Volumen des Eisenkernes (ohne Isolation) in cm^3 .

l_g mittlere geometrische Länge desselben in cm.

Q der effektive Eisenquerschnitt in cm^2 .

δ die Höhe einer Wickelung.

Es bestehen sodann unter Voraussetzung sinusförmigen Verlaufes der E. M. K. folgende Relationen:

$$(8) \quad \dots \quad E_{max} = n_1 \cdot N \cdot \omega \quad (\text{in C. G. S.-Einheiten})$$

$$(9) \quad \dots \quad E = \frac{E_{max}}{\sqrt{2}} = \frac{n_1 \cdot N \cdot \omega \cdot 10^{-8}}{\sqrt{2}} \text{ Volt.}$$

Da ferner $\omega = 2\pi c$ und $B = \frac{N}{Q}$ ist, so resultiert für B :

$$(10) \quad \dots \quad B = \frac{2,25 \cdot E \cdot 10^8}{c \cdot n_1 \cdot Q}.$$

¹⁾ Siehe hierüber auch Cl. P. Feldmann, Wechselstromtransformatoren.

Ferner besteht für H die Relation:

$$(11) \dots H = \frac{B}{\mu} = \frac{4\pi}{10} \cdot \frac{n_1 \cdot (i_0 \sqrt{2})}{l_m}$$

Danach drückt sich der Effektivwert des Erregerstromes aus als:

$$(12) \dots i_0 = \frac{0,8 \cdot B \cdot l_m}{\sqrt{2} \cdot \mu \cdot n_1} = 0,563 \frac{B \cdot l_m}{\mu \cdot n_1}$$

l_m ist von l_g etwas verschieden, da die Kraftliniendichte im Querschnitt des Eisens nicht überall gleich, vielmehr am inneren Umfang

Fig. 67.

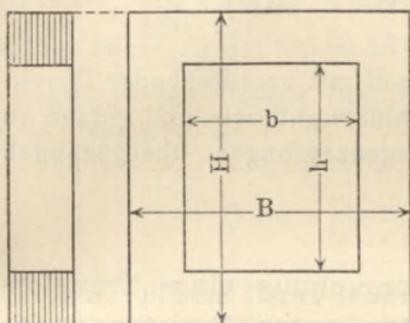
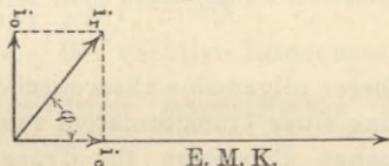


Fig. 68.



des Eisenringes — entsprechend dem kürzeren Kraftlinienwege — größer ist. Bedeuten in der nebenstehenden Skizze (Fig. 67) eines Eisenkernes von rechteckigem Querschnitte B und b die äußere bzw. innere Breite, H und h die äußere bzw. innere Höhe, so ist

$$l_g = H + h + B + b,$$

und

$$(13) \dots l_m = 2 \left(\frac{H - h}{\log \text{nat} \frac{H}{h}} + \frac{B - b}{\log \text{nat} \frac{B}{b}} \right)$$

Der Unterschied zwischen beiden Werten ist im allgemeinen nicht bedeutend und wird vielfach die mittlere geometrische Länge für die mittlere magnetische eingesetzt.

Die zweite Komponente des Leerlaufstromes, der sogenannte Wattstrom, dient zur Überwindung der Leerlaufverluste durch Hysterisis, Wirbelströme und Kupferwiderstand; dieser letztere Teil ist gegenüber den beiden ersteren Teilen unbedeutend. Während der wattlose Strom in der Phase um 90° gegen die erzeugte E.M.K. verschoben ist, fällt der Wattstrom in die Richtung derselben (s. Fig. 68). Der Wattstrom stellt sich dar durch den Quotienten

$$(14) \dots \frac{\text{Leerlaufverluste durch Eisen- und Kupferverluste}}{\text{E. M. K.}}$$

Die beiden Stromkomponenten setzen sich zusammen zum gesamten Leerlaufstrom (s. auch S. 154).

$$(15) \dots i_r = \sqrt{i_0^2 + i_e^2}$$

Der Eisenquerschnitt bestimmt sich aus

$$Q = \frac{\text{Vol.}}{l_g}$$

(sofern der Querschnitt des Joches derselbe wie der des Magnetkernes ist).

Der Hysteresisverlust ist nach Ch. P. Steinmetz

$$(16) \quad E_{hyst} = \alpha \cdot B^{1,6} \cdot c \cdot \text{Vol.} \cdot 10^{-7} \text{ Watt (s. auch S. 157)}$$

und der Wirbelstromverlust

$$(17) \quad E_w = \left(\frac{\delta \cdot c \cdot B}{2,5 \cdot 10^6} \right)^2 \cdot \text{Vol.} \quad \text{Watt}$$

Dieser allgemeine theoretische Teil soll mit nachstehender Durchrechnung eines Transformators zum Abschlusse gebracht und sodann zu praktischen Beispielen für Transformatorprüfungen übergegangen werden.

Beispiel für die rechnerische Untersuchung eines Transformators nach den Konstruktionsdaten unter Benutzung der oben abgeleiteten Formeln.

Der zu untersuchende Transformator von 20 K.-W. Leistung wurde mir seiner Zeit von einer französischen Gesellschaft zur Berechnung und Begutachtung überwiesen. Die Daten des Transformators sind folgende:

Äußere Breite $B = 490$ mm, innere Breite $b = 150$ mm.

Äußere Höhe $H = 830$ mm, innere Höhe $h = 490$ mm.

Zahl der primären Windungen $n_1 = 154$ (je 2 Spulen von 77 Windungen hintereinander; dies viermal parallel geschaltet; insgesamt 616 Windungen).

Zahl der sekundären Windungen $n_2 = 4$ (2 Spiralen von je 4 Windungen, parallel).

Durchmesser des nackten Primärdrahtes 5 mm, Querschnitt $q = 19,63$ qmm.

Querschnitt des nackten Sekundärkupferbandes $q = 90 \times 15 = 1350$ qmm.

Eisenkerngewicht 280 kg.

Die primäre Spannung, für die der Transformator bestimmt ist, beträgt 250 Volt. Unter der Annahme, daß die Verluste des Transformators maximal 4 Proz. betragen, müßten primär 20 800 Watt geleistet werden; es resultiert somit eine primäre Stromstärke von

$$i_1 = \frac{20\,800}{250} = 83,2 \text{ Amp.}$$

bei induktionsfreier Belastung. Die sekundäre Stromstärke ist somit annähernd

$$i_2 = i_1 \cdot \frac{n_1}{n_2} = \frac{83,2 \cdot 154}{4} = 3200 \text{ Amp.};$$

i_2 wird in Wirklichkeit etwas kleiner sein (mit Rücksicht auf den primär aufzuwendenden Leerlaufstrom), etwa 3150 Amp. Die genauere Kenntnis von i_1 und i_2 ist nicht erforderlich, da dieselben in der folgenden Berechnung nur zur Bestimmung von Verlusten verwendet werden. Das Volumen des Eisenkernes ergibt sich als Quotient aus dem Kerngewichte und dem spezifischen Gewichte des Eisens zu $\frac{280 \cdot 10^3}{7,79} = \sim 36\,000 \text{ cm}^3$. Der effektive Eisenquerschnitt berechnet sich somit bei einer mittleren geometrischen Länge $l_g = 185,5 \text{ cm}$ zu

$$Q = \frac{\text{Vol.}}{l_g} = \frac{36\,000}{185,5} = 194 \text{ qcm.}$$

Die mittlere Länge einer sekundären Windung beträgt 0,72 m; die Gesamtlänge von vier Windungen $4 \cdot 0,72 = \sim 2,9 \text{ m}$, mit Zuleitung von 0,3 m ergibt sich eine Länge von 3,2 m.

Das entsprechende Kupfergewicht ist $0,135 \times 64 \times 9 = 78 \text{ kg}$.

Die mittlere Länge einer primären Windung beträgt 0,88 m; die Länge einer Wickelung $0,88 \cdot 77 + 2 = \sim 70 \text{ m}$.

Gesamtlänge der primären Wickelungen = $8 \cdot 70 = 560 \text{ m}$;
Kupfergewicht 99 kg.

Gesamtwiderstand der sekundären Wickelung in besagter Schaltung

$$r_2 = \frac{3,2}{55 \cdot 1350 \cdot 2} = 0,000\,021\,5 \text{ Ohm.}$$

Gesamtwiderstand der primären Wickelung:

$$r_1 = \frac{70 \cdot 2}{55 \cdot 19,63 \cdot 4} = 0,0324 \text{ Ohm.}$$

Der primäre Ohmsche Spannungsverlust ε_1 beträgt

$$\varepsilon_1 = 0,0324 \cdot 83,2 = 2,7 \text{ Volt (= 1,08 Proz.)}$$

Wir setzen induktionslose Belastung voraus. Vernachlässigen wir in diesem Falle den Einfluß der Streuung, welcher gering ist, so resultiert für die primäre E. M. K.:

$$250 - 2,7 = 247,3 \text{ Volt.}$$

Die entsprechenden sekundären Werte sind:

$$\varepsilon_2 = 0,000\,021\,5 \cdot 3150 = 0,0675 \text{ Volt (= 1,05 Proz.)}$$

Die sekundäre E. M. K. ist

$$247,3 \cdot \frac{4}{154} = 6,423 \text{ Volt};$$

unter Vernachlässigung des Einflusses der sekundären Streuung darf man setzen:

$$\begin{aligned} \text{Sekundäre Klemmenspannung} &= 6,423 - 0,0675 = 6,3555 \text{ Volt} \\ &= \sim 6,356 \text{ Volt.} \end{aligned}$$

Der gesamte prozentuale Spannungsverlust bei induktionsfreier Belastung ist somit etwa

$$1,08 \text{ Proz.} + 1,05 \text{ Proz.} = 2,13 \text{ Proz.}$$

Für den Maximalwert der Kraftliniendichte besteht die Relation (siehe Formel (10), S. 166):

$$B = \frac{2,25 \cdot E \cdot 10^8}{c \cdot n_1 \cdot Q} = \frac{2,25 \cdot 247,3 \cdot 10^8}{50 \cdot 154 \cdot 194} = \sim 3725.$$

Der Hysteresisverlust ergibt sich aus der oben gegebenen Formel (s. Formel (16), S. 168) zu:

$$\begin{aligned} E_{hyst} &= \alpha \cdot B^{1,6} \cdot c \cdot \text{Vol.} \cdot 10^{-7} = 0,0029 \cdot 3725^{1,6} \cdot 50 \cdot 36000 \cdot 10^{-7} \\ &= 270 \text{ Watt.} \end{aligned}$$

Der Verlust durch Wirbelströme beträgt (bei $\delta = 6 \text{ mm}$) nach Formel (17):

$$E_w = \left(\frac{\delta \cdot c \cdot B}{2,5 \cdot 10^6} \right)^2 \cdot \text{Vol.} = \left(\frac{0,6 \cdot 50 \cdot 3725}{2,5 \cdot 10^6} \right)^2 \cdot 36000 = 72 \text{ Watt.}$$

Der gesamte Leerlaufverlust ist somit

$$270 + 72 = 342 \text{ Watt.}$$

Der Ohmsche Verlust in der Primärwicklung ist

$$0,0324 \cdot 83,2^2 = 224 \text{ Watt,}$$

der Ohmsche Verlust in der Sekundärwicklung

$$0,000\,0215 \cdot 3150^2 = 213 \text{ Watt.}$$

Die in Richtung der primären E. M. K. (247,3 Volt) fallende Komponente i_e des Leerlaufstromes (Wattkomponente) hat nach Formel (14), S. 167, den Wert

$$i_e = \frac{\text{Eisenverlust}^1)}{\text{E. M. K.}} = \frac{342}{247,3} = 1,38 \text{ Amp.}$$

¹⁾ Der Kupferverlust war vernachlässigbar.

Der Erregerstrom (wattlose Komponente) ist (für einen Wert $\mu = 1550$) nach Formel (12), S. 167:

$$i_0 = \frac{0,8 \cdot B \cdot l_m}{\sqrt{2} \cdot \mu \cdot n_1} = \frac{0,8 \cdot 3725 \cdot 184}{\sqrt{2} \cdot 1550 \cdot 154} = 1,62.$$

Der gesamte Leerlaufstrom i_r setzt sich nach Formel (15), S. 167, zusammen aus i_e und i_0 :

$$i_r = \sqrt{i_e^2 + i_0^2} = \sqrt{1,38^2 + 1,62^2} = 2,104 \text{ Amp.}$$

Die gesamte primäre Leistung ergibt sich aus der sekundären Leistung 20 000 Watt und den Verlusten

$$W_1 = 20\,000 + 342 + 224 + 213 = 20\,779.$$

Der Wirkungsgrad η ist sodann:

$$\eta = \frac{W_2}{W_1} = \frac{20\,000}{20\,779} = 96,2 \text{ Proz.}$$

Erstes Beispiel.

Untersuchung eines Transformators von 1,4 K.-W. nach der Kenellyschen Methode (s. S. 159)¹⁾.

Die Verluste des Transformators wurden für verschiedene Belastungen mit dem Differentialwattmeter gemessen. Bei der Versuchsreihe waren zur Abgleichung in dem Nebenschlusse des primären Teiles des Wattmeters 19480 Ω , im sekundären Teile 3735 Ω induktionsfreier Widerstand vorgeschaltet. Bei offenem Sekundärkreise erfolgte die Ablenkung nur durch das obere Wattmeter; bei Belastung vergrößerte sich der Ausschlag entsprechend den zunehmenden Verlusten im Transformator. Die Kalibrierung des Wattmeters war derart, daß einem Grad Torsion ein Watt entsprach. Die Belastung des Transformators war induktionsfrei (Glühlampen). Durch gleichzeitige Beobachtung des Primär- und des Sekundärstromes konnte der Wattverlust in den Wickelungen des Transformators durch Ohmschen Widerstand berechnet werden. Aus diesem und der durch Wattmeterablesung gewonnenen Energiemenge resultierte sodann als Differenz beider der Hysteresis- und Wirbelstromverlust. Zur Ermittlung der sekundären Leistung wurde außerdem die Sekundärspannung gemessen. Der Wirkungsgrad ergab sich schließlich aus sekundärer Leistung und dem Gesamtverluste. Die gemessenen bzw. berechneten Größen sind in folgender Tabelle zusammengestellt.

¹⁾ Siehe auch E. T. Z. 1893. S. 164.

Ablenkung der Nadel Grad	Primärstromstärke Ampère	Energieverlust Watt	Sekundärstromstärke Ampère	Sekundärspannung Volt	Sekundärleistung Watt	Kupferverlust, primär und sekundär Watt	Hysteresis und Wirbelstromverluste Watt	Wirkungsgrad Proz.
91,0	0,10	91,0	—	52,4	—	0,1	90,3	0,000
91,0	0,25	91,0	2,046	52,4	107	0,7	90,3	0,540
92,0	0,30	92,0	4,092	52,3	214	1,1	90,9	0,699
93,0	0,40	93,0	7,818	51,6	404	2,5	90,5	0,813
95,0	0,60	95,0	11,460	51,5	590	4,5	90,5	0,861
99,0	0,79	99,0	15,280	51,0	779	9,4	89,6	0,887
110,0	1,13	110,0	21,320	50,3	1072	19,5	90,5	0,907
127,5	1,55	127,5	28,440	50,0	1422	36,0	91,4	0,918
91,0	0,10	91,0	—	52,4	—	0,1	90,4	0,000

Zweites und drittes Beispiel.

Im folgenden gebe ich je ein Prüfungsergebnis eines Einphasentransformators der Type *Tme* 14 und eines Drehstromtransformators der Type *Tmd* 14 der E. A. G. vorm. Schuckert u. Co. Jedes Beispiel ist für den täglichen und jährlichen Wirkungsgrad unter Annahme einer bestimmten Tagesbelastung durchgerechnet.

I. Die Daten des Einphasentransformators sind:

Maximale sekundäre Leistung $117 \text{ Amp.} \times 120 \text{ Volt} = 14040 \text{ Watt.}$

Spannung, primär $e_1 . . = 3600 \text{ Volt}$

„ sekundär $e_2 . = 120 \text{ „}$

Stromstärke, primär $i_1 . = 4,026 \text{ Amp.}$

„ sekundär $i_2 = 117 \text{ „}$

Widerstand, primär $r_1 . = 6,4 \text{ Ohm}$ } bei einer Raumtemperatur
 „ sekundär $r_2 = 0,00629 \text{ Ohm}$ } von 28° C.

Die Messungen ergaben folgendes:

Die Prüfspannung der Hochspannungswickelung gegen Eisen und Niederspannungswickelung war 7000 Volt.

Das Übersetzungsverhältnis bei unbelastetem Transformator 3600 Volt primär: 122 Volt sekundär.

Der Spannungsabfall — in Hochspannung ausgedrückt — wurde zu 50,2 Volt, d. h. 1,4 Proz. von der Primärspannung bei induktionsfreier Belastung gemessen. Annähernd berechnet sich derselbe auch aus den normalen Stromstärken primär und sekundär und aus den

Widerständen nach Formel¹⁾ (7), S. 165 als Ohmscher Spannungsabfall zu:

$$6,4 \cdot 4,026 + 0,00629 \cdot 117 \cdot \frac{3600}{122} = 47,5 \text{ Volt.}$$

Daß der so berechnete Wert etwas zu klein ist, ergibt sich leicht, wenn man die Konstruktion (Fig. 66) für die Phasenverschiebung $\varphi = 0$ ausführt.

Die Kurzschlußspannung wurde zu 69 Volt, d. h. 1,92 Proz. von der Primärspannung gemessen. Nebenstehende Fig. 69 diene zur Erläuterung der Ausführungen. Die genannten Spannungsgrößen sind daselbst eingetragen.

Durch Subtraktion des Spannungsabfalles 50,2 Volt von der Primärspannung ergibt sich eine sekundäre Klemmenspannung von

$$(3600 - 50,2) \frac{122}{3600} = 120,3 \text{ Volt.}$$

Der durch den Leerlaufversuch als zugeführter Effekt ermittelte Verlust durch Hysterese und Wirbelströme beträgt 241,5 Watt. Derselbe ist gemessen an der Niederspannungsseite bei offener Hochspannungswicklung und bei einem Leerlaufstrom von 3,45 Amp. (Der Ohmsche Verlust durch den Leerlaufstrom ist unbedeutend, wie schon oben bemerkt, und braucht nicht berücksichtigt zu werden.)

Die Kupferverluste primär und sekundär berechnen sich zu

$$(6,4 \cdot 4,026^2 + 0,00629 \cdot 117^2) = 189,7 \text{ Watt.}$$

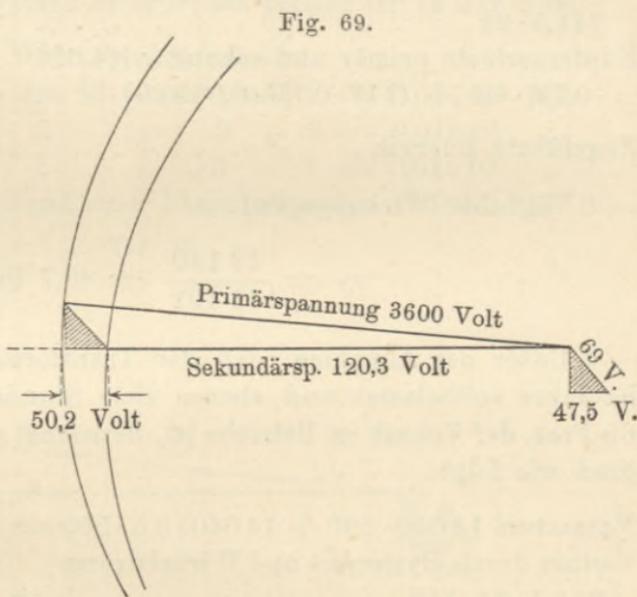
Die maximale primäre Leistung ist:

$$14040 + 241,5 + 189,7 = 14471,2 \text{ Watt.}$$

Der Wirkungsgrad bei Vollbelastung ist somit

$$\eta = \frac{14040}{14471,2} = 97 \text{ Proz.}$$

¹⁾ In derselben bedeuten: $J_p = i_1$, $r_p = r_1$, $J_s = i_2$, $r_s = r_2$, $\varepsilon_r =$ Ohmscher Spannungsabfall und $\frac{h}{n} =$ Übersetzungsverhältnis.



Nach dauernder Vollbelastung wurden mittels des Thermometers die Temperaturen an verschiedenen Teilen des Transformators festgestellt; sämtliche Werte blieben unter 50° C.

Der tägliche Wirkungsgrad in den Monaten des größten Lichtbedarfes unter der Annahme, daß die Belastung des Transformators täglich (innerhalb 24 Stunden) etwa 5 Stunden im Mittel mit 70 Proz. der Vollast dauert, ist, wie folgt, zu ermitteln:

Nutzarbeit $14040 \cdot 0,7 \cdot 5$	=	49 140	Wattstunden
Verlust durch Hysterese und Wirbelströme $241,5 \cdot 24$	=	5 796	"
Kupferverluste primär und sekundär $[(4,026$ $\cdot 0,7)^2 \cdot 6,4 + (117 \cdot 0,7)^2 \cdot 0,006 29] \cdot 5$	=	465	"
Zugeführte Energie	=	<u>55 401</u>	Wattstunden

Täglicher Wirkungsgrad:

$$\eta_t = \frac{49\ 140}{55\ 401} = 88,7 \text{ Proz.}$$

Unter der Annahme, daß der Transformator etwa 500 Stunden im Jahre vollbelastet und ebenso viele Stunden durchschnittlich mit 60 Proz. der Vollast im Betriebe ist, berechnet sich der Jahreswirkungsgrad wie folgt:

Nutzarbeit $14\ 040 \cdot 500 + 14\ 040 \cdot 0,6 \cdot 500$ =	11 232 000	Wattstunden	
Verlust durch Hysterese und Wirbelströme $241,5 \cdot 24 \cdot 365$	=	2 115 540	"
Kupferverlust primär und sekundär $[189,7$ $+ (4,026 \cdot 0,6)^2 \cdot 6,4 + (117 \cdot 0,6)^2$ $\cdot 0,006 29] \cdot 500$	=	<u>129 000</u>	"
Zugeführte Energie	=	13 476 540	Wattstunden

Jahreswirkungsgrad:

$$\eta_j = \frac{11\ 232\ 000}{13\ 476\ 540} = 83,3 \text{ Proz.}$$

Aus diesen Resultaten geht, wie schon gesagt, hervor, daß der Tages- bzw. Jahreswirkungsgrad lediglich durch die Hysterese- und Wirbelstromverluste fällt. Dieser Faktor muß bei einer Zentrale mit Wechsel- oder Drehstrom wohl berücksichtigt werden.

II. Die Daten des Drehstromtransformators (mit Sternschaltung) sind:

$$\begin{aligned} \text{Maximale sekundäre Leistung } \sqrt{3} \times 115 \text{ Volt} \times 70,2 \text{ Amp.} &= \\ &= \sim 14\ 000 \text{ Watt.} \end{aligned}$$

Spannung primär 4900 Volt zwischen den Leitungen

„ sekundär 115 „ „ „ „

Stromstärke primär 1,72 Amp.

„ sekundär 70,2 „

Widerstand primär:

gemessen zwischen den Klemmen 1 und 2 = 28,42 Ohm,

„ „ „ „ 2 „ 3 = 28,56 „

„ „ „ „ 3 „ 1 = 28,44 „

d. h. der mittlere Widerstand einer Phase primär ist 14,237 Ohm.

Widerstand sekundär:

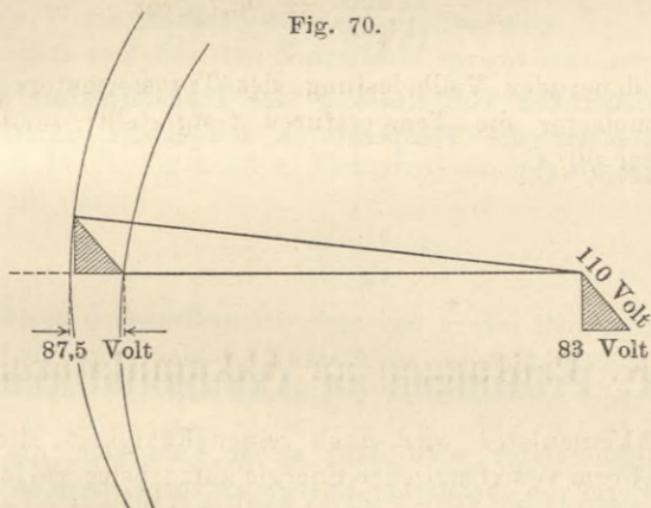
gemessen zwischen den Klemmen 1 und 2 = 0,016 00 Ohm

„ „ „ „ 2 „ 3 = 0,016 05 „

„ „ „ „ 3 „ 1 = 0,016 05 „

d. h. der mittlere Widerstand einer Phase sekundär ist 0,008 017 Ohm.

Fig. 70.



Die Übersetzung bei Leerlauf ist

4900 Volt primär: 118 Volt sekundär für jede der drei Messungen zwischen den Leitungen.

Die Prüfungsspannung der Hochspannungswickelung gegen Eisen und Niederspannungswickelung betrug 8000 Volt.

Der Spannungsabfall, zwischen den Außenleitern gemessen, betrug bei induktionsfreier Belastung in Hochspannung 87,5 Volt, das heißt 1,8 Proz.; die Kurzschlußspannung war 110 Volt oder 2,25 Proz.

Der Ohmsche Spannungsverlust zwischen den Außenleitern hatte den Wert:

$$\left(1,72 \cdot 14,237 + 70,2 \cdot 0,008\ 017 \frac{4900}{118}\right) \cdot \sqrt{3} = \sim 83 \text{ Volt.}$$

Zur Veranschaulichung dieser Verlustgrößen ist wiederum das Spannungsdiagramm beigelegt, s. Fig. 70.

Der Hysteresis- und Wirbelstromverlust, gemessen als zugeführter Leerlaufeffekt an der Niederspannungsseite (bei offener Hochspannungswicklung), beträgt 230 Watt; die hierbei gemessenen Leerlaufströme sind:

1,6	Amp.	in	der	ersten	Phase,
2,1	"	"	"	zweiten	"
2,1	"	"	"	dritten	"

Der Kupferverlust (primär und sekundär) ergibt sich aus den Maximalwerten der Ströme (1,72 und 70,2) und den Widerständen der Wicklungen (14,237, 0,008 017) zu $(1,72^2 \cdot 14,237 + 70,2^2 \cdot 0,008 017) \cdot 3 = 245$ Watt.

Die maximale primäre Leistung ist:

$$14\,000 + 230 + 245 = 14\,475 \text{ Watt,}$$

der entsprechende Wirkungsgrad:

$$\eta = \frac{14\,000}{14\,475} = 96,7 \text{ Proz.}$$

Nach dauernder Vollbelastung des Transformators wurden mit dem Thermometer die Temperaturen festgestellt; sämtliche Werte blieben unter 50° C.

K. Prüfungen an Akkumulatoren.

Der Akkumulator wird dank seiner Fähigkeit, die elektrische Energie in Form von chemischer Energie aufzuspeichern, in elektrischen Zentralen zum Ausgleich für die schwankende Tagesbelastung und zur Lieferung der Energie zu gewissen Tages- und Nachtstunden während Außerbetriebsetzung der Maschinenaggregate verwendet. Derselbe kann nur Gleichstrom aufnehmen und gibt eben solchen bei Entladung wieder ab. Seine wertvollen Eigenschaften kommen daher in erster Linie Gleichstromzentralen zu gute. In Zentralstationen werden die Akkumulatoren — da die einzelnen Zellen nur eine geringe Spannung von etwa 2 Volt haben — zu einer Batterie vereinigt, d. h. in Hintereinanderschaltung verwendet. Die Zahl der Zellen wird nach Maßgabe der Betriebsspannung gewählt.

Die Leistungsfähigkeit und Güte einer Batterie wird nach ihrer „Kapazität“ sowie nach ihrem „Nutzeffekte“ beurteilt. Erstere gibt ein absolutes Maß für die Leistungsfähigkeit, indem sie die Elektrizitätsmenge bezeichnet, die man nach jeder vollen Ladung ohne Beeinträchtigung der Güte der Batterie, d. h. ohne Überanstrengung der

Zellen entnehmen darf. Sie wird in Ampèrestunden gemessen und ist dargestellt durch die Größe

$$(1) \dots \dots \dots \int_0^t i dt,$$

worin i den Momentanwert des Entladestromes in Ampère und t die Zeit in Stunden bezeichnet. Der Nutzeffekt, auch „elektrisches Güteverhältnis“ (Hoppe), „Nutzeffekt der chemischen Aktion“ (Aron) und „Wirkungsgrad“ genannt, ist ein Maß für die Vollkommenheit, mit der sich die durch das Laden und Entladen stattfindende zweifache Umwandlung der Energie vollzieht. Er drückt sich aus durch das Verhältnis:

$$(2) \dots \dots \dots \frac{\int e \cdot i \cdot dt}{\int E \cdot J \cdot dt};$$

darin sollen e und i die Momentanwerte von Spannung in Volt und Stromstärke in Ampère während der Entladung, E und J die entsprechenden Werte während der Ladung bedeuten.

Neben dem so definierten Nutzeffekte spricht man noch von einem anderen, dem „Nutzeffekte der Ladung“, und versteht darunter das Verhältnis der beim Entladen durch den Akkumulator strömenden zu der beim Laden hindurchgehenden Elektrizitätsmenge; dieses Verhältnis ist dargestellt durch:

$$(3) \dots \dots \dots \frac{\int i \cdot dt}{\int J \cdot dt}.$$

Die Kenntnis desselben ist nicht von großer Bedeutung. Um jede Verwechslung der beiden Nutzeffekte auszuschließen, ist es zu empfehlen, stets die Bezeichnung „Wattnutzeffekt“ bzw. „Ampèrenutzeffekt“ zu gebrauchen.

Der erstere hat einen wesentlich geringeren Wert (zwischen 70 Proz. und 80 Proz.) als der letztere, der meist über 90 Proz. beträgt. Der Grund dafür liegt in dem beträchtlichen Spannungsunterschiede bei Ladung und Entladung.

Die Untersuchung einer Akkumulatorenbatterie hat sich auf Ermittlung obiger Größen, Kapazität, Wattnutzeffekt und eventuell Ampèrenutzeffekt — diese letztere Größe verlangt keine besonderen Messungen, vielmehr ergibt sie sich aus den so wie so festzustellenden Beobachtungswerten ohne weiteres — zu erstrecken.

Zu beobachten ist Strom (in Ampère) und Spannung (in Volt) an den Klemmen der Batterie. Die Ablesungen sind möglichst gleichzeitig und in kurzen Intervallen von 5 ÷ 10 Minuten vorzunehmen, da die Spannung beim Laden fortwährend steigt, beim Entladen sinkt. In dem Intervalle darf man jedoch die Spannung mit genügender Genauigkeit als konstant betrachten. Die Stromstärke hält man für Ladung wie für Entladung konstant, auf dem normalen Werte, wie die Akkumulatorenfabrik für die betreffende Type vorschreibt, und zwar für Ent-

ladung in der der vollen Beanspruchung entsprechenden Höhe. Denn da von der Dauer der Entladung und somit von der Entladestromstärke die Kapazität in hohem Grade abhängig ist, so ist die Garantie, welche vom Fabrikanten bezüglich der Kapazität und des Wirkungsgrades geleistet wird, stets an eine bestimmte Entladestromstärke gebunden. Da auch die Ladestromstärke auf den Nutzeffekt Einfluß hat, so ist mit der vom Lieferanten empfohlenen, für die Batterie vorteilhaftesten Stromstärke zu laden.

Im Laufe des Versuches ist außer den oben erwähnten Messungen mehrmals die Säuredichte durch das Aräometer festzustellen, da dieselbe ein Maß für den Grad der Ladung bzw. Entladung ist. Mit zunehmender Ladung wächst das spezifische Gewicht der Säure und nimmt bei Entladung wieder ab.

Durch eine zwischen Ladung und Entladung stattfindende Ruhepause können Stromverluste durch selten ganz zu vermeidenden Erdschluß entstehen, und es empfiehlt sich daher, um einen etwaigen unkontrollierbaren Fehler auszuschließen, der Ladung unmittelbar die Entladung folgen zu lassen.

Dem Versuche muß mindestens einmalige normale Ladung und Entladung vorausgehen.

Beispiele.

Nachstehend beschriebene Versuche an einer Batterie der Akkumulatorenfabrik Hagen i. W., welche von mir bei Übernahme der Batterie des städtischen Elektrizitätswerkes Erlangen vorgenommen wurden, sowie an drei Batterien der Akkumulatorenwerke System Pollak für die Palmengartenzentrale Frankfurt a. M. und die Zentrale Turin mögen zur Erläuterung des obigen dienen.

Die Hagener Batterie arbeitet in Parallelschaltung mit zwei Nebenschlußgeneratoren auf ein Dreileiternetz (2×220 Volt Gebrauchsspannung). Die Batterie besteht aus 272 Elementen. Zu beiden Seiten derselben ist ein Doppelzellenschalter für je 56 abschaltbare Zellen angebracht; die Batterie ist für eine Kapazität von 648 Ampèrestunden bei dreistündiger Entladung und einer maximalen Stromstärke von 216 Ampère gebaut. Die normale Ladestromstärke hat denselben Betrag. Nach vorheriger normaler Ladung erfolgte die Entladung der Batterie; dieselbe dauerte rund drei Stunden bei etwa 212 Ampère mittlerer Stromstärke, welche von einem regulierbaren Drahtwiderstande aufgenommen wurde. Die Entladehebel der Zellenschalter standen so, daß zu Anfang des Versuches je 23 Zellen auf beiden Seiten ausgeschaltet waren. Außer der Spannung an den Enden der Batterie und der Stromstärke wurde die Spannung zwischen Anfang und Ende von 60 in der Mitte der Batterie liegenden Zellen beobachtet und daraus der Verlauf der mittleren Spannung einer Zelle gefunden. In der beigefügten Tabelle ist der letztere Wert eingetragen. Die Ab-

lesungen erfolgten von 10 zu 10 Minuten. Die in Kolonne 5 und 6 eingetragenen Werte von Ampèrestunden bzw. Kilowattstunden sind jeweils aus den beobachteten Spannungs- und Stromwerten berechnet und auf das Zeitintervall zwischen zwei Ablesungen bezogen. Die zu den Messungen benutzten Apparate waren Präzisionsmeßinstrumente, welche vor und nach den Versuchen mit Normalinstrumenten geeicht wurden.

An die Entladung schloß sich sofort die Ladung der Batterie an. Sie nahm etwas über vier Stunden in Anspruch.

Die in der Tabelle enthaltenen Werte für Ampèrestunden und Kilowattstunden sind in analoger Weise wie bei der Entladung gewonnen. Die gemessene Kapazität ergab sich zu 678,5 Ampèrestunden, wobei die Endspannung einer Zelle 1,847 Volt betrug. Die garantierte Kapazität wurde somit überschritten. Der Wirkungsgrad der Batterie in Ampèrestunden ergab sich zu 95,75 Proz., derjenige in Kilowattstunden zu 77,53 Proz. (siehe Tabelle S. 180).

Genau genommen können die so ermittelten Werte erst dann als sicher anerkannt werden, wenn sie sich bei mehrmaligen unmittelbar aufeinander folgenden Ladungen und Entladungen bestätigt haben. — In der Praxis geht man sicher nicht fehl, wenn man annimmt, daß bei Einhaltung der verlangten Kapazität auch die Werte für den Watt- und Ampèrenutzeffekt normal sind. (Siehe zu diesem Beispiel auch Kapitel D, Beispiel, und Kapitel G, viertes Beispiel.)

Die Batterie der Palmengartenzentrale sollte eine Kapazität von 1520 Ampèrestunden bei sechsständiger Entladung aufweisen; die maximale Ladestromstärke war 304 Ampère, die maximale Entladestromstärke 426 Ampère.

Der garantierte Ampèrenutzeffekt betrug 90 Proz., der garantierte Wattnutzeffekt 75 Proz. (bei dreistündiger Entladung).

Bei der Untersuchung der Batterie, welche in analoger Weise wie vorstehend erfolgte, wurde eine Kapazität von 1750 Ampèrestunden (Mittel aus mehreren Entladungen), also etwa 15 Proz. mehr, als garantiert war (bei sechsständiger Entladung), festgestellt. Der aus mehreren Ladungen und Entladungen ermittelte Wattnutzeffekt betrug rund 86 Proz., während 75 Proz. garantiert waren.

Als weiteres Beispiel diene die Prüfung der beiden Akkumulatorenbatterien System Pollak in der Zentrale Turin.

Dieselben bestehen aus je 300 Zellen der Type S. G. 400. Der normale Ladestrom beträgt 464 Ampère, doch ist eine Stromstärke bis 650 Ampère beim Laden zulässig. Die Kapazität sollte

bei 650 Ampère Entladestrom 1950 Ampèrestunden,

„ 530 „ „ 2120 „

betragen.

Der garantierte Ampère- bzw. Wattnutzeffekt war 90 Proz. bzw. 75 Proz.

Kapazitätsprobe und Bestimmung des Ampère- und Wattnutzeffektes der Batterie.

Entladung								Ladung				
Zeit	Ampère- meter	Voltmeter	Volt pro Zelle	Ampère- stunden	Kilowatt- stunden	Ausgeschal- tete Zellen	Säure- dichte	Zeit	Ampère- meter	Voltmeter	Ampère- stunden	Kilowatt- stunden
—	—	—	2,217	—	—	—	—	1 ²⁰	—	—	—	—
9 ¹⁸	214,0	435,0	2,017	—	—	23	{ Elem. 97 + = 1,199 - = 1,200	1 ²⁵	187	515,0	7,80	4,025
								1 ³⁰	180	515,0	15,67	8,070
								1 ⁴⁰	180	525,0	30,00	15,750
9 ³⁰	214,0	437,4	1,958	42,8	18,70	—	—	1 ⁵⁰	186	519,0	31,00	16,080
9 ⁴⁰	213,5	435,9	1,952	35,6	15,50	—	—	2 ⁰⁰	182	507,5	30,33	15,400
9 ⁵⁰	213,0	435,6	1,950	35,5	15,50	—	—	2 ¹⁰	170	507,5	28,33	14,400
10 ⁰⁰	212,4	435,0	1,947	35,4	15,40	—	—	2 ²⁰	180	510,0	30,00	15,300
10 ¹⁰	212,4	435,0	1,945	35,4	15,40	—	—	2 ³⁰	176	510,0	29,33	15,000
10 ²⁰	212,2	434,7	1,925	35,4	15,40	—	—	2 ⁴⁰	192	514,0	32,00	16,450
10 ³⁰	211,6	433,5	1,923	35,3	15,30	—	{ + 1,188 - 1,190	2 ⁵⁰	176	515,0	29,33	15,110
								3 ⁰⁰	187	517,5	31,17	16,130
10 ⁴⁰	211,0	432,6	1,917	35,2	15,20	—	—	3 ¹⁰	176	506,0	29,33	14,800
10 ⁵⁰	210,6	432,0	1,913	35,1	15,20	—	—	3 ⁵⁰	170	506,0	28,33	14,300
11 ⁰⁰	210,4	431,1	1,908	35,1	15,10	—	—	3 ³⁰	160	507,5	26,67	13,500
11 ¹⁰	213,6	438,0	1,903	35,6	15,60	21	—	3 ⁴⁰	128	505,0	21,33	10,770
11 ²⁰	213,0	436,5	1,902	35,5	15,50	—	{ + 1,181 - 1,182	3 ⁵⁰	112	507,5	18,70	9,500
								4 ⁰⁰	112	507,5	18,70	9,500
11 ³⁰	212,4	435,3	1,898	35,4	15,40	—	—	4 ¹⁰	177	523,5	29,50	15,420
11 ⁴⁰	211,6	433,8	1,887	35,3	15,30	—	—	4 ²⁰	138	521,0	23,00	12,000
11 ⁵⁰	210,6	432,3	1,880	35,1	15,20	—	—	4 ³⁰	180	542,5	30,00	16,270
12 ⁰⁰	210,0	430,5	1,878	35,0	15,06	—	—	4 ⁴⁰	186	574,5	31,00	17,800
12 ¹⁰	212,4	435,9	1,867	35,4	15,40	19	—	4 ⁵⁰	194	610,0	32,30	19,700
12 ²⁰	211,8	434,4	1,858	35,3	15,30	—	—	5 ⁰⁰	178	630,0	29,67	18,690
12 ³⁰	210,4	432,0	1,847	35,1	15,15	—	{ + 1,170 - 1,171	5 ¹⁰	176	639,0	29,67	18,700
								5 ²⁰	172	646,0	28,67	18,540
								5 ³⁰	174	649,0	29,00	18,800
Sa.			678,5	294,61								
Sa.			708,63	380,005								

Wirkungsgrad in Ampèrestunden: $\frac{678,50}{708,63} = 95,75$ Proz.

Wirkungsgrad in Kilowattstunden: $\frac{294,610}{380,005} = 77,53$ Proz.

Erste Batterie. Zur Prüfung wurde zunächst eine Ladung bis zur lebhaften Gasentwicklung vorgenommen. Die Untersuchung sollte ohne Unterbrechung des normalen Betriebes stattfinden, d. h. die Ge-

samtspannung konstant bleiben; infolgedessen war bei der auf die Ladung folgenden Entladung nur die Stammbatterie, sowie einige Zuschaltzellen eingeschaltet. Laut Prüfungsprotokoll betrug die mittlere Entladestromstärke 530 Amp. Bis zur Entladegrenze wurden der Batterie 2413 Ampèrestunden entnommen; die mittlere Entladespannung war hierbei 1,88 Volt. Der bei Entladung geleistete Effekt war 1271 Kilowattstunden.

Bei der nun folgenden Wiederaufladung der Batterie — unter Abschaltung der völlig aufgeladenen Zellen — wurde im ganzen eine elektrische Energie von 1445 Kilowattstunden zugeführt.

Aus vorstehendem erhellt, daß die garantierte Kapazität (von 2120 Ampèrestunden bei 530 Ampère Entladestrom) um etwa 14 Proz. und der für den normalen Betrieb garantierte Wattnutzeffekt (mit $\frac{1271}{1445} = 0,88$, d. h. 88 Proz.) um etwa 17 Proz. überschritten wurde.

Zweite Batterie. Die Prüfung wurde in der gleichen Weise wie vorstehend vorgenommen und wurde eine Kapazität von 2450 Ampèrestunden bei 530 Ampère Entladestromstärke erreicht. Der Nutzeffekt wurde nicht bestimmt.

L. Messungen an Leitungsnetzen.

1. Allgemeines.

Bei der Vielseitigkeit der Verwendung der unterirdisch verlegten Kabel in der Technik ist das Kabelmeßwesen immer mehr ausgebildet worden. Schon lange hat man bei der Fabrikation und Legung submariner Kabel die unumgängliche Notwendigkeit der Messung von Leitungsfähigkeit, -Widerstand und Isolationswiderstand für die Erhaltung und lange Lebensdauer der Kabel erkannt. Bei näherem Studium der Ladungserscheinungen in den Kabeln sind auch die Kapazitätsbestimmungen an den Kabeln und späterhin auch die Fehlerortsbestimmungen mit in den Bereich der Meßtechnik hineingezogen worden. Alle diese Prüfungen sind in einem gut eingerichteten Meßzimmer mit feststehenden Apparaten relativ leicht auszuführen.

In der Praxis müssen die Messungen am Orte der verlegten Kabel in Straßen oft unter sehr ungünstigen Verhältnissen oder aber in der Zentrale, wo man auch mit manchen anormalen Verhältnissen zu tun hat, vorgenommen werden.

In erster Linie handelt es sich um Bestimmung der Konstanten, d. h. 1. des Widerstandes, 2. der Leitungsfähigkeit, 3. des Isolationswertes, 4. der Kapazität des ganzen oder eines Teiles des verlegten

Kabels, welche einen vorgeschriebenen vertraglich festgelegten Wert nicht überschreiten dürfen, um die Betriebssicherheit zu gewährleisten. Die Bestimmung der Konstanten der Kabel bzw. die Kupfernornmalien¹⁾ sind von dem Verbands deutscher Elektrotechniker und von der Vereinigung der Elektrizitätswerke²⁾ festgelegt.

2. Messungen von Widerstand und Leitungsfähigkeit.

Die Methoden, welche gegenwärtig zur Bestimmung des Widerstandswertes der Leitungen angewandt werden, beruhen fast ausschließlich auf dem Prinzip der Wheatstoneschen Brücke.

Für genaue Widerstandsmessungen, wie sie bei Kabeln vorgenommen werden müssen, werden Brücken mit Stöpsel- oder auch Schleifkontaktwiderständen verwendet. Bei der ersteren Meßmethode ist die Wahl des Verhältnisses der Brückenarme $\frac{c}{b}$ beschränkt, während der bekannte Vergleichswiderstand a in weiten Grenzen veränderlich sein kann. Es ist hier nicht der Ort, näher auf die Widerstandsmeßmethoden einzugehen; daher soll hier nur kurz der in der Praxis sehr gebräuchliche Universalwiderstandskasten von Siemens und Halske, welcher — wie später näher ausgeführt — auch zu anderen Messungen dient, nebenstehend schematisch skizziert und beschrieben werden.

Bei der Widerstandsmessung stellt man die Verbindungen, wie die Figur 71 zeigt, her. Es bedeutet x den zu messenden Widerstand, g ein gut gedämpftes Spiegelgalvanometer, a den Widerstand, bei welchem die Galvanometernadel keinen Ausschlag zeigt, wenn die Taster d und e geschlossen sind. Es bestehen dann die bekannten Relationen

$$a \cdot c = b \cdot x \quad \text{und} \quad x = a \cdot \frac{c}{b}.$$

¹⁾ Die betreffenden Vorschriften lauten:

§ 1. Der spezifische Widerstand des Leitungskupfers wird gegeben durch den in Ohm ausgedrückten Widerstand eines Stückes von 1 m Länge und 1 qmm Querschnitt bei 15° C.

§ 2. Als Leitfähigkeit des Kupfers gilt der reziproke Wert des durch § 1 festgesetzten spezifischen Widerstandes.

§ 3. Kupfer, dessen spezifischer Widerstand größer ist als 0,0175, oder dessen Leitfähigkeit kleiner als 57, ist als Leitungskupfer nicht annehmbar.

§ 4. Als Normalkupfer von 100 Proz. Leitfähigkeit gilt ein Kupfer, dessen Leitfähigkeit 60 beträgt.

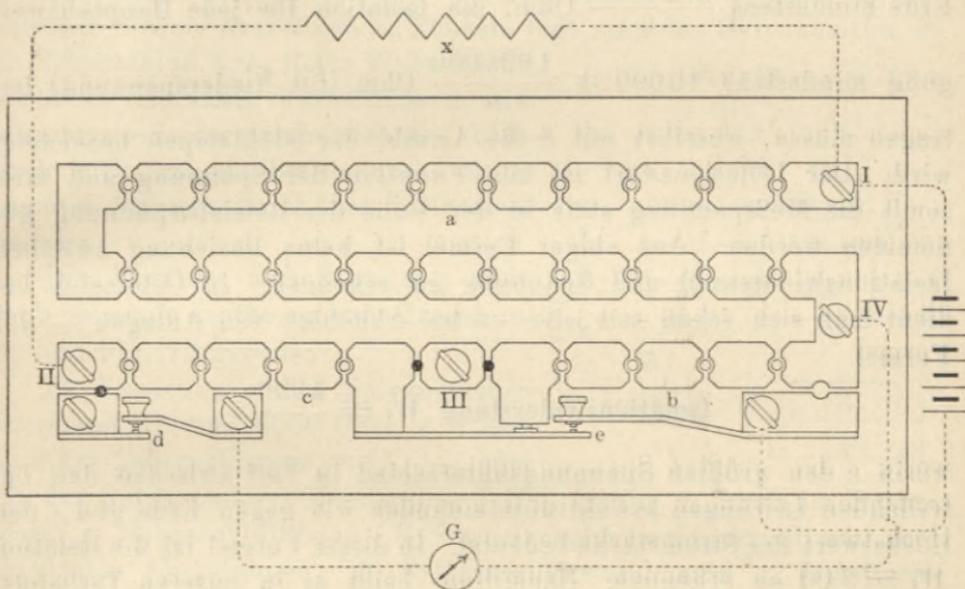
§ 5. Zur Umrechnung des spezifischen Widerstandes oder der Leitfähigkeit von anderen Temperaturen auf 15° C. ist in allen Fällen, wo der Temperaturkoeffizient nicht besonders bestimmt wird, ein solcher von 0,4 Proz. für 1° C. anzunehmen.

²⁾ Siehe Anhang S. 267, 268 und 269.

Die bekannten Widerstände b und c sind dekadisch. Die Taster d bzw. e dienen zur Einschaltung des Galvanometers bzw. zum Stromschlusse. Der Meßbereich geht von 0,0001 Ohm bis 10 000 000 Ohm und reicht somit für alle Arten von Ermittlung der Leitungswiderstände aus.

Die Leitungsfähigkeit bzw. die spezifische Leitungsfähigkeit eines Körpers entspricht dem reziproken Werte des Widerstandes bzw. des spezifischen Widerstandes. Zur Bestimmung der spezifischen Leitungs-

Fig. 71.



fähigkeit eines Drahtes ist die Kenntnis von Länge, Querschnitt, Widerstand und Temperaturkoeffizienten des letzteren erforderlich. Die Ermittlung des Querschnittes muß mit besonderer Vorsicht, bei dünnen Drähten am besten durch Rechnung aus dem Gewichte, um Irrtümern bei der Messung zu begegnen, erfolgen. Bezeichnet l die Länge in Metern, q den Querschnitt in Quadratmillimetern, s das spezifische Gewicht des Materiales, g das absolute Gewicht des Drahtstückes in Grammen, so ist $q = \frac{g}{s \cdot l}$. — Bei der Widerstandsmessung handelt es

sich häufig um kurze Probestücke, bzw. kleine Widerstandswerte; es ist eine Methode in Anwendung zu bringen, bei der die in Rechnung kommenden Übergangswiderstände mit berücksichtigt werden. In erster Linie ist die Thomsonsche Doppelbrückenmethode — entsprechende Apparate bauen Hartmann und Braun, Siemens und Halske und andere — zu verwenden. Bei derselben können Widerstände bis zu 0,000 001 Ohm herab unabhängig von Übergangswider-

ständen ermittelt werden. Näheres hierüber findet sich in Apt, Kittler, Uppenborn, Wietz u. s. w.¹⁾. Aus diesen durch Rechnung und Messung ermittelten Werten kann die Leitungsfähigkeit eines Körpers gefunden werden.

3. Isolationsmessungen.

Ein sehr wichtiger Faktor bei Prüfung eines Kabelnetzes ist der Isolationswiderstand. Entsprechend den Sicherheitsvorschriften des Verbandes deutscher Elektrotechniker galt bis vor kurzem die Bestimmung, daß der Isolationswiderstand des ganzen Leitungsnetzes gegen Erde mindestens $\frac{1000000}{n}$ Ohm, die Isolation für jede Hauptabzweigung mindestens $10000 + \frac{1000000}{n}$ Ohm (für Niederspannung) betragen müsse, woselbst mit n die Anzahl der Glühlampen bezeichnet wird. Der Isolationswert ist eine Funktion der Spannung und muß somit die Meßspannung stets in der Höhe der Betriebsspannung genommen werden. Aus obiger Formel ist keine Beziehung zwischen Isolationswiderstand und Spannung zu erkennen. In Österreich bedient man sich schon seit jeher — bei Abnahme von Anlagen — der Formel

$$\text{Isolationswiderstand } W_i = \frac{5000 \cdot e}{i},$$

worin e den größten Spannungsunterschied in Volt zwischen den betreffenden Leitungen sowohl untereinander wie gegen Erde und i den Höchstwert der Stromstärke bedeutet. In dieser Formel ist die Relation $W_i = f(e)$ zu erkennen. Neuerdings heißt es in unseren Verbandsvorschriften: „Der Isolationszustand einer Anlage soll derart sein, daß der Stromverlust auf jeder Teilstrecke zwischen zwei Sicherungen oder hinter der letzten Sicherung bei der Betriebsspannung ein Milliampère nicht überschreitet. Der Isolationswert einer derartigen Leitungstrecke muß hiernach wenigstens betragen: 1000 multipliziert mit der Voltzahl der Betriebsspannung (z. B. 220000 Ohm für 220 Volt Betriebsspannung).“ Diese neue Bestimmung nähert sich den österreichischen Vorschriften; hierüber siehe die Arbeit von F. Ross²⁾. Immerhin ist jedoch der geforderte Isolationswert nach den österreichischen Vorschriften größer als nach den neuen deutschen Verbandsvorschriften.

¹⁾ Raphael Apt, Isolationsmessungen und Fehlerbestimmungen an elektrischen Starkstromleitungen; — Kittler, Handbuch der Elektrotechnik; — Uppenborn, Kalender für Elektrotechniker.

²⁾ F. Ross, Zeitschrift für Elektrotechnik, Organ des Elektrotechnischen Vereins in Wien, 1901, Heft 49.

Bezüglich des Isolationswertes für Kabel sind die Vertragsbedingungen der „Vereinigung der Elektrizitätswerke“ betr. Lieferung von Kabeln . . . sowie die Normalien für Kabel maßgebend. Die betreffenden Bestimmungen folgen im Anhange des Buches.

Für Freileitungen soll nach den neuen Verbandsvorschriften der Isolationswert mindestens 20000 Ohm pro Kilometer einfacher Länge bei feuchtem Wetter betragen. Hierbei ist natürlich wieder die Meßspannung in Höhe der Betriebsspannung zu wählen. Die Methode zur Bestimmung des Isolationswiderstandes von Kabeln beruht auf der des direkten Ausschlages unter Anwendung eines hochempfindlichen Galvanometers.

Um den Meßbereich des Galvanometers sowohl auf starke als auf schwache Ströme ausdehnen zu können, legt man das Galvanometer in den Nebenschluß einer Reihe Widerstände, welche in einfachen Verhältnissen zum Galvanometerwiderstand stehen. Hierdurch wird nur ein bestimmter Teil des gesamten Stromes durch das Instrument gesandt.

Die Methode und Schaltung seien durch folgende mathematische Beziehungen und Fig. 72 gegeben:

Es bezeichne g den Galvanometerwiderstand = etwa 6000 Ohm; z Widerstand des Nebenschlusses = $1/9$, $1/99$ oder $1/999$ des Galvanometerwiderstandes, J Hauptstrom, i_1 Strom im Instrumente, i_2 Nebenschlußstrom, R Normalvergleichswiderstand mit verschiedenen Abstufungen, B Batteriewiderstand und x Isolationswiderstand.

$$J = i_1 + i_2$$

$$i_1 = \frac{i_2}{9},$$

daher

$$J = i_1 + 9 i_1 = 10 i_1$$

und

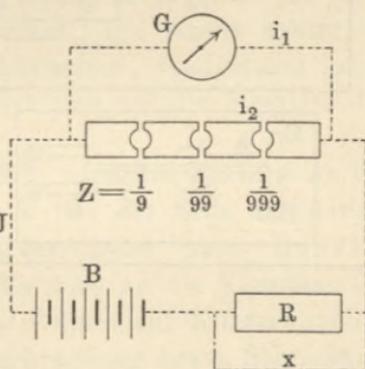
$$i_1 = \frac{J}{10}.$$

Der Gesamtwiderstand W des Stromkreises ist

$$W = R + B + \frac{g \cdot z}{g + z}.$$

Bei Vernachlässigung von $B + \frac{g \cdot z}{g + z}$, welcher Wert im Verhältnis zu R sehr klein ist, bleibt $W = R$. — Vor jeder Messung sehe man zunächst zu, das Galvanometer empfindlich genug zu machen,

Fig. 72.



so daß bei Einschaltung des zu prüfenden Isolationswiderstandes bzw. des Kabels der Ausschlag noch genügend groß wird.

Beispiel. Es sei $R = 100000$ Ohm. War der Ausschlag des Galvanometers beim Shunt $\frac{1}{99}$ von $g: n = 404$ mm Skalenteile, ent-

Fig. 73.

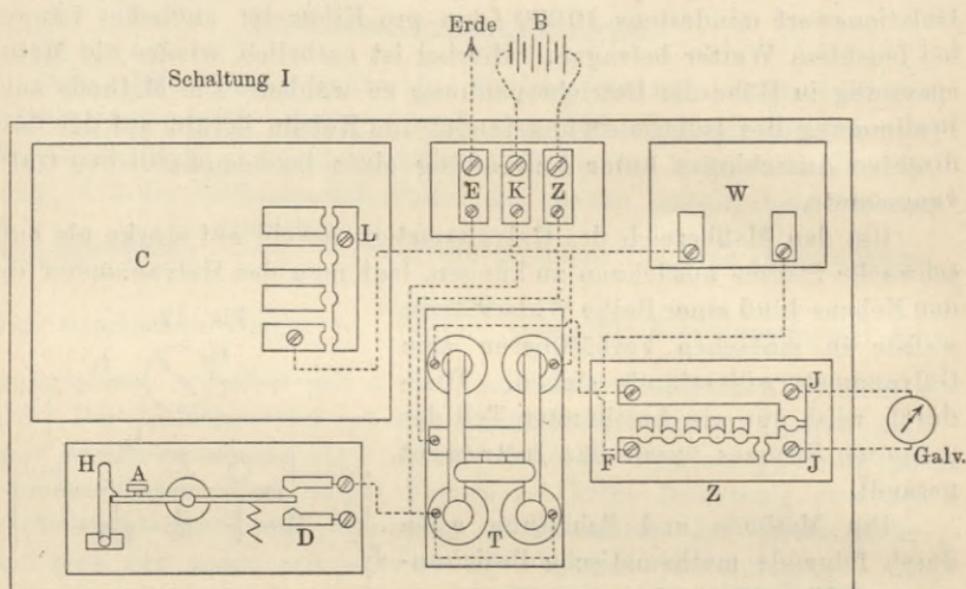
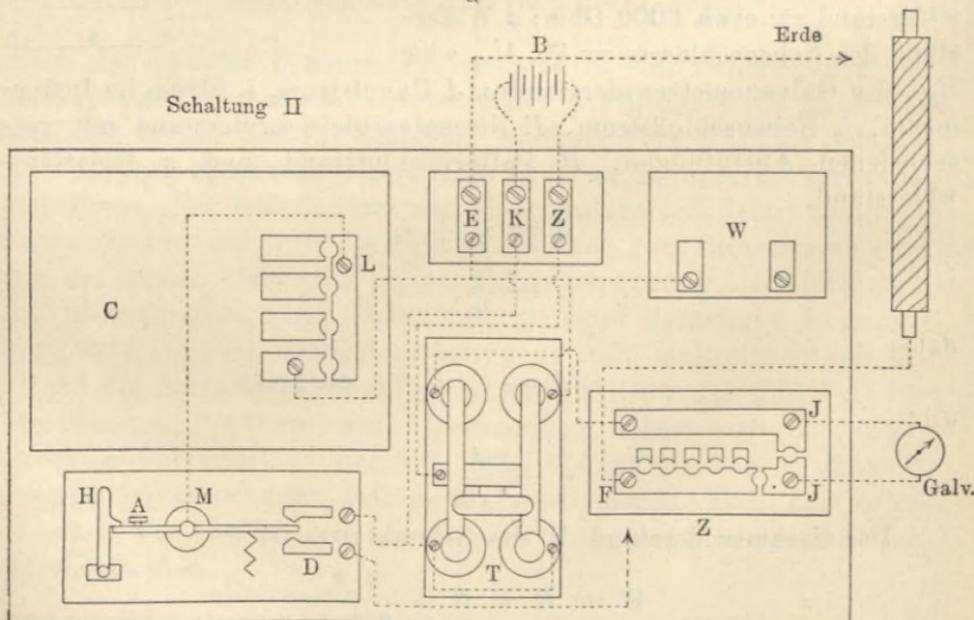


Fig. 74.



sprechend einem Strome $J = 100 \cdot i_1$, so würde ohne Shunt ein Ausschlag von $100 \cdot n$ erfolgen. Schaltet man nun statt R das zu prüfende Material, z. B. die Isolation des Kabels, ein (und zwar ebenfalls ohne Shunt, so ist der Ausschlag n' , entsprechend einem Strome $J' = i_1$.

Die Widerstände verhalten sich nun umgekehrt wie die Ströme und die Ausschläge, daher ist:

$$\frac{x}{R} = \frac{100 \cdot i_1}{i'_1} = \frac{100 n}{n'}$$

n' sei 70 mm Skalenteile, somit ist:

$$x = \frac{R \cdot 100 \cdot n}{n'} = \frac{100\,000 \cdot 100 \cdot 404}{70} = 57\,700\,000 \text{ Ohm}$$

$$= 57,7 \text{ Megohm.}$$

Die zu diesen Messungen gebräuchlichen Apparate, wie sie von Hartmann und Braun, Siemens und Halske und anderen fabriziert werden, seien im folgenden näher beschrieben. Nebenstehender Apparat (Fig. 73 und 74) wird von Siemens und Halske gebaut; derselbe ist hier in der Ausführung skizziert, in der er zugleich zur Messung der Ladungsfähigkeit von Kabeln dient; ich werde später an geeigneter Stelle auf den Apparat zurückkommen, vorderhand interessiert nur derjenige Teil des Apparates, der sich auf die Messung des Isolationswiderstandes bezieht.

Wie aus den beiden Figuren ersichtlich, wird die Batterie an die Klemmen K und Z gelegt und der Punkt E mit der Erde verbunden. Als Meßinstrument dient ein Spiegelgalvanometer nach Deprez-d'Arsonval mit hoher Empfindlichkeit. Es wird an die Klemmen JJ angeschlossen. Das Stöpselloch zwischen JJ dient zur Kurzschließung des Galvanometers während der Stromunterbrechung bzw. Schließung, — um dasselbe gegen zu heftige Ausschläge zu schützen. — W ist der Vergleichswiderstand im Betrage von 100 000 Ohm und wird zur Eichung (Bestimmung der Empfindlichkeit) des Instrumentes benutzt. Mittels des veränderlichen Nebenschlußwiderstandes Z ist man imstande, das Instrument auf verschiedene Empfindlichkeiten einzustellen. Die einstellbaren Widerstände sind $\frac{1}{9}$, $\frac{1}{99}$, $\frac{1}{999}$ und $\frac{1}{9999}$ des Galvanometerwiderstandes. Ein Doppelschlüssel T wird zum Schließen des Stromes benutzt, und zwar hat man es in der Hand, durch Niederdrücken der einen oder anderen Taste dem Strome die eine oder andere Richtung zu geben. Den Elementen sind, um sie vor Kurzschluß zu schützen, Widerstände von je 100 Ohm pro Zelle vorgeschaltet.

Ist z. B. die Empfindlichkeit des Instrumentes, d. h. der Widerstand, der einem Teilstriche auf der Skala entspricht, ohne Benutzung eines Shunts zu bestimmen, und wird eine Batterie von 80 Elementen verwendet, so schließt man den Stromkreis durch den Widerstand $W = 100\,000$ Ohm (Schaltung I) und stöpselt den Nebenschluß $\frac{1}{9999}$. Mit dem Vorschaltwiderstande der Elemente ergibt sich ein Widerstand von 108 000 Ohm. Das Instrument zeige nun einen Ausschlag von 90 Skalenteilen; dann ist die, wie oben definierte, Empfindlichkeit:

$$90 \cdot 10\,000 \cdot 108\,000 = 97\,200 \text{ Megohm.}$$

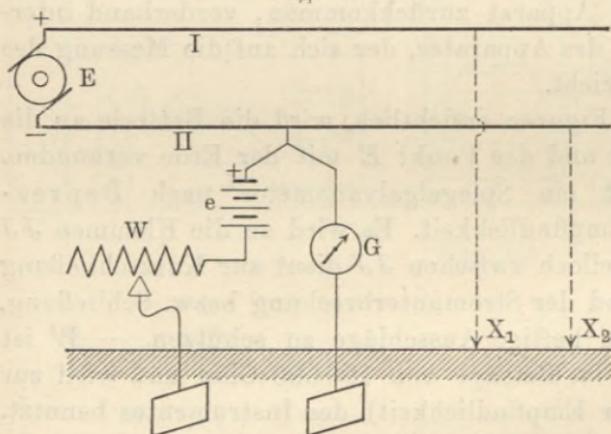
Zur Isolationsmessung eines Kabels entfernt man die Verbindung des Widerstandes W mit Klemme F und legt diesen Punkt an die Seele des Kabels (Schaltung II). Der Isolationswiderstand wird sodann gefunden, indem man die für die Empfindlichkeit erhaltene Zahl durch die bei der Isolationsmessung erhaltene, auf die Schaltung ohne Shunt reduzierte, Ablenkung dividiert.

Sei z. B. bei der oben ermittelten Empfindlichkeit die Isolationsablenkung 150 Skalenteile beim Nebenschlusse $\frac{1}{9}$ des Galvanometerwiderstandes, so beträgt dieselbe bei Anwendung keines Shunts $150 \cdot 10 = 1500$, und man erhält als Isolationswiderstand

$$\frac{97\,200}{1500} \text{ Millionen} = 64,8 \text{ Megohm.}$$

Es sei hier noch eine Methode ¹⁾ zur Isolationsmessung an im Betriebe befindlichen Gleichstromanlagen angegeben. Sie ist eine Nullmethode, da das verwendete Instrument, ein Galvanometer oder ein empfindlicher Spannungsmesser, bei der Messung auf den Ausschlag Null einspielen, d. h. stromlos sein muß.

Fig. 75.



Das Meßverfahren ist folgendes:

Man legt an die eine Netzhälfte II (siehe Fig. 75) den einen Pol einer kleinen Hilfsbatterie derart, daß diese mit dem Generator hintereinandergeschaltet ist; der andere Pol der Batterie ist durch einen regulierbaren Widerstand W mit der Erde verbunden. Das Galvanometer G liegt einerseits an der Hauptleitung II, andererseits an Erde. Mit x_1 und x_2 seien die Isolationswiderstände (Fehlerwiderstände) der beiden Netzhälften I und II, mit E und e die Spannungen des Generators bzw. der Hilfsstromquelle bezeichnet.

Wird der Widerstand W so eingestellt, daß das Instrument G , welches die Potentialdifferenz der Leitung II gegen Erde mißt, stromlos ist, d. h. Leitung II sich auf dem Erdpotential befindet, so ist auch der Isolationsstrom der Leitung II gleich Null, und der ganze Isolationsstrom I nimmt seinen Weg durch den Widerstand W und die Batterie. Dieser Fehlerstrom habe die Größe i . Alsdann gelten die Beziehungen:

¹⁾ Dr. Th. Brugger, Elektrot. Zeitschr. 1902, S. 901.

$$E = i \cdot x_1,$$

$$e = i \cdot W,$$

woraus sich ergibt:

$$x_1 = \frac{E}{e} \cdot W.$$

Wird die Hilfsspannung e so gewählt, daß sie z. B. $0,1 E$ beträgt, so drückt sich der Widerstand x_1 in einfacher Weise aus als

$$x_1 = 10 \cdot W.$$

Man kann also dann x_1 direkt an dem regulierbaren Widerstande ablesen.

Um auch den Isolationswiderstand x_2 zu ermitteln, legt man Batterie und Galvanometer an die Netzhälfte I (jedoch unter Vertauschung der Batteriepole) und verfähre analog.

Wie man das beschriebene Verfahren der Isolationsmessung eventuell auch auf Mehrleiteranlagen (jedoch nur solche ohne geerdeten Leiter) anwenden kann, soll hier nicht ausgeführt werden; es möge genügen, auf den schon oben genannten Aufsatz in der Elektrotechnischen Zeitschrift zu verweisen.

Die Firma Hartmann und Braun A.-G. baut einen bequem zu handhabenden Apparat, der auf obigem Meßprinzip beruht.

Die Temperaturkoeffizienten verschiedener Isoliermassen sind nur mit annähernder Genauigkeit festzustellen, da für jede Sorte von Material ein anderer Koeffizient besteht und derselbe von der Elektrifizierungsdauer und der Veränderlichkeit der Isoliermaterialien durch hohe Temperaturdifferenzen abhängig ist.

Die von Fröhlich angegebene Beziehung bei Guttaperchakabeln lautet

$$c = \frac{r_{15}}{r_t} = 0,87604^{15-t}.$$

Nach dieser Formel hat Fröhlich nachstehende Tabelle (S. 190) aufgestellt, woraus für jede Temperatur t der Wert für c zu entnehmen ist; der bei der Temperatur t gemessene Guttaperchawiderstand (r_t) ist mit dem Koeffizienten c zu multiplizieren, um den Isolationswert (r_{15}) bei 15°C . zu ermitteln. Die Temperatur t ist gleich $\frac{t_1 + t_2}{2}$,

woselbst t_1 die Temperatur der Kupferseele des Kabels (durch Kupferwiderstandsmessung ermittelt) und t_2 die — durch Eingraben von Thermometern in die Tiefe der Kabel ermittelte — Temperatur der äußeren Guttaperchaschichten bedeuten.

Die Isolationsmessungen sollen nicht nur in der Fabrik vor dem Versande der Kabel, sondern auch während der Verlegung an den bereits liegenden Kabelstücken und an den vorhandenen Lötstellen gewissenhaft vollführt werden. Über die letztere Messung siehe Methode von Constable, Uppenborns Kalender für Elektrotechnik.

<i>t</i>	<i>c</i>	<i>log c</i>	<i>t</i>	<i>c</i>	<i>log c</i>
25,0	3,7570	0,57479	12,0	0,6723	9,82756
24,5	3,5160	0,54605	11,5	0,6292	9,79882
24,0	3,2910	0,51731	11,0	0,5890	9,77008
23,5	3,0800	0,48857	10,5	0,5512	9,74135
23,0	2,8830	0,45983	10,0	0,5159	9,71261
22,5	2,6980	0,43109	9,5	0,4829	9,68387
22,0	2,5260	0,40235	9,0	0,4520	9,65513
21,5	2,3640	0,37361	8,5	0,4230	9,62639
21,0	2,2120	0,34487	8,0	0,3960	9,59765
20,5	2,0710	0,31613	7,5	0,3706	9,56891
20,0	1,9380	0,28739	7,0	0,3469	9,54017
19,5	1,8140	0,25865	6,5	0,3247	9,51143
19,0	1,6980	0,22992	6,0	0,3039	9,48269
18,5	1,5890	0,20118	5,5	0,2844	9,45395
18,0	1,4870	0,17244	5,0	0,2662	9,42521
17,5	1,3920	0,14370	4,5	0,2492	9,39647
17,0	1,3030	0,11496	4,0	0,2332	9,36773
16,5	1,2200	0,08622	3,5	0,2183	9,33899
16,0	1,1420	0,05748	3,0	0,2043	9,31025
15,5	1,0680	0,02874	2,5	0,1912	9,28151
15,0	1,0000	0,00000	2,0	0,1790	9,25278
14,5	0,9360	9,97126	1,5	0,1675	9,22404
14,0	0,8760	9,94252	1,0	0,1568	9,19530
13,5	0,8199	9,91378	0,5	0,1467	9,16656
13,0	0,7674	9,88508	0,0	0,1373	9,13782
12,5	0,7183	9,85630			

Die Hauptmessung erfolgt am fertig verlegten Kabelnetze inkl. aller Hausanschlüsse bei Einsetzung sämtlicher Sicherungen in Kabelkasten und Hausanschlußkasten bis zu den Zählern.

Zur Erläuterung gebe ich kurz eine von mir vorgenommene Prüfung eines Kabelnetzes von 36 km einfacher Länge und bei etwa 3000 angeschlossenen Glühlampen. Die Messung erfolgte mit dem allein zur Verfügung stehenden Apparate von Hartmann und Braun nach dem Prinzipie des direkten Ausschlages.

Die Trockenbatterie lieferte maximal nur etwa 50 Volt, und ein Vorversuch zeigte, daß der Apparat für die Messung mit der direkten Betriebsspannung von 220 Volt Gleichstrom bei einem Vergleichswiderstande von 100000 Ohm nicht geeignet war. Zunächst wurden sämtliche + und - Leitungen (der Dreileiteranlage von 2×220 Volt Gleichstrom mit blankem Mittelleiter) untereinander verbunden und an eine Klemme des Galvanometers und der Mittelleiter an die andere Klemme desselben angeschlossen. Bei der Meßspannung = Betriebsspannung = 220 Volt war bei Einschaltung des Kabelnetzes der Aus-

schlag $n = 45$ Skalenteile, bei der Meßspannung 50 Volt in demselben Falle $n_1 = 10$ Skalenteile, während bei Abschaltung des Kabelnetzes und Einschaltung des Vergleichswiderstandes von 100 000 Ohm der Ausschlag bei 50 Volt Meßspannung $n_3 = 181$ Skalenteile betrug; daraus folgt ein Isolationswiderstand des Netzes pro Kilometer von

$$x = \frac{181}{10} \cdot 100\,000 \cdot 36 = 65,2 \text{ Megohm.}$$

$t = \frac{t_1 + t_2}{2}$ berechnete sich zu 12°C. ; daraus $c = 0,87604^3 = 0,67231$.

Demnach ist der Isolationswert des Kabelnetzes bei 15°C. pro Kilometer

$$65,2 \cdot 0,672 = 44 \text{ Megohm.}$$

Garantiert waren, entsprechend den Vorschriften, 15 Megohm pro Kilometer bei 15°C.

Zur Kontrolle, ob alle Sicherungen eingesetzt seien, wurden mehrere Monteure damit beauftragt, an sämtlichen Hausinstallationen eine direkte Verbindung zwischen $+$ - bzw. $-$ - und Null-leiter momentan herzustellen, wobei an Stelle des Apparates in der Zentrale ein gewöhnliches Galvanoskop eingeschaltet war; es mußte bei jeder derartigen Verbindung in der Hausinstallation ein direkter Ausschlag am Galvanoskop erfolgen, was auch eintrat. Vor dem Rundgange der Monteure wurden nach den Plänen die Häuser genau festgelegt, an welchen und zu welcher Zeit die Verbindung hergestellt werden sollte, somit erzielte man eine genaue Kontrolle, ob keine Sicherung fehlte.

4. Kapazitätsmessungen.

Die bei isolierten Leitungen oder Kabelnetzen auftretende Kapazität zu kennen ist bei alternierenden Strömen in vielen Fällen wertvoll. Die Kapazität C ist definiert durch das Verhältnis

$$C = \frac{\text{Elektrizitätsmenge } Q}{\text{Spannung } E}.$$

Die Messungen der Kapazität an Kabeln werden wie die Isolationsmessungen nach der Methode des direkten Ausschlages vorgenommen; hierzu eignet sich der vorhin beschriebene Apparat von Siemens und Halske (s. Fig. 74). Die Schaltung bleibt dieselbe wie vorhin, jedoch ist der Stöpsel zwischen JJ zu entfernen, so daß der Ladungsstrom, bzw. der Entladungsstrom das Galvanometer durchfließen kann. Beim Drücken einer Taste des Doppelschlüssels T erfolgt ein Ausschlag des Instrumentes, der durch geeignete Wahl des Nebenschlusses auf eine passende Größe gebracht werden muß. Als Vergleichsgröße dient ein Kondensator von bekannter Größe der Kapazität. Zu diesem Behufe nimmt man die Verbindung des Kabels mit Klemme F ab, stellt eine Verbindung zwischen F und dem Punkte L des Konden-

sators her und drückt die Taste von T nieder. Der Ladungsausschlag entspricht dem Werte des Kondensators.

Beim Kabel beobachtet man zweckmäßig den Entladungsausschlag, da der Ladungsausschlag durch einen niedrigen Wert der Isolation beeinflußt werden kann. Man verbindet F mit D nach Schaltung II, legt das Kabel an Klemme M und drückt sodann die Taste des Entladungsschlüssels bei A nieder. Hierbei darf keine Verbindung zwischen M und L sein. Das Kabel ladet sich jetzt. Löst man darauf A durch Zurücklegen des Hebels H , sodaß bei D Kontakt eintritt, so erfolgt die Entladung und zwar über M, D, F , das Galvanometer und den Doppelschlüssel T zur Erde. Verbindet man den Punkt M statt mit dem Kabel mit Punkt L des Kondensators, so kann man in ähnlicher Weise die Entladung dieses letzteren messen (siehe Schaltung II).

Da die Spannung der Batterie in beiden Fällen gleich ist, so verhalten sich die Kapazitäten wie die Elektrizitätsmengen der Entladungen, d. h. wie die Ausschläge α und α' am Instrument:

$$\frac{C}{C'} = \frac{Q}{Q'} = \frac{\alpha}{\alpha'},$$

worin C, Q, α die Werte für den Kondensator, C', Q', α' die Werte für das Kabel bedeuten mögen.

Die Kapazität eines Kabels in Mikrofarad pro Kilometer berechnet man nach der Formel

$$\frac{\alpha}{\alpha_1 \cdot L},$$

in welcher α der Ladungsausschlag auf die Schaltung ohne Nebenschluß zum Instrument reduziert, α_1 der Ausschlag für ein Mikrofarad in demselben Sinne reduziert und L die Länge des Kabels in Kilometern ist.

Ergibt z. B. ein Kondensator von 1,5 Mikrofarad einen Ausschlag von 960 Skalenteilen mit Nebenschluß $\frac{1}{99}$ des Galvanometerwiderstandes = $960 \cdot 100$ Skalenteile ohne Verwendung eines Shunts, und ein Kabel von $\frac{1}{2}$ km Länge einen Ausschlag von 80 Skalenteilen mit Nebenschluß $\frac{1}{99}$ = $80 \cdot 100$ Skalenteile ohne Shunt, so beträgt die Kapazität pro Kilometer

$$\frac{8000}{\frac{96000}{1,5} \cdot \frac{1}{2}} = \frac{8000}{64000 \cdot \frac{1}{2}} = 0,25 \text{ Mikrofarad.}$$

Die Kapazitätsmessungen können auch mit einfacheren Hilfsmitteln ausgeführt werden.

Ein Beispiel für eine solche Kapazitätsmessung eines Kabels unter Verwendung eines geeigneten Elektrometers möge noch angeführt werden (siehe nebenstehende Skizze). In der unteren Lage des Tasters α

(Fig. 76) wird der Kondensator bezw. das Kabel geladen, in der oberen Lage findet Entladung durch das Instrument statt. Der Ausschlag desselben mißt die Elektrizitätsmenge.

Die Kapazität C des Kondensators sei bekannt und betrage 0,1 Mikrofarad. Der Entladungsausschlag sei $\alpha = 26,2$ Skalenteile. Wird an Stelle des Kondensators ein Kabel eingeschaltet, so

sei der Ausschlag bei Entladung $\alpha' = 21,4$ Skalenteile. Dann ist:

$$\frac{C'}{C} = \frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{21,4}{26,2}$$

und die Kapazität des Kabels

$$C' = \frac{21,4}{26,2} \cdot 0,1 = 0,082 \text{ Mikrofarad.}$$

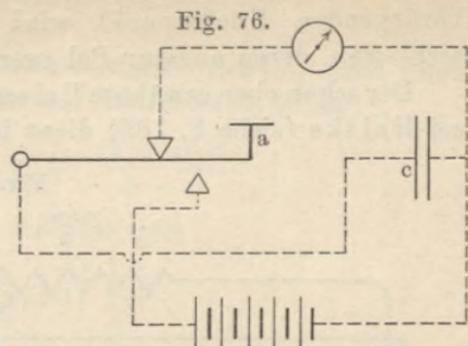
5. Fehlerortsbestimmungen.

Die Aufgabe dieses Kapitels kann es nicht sein, einen auch nur annähernd vollständigen Überblick über die verschiedenen Methoden zu geben, die in der Praxis zur Bestimmung von Isolationsfehlern an Leitungsnetzen Verwendung finden; ich muß auf Spezialwerke (Raphael-Apt und andere¹⁾ verweisen. Es möge daher nur das Wesen der wichtigsten und in den meisten Fällen anwendbaren Methode gekennzeichnet und im Anschluß daran der eine oder andere geeignete Apparat für die Aufsuchung von Fehlern beschrieben werden.

Diese Methode ist die der Schleifenbildung in Verbindung mit der Brückenschaltung. Durch die Fehlerstelle wird das Kabel bezw. die eine Ader in zwei Teile zerlegt, die beiden der Fehlerstelle abgekehrten Enden des Kabels verbindet man mit dem Apparat; die beiden Teile der Leitung bilden mit oder ohne vorgeschaltete Widerstände je einen Zweig der Brücke. Um die Schaltung nun ausführen zu können, muß man eine in Bezug auf Isolation fehlerfreie Leitung mitbenutzen. Am einen Ende der mutmaßlich fehlerhaften Leitung wird der Apparat aufgestellt und die Messung vorgenommen, das andere ferne Ende wird mit der fehlerfreien Rückleitung — eine solche ist in fast allen Fällen vorhanden — leitend verbunden, d. h. es wird eine Schleife gebildet, sodaß die beiderseits der Fehlerstelle liegenden Leitungsteile nach dem Meßort, d. h. zum Apparate führen. Die Fehlerstelle selbst ist stets ein Knotenpunkt der Brücke; am gegen-

¹⁾ Raphael-Apt, Isolationsmessungen und Fehlerbestimmungen.

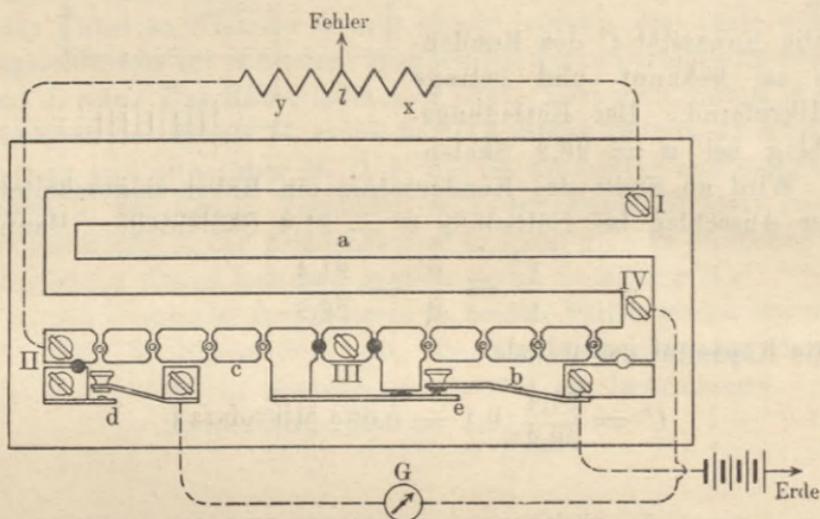
Fig. 76.



überliegenden Knotenpunkt wird der eine Pol der Batterie angeschlossen, deren anderer Pol geerdet wird.

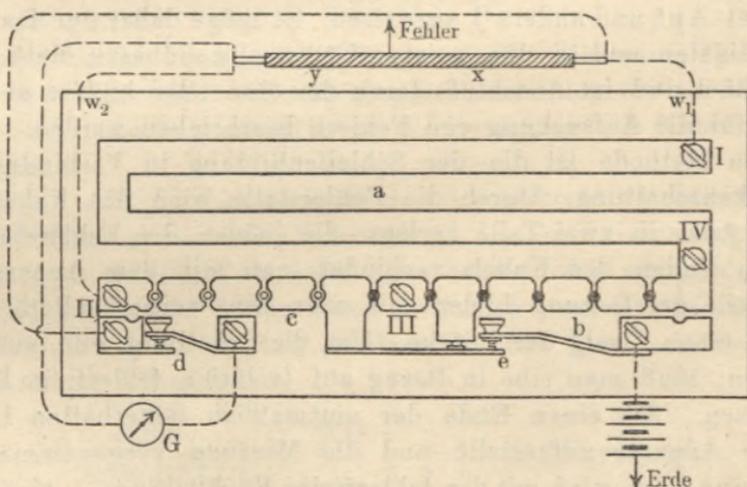
Der schon oben erwähnte Universalwiderstandskasten von Siemens und Halske (siehe S. 183) dient in besonderer Schaltung zur Fehler-

Fig. 77.



bestimmung an Leitungen. Dieselbe ist aus der Figur zu ersehen. l ist die fehlerhafte Leitung samt Rückleitung. Die Enden derselben werden, wie in Fig. 77 dargestellt, an die Klemmen I und II an-

Fig. 78.



geschlossen. Die vier Zweige der Brücke sind: Fehler, I, a, IV — IV, b, III — III, c, II — II, Fehler. Die Widerstände der Brückenarme b und c werden am besten gleichgemacht, der Widerstand a solange verändert, bis das Galvanometer bei Einschaltung der Batterie keinen Ausschlag mehr zeigt.

Ist l der Widerstand der ganzen fehlerhaften Leitung samt Rückleitung und x und y die Widerstände der Teilstrecken, so ist

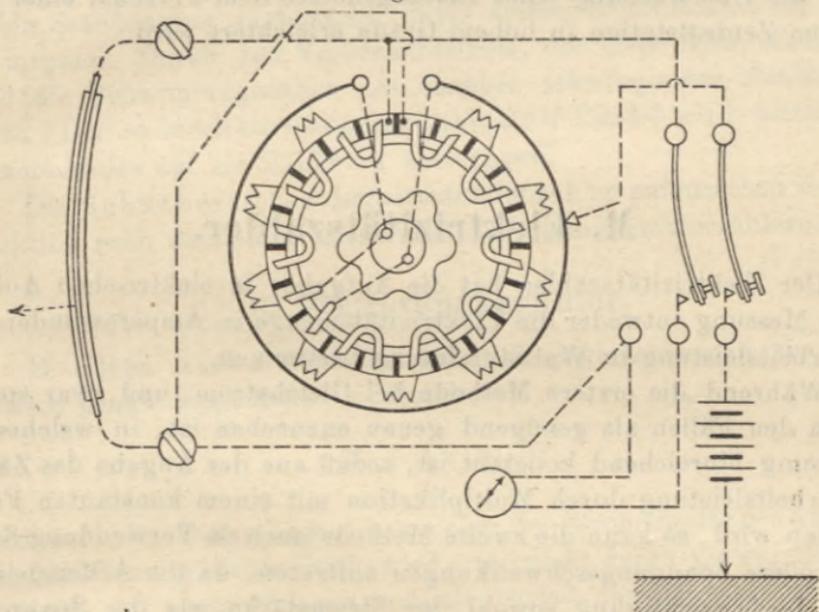
$$x = \frac{b \cdot l - a \cdot c}{b + c}, \quad y = \frac{(l + a) \cdot c}{b + c}.$$

In dem besonderen Falle, wo $b = c$ ist, gilt

$$x = \frac{l - a}{2}, \quad y = \frac{l + a}{2}.$$

Mitunter kann der Apparat nur in einiger Entfernung von den Enden der zu prüfenden Leitung Aufstellung finden, sodaß der Widerstand der verwendeten Zuleitungen höher ist, als der Widerstand vom Leitungsende bis zur Fehlerstelle. In diesem Falle empfiehlt es sich, nach der folgenden Schaltung (siehe Fig. 78) zu arbeiten. Sämtliche Löcher in b werden gestöpselt. In a wird der Widerstand so lange

Fig. 79.



verändert, bis die Ablenkung am Galvanometer gleich Null ist. Die Widerstände der Zuleitungen w_1 und w_2 müssen bekannt sein. Dann bestehen die Beziehungen:

$$x = \frac{l(a + w_1)}{a + c + w_1 + w_2}, \quad y = \frac{l(c + w_2)}{a + c + w_1 + w_2}.$$

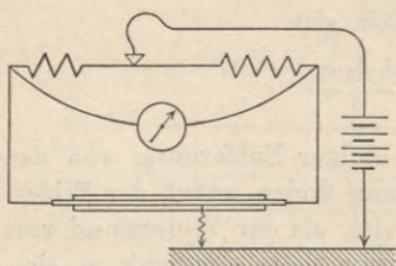
Sind w_1 und w_2 gegenüber a und c sehr klein, so kann man setzen

$$x = \frac{l \cdot a}{a + c}, \quad y = \frac{l \cdot c}{a + c}.$$

Hartmann und Braun bauen zur Fehlerbestimmung einen Apparat, bei dem an Stelle des Stöpselrheostaten ein solcher mit Schleif-

kontakten zur Einstellung der Widerstände dient. Der Rheostat enthält einen Meßdraht mit Schleifkontakt sowie neue Vorschaltwiderstände, deren jeder gleich dem Meßdrahtwiderstand ist; dieselben werden durch einfache Kurbeldrehung dem Draht beiderseits zugeschaltet. Im übrigen ist die Handhabung des Apparates, der eine gewöhnliche Brückenschaltung darstellt, ohne weiteres aus der schematischen Zeichnung sowie dem beigefügten Schaltungsschema (Fig. 79 auf S. 195 und Fig. 80) zu erkennen.

Fig. 80.



Die verschiedenen Apparate, die zu sämtlichen an Kabelnetzen vorkommenden Messungen erforderlich sind, werden von mehreren Firmen in Kabelmeßwagen oder Kabelmeßkarren vereinigt geliefert, mit Hilfe deren die Überwachung eines Leitungsnetzes dem Personal einer elektrischen Zentralstation in hohem Grade erleichtert wird.

M. Elektrizitätszähler.

Der Elektrizitätszähler hat die Aufgabe, in elektrischen Anlagen durch Messung entweder die Elektrizitätsmenge in Ampèrestunden oder die Arbeitsleistung in Wattstunden zu bestimmen.

Während die erstere Methode bei Gleichstrom, und zwar speziell nur in den Fällen als genügend genau anzusehen ist, in welchen die Spannung hinreichend konstant ist, sodaß aus der Angabe des Zählers die Arbeitsleistung durch Multiplikation mit einem konstanten Faktor erhalten wird, so kann die zweite Methode auch da Verwendung finden, wo größere Spannungsschwankungen auftreten, da die Arbeitsleistung unter Berücksichtigung sowohl der Stromstärke wie der Spannungshöhe registriert wird.

1. Ampèrestundenzähler.

Die Elektrizitätsmenge Q in Ampèrestunden, welche in der Zeit $t = t_1 - t_2$ durch einen Leiter fließt, ist, wenn i den Strom in Amp. bedeutet:

$$(1) \dots \dots \dots Q = \int_{t_1}^{t_2} i \cdot dt.$$

In einfacher Weise wird die Aufgabe, die Strommenge zu registrieren, durch den Elektrizitätsmesser von Raps gelöst. Der Zeiger eines Ampèremeters (d'Arsonval) wird in bestimmten konstanten Zeit-

abschnitten durch eine elektromagnetisch bewegte Unruhe vorübergehend in seine Nullage zurückgeführt. Der Weg, den der Zeiger dabei zurücklegt, wird auf ein Zählwerk übertragen und muß der Ampèrezahl proportional sein.

Der O'Keenan-Ampèrestundenzähler ist ein magneto-elektrischer Motorzähler. Das Feld wird von einem feststehenden Magneten gebildet. Der stromführende Anker selbst liegt im Nebenschluß zu einem festen Widerstand und trägt die Spannung an den Bürsten nur maximal 0,5 Volt. Der Kollektor ist infolge dieser geringen Spannung und des Nebenschlusses vor Abnutzung durch Funkenbildung geschützt. Das Instrument zeichnet sich vor allem durch seine große Einfachheit in der Konstruktion aus, besonders gegenüber den dynamo-elektrischen (Wattstunden-) Motorzählern.

Der Aronsche Ampèrestundenzähler besteht aus zwei gleichen Uhrwerken mit Pendeln, welche bei stromlosem Zustande des Zählers gleiche Schwingungsdauer haben. Am unteren Ende des einen Pendels ist ein Stahlmagnet angebracht; unter diesem befindet sich die Hauptstromspule. Durch den Verbrauchsstrom, der diese Spule durchfließt, wird die Schwingungsdauer des darüber schwingenden Pendels verkürzt. Der so bewirkte Gangunterschied der Pendel wird mittels eines Planetenrades auf ein Zählwerk übertragen.

Die Schuckertschen Ampèrestundenzähler entsprechen der Konstruktion nach den unten erwähnten Wattstundenmotorzählern.

2. Wattstundenzähler.

Dieselben messen den elektrischen Energieverbrauch, der mathematisch genau ausgedrückt ist durch

$$(2) \dots \dots \dots E = \int_{t_1}^{t_2} i \cdot e \cdot dt,$$

worin e die Spannung bedeutet, welcher der Stromempfänger ausgesetzt ist. Die Messung dieser Größe wird ermöglicht durch Verwendung einer weiteren, der sogen. Spannungsspule, sodaß das Zählwerk unter dem Einfluß der Produktwirkung von Strom und Spannung angetrieben wird.

Aus dem Aronschen Ampèrestundenzähler entsteht der Aronsche Wattstundenzähler, indem der über der Stromspule schwingende Magnet durch eine Nebenschluß-(Spannungs)-spule ersetzt wird.

Sehr verbreitet sind die Motorzähler¹⁾, welche auf dem Prinzip der Nebenschlußmotoren beruhen. Indes werden bei denselben die Erregerspulen vom Verbrauchsstrom, der Anker vom Nebenschlußstrom durchflossen. Anker und Feld sind eisenfrei konstruiert, um fehlerhafte Angaben infolge von Hysterisis zu vermeiden. Die geringe vom

¹⁾ Dieselben werden von vielen größeren Firmen (Union, Schuckert, Lux-Werke u. s. w.) fabriziert.

Motor entwickelte mechanische Arbeit wird durch die Achse des Motors an eine Metallscheibe, die zwischen den Polen eines kräftigen Magneten rotiert, übertragen und so durch elektrische Dämpfung aufgenommen. Der Nebenschlußstrom wird dem Anker durch einen Kollektor zugeführt. Der Reibungswiderstand der Motorachse in den Lagern und die Bürstenreibung werden durch Hilfsspulen kompensiert.

Die oben genannten Wattstundenzähler sind sowohl für Gleich- wie für Wechselstrom zu verwenden.

Nur für Gleichstrom eignet sich der oszillierende Gleichstromzähler der Allg. El.-Gesellschaft. Er vermeidet gegenüber den vorerwähnten rotierenden Motorzählern die Nachteile des Kollektors. Hauptsächlich hat die am Kollektor auftretende Funkenbildung und die damit verbundene Zerstörung der Berührungsflächen eine Veränderung des Reibungswiderstandes zur Folge, worunter die Genauigkeit und Empfindlichkeit des Instrumentes notwendig mit der Zeit leidet. Beim oszillierenden A. E. G.-Zähler geschieht der Antrieb des Zählwerks durch ein elektromagnetisches Relais, indem ein zwischen zwei Spulen intermittierend bewegter Haken ein Zahnrad Zahn um Zahn weiterschaltet. Die zwischen zwei Kontakten pendelnden, unter dem Einfluß der Spannung stehenden Nebenschlußspulen haben nur die Aufgabe, die elektrische Umschaltung des Relais auszuführen. Das bewegliche System leistet demnach zum Betrieb des Zählwerks keine Arbeit. Es ist möglich, das Schalt- und Zählwerk als besonderen Apparat vom oszillierenden Motor räumlich vollkommen zu trennen.

Für Wechselstrom kommen außer den oben schon genannten eine Reihe von Zählern nach dem Princip von Ferraris und Thomson in Anwendung. Diese entsprechen dem Grundgedanken nach den asynchronen Motoren; der bewegliche Teil besteht aus einem Kupfer- oder Aluminiumkörper, der unter der Einwirkung der festen Induktionsspulen rotiert. Die meisten derselben haben den Nachteil, daß sie nur bei annähernd induktionsfreier Belastung richtig zeigen. Durch die Raabsche¹⁾ Konstruktion gelang es, einen exakt messenden Wattstundenzähler nach Ferrarischem Prinzip zu bauen. Raab verwendet zwei Spannungsspulen, eine solche mit hoher Selbstinduktion, d. h. großer Phasenverschiebung zwischen Feld und Spannung, und eine solche mit großem Widerstand und kleiner Phasenverschiebung.

Außer diesen Zählern sind noch verschiedene andere im Verkehr, doch möge es genügen, die wichtigsten Typen ihrem Prinzip nach gekennzeichnet zu haben.

Im allgemeinen haben die Ampèrestundenzähler gegenüber den Wattstundenzählern den Vorzug der größeren Einfachheit, da sie keiner Spannungsspulen bedürfen. Infolgedessen sind die Anschaffungs- und

¹⁾ Siehe die Arbeit von J. A. Möllinger, Elektrot. Zeitschr. 1898, Heft 36.

auch die Unterhaltungskosten geringer, so namentlich bei den O'Keenan-Zählern.

Ferner liegt es in der Natur der Wattstundenzähler, daß sie einen beständigen, wenn auch kleinen Stromverbrauch haben, indem die Nebenschlußspulen fortwährend der Spannung ausgesetzt und daher von Strom durchflossen sind. Der Nebenschlußstrom fließt auf Kosten des Elektrizitätswerkes, da der Verlust durch denselben am Zählwerk nicht zum Ausdruck kommt. Beträgt z. B. der Nebenschlußwiderstand r eines Zählers 10 000 Ohm bei 220 Volt Netzspannung E , so findet im Nebenschluß ein sekundlicher Verbrauch von

$$\frac{E^2}{r} = \frac{220^2}{10000} = 4,84 \text{ Watt statt;}$$

das macht im Jahr eine Arbeitsleistung von

$$4,84 \cdot 24 \cdot 365 = 42\,000 \text{ Wattstunden.}$$

Betragen nun die Erzeugungskosten pro Kilowattstunde 20 Pfennig, so muß das Werk $42 \cdot 0,2 = 8,4$ Mk. pro Jahr für den Energieverlust in der Nebenschlußspule des Zählers aufwenden.

Auch in den Hauptstromspulen finden naturgemäß Verluste durch Ohmschen Spannungsabfall statt und zwar entsprechend dem jeweiligen Stromkonsum.

Will man über die Güte eines Zählers ein vollständiges Urteil gewinnen, so hat sich die Untersuchung im allgemeinen auf folgende Punkte zu erstrecken:

Abhängigkeit der Angaben des Zählers von der Belastung bei normaler Spannung, bezw. Abweichungen derselben von den Sollwerten. (Größter prozentualer Fehler innerhalb gewisser Belastungsgrenzen).

Kleinste Belastung, bei der der Zähler noch sicher anläuft (Empfindlichkeit).

Einfluß der Spannung auf das richtige Anzeigen des Zählers.

Abhängigkeit der Angaben von vorausgegangener Dauerbelastung (Einfluß der Erwärmung).

Einfluß von Phasenverschiebung und abnormaler Periodenzahl bei Zählern für Wechselstrom.

Einfluß unrichtiger Montage: z. B. Aufhängung in schiefer Lage.

Einfluß benachbarter Magnetfelder.

Effektverluste im Leerlauf und Betrieb u. s. w.

Beispiele.

Als Beispiel möge hier zunächst die von mir vorgenommene Untersuchung eines Einphasenzählers der E.-A.-G. vorm. Schuckert u. Co. angeführt sein. Das Zifferblatt trug die Angaben:

— 120 Volt, 100 Amp., 12 000 Watt bei 53,4 Touren pro Minute — (entsprechend einem Verhältnis des Energieverbrauches zur Tourenzahl pro Minute von 224,7).

Die Angaben des Zählers wurden verglichen mit denjenigen eines Wattmeters, eines Präzisionsampèremeters und eines Cardew-Voltmeters. Außerdem wurde die Tourenzahl pro Minute an der großen Scheibe des Zählers und die Zeitdauer jedes Versuches auf Sekunden genau beobachtet. Als Belastung wurden Glühlampen benutzt.

Die Ergebnisse des Versuchs sind aus der unten folgenden Tabelle und graphischen Darstellung zu ersehen; letztere gibt ein Bild über das Verhältnis der durch den Zähler durchgeführten zu der angezeigten elektrischen Energie (siehe Fig. 81). Der Gang der Rechnung soll für die Leistung 12 200 Watt nachstehend gezeigt werden:

Beobachtete Zeit	Ablesung am Zähler	Watt-Ablesung (Mittelwert)	Touren pro Minute
6h 16' 20''	0011,03		
6h 37' 35''	0015,32	12 200	53,5
Differenz: 21' 15''	Diff.: 4,29 K.-W.-Stdn.		
= 21,25'			
= 0,3541 Stunden.			

Die eingeführte Energie berechnet sich zu:

$$12,200 \cdot 0,3541 = 4,320 \text{ K.-W.-Stdn.}$$

$$\frac{\text{Eingeleitete Energie}}{\text{Angezeigte Energie}} = \frac{4,320}{4,290} = 1,007,$$

daher ist der angezeigte Wert um 0,7 Proz. kleiner als der Sollwert.

	Eingeleitete Energie (korrigierte Mittelwerte) Watt	Verhältnis der ein- geleiteten Energie zur angezeigten	Prozentualer Fehler gegenüber dem Sollwert
1.	150	0,97500	+ 2,500
2.	508	1,01500	- 1,500
3.	810	1,01920	- 1,920
4.	1 802	1,01490	- 1,490
5.	2 633	1,00570	- 0,570
6.	4 000	0,99480	+ 0,520
7.	7 000	0,99230	+ 0,770
8.	8 200	0,99653	+ 0,347
9.	12 200	1,00700	- 0,700

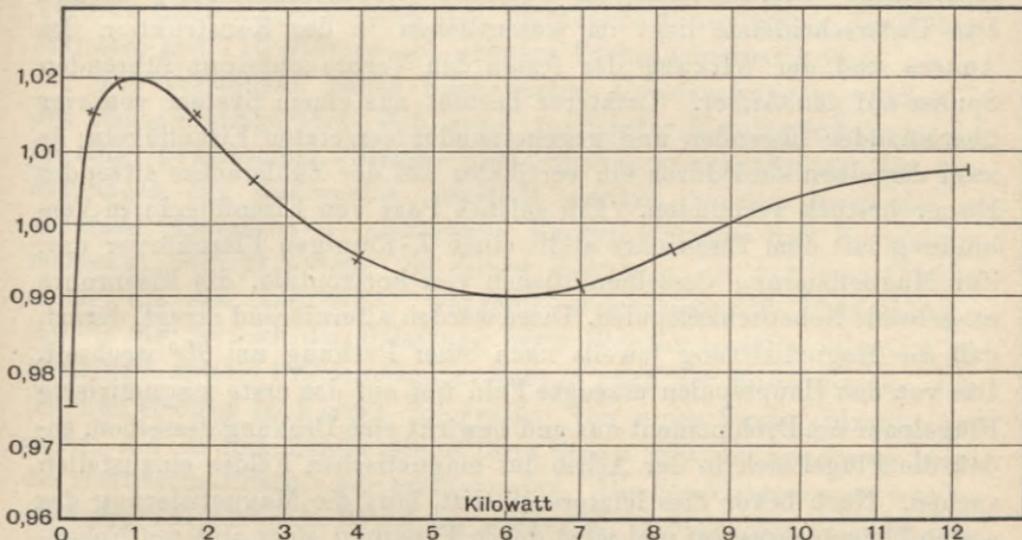
Bei Einschaltung des Zählers ohne Stromverbrauch lief die Scheibe nicht, bei einem Energieverbrauche von 59 Watt dagegen sofort an; jedoch war die Umfangsgeschwindigkeit derselben nicht konstant. Nach Ausschaltung blieb die Scheibe stehen. Bei Einführung einer Energie von 99 Watt lief die Scheibe entsprechend schneller an und nach Ausschalten verlangsamte sich noch einige Minuten weiter.

Das Ergebnis der Untersuchung sei in folgendem zusammengefaßt: Der Anlauf erfolgt bereits bei 0,49 Proz. der normalen Belastung. Es müssen demnach die Reibungswiderstände gering und die

Empfindlichkeit des Instrumentes für kleine Ströme groß sein. Von 8 Proz. Belastung sind die Angaben schon um etwa 2 Proz. genau, während von 19 Proz. bis über die normale Belastung hinaus die Fehler nur in den Grenzen von ± 1 Proz. schwanken. Die Angaben des Zählers zeigen also in weiten Grenzen der Belastung von 10 Proz. aufwärts sehr geringe Abweichungen vom Sollwerte.

Als zweites Beispiel diene die Untersuchung, welche ich an einem Zähler von Hartmann u. Braun mit Einphasenwechselstrom, welcher

Fig. 81.



schon mehrere Jahre im Betriebe war, vorgenommen habe. Der Zähler war für 120 Volt und 200 Amp. bestimmt. Der durch den Zähler geleitete Strom speiste eine Anzahl Glühlampen.

Als Vergleichsinstrumente wurden ein Wattmeter, ein Cardew-Voltmeter und ein Präzisionsampèremeter benutzt.

Die Messungen, die in analoger Weise wie beim vorhergehenden Beispiele durchgeführt wurden, hatten folgende Resultate:

Der Anlauf erfolgte bereits bei 0,25 Proz. der normalen Belastung. Das Instrument ist somit für kleine Belastungen sehr empfindlich und müssen demnach die Reibungswiderstände sehr gering sein.

Bei Belastungen von 3 bis 35 Proz. waren die Angaben des Instrumentes um 1 bis 4 Proz. zu hoch, während bei höheren Belastungen bis zu 70 Proz. die Abweichung vom Sollwerte $+ 0,8$ bis $+ 1$ Proz. ergab. Die Angaben des Zählers zeigen also in den mittleren Gebrauchsgrenzen von 35 Proz. Belastung geringe Abweichungen vom normalen Werte.

Untersuchung eines Flügel-Wattstundenzählers von Siemens u. Halske, A.-G., für 110 Volt und 10 Ampère.

Der Flügel-Wattstundenzähler gehört unter die Klasse der Motorzähler, nimmt jedoch vermöge seiner Bauart eine Sonderstellung ein, indem dieselbe nicht auf dem oben (S. 197) gekennzeichneten, für andere Motorzähler charakteristischen Prinzipie (Nebenschlußmotor) beruht. Das Unterscheidende liegt im wesentlichen in der Konstruktion des Ankers und der Wirkung der festen den Verbrauchsstrom führenden Spulen auf den Anker. Letzterer besteht aus einem System von vier übereinander liegenden und gegeneinander versetzten Eisenflügeln; je zwei derselben sind durch ein vertikales auf der Zählerachse sitzendes Eisenrohrstück verbunden. Ein solches Paar von Eisenflügeln in Verbindung mit dem Eisenrohre stellt einen Z-förmigen Eisenkörper dar. Zur Magnetisierung desselben dienen vier horizontale, die Eisenrohre umgebende Nebenschlußspulen. Diese werden alternierend erregt, derart, daß die Magnetisierung jeweils nach einer Drehung um 90° wechselt. Das von den Hauptspulen erzeugte Feld übt auf das erste magnetisierte Flügelpaar ein Drehmoment aus und bewirkt eine Drehung desselben, so daß die Flügel sich in der Achse des magnetischen Feldes einzustellen suchen. Noch bevor dies letztere eintritt, hört die Magnetisierung des ersten Flügelpaares auf und wird durch Erregung einer anderen Nebenschlußspule das zweite um 90° gegen das erste versetzte Flügelpaar magnetisiert. Die Umschaltung der Erregung auf eine andere Spule nach einer Vierteldrehung der Zählerachse geschieht mittels eines vierlamelligen Kommutators. Demnach ist die Wirkung der Nebenschluß-(Spannungs-)spulen auf die Stromspulen — im Gegensatze zu den gewöhnlichen Motorzählern — nur eine mittelbare.

Die durch das Drehmoment erzeugte mechanische Leistung wird auch beim Flügel-Wattstundenzähler, wie sonst üblich, durch die Bewegung einer Kupfer-Bremsscheibe zwischen den Schenkeln permanenter Stahlmagnete verbraucht. Die Übersetzung der Ankerdrehung auf ein Zählwerk erfolgt in der üblichen Weise durch Schnecke und Schraubensrad. — Laut Angabe (auf dem Zählergehäuse) entspricht einem Energieverbrauche von einer Kilowattstunde eine Umdrehungszahl der Scheibe von 2880.

Die nachstehenden vom Verfasser vorgenommenen Untersuchungen erstreckten sich:

1. Auf Vergleichung der auf dem Zähler angegebenen Konstanten (2880) mit den Angaben des Zählwerkes.
2. Auf die Bestimmung der Empfindlichkeit und der Belastung, bei welcher der Zähler sicher angeht und dauernd weiterläuft.

3. Auf eine Eichung bei verschiedenen Belastungen, von 0,2 Proz. der normalen Belastung (10 Amp.) bis zu 20 Proz. Überlastung.

4. Auf Bestimmung des Spannungsabfalles und des Energieverlustes der Hauptstromspule, sowie Bestimmung des Energieverlustes im Nebenschlusse.

5. Auf den Einfluß der Dauer des Betriebes auf die Angaben (zunehmende Temperatur bei mehrstündiger Belastung).

6. Auf die Beeinflussung der Angaben des Zählers durch Spannungsschwankungen.

7. Auf den Nachweis etwaigen Leerlaufes bei Ausschaltung des Verbrauchsstromkreises bezw. bei plötzlicher Einschaltung des Nebenschlusses mit 110 Volt, jedoch offenem Verbrauchsstromkreise.

Die vorstehend näher bezeichneten Untersuchungen wurden in der Weise durchgeführt, daß unter tunlichster Konstanterhaltung der jeweilig gewünschten Strom- und Spannungsverhältnisse die Umdrehungen der Zählerachse ermittelt wurden, welche durch die — ebenfalls gemessene — elektrische Energie (Strom- und Spannungsmessung) bewirkt waren. Zu diesem Behufe wurde mit dem Chronometer die Zeit bestimmt, während gleichzeitig die Umdrehungen ($10 \div 600$ je nach der Belastung bezw. Rotationsgeschwindigkeit) gezählt und mittels Präzisionsapparaten, je nach der Konstanz der elektrischen Größen in kurzen Intervallen von einer Viertel-Minute und mehr, der in den Zähler eingeführte Strom und die Spannung bezw. die elektrische Energie gemessen wurden. Die Einzelmessungen wurden etwa viermal für jede Belastung wiederholt und aus den Mittelwerten das Verhältnis

$$\frac{\text{Eingeleitete elektrische Energie}}{\text{Angezeigte elektrische Energie}}$$

berechnet. Es wurden zwei Beobachtungsreihen aufgenommen und zwar — jeweils nach vorheriger längerer Einschaltung der Nebenschlußspulen — zunächst nach etwa zweistündiger Vollbelastung des Zählers mit 10 Amp. bei abfallender Belastung, alsdann mit zunehmenden Werten der Belastung mit $\frac{1}{50}$ der Vollast beginnend.

Die bei den Messungen benutzten Präzisionsinstrumente (Milli-Volt- und Ampèremeter und Weston-Voltmeter von Siemens und Halske) wurden vor und nach den Versuchen mit Normalinstrumenten geeicht.

Im einzelnen lieferten die Untersuchungen folgende Resultate:

ad 1. Die Übersetzungskonstante des Zählers (2880 Umdrehungen = 1 Kilowattstunde) wurde durch Zählen der Umdrehungen und gleichzeitige Beobachtung der Zifferblätter des Zählers über eine längere Zeitdauer hin bestätigt gefunden, und konnte daher obige Zahlengröße den weiteren Versuchen zugrunde gelegt werden.

ad 2. Die Empfindlichkeitsversuche wurden bei 110 Volt Gleichstrom durchgeführt. Es ergab sich hierbei, daß der Anlauf aus den

meisten Stellungen der Zählerachse schon bei sehr geringen Stromstärken erfolgte; ein Anlaufen in allen Stellungen sowie sicheres Weiterlaufen konnte bei 0,096 Amp. (10,56 Watt), d. h. bei 0,96 Proz. der Vollast festgestellt werden; die Rotationsgeschwindigkeit war hierbei während einer Umdrehung noch etwas ungleichmäßig.

ad 3. Die bei der Eichung gefundenen Werte sind nachstehend tabellarisch und graphisch für die verschiedenen Belastungen dargestellt.

Mittlere Spannung in Volt	Mittlere Stromstärke in Amp.	Elektrische Energie in Watt	Eingeleitete Angezeigte Energie	Prozentualer Fehler in Proz.	Bemerkungen
110	0,198	21,78	1,060	— 6	
110	0,401	44,11	1,034	— 3,4	
110	0,611	67,21	1,019	— 1,9	
110	0,852	93,72	1,012	— 1,2	
110	1,210	133,10	1,006	— 0,6	
110	2,510	276,10	0,988	+ 1,2	
110	5,000	550,00	0,996	+ 0,4	
110	7,510	826,10	1,009	— 0,9	
110	10,000	1100,00	1,023	— 2,3	
110	12,000	1320,00	1,033	— 3,3	
110	12,000	1320,00	1,040	— 4,0	Messungen nach
110	10,000	1100,00	1,026	— 2,6	zweistündiger
110	7,530	828,30	1,015	— 1,5	Belastung mit
110	5,030	553,30	0,995	+ 0,5	normaler Strom-
110	2,530	278,30	0,981	+ 1,9	stärke (10 Amp.)

Die Spannung war während der Versuche konstant (110 Volt), und konnten daher als Abszissen die Stromstärken aufgetragen werden; als Ordinaten sind die Werte des Verhältnisses

$$\frac{\text{Eingeleitete elektrische Energie}}{\text{Angezeigte elektrische Energie}}$$

ingezeichnet (siehe Fig. 82).

ad 4. Der Spannungsabfall bzw. der Energieverlust in der Hauptstromspule betrug bei 10 Amp. 0,8 Volt bzw. 8 Watt.

Die Stromstärke in der Nebenschlußwicklung wurde bei 110 Volt zu 0,0185 Amp. gemessen, woraus sich ein Wattverbrauch von 2,035 ergibt.

Insgesamt ist demnach der Eigenverbrauch des Zählers bei Vollast:

$$8 \text{ Watt} + 2,035 \text{ Watt} = \sim 10 \text{ Watt.}$$

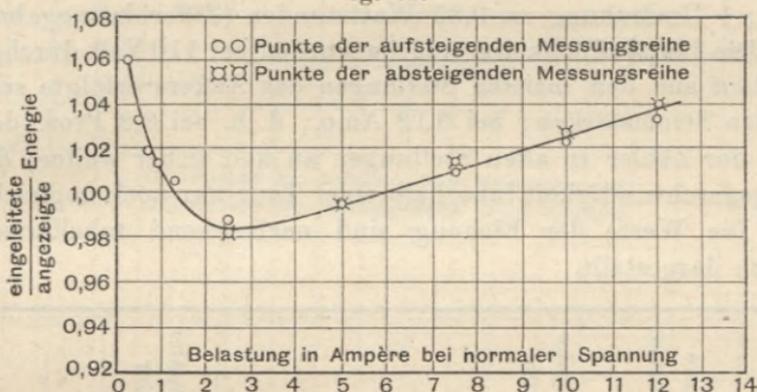
ad 5. Den Einfluß der Temperaturerhöhung infolge von Dauerbelastung ersieht man aus der graphischen Darstellung, in welcher die Punkte der aufsteigenden Meßreihe dem kalten Zustande des Zählers,

diejenigen der absteigenden Meßreihe dem warmen Zustande entsprechen. Die maximale gemessene Abweichung in den Angaben infolge Erwärmung betrug bei den Versuchen nur 0,7 Proz.

ad 6. Um den Einfluß der Spannungsänderungen auf die Angaben des Zählers zu prüfen, wurden Messungen bei 100,2 Volt und 122,8 Volt vorgenommen. Bei dieser hohen Spannungsänderung um etwa 20 Proz. und Vollast (10 Amp.) wurde eine Gesamtschwankung in den Angaben von 2,5 Proz. festgestellt; es sei jedoch hierzu bemerkt, daß die im praktischen Betriebe vorkommenden Spannungsschwankungen bedeutend geringer (etwa 3 Proz.) sind.

ad 7. Bei Ausschaltung des Verbrauchsstromkreises sowie bei plötzlicher Einschaltung der Spannungsspule ergab sich kein Leerlauf,

Fig. 82.



sondern der Anker blieb in jeder Lage sofort stehen. — Aus den sub 1. bis 7. beschriebenen Prüfungen resultiert:

1. Der Anlauf des Zählers sowie der dauernde Weiterlauf erfolgt mit Sicherheit bei 10,56 Watt oder bei 0,96 Proz. der Vollbelastung (10 Amp.).

2. Die Zählerangaben zeigen von 2 Proz. bis 7 Proz. der Vollast maximal 6 Proz. und minimal 1,5 Proz. Fehler und innerhalb der gewöhnlichen Gebrauchsgrenzen von 10 Proz. ÷ 100 Proz. der Vollast nicht über $\pm 2,3$ Proz. Fehler, während bei Überlastung von 25 Proz. der maximale Fehler 4 Proz. nicht überschreitet. Auch dieses Resultat genügt den Anforderungen der Praxis vollauf.

3. Der Eigenverbrauch ist bei 110 Volt und Vollast für die Hauptstromspulen etwa 8 Watt, für die Nebenschlußspulen etwa 2 Watt, insgesamt etwa 10 Watt, d. h. 0,91 Proz. der Vollast.

4. Der Einfluß der Erwärmung infolge von Dauerbelastung des Zählers ist gering (maximal 0,7 Proz. Abweichung in den Angaben).

5. Die hohen Spannungsänderungen von 10 Proz. nach oben und 10 Proz. nach unten haben nur geringen Einfluß auf die Angaben.

6. Der Zähler zeigt keinen Leerlauf.

Untersuchung eines Gleichstrom-Motorzählers der Union Elektrizitäts-Gesellschaft Berlin für 110 Volt und 15 Ampère.

Die Untersuchungen des Zählers erstreckten sich auf die gleichen Punkte wie bei dem vorstehend beschriebenen Flügel-Wattstunden-zähler und wurden in derselben Weise durchgeführt. Als Konstante war auf dem Gehäuse angegeben: 1 Umdrehung = 0,35 Wattstunden. Die vom Verfasser vorgenommenen Untersuchungen hatten folgende Ergebnisse:

1. Ein längerer Versuch, bei welchem die Umdrehungen der Scheibe sowie die Zifferblätter beobachtet wurden, bestätigte die Beziehung: 1 Umdrehung = 0,35 Wattstunden (Zifferblattangabe).

2. Die Empfindlichkeitsversuche wurden bei 110 Volt durchgeführt. Der Anlauf aus den meisten Stellungen des Ankers erfolgte schon bei minimalen Stromstärken; bei 0,12 Amp., d. h. bei 0,8 Proz. der Voll-last lief der Zähler in allen Stellungen an und sicher weiter; die Um-drehungsgeschwindigkeit innerhalb einer Tour war noch ungleichmäßig.

3. Die Werte der Eichung sind nachstehend tabellarisch und graphisch dargestellt.

Mittlere Spannung	Mittlere Stromstärke	Elektrische Energie	Eingeleitete Angezeigte Energie	Prozentualer Fehler	Bemerkungen
in Volt	in Amp.	in Watt		in Proz.	
110	0,198	21,78	0,790	+ 21,0	
110	0,400	44,00	0,868	+ 13,2	
110	0,511	56,21	0,896	+ 10,4	
110	0,615	67,65	0,922	+ 7,8	
110	0,830	91,30	0,940	+ 6,0	
110	0,920	101,20	0,948	+ 5,2	
110	1,098	120,78	0,955	+ 4,5	
110	1,440	158,40	0,970	+ 3,0	
110	2,000	220,00	0,983	+ 1,7	
110	3,020	332,20	0,986	+ 1,4	
110	5,420	596,20	0,997	+ 0,3	
110	6,800	748,00	0,997	+ 0,3	
110	10,000	1100,00	1,005	- 0,5	
110	12,000	1320,00	1,005	- 0,5	
110	15,000	1650,00	1,010	- 1,0	
110	18,200	2002,00	1,005	- 0,5	
110	15,000	1650,00	1,001	- 0,1	
110	12,000	1320,00	1,001	- 0,1	
110	10,000	1100,00	1,004	- 0,4	Messungen nach
110	6,900	759,00	0,990	+ 0,1	zweistündiger
110	5,000	550,00	0,995	+ 0,5	Belastung mit
110	3,020	332,00	0,989	+ 1,1	normaler Strom-
110	1,920	221,20	0,974	+ 2,6	stärke (15 Amp.)

Die Spannung war konstant 110 Volt. Als Abszissen sind die Stromstärken und als Ordinaten das Verhältnis

$$\frac{\text{Eingeleitete Energie}}{\text{Angezeigte Energie}}$$

aufgetragen (siehe Fig. 83).

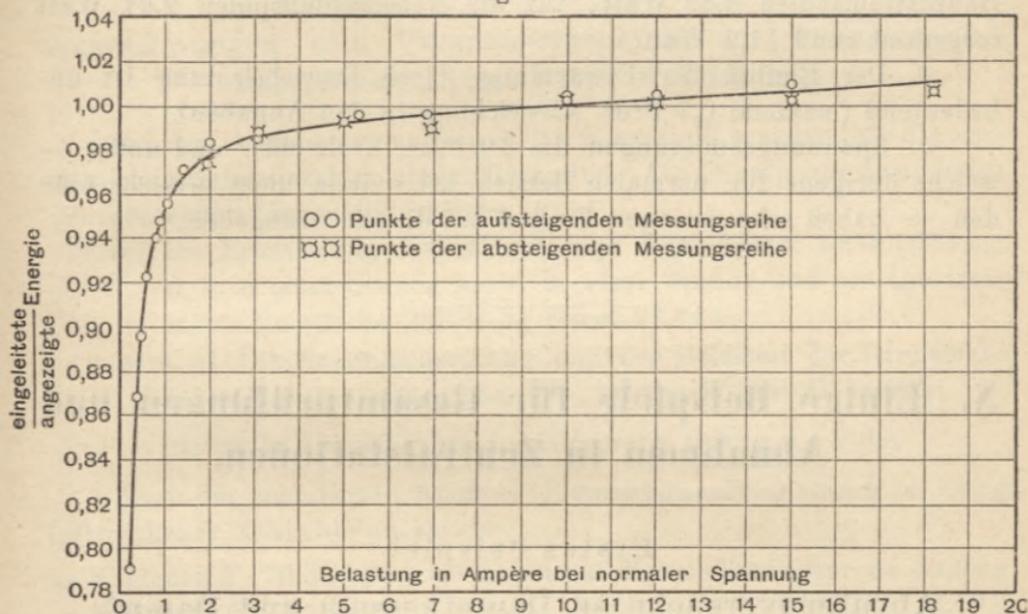
4. Der Spannungsabfall in der Hauptstromspule betrug bei 15 Amp. 0,5925 Volt, der Energieverlust $0,5925 \times 15 = 8,89$ Watt.

Die Stromstärke in der Nebenschlußwicklung war bei 110 Volt 0,027 Amp., danach der Wattverbrauch 2,97.

Insgesamt ist somit der Eigenverbrauch des Zählers bei Vollast:

$$8,89 \text{ Watt} + 2,97 \text{ Watt} = \sim 11,9 \text{ Watt.}$$

Fig. 83.



5. Der Einfluß der Erwärmung durch Dauerbelastung ist, wie die graphische Darstellung erkennen läßt, gering; sie hat nach den Versuchsergebnissen eine maximale Abweichung in den Zählerangaben von 0,9 Proz. zur Folge.

6. Um den Einfluß der Spannungsschwankungen zu ermitteln, wurden Messungen bei 99,8 Volt und 122,5 Volt vorgenommen. Bei dieser hohen Spannungsänderung um etwa 20 Proz. und bei Vollast (15 Ampère) wurde eine Gesamtschwankung der Resultate um weniger als 2 Proz. festgestellt; die gleiche Untersuchung für halbe Belastung ergab eine Gesamtschwankung von 1,6 Proz.; die im normalen Betriebe vorkommenden Spannungsschwankungen sind jedoch viel geringer als die beim Versuche herbeigeführten.

7. Bei Ausschaltung des Verbrauchsstromkreises sowie bei plötzlicher Einschaltung der Spannungsspule ergab sich kein Leerlauf, und blieb der Anker sofort stehen.

Hiernach läßt sich das Ergebnis der Prüfungen im nachstehenden zusammenfassen:

1. Der Anlauf des Zählers erfolgt mit Sicherheit bei 0,12 Amp., d. h. bei 0,8 Proz. der Vollast.

2. Die Angaben des Zählers zeigen nur in den unteren Grenzen größere Abweichungen vom Sollwerte und zwar von 7 Proz. \div 25 Proz. der Vollast einen maximalen Fehler von 5 Proz., während von 25 Proz. der Vollast bis 25 Proz. Überlastung die Fehler weniger als 1 Proz. betragen; gegenüber diesen günstigen Ergebnissen in den mittleren und oberen Grenzen spielen die größeren Abweichungen in den untersten Grenzen keine Rolle.

3. Der Eigenverbrauch ist bei 110 Volt und Vollast für die Hauptstromspulen 8,89 Watt, für die Nebenschlußspulen 2,97 Watt insgesamt rund 11,9 Watt.

4. Der Einfluß der Erwärmung durch Dauerbelastung ist unbedeutend (maximal 0,7 Proz. Abweichung in den Angaben).

5. Spannungsänderungen um 10 Proz. nach oben und unten — welche übrigens für normalen Betrieb bei weitem nicht erreicht werden — haben sehr geringen Einfluß auf die Zählerangaben.

N. Einige Beispiele für Gesamtprüfungen und Abnahmen in Zentralstationen.

Erstes Beispiel.

Abnahmeversuche an Dampfkesseln und Dampfmaschinen der von der E. A. G. vorm. Schuckert u. Co. erbauten elektrischen Zentrale Regensburg.

Daten und Garantien der Flammenrohr-Dampfkesselanlage von J. A. Maffei, München.

1. Die gesamte wasserberührte Heizfläche: 90 qm.
2. Die totale Rostfläche: 2,5 qm.
3. Betriebsüberdruck: 9,5 Atm.
4. Verfeuerte Kohlensorte: „Austria-Würfel II“.
5. Mit 1 kg Kohle brutto von 6600 Kalorien sind bei normaler und maximaler Beanspruchung 7,7 kg Wasser von 0° C. in Dampf von 600 Kalorien Erzeugungswärme garantiert.
6. Der Wirkungsgrad des Kessels, d. h. das Verhältnis der Gesamtwärme des erzeugten Wasserdampfes zu der Gesamtwärme der

Kohle — und zwar brutto — soll 70 Proz. bei 2 Proz. Toleranz betragen. (Forderung 6. ist identisch mit Forderung 5., wie folgender Zusammenhang der Ziffern unter 5. und 6. zeigt:

$$\frac{600 \text{ Kal.} \times 7,7}{6600 \text{ Kal.}} = 0,70.)$$

7. Jeder Kessel muß normal 18, maximal 22 kg technisch trockenen Dampf von 9,5 Atm. Überdruck pro 1 qm wasserberührte Heizfläche in einer Stunde liefern.

8. Die Dampfnaße darf bei Normalbeanspruchung nicht mehr als 1,5 Proz. betragen.

Ausrechnungen und Versuchsergebnisse der Flammenrohr-Dampfkesselanlage (siehe Kapitel A.).

Bei den Abnahmeversuchen sollte festgestellt werden, ob die vertraglichen Garantiezahlen eingehalten sind. Die Dauerprobe von sieben Stunden ergab folgende Resultate:

1. a) Die Ermittlung der Kohlenmenge ergab brutto total 1635 kg, d. i. in einer Stunde bzw. in einer Stunde und pro Quadratmeter Rostfläche 233,60 kg bzw. 93,44 kg.
1. b) u. c) Die Zusammensetzung und der Heizwert der feingemahlten Durchschnittsprobe der „Austria-Würfel II“ ergab:

Die grobe Feuchtigkeit der Glasprobe betrug 8,4 Proz.

Nach der chemischen Analyse (Elementaranalyse) waren in 100 g lufttrockener Rohkohle enthalten:

an Kohlenstoff	70,51 g	oder berechnet auf die feuchte Glasprobe	64,58 g
„ Wasserstoff	4,58 g	„ „ „ „	4,19 g
„ Sauerstoff			
und Stickstoff	8,75 g	„ „ „ „	8,01 g
„ Schwefel . .	0,58 g	„ „ „ „	0,53 g
„ Wasser (bei			
120° C.) . .	7,91 g	„ „ „ „	15,68 g
„ Asche . . .	7,67 g	„ „ „ „	7,01 g

Es berechnet sich der Heizwert aus der chemischen Analyse nach Formel (1), S. 5):

1. bei lufttrockenem Heizmaterial zu:

$$81 \cdot 70,51 + 290 \left(4,58 - \frac{8,75}{8} \right) + 25 \cdot 0,58 - 6 \cdot 7,91 = 6689,36 \text{ Kal.},$$

2. bei dem ursprünglichen feuchten Heizmaterial:

$$81 \cdot 64,58 + 290 \left(4,19 - \frac{8,01}{8} \right) + 25 \cdot 0,53 - 6 \cdot 15,68 = 6075 \text{ Kal.}$$

Die feingemahlene lufttrockene Rohkohle mit einem Wassergehalte von 7,91 Proz. und einem Aschegehalte von 7,67 Proz. ergibt auf kalorimetrischem Wege (s. S. 5 u. 6) einen Heizwert von 6696 Kal.

Aus dem Verhältnisse der Zahlen $\frac{6075}{6689,36}$ ergibt sich der kalorimetrische Heizwert des ursprünglichen feuchten Materiales zu:

$$\frac{6075}{6689,36} \cdot 6696 = 6081 \text{ Kal.}$$

1. d) Die zur Verbrennung erforderliche mittlere Zugstärke im Fuchse bzw. hinter den Flammrohren war in Millimetern 6,80 bzw. 6,71.
1. e) Die Temperatur der Heizgase im Fuchse wurde zu 232,6° C. bestimmt.
1. f) Die Gasuntersuchung ergab einen mittleren Gehalt von 10,365 Proz. Kohlensäure und 8,168 Proz. Sauerstoff im Fuchse.
1. g) Der ganze Schlacken- bzw. Aschengehalt beträgt 115 bzw. 112 kg, d. h. etwa 13,9 Proz. vom Gesamtkohlenmaterial.
2. a), b), c) Die Wägung des Speisewassers ergab total ein Gewicht von brutto 10 700 kg, d. h. in einer Stunde bzw. in einer Stunde und pro 1 qm Heizfläche 1528,8 bzw. 16,986; hierbei war die mittlere Temperatur des Speisewassers 6,72° C. Das Leitungskondensat der Wasserabscheider bzw. der Ringleitung fand sich zu 153,6 bzw. 80,7 kg, d. i. eine Dampfnaße von 2,19 Proz. Der totale Speisewasserverbrauch netto war somit 10 456,7 kg für die ganze Dauer des Versuches oder in einer Stunde 1495,2 kg.

Die mittlere Dampfspannung betrug in Atmosphären-Überdruck 9,03 kg/qcm, entsprechend einer Dampftemperatur von 179,2° C.

3. Die Dampfwärme λ_1 beträgt nach Formel (7), S. 9: 606,5 + 0,305 · 179,2 — 6,72, d. h. ~ 654,4 Kal. Unter Berücksichtigung des oben ermittelten Heizwertes der Kohle von 6081 Kal. sowie des Kohlen- bzw. Speisewasserverbrauches von 1635 kg bzw. 10 700 kg ergibt sich der Wirkungsgrad des Dampfkessels, s. S. 10 u. 11, zu:

$$\frac{654,4 \cdot 10\,700}{6081 \cdot 1635} = 0,704 \text{ oder } 70,4 \text{ Proz.}$$

Somit betragen die Wärmeverluste durch abziehende Heizgase, Herdrückstände, Strahlung u. s. w. 29,6 Proz.

Aus obigen Daten lassen sich noch folgende Werte ableiten: 1 kg Kohle brutto verdampft unter den Versuchsverhältnissen

$$\frac{10\,700}{1635} = 6,544 \text{ kg Wasser.}$$

1 kg Kohle brutto liefert Dampf von 600 Kal. Erzeugungswärme im Betrage von

$$6,544 \cdot \frac{654,4}{600} = 7,136 \text{ kg.}$$

Auf den Heizwert 6600 Kal. (vergl. Garantie 5.) ergibt sich eine Verdampfung von

$$7,136 \cdot \frac{6600}{6081} = 7,74 \text{ kg.}$$

Ergebnis der Untersuchungen hinsichtlich Erfüllung der Garantien.

Aus den Resultaten des Versuches geht hervor, daß bei einer Beanspruchung der wasserberührten Heizfläche mit ~ 17 kg Dampf pro 1 qm der Wirkungsgrad 70,4 Proz., die Dampfnaße 2,19 Proz. betrug; da die beim Versuche ermittelte Zahl für die Dampfnaße durch die nicht ganz zuverlässig arbeitenden Kondenstöpfe beeinflusst war, so ist sicher anzunehmen, daß dieselbe in Wirklichkeit etwas geringer war. — Da der Wirkungsgrad erreicht ist, so ist auch die Garantie unter 5., betreffend Dampferzeugung pro Kilogramm Kohle, erfüllt; es ergab sich ein Wert von 7,74 kg Dampf.

Die Garantien sind sonach eingehalten.

Anschließend hieran folgen die Versuche an den zu den Kesseln gehörigen Maffei-Dampfmaschinen.

Daten und Garantien einer Receiver-Dampfmaschine von J. A. Maffei, München.

Die Daten sind:

- | | |
|---|----------|
| 1. Durchmesser des Hochdruckzylinders | 415,5 mm |
| 2. „ „ Niederdruckzylinders | 631,5 mm |
| 3. Gemeinsamer Kolbenhub | 400,0 mm |

Die Garantien sind:

1. Der Dampfverbrauch soll bei der normalen Belastung von 150 PS_e bzw. der maximalen Leistung von 180 PS_e und einer Einspritzwassertemperatur von nicht über 35° C. nicht mehr als 7,75 kg bzw. 8 kg pro 1 PS_i und eine Stunde betragen.

2. Der mechanische Wirkungsgrad soll nicht weniger als 80 Proz. bei normaler und 83 Proz. bei maximaler Leistung betragen.

3. Bei plötzlichen Be- und Entlastungen von 50 Proz. der vorhergehenden Belastung darf die Tourenzahl um nicht mehr als insgesamt 2,5 Proz. schwanken. Bei allmählichem Übergange von einem Viertel auf die maximale Leistung darf sich die Tourenzahl um nicht mehr als 1,5 Proz. insgesamt ändern. Bei plötzlicher völliger Ent-

lastung ist eine Tourenänderung von höchstens 5 bis 6 Proz. über die normale Tourenzahl zulässig.

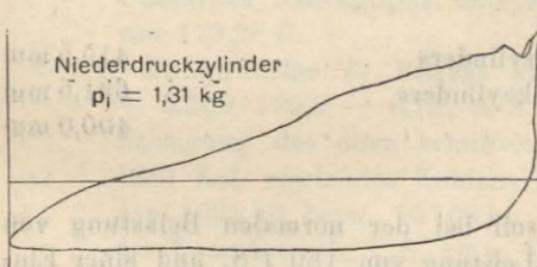
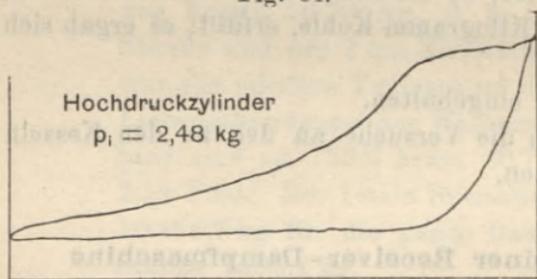
Die Maschinen müssen bei gänzlich geöffnetem Admissionsventil leerlaufen können, und darf hierbei die Tourenzahl nicht mehr als 4 Proz. über die normale steigen. Die Maschinen müssen bei Maximalleistung noch manövrierfähig sein, d. h., wenn dieselbe durch plötzliche Belastung um 50 Proz. der vorhergehenden Leistung erreicht wird, so dürfen die Umdrehungsschwankungen nicht mehr als 5 Proz. betragen.

Ausrechnungen und Versuchsergebnisse der Maffei-Receiver-Dampfmaschine, Leistung 150 PS_e .

Es wurde eine Dauerprobe von sieben Stunden behufs Ermittlung der Garantiezahlen ausgeführt.

Die mittlere Admissions- bzw. Receiver-Überdruckspannung in Atmosphären wurde zu 8,92 bzw. 1,50 kg/qcm, der Mittelwert des

Fig. 84.



Vakuums in Zentimetern zu 65,63 ermittelt, die Mittelwerte der Temperaturablesungen des Einspritz- bzw. Ausgußwassers waren 11,4⁰ C. bzw. 32,8⁰ C. Die Lufttemperatur im Freien betrug im Mittel 10,6⁰ C. Die mittlere Tourenzahl der Dampfmaschine war 150,6 pro Minute.

Die indizierte Leistung für den Hochdruck- bzw. Niederdruckzylinder ergibt sich aus den Formeln für O_i , $(N_i)_d$ und $(N_i)_k$ (siehe Formeln (4a) und (4b), S. 16).

Beispielsweise gebe ich eine Rechnung für den Hochdruckzylinder, Deckelseite, und den Niederdruckzylinder, Deckelseite, die sich wie folgt gestaltet:

$$(O_H)_d = \frac{\pi (415,5)^2}{4} = 0,1356 \text{ qm}, \quad (O_N)_d = \frac{\pi \cdot (631,5)^2}{4} = 0,3132 \text{ qm}.$$

Hierin bedeutet $(O_H)_d$ und $(O_N)_d$ die nutzbare Kolbenfläche für die Deckelseite des Hochdruck- bzw. Niederdruckzylinders. Ferner bezeichnen $(N_{iH})_d$, $(N_{iH})_k$, $(N_{iN})_d$ und $(N_{iN})_k$ jeweils die indizierte

Leistung im Hochdruck- bzw. Niederdruckzylinder auf der Deckel- bzw. Kurbelseite; alsdann ist

$$N_{iH} = (N_{iH})_d + (N_{iH})_k$$

die gesamte indizierte Leistung des Hochdruckzylinders,

$$N_{iN} = (N_{iN})_d + (N_{iN})_k$$

die gesamte indizierte Leistung des Niederdruckzylinders,

$$N_i = N_{iH} + N_{iN}$$

die gesamte indizierte Leistung der Maschine.

Bei Verwendung der beigegebenen hier folgenden Diagramme (Fig. 84), bzw. der aus denselben ermittelten mittleren indizierten Drucke ergibt sich beispielsweise:

$$(N_{iH})_d = 2,222 \cdot 0,1356 \cdot 150,6 \cdot 0,400 \cdot 2,48 = 45 \text{ PS}_i$$

$$(N_{iN})_d = 2,222 \cdot 0,3132 \cdot 150,6 \cdot 0,400 \cdot 1,31 = 54,8 \text{ PS}_i.$$

(Fig. 85 bedeuten die Diagramme für die Kurbelseiten).

Die Berechnung aus sämtlichen Diagrammen ergab einen Mittelwert von $N_{iH} = 87,79 \text{ PS}_i$ und von $N_{iN} = 110,01 \text{ PS}_i$, so daß die gesamte indizierte Leistung der Maschine

$$N_i = 197,80 \text{ PS}_i$$

beträgt.

Der Dampfverbrauch ermittelt sich aus der Speisewassermenge 10700 kg unter Abzug der Verluste des Leitungskondensates im Betrage von 234,3 kg, also aus

$$\begin{aligned} &10700 - 234,3 \\ &= 10465,7 \text{ kg total netto.} \end{aligned}$$

Diese Dampfmenge wurde in sieben Stunden erzeugt. Der Dampfverbrauch pro indizierte Pferdekraft und Stunde ist demnach

$$\frac{10465,70}{7 \cdot 197,80} = 7,56 \text{ kg.}$$

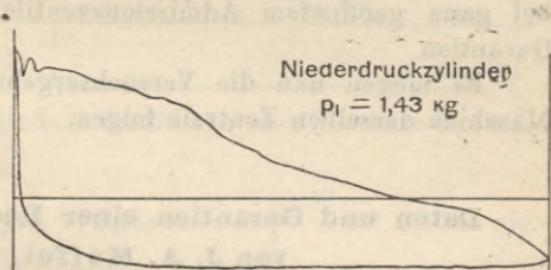
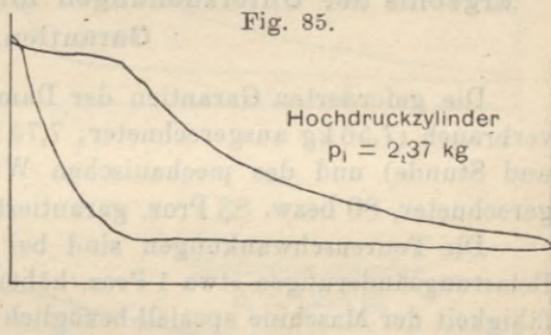
Die effektive Dampfmaschinenleistung war nach den Bremsversuchen im Mittel

$$N_e = 178 \text{ PS}_e.$$

Der mechanische Wirkungsgrad der Maschine ist somit

$$\eta = \frac{N_e}{N_i} = \frac{178}{197,8} = 90 \text{ Proz.}$$

Fig. 85.



Der Verbrauch an Kohle pro effektive Pferdekraft und Stunde ergibt sich aus den Werten für die Verdampfungsziffer pro Kilogramm Kohle von 6,544, für den Dampfverbrauch pro indizierte Pferdekraft und Stunde von 7,56 kg und für den Wirkungsgrad der Maschine von 0,90, wie folgt:

$$\frac{7,56}{0,90} \cdot \frac{1}{6,544} = 1,28 \text{ kg Kohle pro } PS_e \text{ und Stunde.}$$

Die Tourenschwankungen bei plötzlichen Be- und Entlastungen um 50 Proz. der vorhergehenden Belastung bezw. bei allmählichem Übergange von einem Viertel auf die maximale Belastung waren etwa 3,5 Proz. bezw. etwa 2,5 Proz. Bei plötzlichen völligen Entlastungen und voll geöffnetem Admissionsventil fand langsames, aber dauerndes Steigen der Tourenzahl statt.

Ergebnis der Untersuchungen hinsichtlich Erfüllung der Garantien.

Die geforderten Garantien der Dampfmaschine bezüglich Dampfverbrauch (7,56 kg ausgerechneter, 7,75 kg garantierter Wert pro PS_i und Stunde) und des mechanischen Wirkungsgrades (90 Proz. ausgerechneter, 80 bezw. 83 Proz. garantierter Wert) sind gut eingehalten.

Die Tourenschwankungen sind bei plötzlichen und allmählichen Belastungsänderungen etwa 1 Proz. höher als garantiert. Die Regulierfähigkeit der Maschine speziell bezüglich des Verhaltens bei Entlastung von verschiedenen Belastungen auf Null und bezüglich des Leerlaufes bei ganz geöffnetem Admissionsventile entspricht nicht ganz den Garantien.

Es mögen nun die Versuchsergebnisse einer zweiten größeren Maschine derselben Zentrale folgen.

Daten und Garantien einer Receiver-Dampfmaschine von J. A. Maffei, München.

Die Daten derselben sind:

1. Durchmesser des Hochdruckzylinders	511,5 mm
2. Durchmesser des Niederdruckzylinders	761,5 mm
3. Gemeinsamer Hub	600,0 mm

Die Garantien sind:

1. Der Dampfverbrauch soll bei der normalen Belastung 300 PS_e bezw. der maximalen Belastung von 360 PS_e und einer Einspritzwassertemperatur von nicht über 35° C. nicht mehr als 7,5 kg bezw. 7,75 kg pro 1 PS_i und Stunde betragen.

2. Der mechanische Wirkungsgrad soll mindestens 85 Proz. bei normaler und 88 Proz. bei maximaler Leistung betragen.

3. Hinsichtlich Tourenschwankungen und Regulierfähigkeit sind dieselben Bedingungen zu erfüllen, wie für die erste Maschine.

Ausrechnungen und Versuchsergebnisse der Maffei-Receiver-Dampfmaschine, Leistung 300 PS_e .

Die Maschine wurde einer Dauerprobe von 6 Stunden und 17 Minuten (d. i. 6,28 Stunden) unterworfen.

Die mittlere Admissions- bzw. Receiver-Überdruckspannung in Atmosphären wurde zu 8,77 bzw. 1,29 kg/qcm, der Mittelwert des Vakuums in Zentimeter zu 64,6 ermittelt, die Mittelwerte der Temperaturablesungen des Einspritz- bzw. Ausgußwassers waren $12^{\circ}C$. bzw. $33^{\circ}C$. Die Lufttemperatur im Freien betrug im Mittel $10^{\circ}C$. Die mittlere Tourenzahl der Dampfmaschine war 134,6 pro Minute.

Zur Übersicht füge ich auch hier eine Berechnung (s. auch S. 16) analog dem vorigen Beispiele bei. Für die Deckseiten des Hoch- bzw. Niederdruckzylinders resultierte eine nutzbare Kolbenfläche von:

$$(O_H)_d = \frac{\pi \cdot 511,5^2}{4} = 0,2055 \text{ qm}, \quad (O_N)_d = \frac{\pi \cdot 761,5^2}{4} = 0,4552 \text{ qm}.$$

Mit Benutzung der aus den beifolgenden Diagrammen (Fig. 86) gewonnenen mittleren indizierten Drucke ermitteln sich weiter für die Deckseiten der Zylinder die Leistungen zu:

$$(N_{i_H})_d = 2,222 \cdot 0,2055 \cdot 134,6 \cdot 0,600 \cdot 2,13 = 78,4 \text{ } PS_i$$

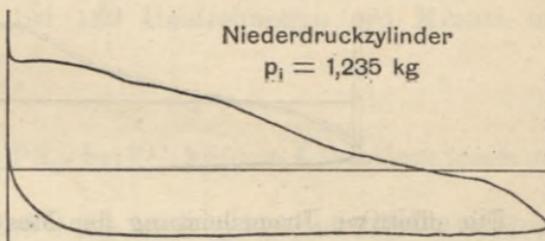
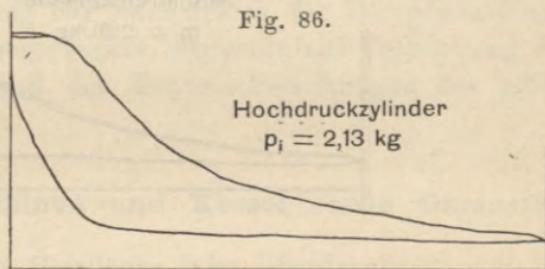
$$(N_{i_N})_d = 2,222 \cdot 0,4552 \cdot 134,6 \cdot 0,600 \cdot 1,235 = 100,8 \text{ } PS_i$$

Die Berechnung aus sämtlichen Diagrammen lieferte einen Mittelwert von $N_{i_H} = 161,8 \text{ } PS_i$ und von $N_{i_N} = 202,4$; demnach ist die gesamte indizierte Leistung der Maschine

$$N_i = 364,2 \text{ } PS_i.$$

Fig. 87 (s. f. S.) geben die Diagramme für die Kurbelseiten.

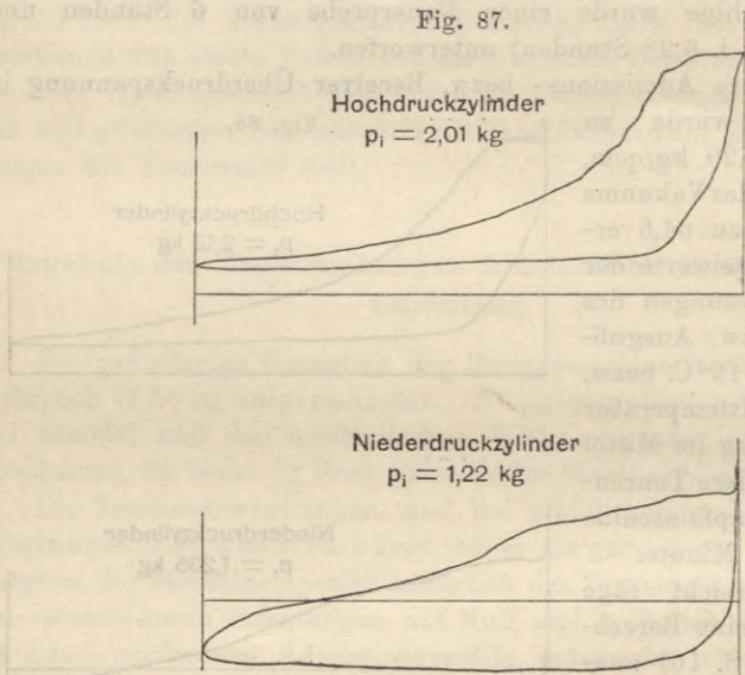
Fig. 86.



Der Dampfverbrauch ermittelt sich aus der Speisewassermenge 15 639 kg unter Abzug der Verluste des Leitungskondensates im Betrage von 315,7 kg; er beträgt somit $15\,639 - 315,7 = 15\,323,3$ kg total netto; dieser Dampfverbrauch fand in 6,28 Stunden statt. Der Dampfverbrauch pro indizierte Pferdekraft und Stunde ist daher:

$$\frac{15\,323,3}{6,28 \cdot 364,2} = 6,7 \text{ kg.}$$

Fig. 87.



Die effektive Bremsleistung der Maschine war im Mittel

$$N_e = 305,8 \text{ PS}_e.$$

Der mechanische Wirkungsgrad ist

$$\eta = \frac{N_e}{N_i} = \frac{305,8}{364,2} = 84 \text{ Proz.}$$

Die Versuche bezüglich Regulierfähigkeit führten zu den gleichen Resultaten wie bei der 150 PS-Dampfmaschine.

Ergebnis bezüglich Erfüllung der Garantien.

Der garantierte Dampfverbrauch (7,75 kg) ist mit einem tatsächlich festgestellten Werte von nur 6,7 kg gut eingehalten, der garantierte Wert (85 Proz.) für den Wirkungsgrad mit 84 Proz. nahezu erreicht.

Bezüglich der Regulierfähigkeit gilt das für die vorige Maschine (150 PS) Gesagte.

Zweites Beispiel.

Abnahmeversuche an Kesseln¹⁾ und Dampfmaschinen¹⁾
in den Mülhauser Elektrizitätswerken (erbaut von
Siemens u. Halske, A.-G.).

Im folgenden seien die an vier Versuchstagen vorgenommenen Prüfungen beschrieben, nämlich zwei Hauptversuche und zwei besondere Verdampfungsversuche. Die Prüfungen der Hauptversuche erstreckten sich auf Bestimmung des Nutzeffektes der Dampfmaschinen, des Kohlen- und des Dampfverbrauches, weiterhin auf Feststellung des Ungleichförmigkeitsgrades und der Tourenschwankungen bei plötzlichen Belastungsänderungen.

Angaben über die Maschinen und Kessel sowie Garantien.

Dampfkessel: 195 qm Heizfläche, 8 kg Überdruck.

Stehende Dampfmaschine: Hochdruckzylinder $d_H = 460$ mm, Niederdruckzylinder $d_N = 720$ mm; Hub = 560 mm.

Lichtdynamo von Siemens u. Halske mit einer Leistung von 1050 bis 720 Ampère bei 180 Umdrehungen pro Minute und 220 bis 330 Volt.

Garantien:

1. Leistung normal: 300 PS_{eff} bei $7\frac{1}{2}$ kg/qcm Admissionsdruck und 24 Proz. Füllung.
Leistung maximal: 360 PS_{eff} bei $7\frac{1}{2}$ kg/qcm Admissionsdruck und 35 Proz. Füllung.
2. Dampfverbrauch: $7\frac{3}{4}$ kg pro PS_i bei 300 PS_{eff} Leistung.
Dampfverbrauch: $8\frac{1}{4}$ kg pro PS_i bei 360 PS_{eff} Leistung.
3. Wirkungsgrad $\eta = \frac{N_e}{N_i} = \frac{\text{effektive Leistung}}{\text{indizierte Leistung}} = 0,88$.
4. Ungleichförmigkeitsgrad des Schwungrades = 1 : 200 = $\frac{1}{2}$ Proz.
Ungleichförmigkeitsgrad der Regulierung beim plötzlichen Aus- und Einschalten von 25 Proz. der Belastung = 1 : 50 = ± 2 Proz.
5. Verdampfung pro Quadratmeter Heizfläche: 12 kg Kohlen. Bei normaler Beanspruchung des Kessels soll 1 kg Kohle (brutto) von 7500 Kal. Heizwert und 6 bis 8 Proz. Schlackengehalt 8 kg Wasser verdampfen.

¹⁾ Geliefert von der Elsässischen Maschinenbaugesellschaft.

Erster Versuch.

A. Abnahmeversuch mit 300 PS_e -Leistung.

(Versuchsdauer vier Stunden).

Zeit	Ankerstrom	Nebenschlußstrom	Abgegebener Strom	Klemmenspannung	Leistung	Leistung der Dampfmaschine	Tourenzahl	Indizierte Leistung
	Ampère	Ampère	Ampère	Volt	Kilowatt	PS_e			$PS_i$
3 ⁰⁵	735	22,2	712,8	291	207,5	303,0	172	337,50
3 ¹⁰	720	22,6	697,4	290	202,0	295,5	173	
3 ¹⁵	715	21,4	693,6	290	201,0	293,5	173	
3 ²⁰	760	18,4	741,6	274	203,0	297,0	173	328,25
3 ²⁵	750	18,4	731,6	274	200,5	293,0	173	
3 ³⁰	750	18,4	731,6	273	200,0	292,0	173	
3 ³⁵	753	18,4	734,6	274	201,0	293,5	173	
3 ⁴⁰	753	18,4	734,6	274	201,0	293,5	173	320,25
3 ⁴⁵	745	18,4	726,6	276	200,5	293,0	174	
3 ⁵⁰	725	18,4	706,6	276	202,0	295,5	174	
3 ⁵⁵	733	18,8	714,2	276	197,0	288,0	173	
4 ⁰⁰	732	18,8	733,2	278	204,0	298,0	174	325,85
4 ⁰⁵	740	18,8	721,2	279	201,0	293,5	174	
4 ¹⁰	735	18,7	716,3	277	198,5	290,0	174	
4 ¹⁵	735	18,7	716,3	278	199,0	291,0	174	
4 ²⁰	730	18,7	711,3	278	198,0	289,0	174	320,05
4 ²⁵	740	19,1	720,9	279	201,0	293,5	174	
4 ³⁰	732	19,1	712,9	280	200,0	292,0	174	
4 ³⁵	710	19,1	690,9	280	193,5	283,0	174	
4 ⁴⁰	735	20,0	715,0	282	202,0	295,5	172	329,35
4 ⁴⁵	770	19,8	750,2	280	210,0	307,0	173	
4 ⁵⁰	755	19,8	735,2	280	206,0	301,0	173	
4 ⁵⁵	760	19,8	740,2	281	208,0	304,0	173	
5 ⁰⁰	745	19,4	725,6	281	204,0	298,0	174	321,65
5 ⁰⁵	735	19,5	715,5	282	201,7	295,0	175	
5 ¹⁰	700	19,4	680,6	282	192,0	280,5	174	
5 ¹⁵	712	19,5	692,5	283	196,0	286,0	174	
5 ²⁰	705	20,5	685,5	284	195,0	284,5	175	316,50
5 ²⁵	715	20,5	694,5	287	199,0	291,0	175	
5 ³⁰	715	20,6	694,4	286	198,5	290,0	174	
5 ³⁵	695	20,6	674,4	287	194,0	283,0	174	
5 ⁴⁰	720	21,0	699,0	289	202,0	295,5	175	332,90
5 ⁴⁵	715	21,0	694,0	289	200,5	293,0	175	
5 ⁵⁰	710	21,0	689,0	290	199,7	292,0	174	
5 ⁵⁵	705	21,0	684,0	291	199,0	291,0	175	
6 ⁰⁰	695	21,0	674,0	292	197,0	287,5	175	
6 ⁰⁵	690	21,0	669,0	293	196,0	286,0	175	321,10

Zeit	Ankerstrom	Nebenschlußstrom	Abgegebener Strom	Klemmenspannung	Leistung	Leistung der Dampfmaschine	Tourenzahl	Indizierte Leistung
	Ampère	Ampère	Ampère	Volt	Kilowatt	PS_e			$PS_i$
6 ¹⁰	710	22,0	688,0	294	202,0	295,5	174	
6 ¹⁵	685	22,0	663,0	294	195,0	285,0	173	
6 ²⁰	690	22,6	667,4	295	197,0	287,5	174	
6 ²⁵	710	22,2	687,8	296	204,0	298,0	174	
6 ³⁰	725	22,2	702,8	292	205,0	299,5	173	338,35
6 ³⁵	715	22,3	692,7	293	203,0	297,0	174	
6 ⁴⁰	710	22,3	687,7	294	202,0	295,5	173	
6 ⁴⁵	715	22,8	692,2	294	203,5	297,0	173	
6 ⁵⁰	720	22,8	697,2	295	205,5	300,0	173	336,60
6 ⁵⁵	720	22,8	697,2	295	205,5	300,0	173	
7 ⁰⁰	720	22,6	697,4	294	205,0	299,5	173	338,60
7 ⁰⁶	720	22,4	677,6	292	198,0	289,0	173	
Sa. 34 511,8			13 964			14 371,5		

Mittlere Stromstärke 704,3 Amp. Mittlere Spannung 284,98 Volt. Mittlere Leistung 200,7 Kilowatt. Mittlere Leistung $N_e = 293,3$ effektive Pferdestärken. Mittlere Leistung $N_i = 327,60$ indizierte Pferdestärken.

(Die abgegebene Stromstärke ergibt sich nach Abzug des Nebenschlußstromes von der abgelesenen Stromstärke im Anker.

Die effektive Dampfmaschinenleistung wurde aus der elektrischen Leistung ermittelt, Berechnung siehe S. 221.

Die indizierte Leistung ist aus nachstehender Versuchstabelle (siehe S. 220) und Berechnung gewonnen.

Der gesamte erzeugte Dampf innerhalb vier Stunden wurde nach Abzug des Kondensates in den Leitungen zu 9108 kg ermittelt; der Dampfverbrauch pro Stunde betrug daher $9108:4 = 2277$ kg, bezw. pro Stunde und indizierte Pferdekraft $\frac{2277}{327,6} = 6,95$ kg.

Der Wirkungsgrad der Dampfmaschine ergibt sich aus N_e und N_i zu

$$\eta = \frac{N_e}{N_i} = \frac{293,3}{327,6} = 0,895.$$

Die Füllung des Hochdruckzylinders betrug bei dem Versuche im Mittel 20 Proz., der Admissionsdruck 6,37 kg/qcm (Überdruck).

B. Indikatorversuch

bei normaler Belastung der Dampfmaschine von 300 PS_e .

Dia- gramm Nr.	Zeit	Mittlerer indizierter Druck p_i				Leistung PS_i
		im Hochdruckzylinder		im Niederdruckzylinder		
		oben	unten	oben	unten	
1	3 ⁰⁰	2,47	2,50	0,975	0,910	337,50 ¹⁾
2	3 ²⁰	2,60	2,37	0,920	0,855	328,25
3	3 ⁴⁰	2,33	2,42	0,920	0,855	320,25
4	4 ⁰⁰	2,40	2,52	0,920	0,860	325,85
5	4 ²⁰	2,30	2,50	0,900	0,852	320,05
6	4 ⁴⁰	2,35	2,48	0,960	0,880	329,35
7	5 ⁰⁰	2,38	2,31	0,960	0,855	321,65
8	5 ²⁰	2,33	2,30	0,900	0,820	316,50
9	5 ⁴⁰	2,41	2,45	0,975	0,900	332,90
10	6 ⁰⁴	2,30	2,41	0,920	0,860	321,10
11	6 ³⁰	2,40	2,50	0,980	0,940	338,35
12	6 ⁵⁰	2,42	2,50	0,975	0,920	336,60
13	7 ⁰⁰	2,45	2,51	0,980	0,920	338,60
Im Mittel		2,395	2,444	0,945	0,879	
Mittl Leistung PS_i		170,35 ¹⁾	168,84 ¹⁾	164,67 ¹⁾	151,38 ¹⁾	
		Mittelwert 169,6		Mittelwert 158		

Mittlere indizierte Leistung $N_i = 169,6 + 158 = 327,6 PS_i$.

Berechnungen zu A. und B.

1. Berechnung der indizierten Dampfmaschinenleistung.
(Siehe Seite 16 und folgende.)

(Zylinderdurchmesser 460/700 mm, Hub 560 mm, Kolbenstangendurchmesser 78 mm.)

Die nutzbaren Kolbenflächen O ermitteln sich aus obigen Dimensionen, wie folgt:

Hochdruckzylinder:

Zylinderoberfläche . . . = 0,166 190 m² obenKolbenstangenquerschnitt = 0,004 778 m²somit $(O_H)_k$ = 0,161 412 m² unten.

1) Berechnung siehe untenstehend und S. 221.

Niederdruckzylinder:

$$\text{Zylinderoberfläche} \dots = 0,407\,150 \text{ m}^2 \text{ oben}$$

$$\text{Kolbenstangenquerschnitt} = 0,004\,778 \text{ m}^2$$

$$\text{somit } (O_N)_k \dots = 0,402\,372 \text{ m}^2 \text{ unten.}$$

Behufs einfacher Ausrechnung der indizierten Leistungen aus Kolbenflächen, den indizierten Drucken und der Tourenzahl wurden folgende Konstanten für Normalbelastung berechnet, wobei die mittlere Tourenzahl 172 (laut Angabe des Hubzählers) zu Grunde gelegt wurde:

$$\text{Kolbengeschwindigkeit} = \frac{2 \cdot 560 \cdot 172}{60} = 3,21 \text{ m/sec};$$

daher sind die Konstanten für die Berechnung der Leistungen:

$$\text{für den Hochdruckzylinder oben} \quad \frac{1661,9 \cdot 3,21}{75} = 71,13;$$

$$\text{„ „ „ „ unten} \quad \frac{1614,12 \cdot 3,21}{75} = 69,08;$$

$$\text{für den Niederdruckzylinder oben} \quad \frac{4071,50 \cdot 3,21}{75} = 174,25;$$

$$\text{„ „ „ „ unten} \quad \frac{4023,72 \cdot 3,21}{75} = 172,22;$$

Durch Multiplikation dieser Konstanten mit den aus den Diagrammen erhaltenen mittleren Drucken pro cm^2 ergibt sich die indizierte Leistung; z. B. für Diagrammaufnahme 1. unter B.:

$$N_i = \frac{2,47 \cdot 71,13 + 2,50 \cdot 69,08}{2} + \frac{0,975 \cdot 174,25 + 0,910 \cdot 172,22}{2}$$

$$= 337,5 \text{ PS}_i.$$

Die mittlere indizierte Leistung aus sämtlichen Messungen unter B. betrug $327,6 \text{ PS}_i$.

2. Berechnung der effektiven Dampfmaschinenleistung.

Die effektive Leistung wurde berechnet aus der von der Dynamo abgegebenen elektrischen Energie mit Zugrundelegung eines Dynamonutzeffektes von 93 Proz. Dieselbe drückt sich jeweils aus als

$$N_e = \frac{\text{abgegebene Kilowatt}}{0,736 \cdot 0,93}.$$

C. Entlastungsproben der Dampfmaschine.

Durch plötzliches Ent- bzw. Belasten um etwa 30 Proz. der Normalleistung der Dynamo, sowie um 30 Proz. bei 500 Amp. Anfangsbelastung wurden Tourenschwankungen herbeigeführt. Das Resultat der Beobachtungen war folgendes:

Entlastung von 700 auf 500 Amp. — Schwankungen: 173 (Anfangstourenzahl) — 176,5 — 176 (Endtourenzahl) = ~ 2 Proz.

Entlastung von 500 auf 350 Amp. — Schwankungen: 176 (Anfangstourenzahl) — 179 — 176 — 179 — 176 — 179 — 176 — 179 — 176 — 177 (Endtourenzahl) = $\sim 1,7$ Proz.

Die Dauer der Schwankungen betrug etwa eine Minute. Die Entlastung der Dynamo wurde durch den Nebenschlußregulierwiderstand bewirkt.

Der Ungleichförmigkeitsgrad wurde aus dem Diagramme des Tachographen, s. S. 71 u. f., als $\sim 1:400$ festgestellt.

D. Dampfkesselleistung bei Normalbetrieb.

Innerhalb vier Stunden wurden 9520 kg Speisewasser von 14° C. verdampft, d. h. pro Stunde und Quadratmeter Heizfläche:

$$\frac{9520}{4 \cdot 195} = 12,21 \text{ kg.}$$

Dabei wurden an Kohle (gestellt von der Elsässischen Maschinenbaugesellschaft) 1370 kg verfeuert; somit verdampfte 1 kg Kohle an Speisewasser:

$$\frac{9520}{1370} = 6,95 \text{ kg.}$$

Zweiter Versuch.

A. Abnahmeversuch mit 360 PS_e -Leistung.

(Versuchsdauer drei Stunden.)

Zeit	Ankerstrom Ampère	Nebenschluß- strom Ampère	Abgebener Strom Ampère	Klemmen- spannung Volt	Leistung Kilowatt	Leistung der Dampfmaschine PS_e	Tourenzahl	Indizierte Leistung PS_i
3 ³⁰	860	25,4	834,6	296	247,0	361,0	170	385,3
3 ³⁵	855	25,1	829,9	296	246,0	359,0	170	
3 ⁴⁰	830	26,3	803,7	296	238,0	347,5	168	
3 ⁴⁵	870	26,3	843,7	297	250,5	366,0	170	
3 ⁵⁰	840	26,4	813,6	296	240,5	351,5	169	388,3
3 ⁵⁵	850	26,6	823,4	298	245,0	358,0	169	
4 ⁰⁰	895	22,8	872,2	284	248,0	362,0	170	397,6
4 ⁰⁵	900	22,8	877,2	285	250,0	365,0	170	
4 ¹⁰	900	23,3	876,7	286	250,5	366,0	170	
4 ¹⁵	895	23,2	871,8	286	249,5	364,0	170	
4 ²⁰	895	23,2	871,8	286	249,5	364,0	170	400,6
4 ²⁵	880	23,0	857,0	286	245,0	358,0	170	
4 ³⁰	880	23,0	857,0	287	246,0	359,5	170	
4 ³⁵	900	24,3	875,7	288	252,0	368,0	170	
4 ⁴⁰	875	23,6	851,4	288	245,5	358,0	170	392,4
4 ⁴⁵	880	24,2	855,8	290	248,0	362,0	170	
4 ⁵⁰	870	24,2	845,8	290	245,5	358,0	170	
4 ⁵⁵	855	24,2	830,8	292	242,5	354,0	170	
5 ⁰⁰	840	24,2	815,8	293	239,0	349,0	170	386,1
5 ⁰⁵	830	24,2	805,8	294	235,0	343,5	171	
5 ¹⁰	830	24,6	805,4	296	238,5	348,0	171	
5 ¹⁵	820	24,6	795,4	296	235,5	344,0	170	
5 ²⁰	810	25,4	784,6	298	234,0	341,5	170	
5 ²⁵	780	26,8	753,2	299	226,0	329,0	168	
5 ³⁰	800	26,2	773,8	300	232,0	339,0	166	
5 ³⁵	870	26,2	843,8	294	248,0	362,0	166	
5 ⁴⁰	840	24,8	815,2	294	240,0	350,0	170	383,1
5 ⁴⁵	835	24,8	810,2	296	240,0	350,0	171	
5 ⁵⁰	845	25,5	819,5	297	243,5	355,0	171	
5 ⁵⁵	825	26,2	798,8	298	238,0	348,0	172	
6 ⁰⁰	825	26,2	798,3	298	238,0	348,0	170	389,2
6 ⁰⁵	830	26,2	803,8	300	241,0	352,0	170	
6 ¹⁰	825	26,1	798,9	300	240,0	350,0	171	
6 ¹⁵	812	26,0	786,0	300	236,0	345,0	171	
6 ²⁰	818	25,9	792,1	300	238,0	348,0	171	384,6
6 ²⁵	800	25,8	774,2	300	232,5	340,0	171	
6 ³⁰	805	25,8	779,2	301	234,0	342,0	171	
		Sa. 30	446,6	10 881		13 065,5		
	Mittelwerte		822,9	294,1	242	353,1		389,77
			(Strom- stärke)	(Span- nung)	(Lei- stung)	(Leistung)		(Leistung) (s. unter B. S. 224.)

B. Indikatorversuch(bei Überlastung der Dampfmaschine, 360 PS_e).

Dia- gramm Nr.	Zeit	Mittlerer indizierter Druck p_i				Leistung PS_i
		im Hochdruckzylinder		im Niederdruckzylinder		
		oben	unten	oben	unten	
1	3 ³⁰	2,71	2,74	1,200	1,13	385,3 ¹⁾
2	3 ⁵⁰	2,60	2,82	1,275	1,10	388,3
3	4 ⁰⁰	2,72	2,94	1,250	1,14	397,6
4	4 ²⁰	2,80	2,90	1,235	1,17	400,6
5	4 ⁴⁰	2,70	2,81	1,220	1,17	392,4
6	5 ⁰⁰	2,70	2,80	1,200	1,12	386,1
7	—	—	—	—	—	—
8	5 ⁴⁰	2,70	2,73	1,170	1,14	383,1
9	6 ⁰⁰	2,66	2,83	1,210	1,15	389,2
10	6 ²⁰	2,71	2,82	1,170	1,12	384,6
Im Mittel		2,70	2,82	1,214	1,138	
Mittl. Leistung PS_i		188,46 ¹⁾	191,20 ¹⁾	207,55 ¹⁾	192,33 ¹⁾	
		Mittel 189,83		Mittel 199,94		

Mittlere indizierte Leistung $N_i = 189,83 + 199,94 = 389,77 PS_i$.

Dampfverbrauch pro Stunde netto = 2736,3 kg.

Dampfverbrauch pro Stunde und $PS_i = 2736,3 : 389,77 = 7,02$ kg.

Wirkungsgrad:

$$\eta = \frac{N_e}{N_i} = \frac{353,1}{389,77} = 0,906.$$

Mittlere minutliche Tourenzahl (laut Angabe des Hubzählers) = 168,57.

$$\text{Kolbengeschwindigkeit} = \frac{2 \cdot 560 \cdot 168,57}{60} = 3,15 \text{ m/sec.}$$

Die Füllung betrug im Mittel 30,5 Proz., der Admissionsdruck 6,61 kg/qcm.

C. Der Ungleichförmigkeitsgrad

ergab sich auf Grund des durch den Tachographen verzeichneten Diagrammes wieder zu 1:400 (s. S. 71 u. f.).

D. Dampfkesselleistung bei 360 PS_e .

Innerhalb drei Stunden wurden insgesamt verdampft 8550 kg Speisewasser von 14° C., d. h. pro Stunde und Quadratmeter Heizfläche:

¹⁾ Die Ausrechnung ist analog der oben beschriebenen.

$$\frac{8550}{3 \cdot 195} = 14,62 \text{ kg.}$$

Dabei wurde an Kohle (geliefert von der Elsässischen Maschinenbaugesellschaft) 1224 kg verfeuert.

Demnach verdampfte 1 kg Kohle an Speisewasser:

$$\frac{8560}{1224} = 6,98 \text{ kg.}$$

Obige Versuche hatten erwiesen, daß alle geleisteten Garantien eingehalten wurden mit Ausnahme derjenigen bezügl. Dampferzeugung pro Kilogramm Kohle: statt einer Verdampfungsziffer von 8 kg wurde nur eine solche von 6,95 bzw. 6,98 erreicht.

Als Grund hierfür wurde unsachgemäße Bedienung des Kessels durch den Heizer sowie der Umstand erkannt, daß das Speisewasser nicht vorgewärmt war, während die Vorwärmung heutzutage meist geschieht. Außerdem zeigte sich, daß die bis dahin verfeuerte Kohle (gestellt von der Elsässischen Maschinenbaugesellschaft) den im Verträge zugrunde gelegten Heizwert (7500 Kal.) nicht besaß.

Es wurden daher noch zwei spezielle Verdampfungsversuche angestellt; einmal unter Verwendung von Kohlen der Mülhausener Elektrizitätswerke, das andere Mal der schon früher verfeuerten Kohle der oben genannten Firma; beide Male wurde das Speisewasser vorgewärmt unter Benutzung des Kondenswassers aus der Dampfleitung und aus den Dampfmänteln der Maschine, und vor allem der Kessel durch einen besser arbeitenden Heizer bedient.

Unter diesen Umständen wurden die Garantieziffern, wie die nachstehenden Versuche zeigen, gut erreicht, selbst bei Verwendung der geringeren Kohlensorte.

Dritter Versuch.

Bei den folgenden Verdampfungsversuchen wurde lediglich die Menge und Temperatur des zugespeisten Wassers und der Kohlenverbrauch gemessen. Das Speisewasser wurde einem mehrmals gefüllten Reservoir entnommen (s. Tabelle auf folgender Seite).

Der Kessel wurde um 1 Uhr angeheizt und lieferte von 2 Uhr an Dampf für den Betrieb der Dampfmaschine, war somit zu Beginn des Versuches 3 Uhr 27 Minuten in normal durchwärmtem Zustande.

Der Wasserverbrauch wurde aus den mehrmaligen Füllungen des Reservoirs berechnet und ergab sich laut Tabelle, wie folgt:

Verdampfungsversuche.

Anderer Heizer: fachgemäßere Bedienung des Kessels. — Kohle der Mülhausener Elektrizitätswerke.

(Versuchsdauer drei Stunden.)

Zeit	Inhalt des Reservoirs in Litern	Wasser-temperatur ° C.	Zeit	Inhalt des Reservoirs in Litern	Wasser-temperatur ° C.	Zeit	Inhalt des Reservoirs in Litern	Wasser-temperatur ° C.
3 ²⁷	1000	52	4 ³⁵	100	49	5 ³³	100	50
	800	54		0	52		0	53
	700	55		500	45		500	34
	600	56		400	40		400	35
	500	58		300	40		300	36
	400	59		200	46		200	37
	300	60		100	46		100	40
	200	61		0	52		0	43
3 ⁵⁰	100	61	4 ⁴⁵	500	40	5 ⁴⁷	500	42
	0	65		400	38		400	42
	855	51		300	37		300	46
	800	51		200	41		200	47
	700	51		100	41		100	50
	600	51		0	42		0	55
	500	52		500	40		500	32
	400	52		400	35		400	33
4 ⁰⁸	300	53	4 ⁵⁶	300	40	5 ⁵⁸	300	32
	200	53		200	43		200	34
	100	55		100	48		100	36
	0	55		0	53		0	39
	500	50		500	44		500	41
	400	50		400	37		400	42
	300	51		300	38		300	45
	200	53		200	40		200	40
4 ²⁴	100	58	5 ¹⁰	100	41	6 ¹⁰	100	54
	0	60		0	45		0	60
	510	45		500	40		500	40
	400	45		400	42		480	40
	300	46		300	44			
	200	47		200	48			

1000 kg

+ 855 „

+ 500 „

+ 510 „

+ 9 × 500 = 4500 „

+ 500—480 = 20 „

Sa. = 7385 kg.

An Kohle, die übrigens stark angefeuchtet war, wurde in der Versuchszeit verbraucht: 908 kg.

Somit wurde pro Kilogramm Kohle verdampft:

$$\frac{7385}{908} = 8,13 \text{ kg Wasser,}$$

pro Quadratmeter Heizfläche und Stunde:

$$\frac{7385}{195 \cdot 3} = 12,64 \text{ kg Wasser.}$$

Verdampfungsversuch.

Anderer Heizer: sachgemäßere Bedienung des Kessels. — Kohle der Elsässischen Maschinenbaugesellschaft.
(Versuchsdauer 2 Stunden 53 Minuten.)

Zeit	Inhalt des Reservoirs in Litern	Wasser-temperatur ° C.	Zeit	Inhalt des Reservoirs in Litern	Wasser-temperatur ° C.	Zeit	Inhalt des Reservoirs in Litern	Wasser-temperatur ° C.
9 ¹⁷	705	62		400	47		100	51
	600	63		300	48	11 ¹⁸	0	53
	500	64		200	49		700	35
	400	65		100	50		600	35
	300	65	10 ¹⁷	0	53		500	36
	200	66		700	43		400	37
	100	68		600	41		300	39
9 ²⁸	0	70		500	43		200	39
	700	60		400	44		100	41
	600	59		300	46	11 ²⁸	0	42
	500	60		200	47		700	34
	400	60		100	52		600	36
	300	61	10 ³⁵	0	54		500	38
	200	61		700	36		400	40
	100	62		600	35		300	43
9 ³⁸	0	63		500	37		200	45
9 ⁴⁴	700	44		400	38		100	51
	600	44		300	40	11 ⁵⁰	0	53
	500	45		200	41		700	33
	400	48		100	44		600	33
	300	52	10 ⁵⁵	0	45		500	34
	200	53		700	39		400	34
	100	55		600	41		300	35
10 ⁰⁰	0	57		500	42		200	36
10 ⁰⁸	700	45		400	44		100	36
	600	46		300	46	12 ⁰⁰	40	36
	500	47		200	49			

Die mittlere Temperatur des Speisewassers betrug $45,3^{\circ}$ C.

Wie schon erwähnt, enthielt die Kohle bei diesem Versuche viel Feuchtigkeit. Es müßte indes mit trockenem Brennmaterial gerechnet werden. Um den Feuchtigkeitsgehalt zu bestimmen, wurde ein Quantum von 50 kg nasser Kohle auf den Kessel gebracht und mehrere Stunden dort belassen. Danach wurde die Kohle abermals gewogen und eine Gewichtsabnahme von 3 kg festgestellt. Der oben gefundene Kohlenverbrauch muß daher noch eine entsprechende Korrektur erfahren. Er beträgt in Wirklichkeit:

$$908 \frac{(50 - 3)}{50} = 853,52 \text{ kg Kohle (trocken).}$$

Die Verdampfung pro 1 kg Kohle ist somit:

$$\frac{7385}{853,52} = 8,65 \text{ kg Wasser.}$$

Vierter Versuch.

Siehe Tabelle auf voriger Seite.

Der Kessel wurde um 7 Uhr 25 Minuten angeheizt und lieferte von 8 Uhr 10 Minuten an Dampf für den Betrieb.

Verbrauchtes Wasser laut Tabelle:

$$\begin{array}{r} 705 \text{ kg} \\ + 8 \times 700 = 5600 \text{ „} \\ + 700 - 40 = 660 \text{ „} \\ \hline \text{Sa.} = 6965 \text{ kg} \end{array}$$

An Kohle (wiederum stark angefeuchtet) wurde verbraucht:
885,8 kg.

Somit wurde verdampft pro Kilogramm Kohle:

$$\frac{6965}{885,8} = 7,87 \text{ kg Wasser,}$$

pro Quadratmeter Heizfläche und Stunde

$$\frac{6965}{195 \cdot 2,883} = 12,4 \text{ kg Wasser.}$$

Die mittlere Temperatur des Speisewassers betrug 47° C. Die Feuchtigkeit der Kohle wurde in derselben Weise wie beim vorhergehenden Versuche ermittelt, und zwar wieder zu 3 kg Wasser auf 50 kg Kohle. Die hiernach korrigierten Werte lauten:

$$\text{Gesamter Kohlenverbrauch} = 885,8 \cdot \frac{(50 - 3)}{50} = 832,7 \text{ kg (trocken).}$$

Verdampft pro Kilogramm Kohle:

$$\frac{6965}{832,7} = 8,37 \text{ kg Wasser.}$$

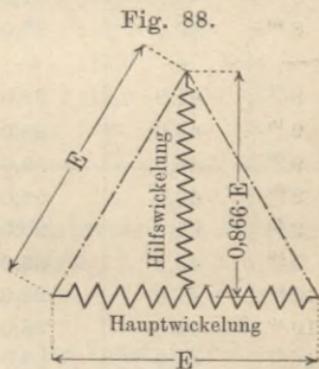
Drittes Beispiel.

Abnahmeversuche an den Maschinen der elektrischen Zentrale Brünn i. M.¹⁾ (Dampfkessel, Dampfmaschinen und Dynamos).

Die vorliegende Anlage ist eine Wechselstromzentrale, erbaut von den Österreichischen Schuckertwerken. Sie besteht aus drei gleichen Aggregaten: je eine Dynamo mit einer Leistung von 200 K.-W. bei induktionsfreier Belastung, angetrieben von einer Collmann-Tandemdampfmaschine (430 bzw. 650 mm Dampfcylinderdurchmesser, 800 mm Hub, 107 Umdrehungen pro Minute). Dampfmaschinen und Kessel sind von der Ersten Brünn Maschinenfabrikgesellschaft geliefert. In den Generatoren wird Wechselstrom nach dem sogenannten „starrten System“ (Schuckertsches Patent) erzeugt. Das Wesen dieses Systems ist, kurz gefaßt, folgendes: Der Anker des Generators ist mit zwei Wickelungen versehen, derart, daß die zweite Phase der ersten Phase um 90° nach-eilt. Der Anfang der zweiten Wickelung (Hilfsphase) wird in der Mitte der ersten (Hauptphase) angeschlossen und die E. M.-Kräfte durch entsprechende Wahl der Windungszahlen in ein bestimmtes Verhältnis zueinander gebracht. Dieses Verhältnis der Hauptphase zur Hilfsphase ist $1 : (\frac{1}{2} \cdot \sqrt{3}) = 1 : 0,866$, so daß die Spannung zwischen Hilfsleiter und Hauptleiter gleich der Spannung der Hauptphase ist.

(s. Fig. 88.) Man erhält so einen Generator, dem man außer dem Einphasenstrome auch drei Phasenströme, entsprechend drei Spannungen von gleicher Größe und je 120° Phasenverschiebung, entnehmen kann, so daß sich ohne weiteres Drehstromtransformatoren an das Netz anschließen lassen. — Im vorliegenden Falle beträgt die Spannung (in der Hauptphase) 2200 Volt.

Es seien im nachstehenden die beiden Hauptversuche (am Maschinensatze II) beschrieben und die Resultate bezüglich Wirkungsgrad und Ökonomie aus denselben abgeleitet.



¹⁾ Da ich selbst noch keine Gelegenheit hatte, eine Zentrale dieses neueren Systems zu prüfen, wurde mir von Herrn Ingenieur Ross in Wien in dankenswertester Weise das Protokoll über die Versuche der Brünn Zentrale zur Verfügung gestellt, welches unter seiner speziellen Leitung durchgeführt wurde.

I. Achtstündige Dauerprobe des Maschinensatzes II bei Vollbelastung in der Hauptphase.

Die am Generator, der Dampfmaschine und dem Dampfkessel aufgenommenen Daten sind aus nachstehenden drei Tabellen zu ersehen.

Elektrische Daten.

Zeit	Erregung in Ampère	Belastung der Hauptphase in Ampère	Spannung in der Hauptphase in Volt	Mit dem Wattmeter gemessene Leistung in K.-W.	Erreger-spannung in Volt	Temperatur im Maschinen-hause in ° C.
7 ³⁰	40,0	—	—	—	—	—
7 ⁴⁵	40,0	98,0	2170	200	111,0	18,0
7 ⁵⁰	44,0	97,0	2180	200	111,0	18,0
8 ⁰⁰	45,0	98,0	2200	200	111,0	18,0
8 ¹⁰	43,0	98,5	2200	200	111,0	—
8 ²⁰	45,0	97,5	2210	200	111,0	—
8 ³⁰	45,0	97,5	2210	200	111,0	—
8 ⁴⁰	40,0	97,0	2190	200	111,0	—
—	—	—	—	—	—	—
9 ⁰⁰	41,0	98,0	2200	200	111,0	—
9 ¹⁰	45,0	99,0	2200	200	111,0	—
9 ²⁰	46,0	99,0	2190	200	111,0	—
9 ³⁰	42,5	98,0	2160	200	111,0	—
9 ⁴⁰	45,0	98,0	2200	200	111,0	19,0
9 ⁵⁰	45,5	97,0	2210	200	111,0	—
10 ⁰⁰	47,0	98,0	2200	200	111,0	—
10 ¹⁰	44,0	98,0	2200	200	111,0	—
10 ²⁰	44,0	98,0	2200	200	111,0	—
10 ³⁰	42,0	97,5	2190	200	111,0	19,0
10 ⁴⁰	42,5	98,0	2200	200	111,0	—
10 ⁵⁰	43,0	97,5	2200	200	111,0	19,5
11 ⁰⁰	44,0	97,0	2200	200	111,0	19,5
11 ¹⁰	44,0	97,5	2200	200	111,0	—
11 ¹⁵	44,0	97,5	2190	200	111,0	—
11 ²⁰	49,0	97,5	2210	200	111,0	—
11 ³⁰	42,0	98,0	2200	200	111,0	—
11 ⁴⁰	44,0	96,5	2200	198	111,0	—
11 ⁵⁰	45,5	97,0	2200	200	111,0	—
12 ⁰⁰	44,0	96,5	2200	198	111,0	—
12 ¹⁰	43,5	96,5	2200	200	111,0	—
12 ²⁰	43,5	96,5	2200	200	111,0	—
12 ³⁰	45,0	97,0	2200	200	111,0	—
12 ³⁵	32,0	100,0	2120	200	111,0	—
12 ⁴⁰	31,0	106,0	1980	200	111,0	—
12 ⁵⁰	34,0	110,0	2000	240	111,0	—

Zeit	Erregung in Ampère	Belastung der Haupt- phase in Ampère	Spannung in der Haupt- phase in Volt	Mit dem Wattmeter gemessene Leistung in K.-W.	Erreger- spannung in Volt	Tempe- ratur im Maschinen- hause in ° C.
1 ⁰⁰	30,0	110,0	1950	210	111,0	—
1 ¹⁰	31,0	106,0	1995	200	111,0	—
1 ²⁰	36,0	102,5	2060	200	111,0	—
1 ³⁰	40,0	101,5	2110	200	111,0	19,8
1 ⁴⁰	43,0	99,0	2175	200	111,0	—
1 ⁵⁰	43,0	96,5	2190	200	111,0	—
2 ⁰⁰	42,5	96,0	2185	200	111,0	—
2 ¹⁰	42,5	98,0	2200	200	111,0	—
2 ²⁰	46,5	98,5	2200	200	111,0	20,0
2 ³⁰	45,5	97,5	2210	200	111,5	—
2 ⁴⁰	45,0	97,5	2200	200	111,0	—
2 ⁵⁰	45,0	98,5	2200	200	111,0	—
—	—	—	—	—	—	—
3 ¹⁰	43,0	99,0	2000	200	111,0	—
3 ²⁰	45,0	99,5	2175	200	111,0	—
3 ³⁰	42,5	99,5	2160	200	111,0	—
3 ⁴⁰	42,5	99,5	2155	200	111,0	—
3 ⁵⁰	42,5	98,5	—	—	—	—
	42,4	98,8	2166	Mittel		
	—	95,6	2145	Korrigierte Mittelwerte nach Eichung der Instrumente		

Die Belastung war induktionsfrei; daher ist die Leistung:

$$95,6 \times 2145 = 205,06 \text{ Kilowatt.}$$

Der Erregerverlust $i_e \cdot e_e$ ist:

$$42,4 \cdot 111 = 4,7064 \text{ Kilowatt.}$$

Zur Erzeugung dieses Effektes ist jedem Generator ein Drehstrom-Gleichstromumformer beigegeben. Bei einem Wirkungsgrad des Umformers von 73 Proz. ergibt sich eine zuzuführende Wechselstromenergie für den Generator von $4,7064 : 0,73 = 6,45$ Kilowatt und somit eine nutzbare Leistung des Generators von

$$205,06 - 6,45 = \sim 199 \text{ Kilowatt.}$$

Dampfmaschine.

Versuchsbeginn 7 Uhr 30 Minuten, Ende 3 Uhr 30 Minuten; Dauer acht Stunden.

Zeit	Atmosphären an der Maschine (Überdruck)	Receiver Über- druck in Atmosphären	Vakuum in Millimetern (Wassersäule)	Tourenzah	Dampf- temperatur an der Maschine in ° C.	Indizierte PS.		
						Hoch- druck <i>PS_i</i>	Nieder- druck <i>PS_i</i>	Summe <i>PS_i</i>
7 ³⁰	9,6	0,85	66,0	107	197	204,26	150,77	355,03
8 ⁰⁰	10,2	0,95	66,0	107	208	201,28	151,02	352,30
8 ³⁰	10,3	0,90	66,0	107	211	205,07	151,94	357,01
9 ⁰⁰	10,5	0,90	66,0	107	206	204,53	146,63	351,16
9 ³⁰	10,4	1,00	66,5	107	211	199,39	146,14	345,53
10 ⁰⁰	10,6	0,80	66,5	107	213	208,85	153,79	362,64
10 ³⁰	10,6	0,90	66,5	107	211	203,18	146,39	349,57
11 ⁰⁰	10,0	0,95	66,5	107	210	206,96	151,02	357,98
11 ³⁰	10,0	0,90	66,5	107	206	203,45	148,98	352,43
12 ⁰⁰	10,6	0,85	66,5	107	212	207,50	149,17	356,67
12 ³⁰	10,4	0,80	66,5	107	210	200,20	148,05	348,25
1 ⁰⁰	10,6	0,91	66,0	107	208	207,23	153,61	360,84
1 ³⁰	10,2	0,85	66,5	107	210	211,01	150,64	361,65
2 ⁰⁰	10,8	0,85	66,0	107	211	202,64	147,13	349,77
2 ³⁰	10,2	0,90	66,5	107	209	202,36	150,83	353,19
3 ⁰⁰	9,8	0,95	66,5	107	209	204,80	153,11	357,91

Mittel: 354,40

Die Werte für die indizierten Pferdestärken sind berechnet nach den Formeln (2), (3), (4 a), (4 b), S. 16. Eine Kontrolle ergab, daß die tatsächliche Tourenzah nicht 107, sondern 105 betrug, wonach sich die mittlere Leistung reduziert auf 347,87 *PS_i*.

Aus nebenstehender Tabelle betr. Messungen an einem Dampfkessel lassen sich folgende Resultate ableiten:

Speisewasserverbrauch pro Stunde:

$$\frac{1590\ 095 - 1574\ 900}{8} = \frac{15\ 195}{8} = 1899,4 \text{ Liter.}$$

Kohlenverbrauch pro Stunde:

$$\frac{2452}{8,22} = 298,5 \text{ kg.}$$

Speisewasser pro indizierte Pferdestärke und Stunde:

$$1899,4 : 347,87 = 5,46 \text{ Liter.}$$

Kohlen pro indizierte Pferdestärke und Stunde:

$$298,5 : 347,87 = 0,858 \text{ kg.}$$

Dampfkessel.

Zeit	Atmo- sphären am Kessel	Dampf- tempe- ratur am Kessel ° C.	Essengase- temperatur ° C.	Speise- wasser- temperatur ° C.	Stand des Speisewasser- zählers Liter	Kohle kg
7 ³⁰	10,0	253	306	22,0	1 574 900	560
7 ⁴⁵	10,2	249	316	—	1 575 565	541
8 ⁰⁰	10,6	247	314	—	1 575 765	—
8 ¹⁵	11,0	254	335	22,0	1 576 380	—
8 ³⁰	11,2	252	316	—	1 576 770	—
8 ⁴⁵	10,0	238	266	—	1 577 420	—
9 ⁰⁰	11,2	251	303	23,2	1 577 780	—
9 ¹⁵	11,0	249	327	—	1 578 300	—
9 ³⁰	11,0	253	333	25,0	1 578 720	—
9 ⁴⁵	11,2	254	331	—	1 579 260	—
10 ⁰⁰	10,8	250	320	25,2	1 579 855	—
10 ¹⁵	11,0	252	313	—	1 580 125	—
10 ³⁰	11,2	254	320	25,6	1 580 750	—
10 ⁴⁵	10,8	247	323	—	1 581 235	—
11 ⁰⁰	10,0	248	318	27,2	1 581 575	531
11 ¹⁵	10,5	244	298	—	1 582 125	—
11 ³⁰	11,0	262	351	27,8	1 582 715	—
11 ⁴⁵	11,2	252	320	—	1 583 065	—
12 ⁰⁰	10,4	247	312	29,9	1 583 630	—
12 ¹⁵	11,0	249	322	—	1 584 225	—
12 ³⁰	10,2	242	309	31,6	1 584 655	—
12 ⁴⁵	10,0	243	321	—	1 585 160	537
1 ⁰⁰	11,0	251	339	33,0	1 585 565	—
1 ¹⁵	10,2	245	318	—	1 586 105	—
1 ³⁰	10,8	250	337	34,0	1 586 755	—
1 ⁴⁵	11,6	250	315	—	1 587 295	—
2 ⁰⁰	10,8	248	322	—	1 587 825	—
2 ¹⁵	10,8	242	325	58,0	1 588 100	—
2 ³⁰	11,2	253	334	—	1 588 565	—
2 ⁴⁵	11,1	251	329	58,5	1 588 900	283
3 ⁰⁰	11,1	246	320	61,5	1 589 630	—
3 ¹⁵	10,5	238	300	64,5	1 590 015	—
3 ³⁰	10,2	244	320	71,2	1 590 095	—
3 ⁴³	10,0	240	317	—	1 591 055	—
8 Std. 13 Min. = 8,22 Std.	10,72 (Mittel- wert)	248,5 (Mittel- wert)		etwa 28° C. (Mittel- wert)	15 195 Liter von 7 ³⁰ bis 3 ³⁰	2452

Verdampfungsziffer:

$$5,46 : 0,858 = 6,36.$$

Wasserverbrauch pro nutzbare Kilowattstunde:

$$1899,4 : 199 = 9,55 \text{ Liter.}$$

Kilo pro nutzbares Kilowatt:

$$298,5 : 199 = 1,5 \text{ kg.}$$

Da der durchschnittliche Analysenwert der verheizten Kohle 6322 Kal. Heizwert ergab und vertraglich der Heizwert 6500 Kal. in Aussicht genommen war, so ist der Kohlenverbrauch pro nutzbare Kilowattstunde umgerechnet:

$$1,5 \cdot \frac{6322}{6500} = \sim 1,46 \text{ kg.}$$

Laut Vertrag waren 2 kg Kohle pro Kilowattstunde garantiert.

Der Wirkungsgrad η' des ganzen Aggregates (Dampfmaschine und Dynamo), d. h.

$$\frac{\text{vom Generator abgegebene Leistung in Kilowatt}}{\text{Gesamte zugeführte Energie (} PS_i + \text{ Erregerenergie)}}$$

beträgt:

$$\eta' = \frac{205,06}{347,87 \cdot 0,736 + 4,71} = \frac{205,06}{260,76} = 0,786.$$

Vertraglich war für die Dampfmaschine 85 Proz. und für den Generator bei induktionsfreier Belastung von 200 KW Nutzleistung 90 Proz. Wirkungsgrad garantiert, woraus ein Totalnutzeffekt von $0,85 \cdot 0,90 = 0,765$ resultiert. Somit war der durch Messung gefundene um etwa 2,7 Proz. höher.

Der Nutzeffekt des Kessels, der vertraglich 70 Proz. betragen sollte, läßt sich aus vorstehenden Daten, wie folgt, berechnen:

Der Mittelwert der Dampfspannung während des Versuches war 10,72 kg/qcm Überdruck, absolut etwa 11,75 kg/qcm.

Diesem Drucke entspricht eine Dampftemperatur von . . . 186,0° C.

Die wirkliche Dampftemperatur betrug jedoch 248,5° C.

Somit ist die Überhitzung 62,5° C.

Nach der Regnaultschen Formel gehört zur Temperatur 186° C. des gesättigten Dampfes eine Gesamtwärme desselben von $606,5 + 0,305 \cdot 186 = 673,2$ Kal. Der Überhitzung von 62,5° C. entspricht eine weitere Wärmemenge von $62,5 \cdot 0,48 = 30$ Kal. Da die mittlere Speisewassertemperatur etwa 28° C. war, so resultiert eine Wärmeaufnahme des Wassers pro Kilogramm von:

$$\begin{array}{r} 673,2 \\ + 30,0 \\ - 28,0 \\ \hline \end{array}$$

Total = 675,2 Kal. (s. hierzu u. zu f. S. 9, 10 u. 11).

Berücksichtigt man endlich, daß auf 1 kg Kohle 6,36 kg Wasser verdampft wurden und die verwendete Kohle einen Heizwert von 6322 Kal. aufwies, so ergibt sich der Nutzeffekt des Kessels zu

$$\frac{675,2 \cdot 6,36}{6322} = \sim 0,68.$$

II. Sechsstündige Dauerprobe des Maschinensatzes II bei induktionsfreier Überlastung (Haupt- und Hilfsphase belastet).

Es seien wieder zunächst die drei Versuchstabellen für Generator, Dampfmaschine und Kessel angeführt.

Elektrische Daten.

Zeit	Erregung Ampère	Hauptphase		Hilfsphase	
		Ampère	Volt	Ampère	Volt
10 ⁰⁰	39,5	83,5	2200	52,5	1850
10 ¹⁵	40,0	81,0	2200	55,0	1850
10 ³⁰	40,0	80,0	2200	55,0	1850
10 ⁴⁵	39,0	81,0	2200	51,0	1850
11 ⁰⁰	38,5	80,0	2200	52,5	1825
11 ¹⁵	38,5	80,0	2175	53,0	1820
11 ³⁰	39,0	80,0	2200	52,0	1850
11 ⁴⁵	38,0	80,0	2150	52,0	1820
12 ⁰⁰	38,0	82,0	2200	52,0	1825
12 ¹⁵	38,0	81,0	2220	52,0	1850
12 ³⁰	38,0	80,0	2180	52,0	1850
12 ⁴⁵	38,5	83,0	2200	53,5	1820
1 ⁰⁰	38,0	83,0	2200	54,0	1825
1 ¹⁵	38,5	86,0	2180	53,0	1805
1 ³⁰	38,5	83,0	2190	53,0	1825
1 ⁴⁵	41,5	81,0	2225	53,0	1850
2 ⁰⁰	41,0	85,0	2200	53,0	1840
2 ¹⁵	41,0	82,0	2175	52,0	1810
2 ³⁰	41,0	82,0	2200	52,0	1825
2 ⁴⁵	41,0	82,0	2200	52,0	1850
3 ⁰⁰	41,0	81,0	2200	52,0	1825
3 ¹⁵	41,0	82,0	2220	52,0	1850
3 ³⁰	41,0	81,0	2200	52,0	1850
3 ⁴⁵	40,5	80,0	2200	52,0	1830
4 ⁰⁰	40,5	79,0	2175	52,0	1825
Mittelwerte: 39,6		81,5	2195	52,0	1825

Nach Korrektur der Werte ergab sich:

Leistung der Hauptphase . . .	170,7 K.-W.
" " Hilfsphase . . .	87,3 "
Gesamtleistung	258,0 K.-W.

Der Erregungsverlust ist:

$$39,6 \cdot 111 = 4,4 \text{ K.-W.}$$

Dem entspricht ein Energieaufwand, der dem Umformer zuzuführen ist, im Betrage von $4,4 : 0,73 = \sim 6 \text{ K.-W.}$ Die nutzbare Leistung des Generators ist somit:

$$258 - 6 = 252 \text{ K.-W.}$$

Dampfmaschine.

Zeit	Atmosphären (an der Maschine Überdruck in Atmosphären)	Receiver (Überdruck in Atmosphären)	Vakuum in Millimetern (Wassersäule)	Tourenzah	Dampf Temperatur an der Maschine in ° C.	Indizierte PS.		
						Hochdruck	Niederdruck	Summe
						PS_i	PS_i	PS_i
9 ⁰⁰	11,0	2,20	65,0	107	181	234,25	240 21	474,46
9 ³⁰	11,0	1,15	65,0	107	218	216,96	168,37	385,33
10 ⁰⁰	10,5	1,70	65,0	107	218	229,93	204,70	434,63
10 ³⁰	11,0	1,55	65,0	107	229	234,79	189,44	424,23
11 ⁰⁰	11,0	1,35	65,0	107	227	231,28	195,25	426,53
11 ³⁰	10,5	1,50	65,5	107	226	231,25	195,21	424,46
12 ⁰⁰	10,8	1,50	65,0	107	223	229,93	196,24	426,17
12 ³⁰	10,6	1,45	65,5	107	222	233,44	195,25	428,69
1 ⁰⁰	10,8	1,60	65 0	107	222	232,36	205,19	437,55
1 ³⁰	10,1	1,70	65,0	107	218	226,14	211,73	437,87
2 ⁰⁰	11,2	1,50	65,0	107	229	235,60	196,18	431,78
2 ³⁰	10,5	1,55	65,0	107	225	235,06	195,25	427,31
3 ⁰⁰	10,6	1,55	65,0	107	225	232,09	198,95	431,04
3 ³⁰	10,6	1,45	65,0	107	226	236,95	197,10	434,05

Mittel von 10⁰⁰ bis 3³⁰: 430,36

Da die tatsächliche Tourenzah nicht 107, sondern 103,7 betrug, so reduziert sich die mittlere Leistung auf 417,10 PS_i .

Dampfkessel.

Zeit	Atmo- sphären am Kessel	Dampf- temperatur am Kessel ° C.	Essengase- temperatur ° C.	Speise- wasser temperatur ° C.	Stand des Speise- wasser- zählers Liter	Kohle kg
10 ⁰⁰	11,0	238	325	25,0	1 608 455	198
10 ¹⁵	11,2	248	323	—	1 609 360	181
10 ³⁰	11,5	242	307	25,5	1 609 430	—
10 ⁴⁵	11,5	240	300	—	1 610 390	471
11 ⁰⁰	11,9	254	312	—	1 611 050	—
11 ¹⁵	11,2	241	302	27,5	1 611 855	—
11 ³⁰	11,4	238	504	—	1 612 365	—
11 ⁴⁵	11,0	237	313	28,8	1 612 485	—
12 ⁰⁰	11,3	237	313	—	1 613 715	—
12 ¹⁵	11,4	239	313	—	1 614 385	475
12 ³⁰	11,3	242	325	51,4	1 615 130	—
12 ⁴⁵	11,2	246	318	—	1 615 615	—
1 ⁰⁰	11,2	238	327	33,7	1 616 310	—
1 ¹⁵	11,0	238	340	—	1 617 085	—
1 ³⁰	11,0	238	336	35,5	1 617 255	500
1 ⁴⁵	11,5	247	337	45,2	1 618 280	—
2 ⁰⁰	11,3	240	337	—	1 618 850	—
2 ¹⁵	10,5	243	349	50,0	1 619 540	—
2 ³⁰	11,4	242	343	—	1 620 100	—
2 ⁴⁵	11,4	239	339	57,0	1 620 500	—
3 ⁰⁰	11,2	242	356	—	1 621 300	314
3 ¹⁵	10,8	240	338	65,5	1 621 965	—
3 ³⁰	11,0	244	356	—	1 622 610	—
3 ⁴⁵	11,0	244	358	75,5	1 623 250	—
4 ⁰⁰	10,0	257	348	—	1 623 810	20
					15 355 Liter von 10 ⁰⁰ bis 4 ⁰⁰	2139 kg (ohne Be- rücksichti- gung der letzten 20 kg)

Die Resultate der Messungen sind folgende:

Speisewasserverbrauch pro Stunde:

$$\frac{1\ 623\ 810 - 1\ 608\ 455}{6} = 2559,1 \text{ Liter,}$$

Kohlenverbrauch pro Stunde:

$$2139 : 6 = 356,5 \text{ kg.}$$

Speisewasser pro indizierte Pferdestärke und Stunde:

$$2559,1 : 417,1 = 6,13 \text{ Liter.}$$

Kohlenverbrauch pro indizierte Pferdestärke und Stunde:

$$6,13 : 417,1 = 0,855 \text{ kg.}$$

Wasser pro Kilogramm Kohle:

$$6,13 : 855 = 7,17 \text{ Liter (Verdampfung).}$$

Wasserverbrauch pro nutzbare Kilowattstunde:

$$2559,1 : 252 = 10,16 \text{ Liter.}$$

Kohle pro nutzbares Kilowatt, auf 6500 Kal. reduziert

$$= \left(356,5 \frac{6322}{6500} \right) : 252 = 1,38 \text{ kg.}$$

Der Wirkungsgrad η' des ganzen Aggregates beträgt:

$$\eta' = \frac{258}{417,1 \cdot 0,736 + 44} = \frac{258}{311,4} = 0,829.$$

Danach gestalten sich sowohl der Wirkungsgrad als auch die Ökonomie bei der erheblichen Mehrbelastung von über 25 Proz. noch wesentlich günstiger, wie bei der Normalbelastung.

Anhang.

Prüfungen an Hausinstallationen.

Wenn auch der Titel des Buches das im folgenden behandelte Kapitel nicht in sich begreift, so wird es doch dem Praktiker, der sich mit Prüfungen in Zentralen und deshalb meist auch mit Hausinstallationen zu befassen hat, willkommen sein, wenn ich an dieser Stelle das Wichtigste über die Untersuchungen an Hausinstallationen — im Anschlusse an Zentralstationen — folgen lasse.

In der Regel handelt es sich um Neuanlagen — welche vor Anschluß an ein Verteilungsnetz einer eingehenden Prüfung zu unterziehen sind — oder um Nachprüfungen an einer schon im Betriebe befindlichen Installation: sei es, daß sich Erscheinungen gezeigt haben, die auf einen Fehler in der Installation schließen lassen, sei es, daß sich der Besitzer der Anlage die Gewißheit verschaffen will, daß die Güte der Anlage betreffs Isolation u. s. w. nicht unter irgend welchen Einflüssen gelitten hat.

Die Untersuchungen haben sich im allgemeinen auf Feststellung des Isolationswertes, des bei Vollbelastung der Anlage stattfindenden Spannungsabfalles (generelle Kontrolle für die richtige Wahl der Leitungsquerschnitte), sowie auf die Aufsuchung der etwaigen Fehlerstellen (Fehlerortsbestimmung) zu erstrecken; endlich hat man sich bezüglich der Ausführung der Installation davon zu überzeugen, daß dieselbe den im Interesse der Sicherheit gebotenen Vorschriften genügt. In dieser Hinsicht sind die Vorschriften des Verbandes deutscher Elektrotechniker¹⁾ maßgebend.

Je nach den lokalen Verhältnissen erfordern die Vorschriften bestimmte Ergänzungen bzw. Verschärfungen. Um einen Einblick in derartige Vorschriften zu gewähren, füge ich im Anhang ein Exemplar derselben bei, welche zugleich den lokalen Verhältnissen Rechnung tragen und von mir in zwei Zentralen mit 2×220 Volt Gleichstrom eingeführt wurden.

¹⁾ Für Neuanlagen (Niederspannung) siehe: Verbandsvorschriften vom 1. Januar 1903.

Die Messung des Isolationswiderstandes ist der wichtigste Teil der Prüfungen. Naturgemäß ist der Isolationswert eine Funktion der Spannung; sodann hängt er selbstredend, abgesehen von lokalen Verhältnissen, auch von der Ausdehnung der Leitungen ab und muß daher der Mindestwert desselben nach Maßgabe der Spannung und der Länge bezw. der Anzahl der Lampen festgesetzt werden. Bei Hausinstallationen genügt eine angenäherte Ermittlung des Isolationswiderstandes; es darf eine gewisse untere Grenze (siehe Verbandsvorschriften) nicht unterschritten werden, die niedrig genug gewählt ist, um sie bei kleinen wie bei größeren Leitungslängen leicht einhalten zu können. Werden die festgelegten Isolationsbedingungen nicht erfüllt, so liegt unvorschriftsmäßige Installation oder ein oder mehrere Verletzungen der Leitungen vor, die sich verhältnismäßig leicht nachweisen lassen.

Es ist die Bestimmung von dreierlei Isolationswerten gebräuchlich.

Isolationsmessung der Leitungen verschiedenen Potentials:

1. gegen Erde;
2. gegeneinander;
3. der untereinander verbundenen Leitungen gegen Erde.

Im allgemeinen wird die zweite Art der Messung höhere Widerstandswerte ergeben wie die erste; bei dieser hat der Meßstrom beim Übergange von der positiven zur negativen Leitung seinen Weg nur durch eine, bei der zweiten Meßschaltung durch beide Isolationen zu nehmen. Der Isolationswiderstand einer Leitung gegen Erde ist höchstens gleich demjenigen von Leitung gegen Leitung; in diesem besonderen Falle hat die zweite Leitung vollkommenen Erdschluß.

Die unter 3. angeführte Messung führt dagegen zu kleineren Isolationswerten als die erste. Waren bei der zweiten Methode, bei der der Meßstrom seinen Weg über die erste Isolation, die Erde und die zweite Isolation nacheinander zu nehmen hatte, die Isolationswiderstände hintereinander, so sind sie bei der dritten Art der Messung, bei der die Leitungen miteinander verbunden sind, einander parallel geschaltet.

Daher empfiehlt Uppenborn, den Isolationswiderstand von Hausinstallationen in diesem Sinne, d. h. als Widerstand des gesamten isolierten Netzes gegen Erde, zu bezeichnen und dementsprechend sich auf Ermittlung dieser Größe zu beschränken. Die Verbandsvorschriften dagegen verlangen die Ausführung der Messungen unter 1. und 2. Unter ganz normalen Verhältnissen — falls die Isolationswiderstände auf beiden Zweigen der Leitungen gleich sind — verhalten sich bei einer Zweileiteranlage die Isolationswiderstände unter

$$1., 2. \text{ und } 3. \text{ wie } 2:4:1.$$

Als Stromquelle wird bei den Isolationsprüfungen meist eine Batterie von Trockenelementen oder ein Magnetinduktor verwendet. Dieser letztere ist mit Handkurbel zu bewegen und liefert bei geig-

neter Umdrehungsgeschwindigkeit die gewünschte Spannung. Die Messungen müssen mit der Betriebsspannung ausgeführt werden und ist danach die Stromquelle zu bemessen. Eine solche Hilfsstromquelle ist in der Regel da zu verwenden, wo es sich um Abnahme einer Neuinstallation vor dem Anschlusse an ein Netz handelt. Bei Einzelanlagen dagegen benutzt man gern als Stromquelle die daselbst vorhandene Maschine; die Pole der Maschine müssen jedoch an und für sich gut isoliert sein, damit nicht bei Erdung des einen Poles Kurzschluß eintritt. Desgleichen kann man bei Dreileiteranlagen mit blankem Mittelleiter — weil hierdurch schon eine Erdleitung gegeben ist — die Zuführung der elektrischen Energie durch die Leitungen in den Hausanschlußkasten als Meßstromquelle benutzen.

Fig. 89.

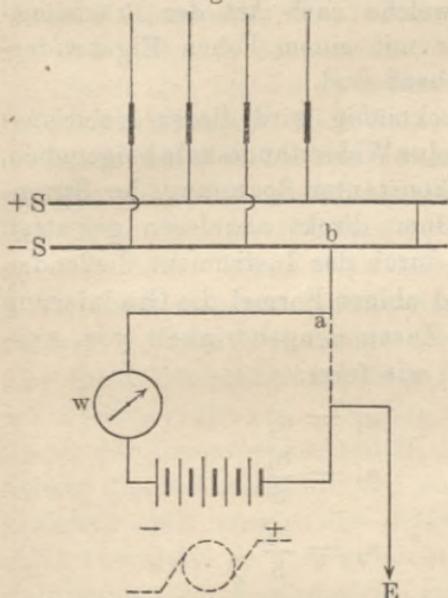
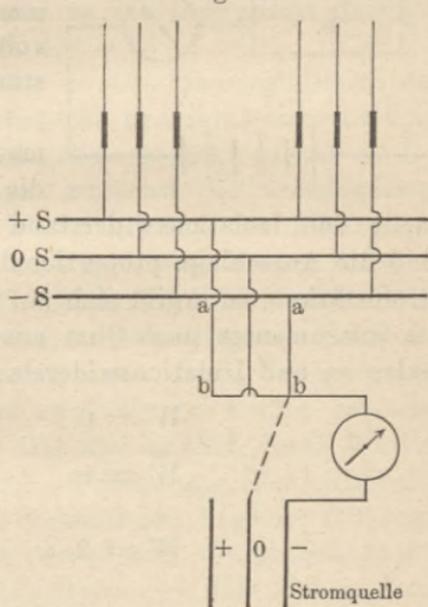


Fig. 90.



Eine von Uppenborn empfohlene Methode sei nachstehend beschrieben. Die Meßschaltung ist aus der beigefügten Skizze zu ersehen (Fig. 89). Die Verteilungsschienen *SS* werden verbunden. Der positive Pol der Stromquelle wird an Erde, der negative Pol unter Zwischenschaltung eines Spannungsanzeigers nach D'Arsonval mit hohem Widerstande *w* an die Schienen gelegt. Wird die punktierte Verbindung hergestellt, so zeigt das Instrument den Ausschlag n_1 . Wird sodann statt der punktierten Verbindung diejenige (*a*—*b*) mit den Schienen hergestellt, so erhält man einen Ausschlag n_2 . Dann ist der Isolationswiderstand

$$W = w \frac{n_1}{n_2} - w = w \cdot \left(\frac{n_1}{n_2} - 1 \right).$$

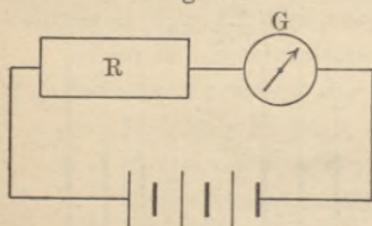
Entsprechend wäre die Schaltung für Dreileitersystem mit blankem Mittelleiter nach obiger Skizze (Fig. 90) auszuführen: Zuerst ist die

punktierte Verbindung herzustellen, danach das Instrument an die Außenleiter zu legen. Der Isolationswiderstand ist wieder

$$W = w \cdot \left(\frac{n_1}{n_2} - 1 \right).$$

Naturgemäß läßt sich in dieser Weise auch die Isolation der einzelnen Leitungen gegen Erde messen, wenn man die Verbindung der Netzhälften entfernt und das Instrument an die positive und negative Leitung nacheinander anschließt. — Legt man die Stromquelle statt an Erde an die zweite isolierte Leitung, so wird der Isolationswiderstand von Leitung gegen Leitung gemessen. Hartmann & Braun,

Fig. 91.



Siemens & Halske und andere liefern zu solchen Isolationsmessungen Instrumente, welche nach Art der Präzisionsvoltmeter mit einem hohen Eigenwiderstand gebaut sind.

Zweckmäßig wird diesen Isolationsmessern eine Widerstandsskala beigegeben, die bei konstanter Spannung der Stromquelle den Isolationswiderstand in Ohm direkt abzulesen gestattet. Sind die Ausschläge proportional den durch das Instrument fließenden Stromstärken, so ergibt sich auf Grund obiger Formel die Graduierung des Instrumentes nach Ohm aus der Zusammengehörigkeit von Ausschlag n_2 und Isolationswiderstand W , wie folgt:

$W = 0$	$n_2 = n_1$
$W = w$	$n_2 = \frac{n_1}{2}$
$W = 2 \cdot w$	$n_2 = \frac{n_1}{3}$
$W = 3 \cdot w$	$n_2 = \frac{n_1}{4}$
.....
$W = 9 \cdot w$	$n_2 = \frac{n_1}{10}$
.....

u. s. w.

Die Isolationsskalen werden für verschiedene Spannungen ausgeführt; bei höheren Spannungen sind die inneren Widerstände des Isolationsmessers entsprechend höher.

Die sogenannte Substitutionsmethode ist dieser Methode ähnlich. An Stelle des Spannungszeigers mit hohem Widerstande dient ein Galvanoskop G mit großer Windungszahl und einfacher Gradteilung. Als Vergleichswiderstand wird ein Rheostat R benutzt (siehe Fig. 91). — Bei Einschaltung des Widerstandes R sei der Ausschlag n_1 Teilstriche. Der gesamte eingeschaltete Widerstand ist sodann $R + g$

(Rheostat- und Galvanoskopwiderstand). Einem Teilstriche entspricht somit ein Widerstand von $(R + g) \cdot n_1$. Nachdem in dieser Weise das Instrument geeicht ist, wird an Stelle von R der zu messende Isolationswiderstand in den Stromkreis eingefügt. Mißt man nun einen Ausschlag von n_2 Teilstrichen, so ist der gesuchte Widerstand

$$W = \frac{(R + g) \cdot n_1}{n_2} - g.$$

Es ist zweckmäßig, die Teilung des Instrumentes nicht über 30 Winkelgrad zu benutzen; man kann annehmen, daß von 0 bis 30 Grad der Ausschlag der Nadel mit genügender Genauigkeit der Stromstärke proportional sei. Unterschreitet der Isolationswert eine gewisse Grenze, d. h. wird der Ausschlag zu groß, so bringt man durch Anlegen eines geeigneten Nebenschlusses an das Instrument dasselbe auf eine geringere Empfindlichkeit, z. B. auf $1/10$.

Stellt sich bei der Isolationsmessung in einer Hausinstallation der Isolationswert als zu klein heraus, so daß man Erdschluß einer Leitung vermuten muß, so ist der Fehler zu lokalisieren und darauf zu beseitigen. Zu dem Zwecke trennt man zunächst die verschiedenen Leitungen von der Schalttafel durch Herausnehmen der Sicherungen an derselben. Indem man nun die Leitungen einzeln auf Isolation prüft, findet man den fehlerhaften Leitungsstrang. Dieser wird weiter untersucht. Man entfernt aus der Leitung die nächstliegende Sicherung und führt die Isolationsmessung vor und hinter der Unterbrechungsstelle (Sicherung) aus. Daraus ersieht man, ob der Fehler vor oder hinter der Unterbrechungsstelle liegt. Hat man endlich durch Wiederholung dieses Verfahrens von Sicherung zu Sicherung das fehlerhafte, zwischen zwei aufeinander folgenden Sicherungen liegende Leitungsstück ermittelt, so wird es nicht mehr schwer sein, durch genaue Berücksichtigung die Fehlerquelle zu konstatieren. — Der Fehler kann naturgemäß auch im Beleuchtungskörper liegen (Körperschluß).

Einen Erdschluß kann man während des Betriebes dadurch feststellen, daß man eine Glühlampe mit einem Ende an Erde, mit dem anderen nacheinander an die positive und negative Leitung anlegt. Die Lampe wird dann je nach der Größe des Erdschlusses hell oder dunkel brennen.

Den Spannungsabfall in einer Installation bestimmt man mittels zweier vergleichener Voltmeter, indem man das eine an der Hauptverteilungsschalttafel, das andere an der entferntesten Verbrauchsstelle mit den Polen verbindet. Die Differenz der von den beiden Instrumenten angezeigten Werte ist der Spannungsabfall.

Ist die Hausinstallation schon in Betrieb genommen und soll eine nochmalige generelle Revision vorgenommen werden, so empfiehlt es sich, folgenden Versuch anzustellen. Man schaltet einen Strommesser derart in die Leitung, daß der gesamte Verbrauchsstrom ihn durchfließt.

Nachdem sämtliche Lampen eingeschaltet sind, schaltet man dieselben wieder einzeln ab, ebenso die jeweils außer Betrieb gesetzten Abzweigungen, und beobachtet das Zurückgehen des Stromzeigers. Die Angaben des Stromzeigers müssen dabei stets der Zahl der noch eingeschalteten Lampen proportional sein. War irgend wo ein Erdschluß, so zeigt sich nach Abschalten des betreffenden Leitungszweiges ein anomales Fallen des Stromzeigers.

Spezielle Installationsvorschriften¹⁾ für eine Gleichstromzentrale für 2×220 Volt Spannung²⁾.

I. Allgemeine Bestimmungen.

§ 1.

Der Anschluß der einzelnen Grundstücke an das Straßenleitungsnetz erfolgt nur durch das städtische Elektrizitätswerk.

Sollte ein Unternehmer oder ein bei demselben beschäftigter Arbeiter oder Monteur eine Installationsanlage oder eine Veränderung, Ergänzung oder Ausdehnung einer solchen, ohne ausdrückliche Erlaubnis des städtischen Elektrizitätswerkes, wenn auch nur probeweise, mittelbar oder unmittelbar an das Leitungsnetz anschließen, so wird demselben die ihm städtischerseits erteilte Erlaubnis zur Ausführung von Installationsarbeiten im Anschlusse an das Leitungsnetz des städtischen Elektrizitätswerkes (siehe § 2 und 3) entzogen.

§ 2.

Die Einrichtung von Installationen im Innern der Grundstücke wird Unternehmern überlassen, welchen vom Stadtmagistrat die schriftliche Erlaubnis hierzu erteilt wird.

§ 3.

Die den Unternehmern zu erteilende Erlaubnis zur Ausführung von Installationen, die an das Leitungsnetz des städtischen Elektrizitätswerkes angeschlossen werden sollen, ist neben der Bedingung der allgemeinen Zuverlässigkeit von dem Nachweise abhängig, daß Installationen unter Leitung eines Technikers ausgeführt werden, der die nötigen Vorkenntnisse und entsprechenden praktischen Erfahrungen besitzt. Die Erlaubnis kann vom Stadtmagistrate zurückgezogen werden, sobald sich gegen deren Fortdauer Bedenken erregen.

¹⁾ Diese Vorschriften sind im Jahre 1901 aufgestellt. Nach den neuesten Vorschriften d. V. D. E. vom 1. Januar 1903 treten einige Veränderungen ein, deren Hauptmerkmale ich unter dem Striche erwähnen werde. Obige Vorschriften sind jedoch mit besonderer Berücksichtigung der höheren Betriebsspannung aufgestellt und können ohne Gefahr für Feuer- und Betriebssicherheit beibehalten werden. Siehe auch andere Vorschriften, z. B. Bonn, Karlsruhe, Frankfurt a. M. u. s. w.

²⁾ Siehe hierzu S. 239.

§ 4.

Der Unternehmer bleibt für alle durch ihn ausgeführten Arbeiten und Lieferungen auch nach Prüfung der Einrichtung durch das städtische Elektrizitätswerk verantwortlich und hat die von demselben gegebenen Vorschriften gewissenhaft zu befolgen.

Der Unternehmer bleibt auch für die Dauer eines Jahres nach der Inbetriebsetzung der betreffenden Installation verpflichtet, jedem nach dem Urteile des Elektrizitätswerkes durch fehlerhafte oder vorschriftswidrige Arbeit oder Lieferung den Interessen des Elektrizitätswerkes zugefügten Schaden zu ersetzen.

§ 5.

Für die genaue Einhaltung der gegebenen Vorschriften haftet der Unternehmer dem städtischen Elektrizitätswerke gegenüber für allen Schaden.

Der Unternehmer hat eine Kautions von 500 Mark bei der Stadtkämmerei aufrecht zu machen.

Verzichtet der Unternehmer auf das Recht, Installationen auszuführen, so hat er mit dem diesbezüglichen Antrage seinen Berechtigungsschein zurückzusenden. Die Kautions wird ein Jahr nach Zurückgabe oder Zurücknahme des Berechtigungsscheines hinausgegeben.

Das städtische Elektrizitätswerk ist, falls der Unternehmer oder dessen Bevollmächtigter den ihm auferlegten Verpflichtungen nicht nachkommt, berechtigt, von dieser Kautions die Kosten der Änderungen und Arbeiten an der Einrichtung, die es für notwendig erachtet oder etwaige Schadenersatzansprüche zu decken. Die Kautions ist stets auf der Höhe von 500 Mark zu erhalten bzw. zu ergänzen.

§ 6.

Die Inangriffnahme einer Installation darf erst erfolgen, wenn die Erlaubnis dazu dem Unternehmer unter Genehmigung der an den Stadtmagistrat in doppelter Fertigung eingereichten Projektzeichnung seitens des Stadtmagistrates schriftlich erteilt worden ist.

II. Projekteinreichung.

§ 7.

Von dem Unternehmer sind vor Beginn der Installationen Projektzeichnungen auf Lichtdruckpapier oder auf Pausleinwand im Maßstabe 1 : 100 oder 1 : 50 in zwei Ausfertigungen einzureichen. Kommen jedoch in dem betreffenden Anwesen oberirdische Leitungen zur Verwendung, welche bestehende staatliche Telegraphen- oder Telephonleitungen kreuzen oder neben denselben verlaufen, so ist das Projekt in dreifacher Ausführung einzureichen.

Die Zeichnungen müssen in übersichtlicher Darstellung folgende Angaben enthalten:

1. In der Mitte oben: Name des Abnehmers, Straße, Hausnummer und Stockwerk.
2. Rechts unten: Eigenhändige Unterschriften des Eigentümers und des Unternehmers, sowie das Datum der Projekteinreichung.
3. Links unten: Zahl und Lichtstärke der Glühlampen, Zahl und Energieverbrauch (Watt) der Bogenlampen, Zahl und Leistung der Elektromotoren, Zahl und Energieverbrauch (Watt) sonstiger Stromverbrauchsgegenstände. Gesamtverbrauch ausgedrückt in Watt.
4. Verwendungsart der Räume als Wohnräume, Läden, Küche, Keller u. s. w., ferner ist bei Räumen, die feucht sind oder ätzende und explosible Gase, Dämpfe u. s. w. enthalten, dieses besonders anzugeben.
5. Lage, Kupferquerschnitte und Art der Isolierung der Leitungen.
6. Art der Verlegung (Isolierglocken, Rollen, Rohre u. s. w.).
7. Beschaffenheit und Lage der Sicherheits-, Aus- und Umschalter.
8. Lage und Art der Lampen, Elektromotoren und sonstiger Stromverbraucher.
9. Aufstellungsort für den Elektrizitätszähler und für die Stromunterbrecher.
10. Der in Aussicht genommene Platz des Hausanschlusses.
11. Staatliche Telegraphen- oder Telephonleitungen, welche etwaige oberirdische Leitungen kreuzen oder neben denselben verlaufen.
12. Bei größeren Anlagen ist dem Plane außerdem ein Schaltungs-schema, welches sämtliche Abzweige von den Schalttafeln mit Angabe der Leitungsquerschnitte sowie der maximalen Belastung in Ampère enthält, beizugeben.

§ 8.

Zur Darstellung der in § 7 verlangten Angaben sind folgende Bezeichnungen anzuwenden.

1. In roter Farbe:

×; ×

Feste hängende Glühlampen bis zu 25 *NK* ohne bezw. mit Hahn.

×; ×

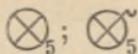
Feste Glühlampen bis zu 25 *NK* auf Wandarm ohne bezw. mit Hahn.

⊥; ⊥

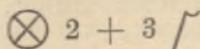
Feste Glühlampen bis zu 25 *NK* auf Ständer ohne bezw. mit Hahn.

~~~~~×; ~~~~~×

Bewegliche Glühlampen bis zu 25 *NK* ohne bezw. mit Hahn.



festе Lampenträger (Krone) mit Lampenzahl (5) Glühlampen bis zu 25 NK ohne bzw. mit Hahn.



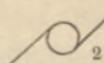
festе Lampenträger mit zwei Glühlampen bis zu 25 NK ohne und drei Glühlampen bis zu 25 NK mit Hahn.



NB. Bei Glühlampen von mehr als 25 NK ist die jeweilige Kerzenstärke in Zahlen hinzuzufügen (X 32; X 50; ⊗  $\frac{5}{32}$  u. s. w.). Bogenlampe mit Angabe der Stromstärke (6) in Ampère.



Dauerbrandlampe mit Angabe der Stromstärke (6) in Ampère.



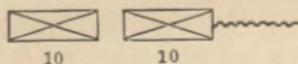
Dynamomaschine bzw. Elektromotor mit Angabe der höchst zulässigen Abgabe bzw. Aufnahme in Kilowatt.



Anlasser.



Akkumulatoren.

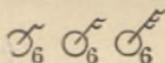


Fester bzw. beweglich angeschlossener Heizkörper mit Angabe der höchst zulässigen Stromstärke (10) in Ampère.

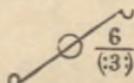
2. In schwarzer Farbe:



Wandfassung, bzw. Anschlußdose mit Angabe der höchst zulässigen Stromstärke (3) in Ampère.



Ein- bzw. zwei- bzw. dreipoliger Aus- schalter mit Angabe der höchst zulässigen Stromstärke (6) in Ampère.



Umschalter bzw. Serienschalter mit Angabe der höchst zulässigen Stromstärke (6) in Ampère und darunter in Klammern Angabe der Anzahl der umschaltbaren (3) Leitungen.



Stromunterbrecher für die einzelnen Abzweigungen.



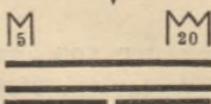
Sicherungen mit Angabe der höchst zulässigen Stromstärke (6) in Ampère.



Widerstand mit Angabe der höchst zulässigen Stromstärke (10) in Ampère.



Blitzschutzvorrichtung.



Zwei- bzw. Dreileiterzähler mit Angabe des Meßbereiches in Kilowatt (5 bzw. 20).

Zwei- bzw. Dreileiter-Schalttafel.



Ausschalter, Sicherungen u. s. w. bei dem städtischen Elektrizitätswerke zu hinterlegen bzw. vorzulegen.

Das Elektrizitätswerk hat das Recht, die eingesandten Muster unter der den gewöhnlichen Betriebsverhältnissen mindestens gleichkommenden Beanspruchung zu untersuchen. Eine Verantwortung für etwaige Beschädigung der Apparate und dergleichen wird nicht übernommen.

Die von dem Elektrizitätswerke als unbrauchbar anerkannten oder beanstandeten Gegenstände dürfen nicht verwendet werden (s. § 45).

### § 10.

Allen vom Stadtmagistrate verlangten Änderungen an den Projekten ist unweigerlich nachzukommen.

Von dem Beginne der Installation, ebenso von jeder beabsichtigten Veränderung, Ergänzung oder Ausdehnung derselben, ist dem Elektrizitätswerke spätestens zwei Tage vorher (auf dem vorgeschriebenen Formulare) schriftlich Mitteilung zu machen.

### § 11.

Änderungen an vorhandenen genehmigten Anlagen, Veränderungen oder Umlegungen vorhandener Leitungen, Herstellung neuer Leitungen, Verwendung neuer oder abgeänderter Apparate, Isolierungsvorrichtungen, Beleuchtungskörpern, Änderungen in der Zahl, der Stärke der Glühlampen und Bogenlampen und dergleichen bedürfen der Genehmigung des städtischen Elektrizitätswerkes.

## III. Aufstellung und Ausführung der Projekte.

### a) Allgemeines.

### § 12.

Die allgemeine Anordnung der Leitungen und aller zugehörigen Apparate ist so durchzuführen, daß alle Teile der Anlage übersichtlich angeordnet und leicht zugänglich sind, und daß bei etwa eintretenden Betriebsstörungen eine rasche und leichte Abhilfe möglich ist. In der Regel sind die Hauptleitungen nebst den für die Abzweigleitungen erforderlichen Ausschaltern und Sicherungen außerhalb der Räume an leicht zugänglichen Stellen anzubringen, und zwar an möglichst passend gewählten Verteilungsstellen unter Benutzung besonderer Schaltbretter. Die Zuleitungen für die Motoren sind unmittelbar am Hausanschlußkasten abzuzweigen und dortselbst mit Sicherungen zu versehen.

### § 13.

Die Innenleitungen sind nach dem Gleichstrom-Dreileiter-,  $2 \times 220$  Volt, bzw. Zweileitersystem,  $1 \times 220$  Volt, einzurichten.

## § 14.

Der höchste zulässige berechnete Spannungsabfall in den Leitungen von der Hauptsicherung am Hausanschlußkasten bis zur letzten Stromabnahmestelle darf, wenn alle Lampen gleichzeitig brennen, 1,5 Proz. der Netzspannung nicht überschreiten. Bei Leitungen, welche nur Motoren, Heizvorrichtungen u. s. w. führen, ist innerhalb der zulässigen Strombelastung ein Spannungsabfall bis zu 10 Proz. der Normalspannung zulässig. Abweichungen sind in besonderen Fällen, nur mit Genehmigung des Elektrizitätswerkes, gestattet.

## § 15.

Für die Berechnung der Querschnitte gilt folgendes:

a) für jede Glühlampe bis zu 25 NK einschließlich ist eine Stromstärke von 0,40 Ampère in Rechnung zu ziehen. Bei Glühlampen mit höherer Leuchtkraft wird die erforderliche Stromstärke in Rechnung gestellt;

b) für jede Bogenlampe ist ein Strombedarf von mindestens dem  $1\frac{1}{2}$ fachen des normalen Strombedarfes zu rechnen;

c) für Elektromotoren und sonstige Stromverbrauchsgegenstände sind die Leitungen für das Doppelte der normalen Stromstärke für Vollbelastung zu berechnen.

Dementsprechend sind für a), b) und c) auch die Sicherungen, Ausschalter und dergleichen zu wählen.

d) Die berechneten Querschnitte der Drähte sind stets darauf zu prüfen, daß die Beanspruchung die als zulässig angegebenen Grenzwerte nicht überschreitet und eine schädliche Erwärmung vermieden wird.

## § 16.

Die Leitungsfähigkeit des zu Stromleitungen verwendeten Kupfers darf nicht kleiner als 57 und der spezifische Widerstand nicht größer als 0,0175 bei 15° C. sein.

Die höchst zulässige Betriebsstromstärke für isolierte Kupferleitungen ist aus folgender Tabelle zu entnehmen.

| Querschnitte<br>in qmm | Betriebsstärke<br>in Amp. | Querschnitte<br>in qmm | Betriebsstärke<br>in Amp. |
|------------------------|---------------------------|------------------------|---------------------------|
| 0,75                   | 3                         | 95                     | 165                       |
| 1,00                   | 4                         | 120                    | 200                       |
| 1,5                    | 6                         | 150                    | 235                       |
| 2,5                    | 10                        | 185                    | 275                       |
| 4,0                    | 15                        | 240                    | 330                       |
| 6,0                    | 20                        | 310                    | 400                       |
| 10                     | 30                        | 400                    | 500                       |
| 16                     | 40                        | 500                    | 600                       |
| 25                     | 60                        | 625                    | 700                       |
| 35                     | 80                        | 800                    | 850                       |
| 50                     | 100                       | 1000                   | 1000                      |
| 70                     | 130                       |                        |                           |

Blanke Kupferleitungen bis zu 50 qmm Querschnitt unterliegen gleichfalls den Vorschriften vorstehender Tabelle; blanke Kupferleitungen von 50 bis 1000 qmm Querschnitt können dagegen mit zwei Ampère pro Quadratmillimeter belastet werden.

Als selbständige isolierte Leitungen sind nur Drähte von 1,5 qmm ab zu verwenden. In und an Beleuchtungskörpern können bei besonders guter Isolation Drähte von 0,75 qmm benutzt werden; für blanke Kupferleitungen ist der geringste zulässige Querschnitt in Gebäuden 4 qmm, derjenige von blanken oder isolierten Freileitungen aus Kupfer 6 qmm.

### § 17.

Die Art der Leitungen sowie der anzuwendenden Isolier- und Befestigungsmittel ist, je nach der Verwendungsart, nach den in der angehefteten Tabelle gegebenen Bestimmungen zu wählen und sind andere Leitungen und Verlegungsarten ausgeschlossen.

### § 18.

Zur Installation dürfen nur Drähte, Litzen und Kabel von nachstehend beschriebener oder gleichwertiger Konstruktion<sup>1)</sup> und den in § 16 angeführten Querschnitten Verwendung finden.

- a) Kupferdraht *BC* sowohl blank wie verzinkt.
- b) Gummibanddraht (*G*) (hierzu gehörig auch Zwillings- und Drillingsleiter). Der verzinnte Kupferleiter hat eine Gummiisolierung in Form einer ununterbrochenen, nahtlosen, vollkommen wasserdichten Hülle mit Umflechtung aus imprägniertem, faserigem, nicht brüchigem Isoliermaterial. Bei Zwillings- und Drillingsleitungen sind die wie vorstehend hergestellten Leitungen nochmals mit faserigem, nicht brüchigem, imprägniertem Isoliermaterial umspinnen.
- c) Okonitaderdraht (*O*).

Der verzinnte Kupferleiter ist mit Okonit isoliert und mit imprägniertem, nicht brüchigem, faserigem Isoliermaterial umflochten.

- d) Flammensichere Okonitaderdrähte (*OFL*).

Der verzinnte Kupferleiter ist mit Okonit isoliert und mit imprägniertem, nicht brüchigem Isoliermaterial sowie einer flammensicheren Umflechtung aus eben solchem Isoliermaterial umflochten.

- e) Okonitaderdrahtlitze (*OL*) wie unter c) als Litze oder als verdrehte Leitung ausgebildet.
- f) Blankes Bleikabel (*KB*).

Imprägnierte Isolation und einfache nahtlose Bleimantel.

<sup>1)</sup> Siehe auch die neuen Normalien für Gummiband- und Gummiaderleitungen und -Schnüre d. V. D. E. vom 1. Januar 1903.

g) Asphaltierte Bleikabel (*KA*).

Wie *KB* Bleimantel, außerdem mit asphaltierter Juteumspinnung.

h) Eisenarmierte, asphaltierte Bleikabel (*KE*).

Imprägnierte Isolation mit Bleimantel, asphaltierter Bandumwicklung und Armatur aus Eisenband oder Eisendraht, darüber Compoundhülle, sonst wie *KB*.

Isolierte Leitungen dürfen nur mit Ölfarbe, keinesfalls aber mit Kalkfarbe bestrichen werden.

## § 19.

Um nachteilige Einwirkungen der Starkstromanlagen auf die staatlichen und die städtischen Telegraphen- und Telephonleitungen zu verhüten, sollen die Hin- und Rückleitungen der ersteren in einem so geringen, überall gleichen Abstände voneinander geführt werden, als dies die Rücksicht auf die Sicherheit des Betriebes der Lichtleitungen und die Bestimmungen dieser Vorschriften zuläßt. Auch bei hintereinander geschalteten Bogenlampen ist die Herstellung derartiger nebeneinander verlaufender Hin- und Rückleitungen durchzuführen.

Alle im Freien oberirdisch geführten Starkstromleitungen müssen bei Kreuzungen mit staatlichen Telegraphen- und Telephonleitungen einen Abstand von mindestens 1,5 m von denselben einhalten. An den Kreuzungsstellen dieser Starkstromleitungen mit staatlichen Telegraphen- und Telephonleitungen müssen die Starkstromleitungen mindestens in dem in Betracht kommenden Stützpunktzwischenraume aus Gummidraht hergestellt werden. Hierbei sind die Starkstromleitungen so zu führen, daß sie die Schwachstromleitungen möglichst rechtwinklig kreuzen. Andernfalls ist die Isolierung der Starkstromleitung beiderseits der Kreuzungsstellen so weit zu verlängern, daß bei etwaigem Reißen der Schwachstromleitungen diese mit einem blanken Draht der Starkstromleitungen nicht in Berührung kommen können.

An denjenigen Stellen, wo blanke Starkstromleitungen neben Schwachstromleitungen verlaufen und der gegenseitige Abstand weniger als 10 m beträgt, müssen die Starkstromleitungen auf eine ausreichende Strecke aus isoliertem Draht hergestellt werden. Von dieser Bedingung kann dort abgesehen werden, wo die örtlichen Verhältnisse eine Berührung der Starkstrom- und Schwachstromleitungen auch beim Umbruch von Gestängen oder beim Zerreißen von Drähten ausschließen.

Beim Installieren der isolierten Lichtleitungen im Innern der Gebäude sind Kreuzungen mit etwa vorhandenen Telephonleitungen zu vermeiden. Läßt sich eine Überkreuzung nicht umgehen, so müssen die Starkstromleitungen durch Überschieben eines Hartgummi-, Papier- oder Porzellanrohres oder durch einen Kreuzungsring aus Glas oder

Porzellan von den unterhalb befindlichen Telephonleitungen ferngehalten werden. Das Schutzrohr ist gegen Lagenänderung sorgfältig zu sichern.

In Räumen, in welchen Telephonleitungen geführt sind, ist das Anheften der Starkstromleitungen an derselben Wand, an welchen die Telephonleitungen sich befinden, verboten.

## b) Schaltvorrichtungen.

### § 20.

Alle zur Verwendung kommenden Apparate (Bleisicherungen, Ausschalter, Umschalter, Widerstände, Stromverbrauchsgegenstände u. s. w.) müssen so beschaffen sein, daß alle stromführenden Teile sowohl voneinander, als auch nach außen mindestens gleich gut isoliert sind, wie die Leitungen, welche sie bedienen. Alle Apparate sind auf einer feuersicheren Unterlage zu montieren, die auch in feuchten Räumen noch gut isolieren muß, und außerdem mit einer feuersicheren Hülle zu umgeben.

Die Schaltvorrichtungen sind, auf Schaltschaltern vereinigt, an geeigneten Orten in solcher Höhe anzubringen, daß man sie ohne besondere Hilfsmittel erreichen kann. Zum Schutze gegen Beschädigung und unbefugter Berührung sind die Schaltschalter mit einem besonderen Schutzkasten zu bedecken.

In Räumen, in welchen sich brennbare Gase oder Dämpfe entwickeln, oder brennbare Körper in staubähnlichem Zustande in explosiblen Mengen der Luft beigemischt werden können, dürfen Schaltvorrichtungen oder Apparate, an denen eine Stromunterbrechung oder Überhitzung (Heizkörper) stattfinden kann, nicht angebracht werden.

Die Hauptbleisicherungen, die Stromunterbrecher des Elektrizitätswerkes, Hausanschlußkasten und die Verteilungsschaltbretter dürfen nur in Räumen untergebracht werden, über welche der betreffende Stromabnehmer frei verfügt, oder deren Zugänglichkeit dem Elektrizitätswerke durch den Hauseigentümer nach Bedarf gesichert ist.

Apparate auf Schalttafeln, soweit sie nur instruiertem Personal zugänglich sind, sowie Apparate, die im Freien in unzugänglicher Lage angebracht sind, können Schutzkästen entbehren.

Die stromführenden Teile sämtlicher Apparate müssen gegen die Erde ebenso sorgfältig isoliert sein, wie die in den betreffenden Räumen verlegten Leitungen. Bei Einführung von Leitungen muß der für die Leitungen vorgeschriebene Abstand von der Wand gewahrt bleiben.

Die Kontakte sind derart zu bemessen, daß durch den stärksten vorkommenden Betriebsstrom keine Erwärmung von mehr als  $50^{\circ}$  C. über Lufttemperatur eintreten kann.

## § 21.

Bleisicherungen sind überall da anzuwenden, wo eine Veränderung des Kupferquerschnittes in den Leitungen stattfindet, jedoch können in den zum Speisen einzelner Lampen bestimmten Leitungskästen bis zu 15 Lampen von 5 bis 25 NK hinter einer gemeinsamen Sicherung brennen.

Es wird empfohlen, die Verteilung der Lampen auf die einzelnen Zweigleitungen so vorzunehmen, daß in einem Raume, in welchem mehr als zehn Lampen brennen, diese nicht alle von einer gemeinsamen Hauptsicherung abgezweigt sind.

Sämtliche Leitungen sind doppelpolig zu sichern.

Die Sicherungen sind möglichst zentralisiert in handlicher Höhe anzubringen.

In Räumen, in denen betriebsmäßig leicht entzündliche oder explosive Stoffe vorkommen, dürfen keine Sicherungen angebracht werden.

Die Stärke der Bleisicherungen ist so zu bemessen, daß dieselben beim zweifachen der normalen Stromstärke durchschmelzen und sind die höchst zulässigen Abschmelzstromstärken aus nachstehender Tabelle ersichtlich:

| Drahtquerschnitt<br>in qmm | Normalstromstärke<br>der Sicherung<br>in Amp. | Abschmelzstromstärke<br>in Amp. |
|----------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------|
| 0,75                       | 3                                             | 6                               |
| 1,00                       | 4                                             | 8                               |
| 1,50                       | 6                                             | 12                              |
| 2,50                       | 10                                            | 20                              |
| 4,00                       | 15                                            | 30                              |
| 6,00                       | 20                                            | 40                              |
| 10,00                      | 30                                            | 60                              |
| 16,00                      | 40                                            | 80                              |
| 25,00                      | 60                                            | 120                             |
| 35,00                      | 80                                            | 160                             |
| 50,00                      | 100                                           | 200                             |
| 70,00                      | 130                                           | 260                             |
| 95,00                      | 165                                           | 330                             |
| 120,00                     | 200                                           | 400                             |
| 150,00                     | 235                                           | 470                             |
| 185,00                     | 275                                           | 550                             |
| 240,00                     | 330                                           | 660                             |
| 310,00                     | 400                                           | 800                             |
| 400,00                     | 500                                           | 1000                            |

Die Sicherungen müssen derart konstruiert sein, daß beim Abschmelzen, auch bei Kurzschluß, in der gesicherten Leitung kein dauernder Lichtbogen entsteht.

Bei Sicherungen dürfen weiche, plastische Metalle und Legierungen nicht unmittelbar den Kontakt vermitteln, sondern es müssen die Schmelzdrähte oder Schmelzstreifen in Kontaktstücke aus Kupfer oder gleich geeignetem Metall eingeleitet sein.

Die Maximalspannung und die Normalstromstärke sind auf dem auswechselbaren Einsatz der Sicherung zu verzeichnen.

Das Einsetzen und Entfernen der Sicherungen in den Hausanschlußkasten geschieht ausschließlich durch das Elektrizitätswerk.

Die Konstruktion sämtlicher Sicherheitsschalter muß eine gefahrbringende irrtümliche Verwendung ausschließen. Die Einrichtung muß derartig getroffen sein, daß Umherschleudern geschmolzenen Bleies vermieden wird.

### § 22.

Die Ausschalter und Umschalter sind mit einer Schutzhülle zu umgeben, die alle leitenden Teile umschließt. Die Aus- und Einschaltung muß momentan durch Federkraft geschehen, und zwar so, daß eine Mittelstellung des Ausschalters unmöglich ist und die Feder sich nur in den beiden Endstellungen im Ruhezustande befindet.

Die Wirkungsweise aller Schalter muß derart sein, daß sich kein dauernder Lichtbogen bilden kann.

Es dürfen nur Schleifkontakte zur Anwendung kommen, die auf 1 qmm Kontaktfläche mit höchstens 0,2 Ampère beansprucht werden.

Sowohl Aus- wie Umschalter sind mit einer auch an den montierten Apparaten leicht sichtbaren Bezeichnung der höchst zulässigen Stromstärke in Ampère und Spannung in Volt zu versehen. Ferner muß bei Aus- und Umschaltern, welche mit Gehäuse versehen sind, durch eine Bezeichnung aus der Stellung des Schaltgriffes ersichtlich sein, ob der, bzw. die Stromkreise geöffnet oder geschlossen sind.

In Räumen, wo leicht entzündbare und explosible Stoffe vorkommen, sind Aus- und Umschalter nur unter verläßlichem Sicherheitsabschluß zulässig. In feuchten Räumen sind Aus- und Umschalter möglichst zu vermeiden bzw. außerhalb zu montieren.

### § 23.

Widerstände und Heizapparate, bei welchen eine Erwärmung um mehr als 50<sup>0</sup> C. eintreten kann, sind derart anzuordnen, daß eine Berührung zwischen den wärmeentwickelnden Teilen und entzündlichen Materialien, sowie eine feuergefährliche Erwärmung solcher Materialien nicht vorkommen kann.

Widerstände sind auf feuersicherem, gut isolierendem Material zu montieren und mit einer Schutzhülle aus feuersicherem Material zu umkleiden.

Widerstände dürfen nur auf feuersicherer Unterlage (Isolierrollen und Asbest), und zwar freistehend oder an feuersicheren Wänden, an-

gebracht werden. Sie müssen mindestens 2 cm von der Wand und 25 cm von der Decke und brennbaren Gegenständen entfernt sein. In Räumen, wo betriebsmäßig Staub, Fasern oder explosible Gase vorhanden sind, dürfen Widerstände nicht aufgestellt werden.

### § 24.

Schalttafeln sind überall da anzubringen, wo sich mehrere Sicherungen, Ausschalter, Widerstände u. s. w. an einem bequem zugänglichen Orte leicht und übersichtlich anordnen lassen.

Die Schalttafeln sind aus metallfreiem Marmor oder ebensolchem Schiefer und die Schutzkästen darüber aus feuersicherem Material herzustellen, daß alle stromführenden Teile verdeckt und Störungen durch Unbefugte ausgeschlossen sind.

Die Verbindung der einzelnen Apparate sind auf der Rückseite der Tafel zu montieren, wobei Kreuzungen möglichst zu vermeiden sind. Ist dies nicht zu erreichen, so sind die sich kreuzenden Drähte besonders sorgfältig zu isolieren und durch entsprechende unverschiebbare Vorrichtungen in einem bestimmten Abstände voneinander zu halten.

Die Ausschalter und Sicherungen auf den Schalttafeln sind mit Bezeichnungen zu versehen, aus denen hervorgeht, für welche Räume bzw. Lampengruppen sie gehören.

### § 25.

Die Elektrizitätszähler werden ausschließlich vom Elektrizitätswerke geliefert, welches auch die Größe und Anzahl derselben bestimmt und die Aufstellung, Bedienung und Instandhaltung besorgt. Dieselben dürfen nur an ganz trockenen, leicht zugänglichen, staubfreien und hellen Orten angebracht werden und behält sich das Elektrizitätswerk die Genehmigung bzw. Bestimmung des Aufstellungsortes vor.

Die Zu- und Ableitungen für die Zähler sind so zu bemessen, daß der Anschluß des Zählers seitens des Elektrizitätswerkes anstandslos gemacht werden kann.

Für die Elektrizitätszähler sind auf Porzellanrollen isoliert montierte, genau eingelotete Eichenholzbretter an die Wand anzubringen, und zwar so, daß die Zähler ohne Anwendung besonderer Hilfsmittel bedient und nachgesehen werden können.

### c) Stromverbrauchsgegenstände.

### § 26.

Glühlampen dürfen in Räumen, in denen eine Explosion durch Entzündung von Gasen, Staub oder Fasern stattfinden kann, nur mit

dichtschießenden Überglocken, welche auch die Fassungen einschließen, verwendet werden.

Glühlampen, welche mit entzündlichen Stoffen in Berührung kommen können (z. B. Schaufensterbeleuchtung), müssen mit Schalglocken oder Drahtgittern versehen sein, durch welche die unmittelbare Berührung der Lampe mit entzündlichen Stoffen verhindert wird.

Sämtliche Fassungen für gewöhnliche Lampen sollen mit Edison gewinden versehen sein, welche mit den beim Elektrizitätswerke befindlichen Normalien genau übereinstimmen müssen. Die Lampen müssen gut in die Fassungen passen.

Für außergewöhnliche Lampen (Kerzen resp. Dekorationslampen) sind auch andere Kontakte und Fassungen zulässig. Die stromführenden Teile der Fassungen müssen auf feuersicherer Unterlage montiert und durch feuersichere Umhüllung, welche jedoch nicht unter Spannung stehen darf, vor Berührung geschützt werden.

Hartgummi und andere Materialien, welche in der Wärme einer Formveränderung unterliegen, sind als Bestandteile im Innern der Fassungen ausgeschlossen. Fassungen mit Edison gewinden sind stets so anzuschließen, daß der Gewinding im Mittelleiter liegt. (Der Zentralkontakt und der Ausschalter liegen dann im Außenleiter.) Besonders wichtig ist dies bei beweglichen Leitungen und Lampen in feuergefährlichen Räumen (Schaufenster u. dergl.) und muß dann der Anschlußkontakt an die feste Leitung derart verlegt sein, daß eine Verwechslung der Polarität ausgeschlossen ist.

Die Ausschalter an den Fassungen unterliegen den Bestimmungen in § 22, Abs. I.

Beleuchtungskörper müssen isoliert aufgehängt bzw. befestigt werden.

Sind Beleuchtungskörper entweder gleichzeitig für Gasbeleuchtung eingerichtet, oder kommen sie mit metallischen Teilen der Gebäude in Berührung, oder werden sie an Gasbeleuchtung oder feuchten Wänden befestigt, so ist der Körper an der Befestigungsstelle mit einer besonderen Isoliervorrichtung zu versehen, welche einen Stromübergang vom Körper zur Erde verhindert. Hierbei ist zu beachten, daß die Zuführungsdrähte den nicht isolierten Teil der Gasleitung nirgends berühren.

Schnurpendel mit biegsamer Leitungsschnur sind nur dann zulässig, wenn das Gewicht der Lampe nebst Schirm, Schutzkorb u. s. w. von einer besonderen Tragschnur getragen wird, welche mit der Litze verbunden sein kann. Sowohl an der Aufhängestelle als auch an der Fassung müssen die Leitungsdrähte länger sein als die Tragschnur, damit kein Zug auf die Verbindungsstelle ausgeübt werden kann.

Auch sonst dürfen Leitungen nicht zur Aufhängung benutzt werden, sondern müssen durch besondere Aufhängevorrichtungen, welche jederzeit kontrollierbar sind, entlastet sein.

## § 27.

Bogenlampen müssen mit Vorrichtungen, welche ein Herausfallen glühender Kohlenteilchen verhindern, versehen werden. Glocken ohne Aschenteller oder eine gleich gute Schutzvorrichtung sind nicht zulässig.

Die Glocken für Bogenlampen müssen mit Drahtumflechtung versehen sein.

Die Lampe ist von der Erde isoliert aufzuhängen.

Die Einführungsöffnungen für die Leitungen müssen so beschaffen sein, daß die Isolierhülle der letzteren nicht verletzt werden und Feuchtigkeit in das Innere der Laterne nicht eintreten kann.

Bei Verwendung der Zuleitungsdrähte als Aufhängevorrichtung dürfen die Verbindungsstellen der Drähte nicht durch Zug beansprucht und die Drähte nicht verdrillt werden.

Bogenlampen dürfen nicht in Räumen, in denen Explosion durch Entzündung von Gasen, Staub oder Fasern stattfinden kann, verwendet werden.

## § 28.

Motoren bis zu 2000 Watt Energieverbrauch dürfen für 220 Volt gewickelt sein und zwischen dem Mittelleiter und einem Außenleiter geschaltet werden.

Bei größeren Motoren muß der Anker an die Außenleiter angeschlossen werden, während die Erregung mit 220 Volt statthaft ist.

Alle Motoren über 750 Watt normalen Energieverbrauchs müssen mit Anlassern versehen sein, deren Widerstand und Stufenzahl so zu bemessen ist, daß das Einschalten des Motors ohne nachteiligen Einfluß auf die Gleichmäßigkeit des Lichtes ist.

Für Motoren, bei welchen infolge zu großen Stromverbrauchs oder aus einem anderen Grunde eine störende Rückwirkung für die Beleuchtung zu befürchten ist, kann seitens des Elektrizitätswerkes der Anschluß verweigert werden.

Die zu den Motoren führenden Leitungen sind unmittelbar hinter der Hausanschlußsicherung von dem Lichtleitungsnetze abzuzweigen.

Elektromotoren und Gleichstromumformer, welche nicht in besonders luft- und staubdichten Schutzkasten stehen, dürfen nur in Räumen aufgestellt werden, in denen in normaler Weise eine Explosion oder Entzündung von Gasen, Staub oder Fasern ausgeschlossen ist.

In allen Fällen ist die Aufstellung derart auszuführen, daß etwaige Feuererscheinungen keine Entzündung von brennbaren Stoffen hervorrufen können.

## § 29.

Heizkörper, Akkumulatoren und sonstige Stromverbraucher von über 5000 Watt maximalem Energieverbrauch dürfen nur mit besonderer Genehmigung des Elektrizitätswerkes angeschlossen werden.

## d) Spezielle Installationsvorschriften.

## § 30.

Sämtliche Leitungen sind so anzubringen, daß sie, so weit wie möglich, jederzeit leicht nachgesehen werden können.

Je nach Beschaffenheit der Räume sind die aus der angehefteten Tabelle ersichtlichen Leitungsmaterialien u. s. w. zu verwenden.

## § 31.

Leitungen zu Motoren, Heizapparaten u. s. w. müssen so gekennzeichnet sein, daß eine Verwechslung mit anderen Leitungen ausgeschlossen ist.

## § 32.

Schutzvorrichtungen sind überall da anzubringen, wo die Leitungen oder Apparate einer zufälligen oder fahrlässigen Beschädigung ausgesetzt sind. Die Vorrichtungen müssen Luftzutritt gestatten.

## § 33.

Durchführungen durch Wände und Decken, bei welchen die Herstellung eines Kanals zur Isolierung der Leitung auf Porzellanrollen nicht möglich ist, sind mittels Hartgummi- oder Porzellanröhren auszuführen.

Jeder Leitungsdraht bzw. -Litze erhält ein besonderes Rohr. Die Rohre müssen einen Abstand von mindestens 1 cm voneinander haben und sollen 1 cm auf beiden Seiten über die Wandfläche frei vorstehen. Dieselben müssen so weit sein, daß sich der Draht frei in ihnen bewegen läßt.

Auf den Rand der Durchführungen müssen Porzellantüllen gesetzt werden, damit die Leitungen nicht beschädigt werden können.

Bei Führung von Drähten aus dem Innern der Gebäude ins Freie sind sogen. Porzellan- oder Hartgummieinführungen mit nach unten gerichteter trichterförmiger Mündung zu verwenden.

Durchführungen durch Fußböden sind immer mit Gasröhren zu bewerkstelligen, die mindestens 10 cm über den Boden vorstehen. Die Gasröhren sind mit Hartgummihülsen auszufüttern.

## § 34.

Bei Überkreuzungen von Leitungen soll, wenn die Drähte nicht schon durch die Art der Befestigung in einen unverrückbaren Abstand von mindestens 2 cm gehalten werden, der Überkreuzungsdraht durch Überschieben eines Hartgummi- oder Papierrohres oder einer Isolierrolle aus Glas oder Porzellan oder durch Unterlage einer

isolierenden Schicht von dem darunter befindlichen Drahte ferngehalten werden. Rohre und Unterlage sind sorgfältig zu befestigen und gegen Lagenänderung zu schützen.

### § 35.

Blanke Drähte können im Freien Verwendung finden, wenn sie in einer Höhe von mindestens 5 m, bei Wegübergängen mindestens 6 m auf Porzellandoppelglocken geführt werden und zufälligen oder fahrlässigen Berührungen nicht ausgesetzt sind. In Gebäuden müssen dieselben, soweit sie nicht unausschaltbare Parallelzweige gleicher Polarität sind, voneinander bei Spannweiten von über 6 m mindestens 30 cm, bei Spannweiten von 4 bis 6 m mindestens 20 cm und bei kleineren Spannweiten mindestens 15 cm, von der Wand in allen Fällen mindestens 10 cm entfernt sein. Blanke Drähte dürfen ferner in Kellerräumen Verwendung finden, sofern letztere keinen brennbaren Inhalt besitzen und die Leitungen so angelegt sind, daß sie vor Berührung oder zufälliger Beschädigung gesichert sind. Gleichzeitig sind blanke Drähte auf Doppelglocken überall da zulässig, wo sie Unbefugten unzugänglich sind und wo mit ihrer Verwendung keine Feuersgefahr verknüpft ist.

### § 36.

Porzellanrollen dürfen in trockenen oder mäßig feuchten Räumen zur Anwendung kommen, sind jedoch in mit Dämpfen erfüllten und sehr feuchten Räumen ausgeschlossen.

Der seitliche Abstand der Rollen muß so bemessen sein, daß der Abstand der beiden Drähte voneinander mindestens 3 cm beträgt; auf je 80 cm Leitungslänge ist mindestens eine Rolle anzubringen.

Die Entfernung der Drähte von der Wand muß mindestens 1 cm betragen. Die Drähte dürfen nicht um die Rolle geschlungen werden, sondern sind an dieser vorbeizuführen und mit Kupferbindedraht oder mit verzinktem Eisendraht festzubinden. Unter der Bindestelle ist die isolierte Leitung mehrfach mit Isolierband zu umwickeln.

### § 37.

Isolierglocken müssen beim Verlegen der Leitungen im Freien und in nassen oder mit Dämpfen angefüllten Räumen verwendet werden.

Isolierglocken dürfen im Freien nur in aufrechter Stellung, in gedeckten Räumen nur in solcher Lage befestigt werden, daß sich keine Feuchtigkeit in der Glocke ansammeln kann.

Die Glocken sind so anzubringen, daß blanke Drähte einen Abstand von mindestens 30 cm, isolierte Leitungen einen solchen von mindestens 20 cm voneinander haben, während der Abstand zwischen Glocke und Erde (nächste Wand u. s. w.) mindestens 10 cm betragen muß.

## § 38.

Die Verlegung von Leitungen in Holzleisten ist verboten.

## § 39.

Mehrfachleitungen dürfen nicht so befestigt werden, daß ihre Einzelleiter aufeinandergepreßt sind, worauf besonders bei solchen Isolatoren zu achten ist, bei welchen die Leitungen zwischen zwei durch die Befestigungsschrauben zusammengehaltene Teile eingeklemmt wird.

Wird die Leitung an Isolierglocken, Isolierrollen oder dergleichen angebunden, so muß hierzu Bindfaden oder Isolierband verwendet werden. Metallbindedrähte sind streng zu vermeiden.

## § 40.

Isolierrohre sowie Metallrohre mit oder ohne isolierende Auskleidung können zur Verlegung von isolierten Leitungen mit mindestens einer Isolation nach § 18 b unter Putz, in Wänden, Decken und Fußböden verwendet werden, sofern sie den Zutritt von Feuchtigkeit dauernd verhindern.

In Neubauten sind unter Putz nur Hartgummirohre oder Papierrohre mit Eisenpanzer zulässig.

Es empfiehlt sich, bei den Installationen Hin- und Rückleitung in gesonderte Rohre zu verlegen und eine Verlegung in ein gemeinsames Rohr zu vermeiden. Mehr als drei Leitungen in demselben Rohre sind nicht zulässig.

Eine offene Verlegung von Rohren ist den verdeckten stets vorzuziehen.

## § 41.

Drahtverbindungen dürfen nicht innerhalb der Rohre, sondern nur in besonderen Verbindungsdosen oder Kasten ausgeführt werden, welche jederzeit leicht geöffnet werden können.

Die Verbindung der Leitungen untereinander darf nur mittels Verlöten oder einer nach dem Ermessen des Elektrizitätswerkes dem Verlöten gleichwertigen Verbindungsart erfolgen. Die Verbindung von Leitungen mit Apparaten kann auch durch Klemmschrauben geschehen.

Lötwater ist für Verlötungen ausgeschlossen, am besten eignet sich Kolophonium. Die Lötstellen sind nach dem Erkalten sorgfältig zu reinigen. Jede Verbindungsstelle ist der Art des Drahtes entsprechend ebenso gut zu isolieren wie die Leitung selbst. Eine Verschiebung der neuen Isolierschicht muß ausgeschlossen sein.

Bei Abzweigung von frei gespannten Drähten sind die Befestigungsmittel so anzuordnen, daß ein Zug auf die Verbindungsstelle vermieden wird.

Die lichte Weite der Rohre, die Zahl und der Radius der Krüm-

mungen, sowie die Zahl der Dosen müssen so gewählt werden, daß man die Drähte jederzeit leicht einziehen und entfernen kann.

Die Rohre sind so herzurichten, daß die Isolation der Leitungen durch vorstehende Teile und scharfe Kanten nicht verletzt werden kann. Ferner sind dieselben so zu verlegen, daß sich an keiner Stelle Wasser ansammeln kann. Nach der Verlegung ist die höher gelegene Mündung des Rohrkanals luftdicht zu verschließen.

#### § 42.

Beleuchtungskörper müssen isoliert aufgehängt werden (siehe § 26, Abs. 7; § 27, Abs. 3).

Die Beleuchtungskörper sind so aufzuhängen bzw. anzubringen, daß eine Verletzung der Leitung durch Drehen des Körpers ausgeschlossen ist.

#### § 43.

Dübel und ähnliche Körper, die zur Befestigung von Leitungen, Apparaten und Beleuchtungskörpern dienen, müssen derart beschaffen sein, daß sie nach Anbringung in der Wand sich nicht lockern oder drehen können.

Zur Befestigung sind nur Stein- oder Holzschrauben, aber keine Nägel zu verwenden.

Bei der Verbindung der Leitung mit Apparaten darf der nächste Befestigungspunkt nicht über 10 cm vom Apparate entfernt sein.

### e) Übergangsbestimmungen.

#### § 44.

Auf elektrische Anlagen, welche bei Erlaß dieser Vorschriften bereits bestehen oder schon vorbereitet sind, finden letztere unter nachstehenden Übergangsbestimmungen Anwendung.

- a) Über solche Anlagen ist mit Antrag auf Anschluß durch einen hierzu ermächtigten Unternehmer ein vorschriftsmäßiger Plan einzureichen.
- b) Die Anlagen sind vor ihrem Anschlusse an das Leitungsnetz des städtischen Elektrizitätswerkes so weit wie tunlich den Vorschriften anzupassen; dabei dürfen aber beibehalten werden:
  1. Leitungen und Vorbereitungen zu denselben, welche in ihren Querschnittsabmessungen, in ihren Isolier-, Verlegungs- und Befestigungsmitteln oder in der Vereinigung der Apparate auf Schaltbrettern diesen Bestimmungen nicht entsprechen.
  2. Bleisicherungen, welche von den städtischen Normalien abweichen.

3. Lampenfassungen, welche mit anderem als dem Edisongewinde hergestellt worden sind.
  4. Leitungen und Apparate, welche anders als nach diesen Bestimmungen verlegt, befestigt oder verbunden sind, sofern die Anlagen bezw. die betreffenden Bestandteile derselben sich sicher bewährt haben, nicht unzumutbar sind, kein Bedenken vom Standpunkte der Feuer- oder der Betriebssicherheit veranlassen und seitens des Elektrizitätswerkes für anschlussfähig gehalten werden.
- c) In allen anderen oben und unter b) nicht ausdrücklich aufgenommenen Beziehungen müssen die betreffenden Anlagen in vollem Einklange mit den Vorschriften hergestellt sein bezw. hergerichtet oder ergänzt werden und sind dabei unbedingt und genau einzuhalten, insbesondere die Vorschriften über:
- Spannungsverlust und Beanspruchung der Drähte, Schutz der Telegraphen- und Telephonleitungen, Isolierung, Schutz und Aufstellung der Apparate, Bleisicherungen, Ausschalter und Widerstände, Normale Spannung an den Glühlampen, Isolierung der Lampenfassungen, Schutzvorrichtung an den Bogenlampen, Bezeichnung der Leitungen, Anbringung von Schutzvorrichtungen, Durchführung durch Wände u. s. w., Isolierung der Leitungen und Überkreuzungsstellen, Anwendung von Isolatoren, Isolierung der Beleuchtungskörper und den Isolationswiderstand der Anlage.
- d) Veränderungen, Ergänzungen und Ausdehnungen solcher Anlagen sind ausnahmslos in voller Übereinstimmung mit den Vorschriften auszuführen.

#### IV. Überwachung und Prüfung der Installationsarbeiten und Inbetriebsetzung.

##### § 45.

Dem Elektrizitätswerke steht das Recht zu, eine Überwachung der Installationsarbeiten auszuüben und sich zu überzeugen, ob die Arbeiten den Vorschriften entsprechend ausgeführt werden. Alle durch das Elektrizitätswerk oder dessen Bevollmächtigten hierbei als notwendig anerkannten Abänderungen hat der Unternehmer bezw. dessen verantwortlicher Angestellter unverzüglich auszuführen. Im Weigerungsfalle hat das Elektrizitätswerk das Recht, den Anschluß an das Netz zu verweigern bezw. die Leitung abzutrennen.

##### § 46.

Zur Anzeige der Fertigstellung einer Anlage oder von Veränderungen, Ergänzungen und Ausdehnungen einer Anlage bedient sich

der Unternehmer eines vom Elektrizitätswerke unentgeltlich zu beziehenden Formulares, worin er versichert, alle Lieferungen und Arbeiten nach Vorschrift ausgeführt und sich durch vorgenommene Messungen von der tadellosen Beschaffenheit der gesamten Anlage überzeugt zu haben. Die Fertigstellungsanzeige muß mindestens zwei Tage vor der beabsichtigten Abnahmeprüfung beim städtischen Elektrizitätswerke erstattet sein.

Der Anzeige ist eine genau nach § 7 anzufertigende Revisionszeichnung auf Pausleinwand im Maßstab 1:100 oder 1:50 für den Gebrauch des Elektrizitätswerkes kostenlos beizugeben, auf welcher sämtliche bei der Ausführung gegen das genehmigte Projekt stattgefundene Änderungen eingetragen sein müssen.

#### § 47.

Die Abnahmeprüfung einer als fertig angezeigten Anlage erfolgt an einem vom Elektrizitätswerke festzusetzenden Zeitpunkte und erstreckt sich auf die Besichtigung der ganzen Anlage sowie auf Messung des Spannungsverlustes, der Isolationswiderstände und, nach dem Ermessen des Elektrizitätswerkes, auch der Leitungswiderstände der Bogenlampenstromkreise u. s. w.

Bei der Untersuchung muß der Unternehmer oder dessen bevollmächtigter Vertreter zugegen sein, um jeden verlangten Aufschluß zu erteilen und etwaige Fehler auf Verlangen sofort zu beseitigen. Zur Prüfung der Betriebsfähigkeit einer Anlage kann ein Einschalten sämtlicher Lampen und Apparate bis zu drei Stunden verlangt werden.

#### § 48.

Der Isolationswiderstand<sup>1)</sup> der Gesamtanlage gegen Erde muß bei einer effektiven Spannung zwischen irgend zwei Leitern oder einer Leitung und Erde bei 220 Volt bzw. 440 Volt Meßspannung mindestens

$$\frac{1\ 000\ 000}{n} \text{ Ohm;}$$

für jede Abzweigung mindestens

$$10\ 000 + \frac{1\ 000\ 000}{n} \text{ Ohm;}$$

---

<sup>1)</sup> Nach den mit dem 1. Januar 1903 in Kraft getretenen neuen Verbandsvorschriften muß der Isolationszustand einer Anlage derart sein, daß der Stromverlust auf jeder Teilstrecke zwischen zwei Sicherungen oder hinter der letzten Sicherung bei der Betriebsspannung ein Milliampère nicht überschreitet. Der Isolationswert einer derartigen Anlage muß hiernach wenigstens betragen: 1000 Ohm multipliziert mit der Voltzahl der Betriebsspannung.

bezw. mindestens

$$\frac{3\,000\,000}{n} \text{ Ohm};$$

für jede Abzweigung mindestens

$$10\,000 + \frac{3\,000\,000}{n} \text{ Ohm}$$

betragen.

Unter  $n$  ist die Zahl der an die zu messende Anlage oder Leitung angeschlossenen Glühlampen zu verstehen, vermehrt um je zehn Glühlampen für jede Bogenlampe, jeden Elektromotor und jeden anderen stromverbrauchenden Apparat.

Glühlampen, Bogenlampen, Motoren und andere Strom verbrauchende Apparate müssen von ihren Leitungen abgetrennt, dagegen alle vorhandenen Beleuchtungskörper angeschlossen, alle Sicherungen eingesetzt und alle Schalter geschlossen sein.

In feuchten Räumen, z. B. Brauereien, Färbereien u. s. w., in denen sich der in Absatz 1 dieses Paragraphen verlangte Isolationswiderstand nicht erreichen läßt, müssen die Leitungen mit feuer- und feuchtigkeitsbeständigem Material derart verlegt werden, daß infolge von Stromableitung eine Feuersgefahr dauernd ausgeschlossen ist.

#### § 49.

Die Inbetriebsetzung der Anlage bezw. der Anschluß von Veränderungen, Ergänzungen oder Ausdehnungen einer Anlage erfolgt ausschließlich durch das Elektrizitätswerk, sobald die vorgenommene Besichtigung und Untersuchung die Anlage als völlig vorschriftsmäßig befunden hat.

#### § 50.

Für die Überwachung, Prüfung und Abnahme der Installationen bezieht das Elektrizitätswerk die in den Lieferungsbedingungen festgesetzten Gebühren.

Die Einzahlung der Gebühren hat vor Anschluß der Anlage an das Elektrizitätswerk seitens der Konsumenten zu geschehen.

## Übersichtstabelle betr. Leitungsverlegung.

| Bezeichnung der Leitungen                 | Unter dem Fußboden oder unter Putz                                                                                                                                                                                      | Außenräume                               | Trockene Räume                                                                                                                               | Feuchte Räume                            | Räume von Gasen oder Dämpfen erfüllt     |
|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|
| Blanker Draht                             | —                                                                                                                                                                                                                       | Porzellanglecken                         | Porzellanglecken;<br>Rollen auf Eisenkonstruktion                                                                                            | Porzellanglecken                         | —                                        |
| Gummiaderdraht<br>oder<br>Okonitaderdraht | In Eisenrohr mit Isolierfutter. In Papierrohr mit Metallüberzug. Überall mit Luftzutritt.<br>In Eisen geschützte Röhren, jedoch nur als Zwillingen- (ausnahmsweise) als Hin- und Rückleitung durch ein gemeinsames Rohr | Porzellanglecken<br>oder Rollen          | Porzellanglecken oder Rollen, Isolierrohr, Luftzu- u. -austritt                                                                              | Porzellanglecken<br>oder Rollen          | Porzellanglecken                         |
| Flammensicherer Draht                     | In vollkommen dichtem Hartgummi- oder Papierrohr; letzteres mit Metallüberzug (Eisen ausgeschlossen). Jeder Draht im eigenen Rohr. Luftzu- u. -austritt                                                                 | Porzellanglecken                         | Porzellanglecken oder Rollen. Im Isolierrohr, bei metallarmierten (Eisen ausgeschlossen) jeder Draht im eigenen Rohre, Luftzu- und -austritt | —                                        | —                                        |
| Litze                                     | —                                                                                                                                                                                                                       | —                                        | Porzellanrollen                                                                                                                              | —                                        | —                                        |
| Blankes Bleikabel                         | —                                                                                                                                                                                                                       | Weiche Unterlage, Metallklemmen verzinkt | Metallklemmen, weiche Unterlage                                                                                                              | Metallklemmen verzinkt, weiche Unterlage | Metallklemmen verzinkt, weiche Unterlage |
| Eisenbandarmierte Bleikabel               | Ohne weiteres verlegbar                                                                                                                                                                                                 | Metallklemmen verzinkt                   | Metallklemmen                                                                                                                                | Metallklemmen verzinkt                   | Metallklemmen verzinkt                   |
| Asphaltiertes Bleikabel                   | Desgl.                                                                                                                                                                                                                  | Desgl.                                   | Desgl.                                                                                                                                       | Desgl.                                   | Desgl.                                   |

## Normalien

für einfache Gleichstromkabel mit und ohne Prüfdraht bis 700 Volt nach den gemeinsamen Beschlüssen des Verbandes Deutscher Elektrotechniker und der Vereinigung der Elektrizitätswerke.

Toleranz 5 Proz. für sämtliche Dimensionen mit Ausnahme der Länge, der Isolationsstärke und des im Leitungswiderstande oder der Leitungsfähigkeit ausgedrückten Querschnittes.

| Effektiver Kupferquerschnitt | Zahl der Drähte |     | Durchmesser eines jeden Drahtes bei Kabel mit Prüfdraht | Prüfdraht | Isolierhülle |                               | Bleimantel |           | Bespinnung des Bleimantels |       | Blechstärke der Armierung | Dicke der Bewickelung des armierten Kabels | Äußerer Durchmesser des fertigen Kabels |     | Maximalprüfungsspannung |           |
|------------------------------|-----------------|-----|---------------------------------------------------------|-----------|--------------|-------------------------------|------------|-----------|----------------------------|-------|---------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------|-----|-------------------------|-----------|
|                              | ohne            | mit |                                                         |           | Dicke        | Minimaldicke Toleranz 0,25 mm | ein-facher | doppelter | Konstruktion               | Dicke |                           |                                            | ohne                                    | mit |                         | Prüfdraht | mm | mm |
| qmm                          | Minimalzahl     |     | mm                                                      | qmm       | Konstruktion |                               | mm         | mm        | mm                         | mm    | mm                        | etwa mm                                    | mm                                      | mm  |                         |           |
| 16                           | 7               | 3   | 2,60                                                    | 1         | Konstruktion | 2,0                           | 1,5        | 2 · 0,9   | 2,0                        | 2,0   | 2 · 0,5                   | 2,0                                        | 23                                      | 24  | 1200 Volt Wechselstrom  |           |
| 25                           | 7               | 6   | 2,30                                                    |           |              | 2,0                           | 1,5        | 2 · 0,9   | 2,0                        | 2,0   | 2 · 0,5                   | 2,0                                        | 2,0                                     | 24  |                         | 25        |
| 35                           | 7               | 6   | 2,73                                                    |           |              | 2,0                           | 1,6        | 2 · 0,9   | 2,0                        | 2,0   | 2 · 0,8                   | 2,0                                        | 2,0                                     | 25  |                         | 26        |
| 50                           | 19              | 6   | 3,26                                                    |           |              | 2,0                           | 1,6        | 2 · 1,0   | 2,0                        | 2,0   | 2 · 0,8                   | 2,0                                        | 2,0                                     | 29  |                         | 30        |
| 70                           | 19              | 13  | 2,60                                                    |           |              | 2,0                           | 1,7        | 2 · 1,0   | 2,0                        | 2,0   | 2 · 0,8                   | 2,0                                        | 2,0                                     | 31  |                         | 32        |
| 95                           | 19              | 13  | 3,10                                                    |           |              | 2,0                           | 1,7        | 2 · 1,0   | 2,0                        | 2,0   | 2 · 0,8                   | 2,0                                        | 2,0                                     | 32  |                         | 33        |
| 120                          | 19              | 13  | 3,42                                                    |           |              | 2,0                           | 1,8        | 2 · 1,1   | 2,0                        | 2,0   | 2 · 1,0                   | 2,0                                        | 2,0                                     | 35  |                         | 36        |
| 150                          | 19              | 18  | 3,26                                                    |           |              | 2,0                           | 1,9        | 2 · 1,1   | 2,0                        | 2,0   | 2 · 1,0                   | 2,0                                        | 2,0                                     | 37  |                         | 38        |
| 185                          | 37              | 26  | 3,00                                                    |           |              | 2,0                           | 2,0        | 2 · 1,1   | 2,0                        | 2,0   | 2 · 1,0                   | 2,0                                        | 2,0                                     | 40  |                         | 41        |
| 240                          | 37              | 29  | 3,25                                                    |           |              | 2,0                           | 2,1        | 2 · 1,2   | 2,0                        | 2,0   | 2 · 1,0                   | 2,0                                        | 2,0                                     | 43  |                         | 44        |
| 310                          | 37              | 37  | 3,31                                                    |           |              | 2,0                           | 2,2        | 2 · 1,2   | 2,0                        | 2,0   | 2 · 1,0                   | 2,0                                        | 2,0                                     | 46  |                         | 47        |
| 400                          | 37              | 37  | 3,76                                                    |           |              | 2,0                           | 2,3        | 2 · 1,2   | 2,0                        | 2,0   | 2 · 1,0                   | 2,0                                        | 2,0                                     | 49  |                         | 50        |
| 500                          | 37              | 36  | 4,20                                                    |           |              | 2,0                           | 2,4        | 2 · 1,3   | 2,0                        | 2,0   | 2 · 1,0                   | 2,0                                        | 2,0                                     | 54  |                         | 55        |
| 625                          | 37              | 37  | 4,70                                                    |           |              | 2,0                           | 2,6        | 2 · 1,3   | 2,0                        | 2,0   | 2 · 1,0                   | 2,0                                        | 2,0                                     | 58  |                         | 59        |
| 800                          | 37              | 37  | 5,32                                                    |           |              | 2,0                           | 2,8        | 2 · 1,4   | 2,0                        | 2,0   | 2 · 1,0                   | 2,0                                        | 2,0                                     | 63  |                         | 64        |
| 1000                         | 37              | 37  | 5,95                                                    |           |              | 2,0                           | 3,0        | 2 · 1,5   | 2,0                        | 2,0   | 2 · 1,0                   | 2,0                                        | 2,0                                     | 67  |                         | 68        |

## Vertragsbedingungen,

betreffend die Lieferung von Gleichstromkabeln bis 700 Volt nach den gemeinsamen Beschlüssen der deutschen Kabelfabriken und der Vereinigung der Elektrizitätswerke vom 28. August und 18. September 1900.

### 1. Haftung.

Falls eine Kautions verlangt wird, so soll dieselbe 10 Proz. des Wertes des Kabels betragen. Auf Wunsch des Lieferanten kann dieselbe in mündelsicheren Papieren oder in Sichtwechslern, welche von einem ersten Bankhause acceptiert sind, hinterlegt werden. Die Zinsen der Kautions genießt der Lieferant. Bei Erlag der Kautions wird kein Zins bezahlt.

Nach Ablauf der festgesetzten Garantiezeit und vollkommen verträglichem Befund der Lieferung auf Grund einer vorzunehmenden Enduntersuchung wird die Kautions wieder freigegeben.

### 2. Beschaffenheit der Kabel.

Die Kabel müssen hinsichtlich der Konstruktion den von der Vereinigung der Elektrizitätswerke und den Kabelfabriken in den Sitzungen vom 28. August bzw. 18. September vereinbarten und dem Verträge beigehefteten Normalien entsprechen.

Es wird ferner bestimmt:

Der Leitungswiderstand des zur Herstellung der Seele verwendeten Kupfers darf 17,45 Ohm per Kilometer und 1 qmm Querschnitt bei 15° C. nicht übersteigen. Der Isolationswiderstand soll bei Abnahme im Werke mindestens 500, nach der Verlegung einschließlich der Hausanschlußkabel, welche jedoch frei endigen müssen, mindestens 15 Megohm bei 15° C. pro Kilometer betragen.

### 3. Garantie.

Die Garantie beginnt vom Tage der Lieferung des Kabels ab Werk und dauert zwei Jahre.

Der Fabrikant garantiert für zweckmäßige Konstruktion, bestes Material und tadellose Arbeit in der Weise, daß er sich verpflichtet, alle diejenigen Mängel an den von ihm gelieferten und verlegten Kabeln auf eigene Kosten so rasch als möglich zu beseitigen, welche nachgewiesenermaßen an denselben während der Garantiezeit infolge von Konstruktions-, Material- und Arbeitsfehlern entstehen. Jeder auftretende Defekt, welchen abzuwenden nicht in der Macht des Kabelfabrikanten lag, fällt nicht unter die Garantie desselben. Weiteren Schadenersatz ist der Kabelfabrikant nicht verpflichtet zu leisten; dagegen steht es dem Besteller frei, falls der betreffende Kabelfabrikant nicht innerhalb einer angemessenen Frist die Beseitigung der auftretenden Defekte nach vorheriger Aufforderung in die Wege leitet,

dieselben selbst oder durch einen Dritten auf Kosten des Kabelfabrikanten vornehmen zu lassen. Führt das Elektrizitätswerk die Kabelverlegung selbst aus und verlangt trotzdem die vorstehend angeführten Garantien, so hat der Kabelfabrikant die Aufsicht gegen Zubilligung einer entsprechenden Vergütung für das Aufsichtspersonal auf Verlangen zu übernehmen, und es muß dann den Anforderungen dieses Aufsichtspersonals, soweit es sich um Ausführung der Verlegungs- und Montagearbeiten handelt, in jedem Falle unbedingt entsprechen werden. Insbesondere dürfen Kabel in gefrorenem Zustande nicht verlegt werden, und bei Frostwetter soll die Verlegung der Kabel möglichst vermieden werden. Auch ist es nicht gestattet, Kabel mechanischen Beanspruchungen mehr auszusetzen, als durch die Verlegungsarbeiten bedingt ist. Bei Ersatz einer schadhafte Kabelstrecke durch eine neue findet keine Verlängerung der Garantie für das übrige Kabelnetz statt.

#### 4. Berechnung der Lieferung.

Die Vereinbarungen in Bezug auf die Berechnung der Lieferung sind dahin zu treffen, daß entweder die gelieferte, d. h. fakturierte, Länge berechnet wird, oder daß die Kabellänge aus der Grabenlänge ermittelt wird. Hierbei wird für Krümmungen und Verschnitt ein Aufschlag von 4 Proz. berechnet. Verschnitt, der durch Abänderung der ursprünglichen Kabeltrace oder durch Unbestimmtheit der Ortsangaben für Kabelkästen, Transformatoren, Schalttafeln und dergl. entsteht, wird nicht als Verschnitt, sondern als Lieferung berechnet.



# NAMEN- UND SACHREGISTER.

## A.

- Admissionsdruck, Verhältnis zum Kessel-  
druck, Formel von Hrabák 22.
- Akkumulatoren.  
—, Kapazität 176, 178.  
—, Nutzeffekt der Ladung 177.  
—, Prüfung 176.  
—, Säuredichte 178.  
—, Wirkungsgrad 176, 177, 178, 180.
- Akkumulatorenbatterien.  
—, Prüfungen 178—181.
- Allgemeine Elektrizitätsgesellschaft, os-  
zillierender Gleichstromzähler 198.
- Ampèrestundenzähler (s. auch Elektri-  
zitätszähler).  
— von Aron 197.  
— — O'Keenan 197.  
— — Raps 196.  
— — Schuckert 197.
- Anlassen eines asynchronen Einphasen-  
motors 119.
- Anzugsdrehmoment 133.
- Appoldt, Bremsdynamometer 37.
- Aron, Ampèrestundenzähler 197.  
—, Wattstundenzähler 197.
- Aspirator 7.
- Asynchrone Drehstrommotoren 119, 123.  
—, Wechselstrommotoren 119, 120.
- Atmosphäre, metrische 4.
- Ausgiebigkeit des Ein- und Mehrphasen-  
systems, Vergleich 118.

## B.

- Balk, Bremsdynamometer 37.
- Batchelder, Dynamometer 40.
- Beanspruchung, magnetische, des Ein-  
und Mehrphasensystems, Vergleich  
119.
- Belastungscharakteristik 126, 139, 144,  
145.

- Betriebskraft, Wahl derselben 70.
- Blechstärke der Transformatoren 157.
- Brauer, Bremsdynamometer 37.
- Bremsdynamometer.  
—, Allgemeines, Beispiel 34, 35, 149.  
— von Appoldt 37.  
— — Balk 37.  
— — Brauer 37.  
— — Hartig 36.  
— — Imray 37.  
— — Navier 36.  
— — Poncelet 36.  
—, Pronyscher Zaum 35.  
— von Wettler 36.
- Bremsen von Dampfmaschinen, Gas-  
motoren und Elektromotoren 15, 34,  
48, 49, 54, 149, 213.  
—, Berechnung der eff. Leistung 35  
52, 55, 61, 149.
- Bremsmethode, indirekte, zur Prüfung  
eines Elektromotors 91.
- Brown, Flüssigkeitskondensator 119.
- Bunte, Gasbürette 7.

## C.

(Siehe auch unter K.)

- Cardew, Voltmeter 76, 77.
- Charakteristik.  
—, äußere 128, 129.  
—, Belastungs- 126, 139, 145.  
—, Kurzschluß 125, 144.
- Compoundierungskurve 115.
- Compoundmaschinen, Hauptformeln 94,  
95.

## D.

- Dampf, Gesamtwärme 9, 11, 14, 20, 21, 47.  
—, überhitzter 10.
- Dampfdruck 4.
- Dampf Feuchtigkeit 9, 210.

Dampfeuchtigkeit, Bestimmung 9.  
 Dampfkessel.  
 —, Allgemeines 3.  
 —, Heizfläche 3.  
 —, Leistung 3.  
 —, Luftmenge, erforderliche 3, 6, 7, 13.  
 —, Nutzeffekt (siehe Wirkungsgrad).  
 —, Prüfungen 3, 10, 11, 14, 208, 209, 217, 225, 227, 229, 233, 237.  
 —, Verdampfungsziffer 3, 11, 14, 48, 50, 210, 211, 222, 225, 227, 228.  
 —, Versuchsbedingungen, allgemeine 3.  
 —, Wärmeverteilung 11, 14.  
 Dampfmaschine.  
 —, Allgemeines 15.  
 —, Dampfverbrauch.  
 —, —, Berechnung 21, 46.  
 —, —, effektiver 17, 18, 20, 22, 44.  
 —, —, indizierter 17, 18, 19, 46, 213, 216, 219.  
 —, Dampf- (und Wärme-) Verlust 17, 18, 20, 30, 46.  
 —, Dampfverteilung 28.  
 —, Füllungsverhältnis 17, 22.  
 —, Güte 28.  
 —, Kolbenfläche, wirksame 16.  
 —, Leergang 34, 103.  
 —, Leistung.  
 —, —, effektive 15, 23, 213, 216, 221.  
 —, —, indizierte 15, 16, 45, 212, 213, 215, 219.  
 —, Nutzdruck 22, 23.  
 —, Nutzleistung, Berechnung 22, 34, 213.  
 —, Prüfungen 43, 47, 49, 101, 211, 212, 215, 229, 232, 236.  
 —, Schädlicher Raum 16.  
 —, Spannung, mittlere, zur Überwindung der Reibungswiderstände 15.  
 —, Ungleichförmigkeitsgrad 214, 222, 224.  
 —, Wirkungsgrad 15, 22, 23, 34, 213, 216, 219, 224.  
 Dampfspannung 3, 4, 10, 45, 210.  
 —, Bestimmung 10.  
 Dampfverteilung, Fehler 28, 29.  
 Deprez - d'Arsonval, Präzisionsapparate 78.  
 Dettmarsche Formel 122.  
 Differentialrolle für Indikatoren 33.  
 Differentialwattmetermethode von Kennelly 159, 171.  
 Doppelbrücke von Thomson 183.  
 Dowsongas (siehe Generatorgas) 62.

Drehstromgeneratoren.  
 —, Belastungscharakteristik 139, 144.  
 —, Erregerstrom 123.  
 —, Erwärmung 123, 135.  
 —, Feldcharakteristik 141.  
 —, Impedanz 140.  
 —, Klemmenspannung 126, 128, 129.  
 —, Kurzschlußcharakteristik 125, 144.  
 —, Leerlaufcharakteristik 125, 139, 144.  
 —, Leistungsfaktor 121, 129.  
 —, Magnetisierungskurve 126.  
 —, Phasenverschiebung 126, 129.  
 —, Prüfungen 125, 135, 144.  
 —, Spannungsabfall 125, 126, 129.  
 —, Verluste 122, 123, 135, 136.  
 —, Wirkungsgrad 123, 129, 130, 135.  
 Drehstrommotoren.  
 —, Anzugsdrehmoment 133.  
 —, Drehmoment 133.  
 —, Erwärmung 134, 149.  
 —, Leerlauf 120, 132, 146.  
 —, Leistung 120, 125, 133, 149.  
 —, Leistungsfaktor 125, 133, 148, 150, 152.  
 —, Magnetisierungskurve 132.  
 —, Phasenverschiebung 133, 151.  
 —, Prüfungen 132, 146, 150, 151.  
 —, Schlüpfung 86, 120, 125, 133, 149.  
 —, Selbstinduktion, Bestimmung nach Kapp 124.  
 —, Streuung 123.  
 —, Streuungsfaktor 124.  
 —, Streuungsinduktion 123.  
 —, Verluste 132, 147, 148.  
 —, Wirkungsgrad 125, 133, 134, 148, 151, 152.  
 Drehstromsystem, Allgemeines 118, 120.  
 —, Energieleistung 121.  
 Dreieckschaltung 83, 118, 120, 123.  
 Dreiphasenstrom (siehe auch Drehstromsystem) 118, 122.  
 Dürr-Siegertsche Zugmesser 6.  
 Dynamometer (Einschaltdynamometer).  
 —, Allgemeines 39.  
 — von Batchelder 40.  
 — — Hachette 39.  
 — — Hartig 41.  
 — — Hefner v. Alteneck 41.  
 — — White 40.

## E.

Effektive Maschinenleistung, Berechnung aus der Bremsung 35, 52, 55, 61.

Eichung einer Indikatorfeder 25, 27.  
 Einphasengeneratoren.  
 —, Erwärmung 123.  
 —, Klemmenspannung 128, 129.  
 —, Kurzschlußcharakteristik 125.  
 —, Leerlaufcharakteristik 125.  
 —, Leistungsfaktor 129.  
 —, Magnetisierungskurve 126.  
 —, Phasenverschiebung 126, 129.  
 —, Prüfungen 125, 229, 230, 235.  
 —, Spannungsabfall 125, 126, 129.  
 —, Starres System von Schuckert 229.  
 —, Wirkungsgrad 99, 129, 130.  
 Einphasen- und Mehrphasenmaschinen.  
 —, Vergleich 118.  
 Einphasenmotoren, asynchrone.  
 —, Anlassen derselben 119.  
 —, Anzugsdrehmoment 133.  
 —, Drehmoment 133.  
 —, Erwärmung 134.  
 —, Leerlauf 132.  
 —, Leistung 133.  
 —, Leistungsfaktor 133, 145.  
 —, Magnetisierungskurve 132.  
 —, Phasenverschiebung 133, 145.  
 —, Prüfungen 99, 132, 145.  
 —, Schlüpfung 86, 133.  
 —, Verluste 132.  
 —, Wirkungsgrad 133, 134, 145.  
 Einphasenmotoren, synchrone 119.  
 Einphasenstrom 118.  
 Einschaltdynamometer (siehe Dynamometer).  
 Eisenverluste 91, 97, 116, 122, 131, 136, 148, 156, 160.  
 Elektrische Maschinen (siehe auch unter Gleichstrom, Einphasen- und Drehstrommaschinen, Generatoren und Motoren).  
 — Messung 75, 229, 230, 235.  
 — Widerstandsmessung auf indirektem Wege 76, 106, 108.  
 — Wirkungsgrad 75.  
 Elektrizitätszähler (siehe auch Ampèrestunden-, Wattstunden-, Motor-, Wechselstromzähler).  
 —, Allgemeines 196.  
 —, Güte derselben 199.  
 —, Prüfungen 199, 201, 202, 206.  
 —, Verluste 199.  
 Elektrodynamometer, Allgemeines 76, 78.  
 —, Messung von Wechselströmen 79, 81.

Elektrodynamometer, Schaltung 78, 81.  
 — als Wattmeter 79, 81.  
 Elektrometer 76, 78.  
 Empfindlichkeit eines Präzisionsapparates 78.  
 Energieleistung des Drehstromsystems 121.  
 Erregerstrom 123, 126, 129, 131.  
 Erwärmung.  
 — der Ein- und Mehrphasenmaschinen, Vergleich 120.  
 — von Gleichstrommaschinen 92, 108, 114.  
 — Wechselstrommaschinen 123, 134, 135, 149.

## F.

Fehlerortsbestimmungen 193, 195.  
 Feldcharakteristik eines Mehrphasengenerators 141.  
 Ferraris, Wechselstromzähler 198.  
 Fischer, Zugmesser 6.  
 Flüssigkeitskondensator von Brown 119.  
 Freileitungen, Isolationswerte 185.

## G.

Gasbürette 7.  
 Gase.  
 —, Heizwertbestimmung 52, 55, 59.  
 —, Temperatur 6, 210.  
 Gasmotoren.  
 —, Allgemeines 50.  
 —, Gasverbrauch 54, 58, 59.  
 —, Kühlwasser 53, 55, 59, 68.  
 —, Leerlauf 56, 57.  
 —, Leistung, effektiv 52, 55, 57, 58, 61, 69.  
 —, —, indiziert 52, 55, 58, 69.  
 —, Prüfungen 53, 56, 57, 61, 64.  
 —, Viertaktmaschinen 51.  
 —, Wärmebilanz 60.  
 —, Wirkungsgrad 51, 52, 56, 59, 68.  
 Gasverbrauch von Gasmotoren 54, 58, 59.  
 Gay-Lussac-Mariottesches Gesetz 51.  
 Generator für Kraftgasanlagen 63, 64.  
 Generatorgas 62.  
 Generatorgasanlage.  
 —, Allgemeines 62.  
 —, Brennmaterialverbrauch 65, 68.  
 —, Prüfungen 63, 64.  
 —, Reglerglocke 63, 64.  
 —, Sägespäneereiniger 63, 64.

- Generatorgasanlage, Skrubber, 63, 64.  
 —, Speisewasservorwärmer 63, 64.  
 —, Widerhitzer 63, 64.  
 Gesamtwärme des Dampfes 9, 11, 14,  
 20, 21, 47, 210.  
 Gleichförmigkeitsgrad der Antriebs-  
 maschinen 70.  
 Gleichstromkabel, einfache.  
 —, Normalien 267.  
 —, Vertragsbedingungen betreffend  
 Lieferung 268.  
 Gleichstrommaschinen.  
 —, Allgemeines 90.  
 —, Compoundierungskurve 115.  
 —, Erwärmung 92, 108, 114.  
 —, Hauptformeln 93, 94.  
 —, Leerlauf 91, 96, 97, 103.  
 —, Prüfungen 95, 96, 97, 100, 101,  
 105, 114.  
 —, Sättigungskurve 114.  
 —, Verluste 91, 97, 98, 103, 106, 110,  
 112, 116, 123, 161.  
 —, Verlustbestimmung nach Kapp 161.  
 —, Wirkungsgrad 39, 90, 91, 96, 98,  
 100, 104, 106, 110, 112, 116, 161.  
 —, Wirkungsgrad, kommerzieller 103,  
 105.  
 —, —, Methode zur Bestimmung 91,  
 98, 103, 161.  
 Gleichstromzähler (siehe auch Elektri-  
 zitätszähler).  
 —, oszillierender von der Allgemeinen  
 Elektrizitätsgesellschaft 198.  
 Gran, Wirbelstrombremse 38.  
 Güte einer Dampfmaschine 28.  
 — eines Elektrizitätszählers 199.  
 Güteverhältnis (siehe Wirkungsgrad).  
 —, elektrisches 75, 90, 91, 97, 98, 105.  
 —, mechanisches 90, 91, 97.  
 Guttapercha, Veränderung des Isolations-  
 widerstandes mit der Temperatur  
 189, 190.

## H.

- Hachette, Dynamometer 39.  
 Hartig, Bremsdynamometer 36.  
 —, Dynamometer 41.  
 Hauptformeln der Gleichstrommaschi-  
 nen 94.  
 Hauptstrommaschine, Hauptformel 94.  
 Hausinstallation 239.  
 —, Installationsvorschriften 244 u. f.  
 —, Isolationswerte 239.  
 Lehmann-Richter, Prüfungen u. s. w.

- Hausinstallation, Isolationsmessung 241,  
 242.  
 —, Prüfungen 239, 263.  
 —, Spannungsabfall 239, 243.  
 Hefner v. Alteneck, Dynamometer  
 41.  
 Heizfläche 3.  
 Heizgasuntersuchung 7, 210.  
 Heizwert 3, 5, 13, 209, 210.  
 — des Generatorgases 63.  
 Heizwertbestimmung 5.  
 — von Gasen 52, 55, 59.  
 Herdrückstände 3, 5, 8, 13, 210.  
 Hilfsphase 119.  
 Hrabák, Verhältnis des Admissions-  
 druckes zum Kesseldruck 22.  
 Hysteresisverlust in Transformatoren  
 157, 168, 170.

## I.

- Jahresnutzeffekt 154, 174.  
 Impedanz 132, 140.  
 Imray, Bremsdynamometer 37.  
 Inbetriebsetzung von Hausinstallationen  
 263.  
 Indikatordiagramme, Berechnung des  
 Dampfverbrauchs 17.  
 —, Folgerungen 28.  
 Indikatoren, Schrötersche Einrichtung  
 33.  
 —, Differentialrolle 33.  
 Indikatorfeder, Eichung 25, 27.  
 Indikatorversuche 16, 44, 50.  
 Indizieren 30, 44.  
 Indizierter Druck, Berechnung aus dem  
 Indikatordiagramm 22, 23, 45, 50.  
 Indizierte Leistung von Dampfmaschinen  
 15, 16, 22, 45, 212, 213, 219, 220, 224.  
 Installationsvorschriften für Hausin-  
 stallationen angeschlossen an Gleich-  
 stromzentralen 244 u. f.  
 —, Allgemeines 244.  
 —, Aufstellung und Ausführung der  
 Projekte.  
 — — —, Allgemeines 249.  
 — — —, Schaltvorrichtungen 253.  
 — — —, Stromverbrauchsgegenstände  
 256.  
 — — —, Übergangsbestimmungen  
 262.  
 — — —, Vorschriften, spezielle 259.  
 —, Inbetriebsetzung 263.  
 —, Überwachung und Prüfung der  
 Installationsarbeiten 263.

## Isolationsmessungen.

- an Hausinstallationen 241.
- — Dynamomaschinen 93, 184.
- — Leitungsnetzen und Kabel 184, 185, 188, 190.

## Isolationswerte.

- von Freileitungen 185.
- — Hausinstallationen 239.
- — Kabeln 185.

## Isolationswert von Guttapercha, Veränderung mit der Temperatur 189, 190.

## Isolationswiderstand, vorgeschriebener, der Leitungsnetze 184.

**K.**

(Siehe auch unter C.)

## Kabel, Kabelnetze (siehe auch unter Gleichstromkabel).

- , Fehlerortsbestimmung 193, 195.
- , Isolationswerte 185.
- , Kapazitätsmessung 191, 192.
- , Messung von Isolationswiderständen 185, 188, 190.

## Kalorimeter 5, 7, 52, 59.

## Kapazität von Akkumulatoren 176, 178.

## Kapazitätsbestimmung von Kabeln 191, 192.

## Kapp, Bestimmung der Selbstinduktion 124.

- , — — Spannungsverluste in Gleichstrommaschinen und Transformatoren 161, 163, 170.

## Kenelly, Differentialwattmetermethode 159, 171.

## Kessel (siehe Dampfkessel).

## Kesseldruck, Verhältnis zum Admissionsdruck, Formel von Hrabák 22.

## Kesselmauerung, Nachweis von Undichtigkeiten 8, 13.

## Kesselprüfungen (siehe Dampfkessel).

## Kleinspannung 126, 128, 129.

## Kohle, Durchschnittsprobe 4.

- , Heizwert 3, 5, 13, 209, 210.
- , Heizwertbestimmung 5.
- , Verbrauch 3, 4, 49, 209.
- , Zusammensetzung 3, 5, 12.

## Kraftgas (siehe Generatorgas).

- , Vergleich mit Leuchtgas 61.

## Kraftgasanlagen (siehe Generatorgasanlagen).

## Kraftliniendichte der Transformatoren 166, 170.

## Krausese Formel 21.

## Kunstphase 119.

## Kupfernormalien 182.

## Kupferverlust 160, 173, 176.

## Kuppelung, direkte 70.

## Kurzschlußcharakteristik 125, 144.

**L.**

## Lagerreibungsarbeit 122.

## Leerlauf.

- von Dampfmaschinen 34, 103.
- des Ein- und Mehrphasensystems, Vergleich 120.
- von elektrischen Maschinen 91, 96, 97, 103, 110, 116, 120.
- — Gasmotoren 56, 57.
- — Transformatoren 154, 160, 167, 170, 176.

## Leerlaufcharakteristik 125, 139, 144.

## Leistung.

- einer Dampfmaschine eff. 15, 23, 213, 216, 221.
- — — ind. 15, 22, 212, 213, 215, 220, 224.
- eines Drehstrommotors 120, 125, 133, 149.
- des Ein- und Mehrphasensystems, Vergleich 120.
- eines Einphasenmotors, asynchron 133.
- — — Gasmotors, eff. 52, 55, 57, 58, 61, 69.
- — —, ind. 52, 55, 58, 69.
- einer Kesselanlage 3.

## Leistungsfaktor 121, 125, 129, 133, 145, 148, 150, 152.

## Leitungsmaterial.

- , Kupfernormalien 182.
- , Leitungsfähigkeit 182.
- , Verwendungsart verschiedener Sorten 266.
- , Widerstandsmessung 182.

## Leitungsnetze.

- , Allgemeines 181.
- , Fehlerortsbestimmung 193, 195.
- , vorgeschriebener Isolationswiderstand 184.
- , Isolationsmessung 184.
- , Messungen 181.

## Luftmenge, erforderliche, für eine Dampfkesselanlage 3, 6, 7, 13.

**M.**

## Magnetisierungskurve 126, 132.

## Mehrphasengenerator (siehe Drehstrom- und Zweiphasengenerator).

Mehrphasenmaschinen 118.  
 Mehrphasenmotor (siehe Drehstrom-  
 motor).  
 Mehrphasenströme, Effektmessung 83.  
 Milli-, Volt- und Ampèremeter 78.  
 Mix, Apparat zur Messung des Un-  
 gleichförmigkeitsgrades der An-  
 triebsmaschinen 73.  
 Motorzähler 197.

**N.**

Navier, Bremsdynamometer 36.  
 Nebenschlußmaschine, Hauptformel 94.  
 Normalien für einfache Gleichstrom-  
 kabel 267.  
 — — Kupfer 182.  
 Nutzdruk 22.  
 Nutzeffekt (siehe Wirkungsgrad).  
 Nutzleistung einer Dampfmaschine 22,  
 34, 213.

**O.**

O'Keenan, Ampèrestundenzähler 197.  
 Orsatscher Apparat 7.  
 Oszillierender Gleichstromzähler 198.

**P.**

Periodenzahl 86.  
 Phasenverschiebung 85, 119, 126, 129,  
 133, 145, 151, 154.  
 Poncelet, Bremsdynamometer 36.  
 Projekteinreichung von Hausinstalla-  
 tionen 245.  
 Projekte von Hausinstallationen, Auf-  
 stellung und Ausführung 249.

**Q.**

Quecksilberpyrometer 7.  
 Querschnittsbestimmung von Drähten  
 183.

**R.**

Raab, Wattstundenzähler für Wechsel-  
 strom 198.  
 Raps, Ampèrestundenzähler 196.  
 Reglerglocke 63, 64.  
 Regnaultsche Formel 9, 11, 14, 210.  
 Regulatoren 71.  
 Reibungsarbeit der Dampfmaschinen 15,  
 34.  
 Riemengleitungsarbeit 131.  
 Riemenübertragung 70.

**S.**

Sägespänerereiniger 63, 64.  
 Sättigungskurve 114.  
 Säuredichte von Akkumulatoren 178.  
 Sauggasanlage (siehe auch Generator-  
 gasanlage).  
 —, Allgemeines 63.  
 —, Verdampfer 64.  
 Scattergood, Methode zur Bestim-  
 mung des Spannungsabfalles in  
 Transformatoren 163.  
 Schaltvorrichtungen für Hausinstalla-  
 tionen 253.  
 Schlüpfung 86, 120, 125, 133, 134, 148,  
 149, 151, 152.  
 Schlüpfungszähler, Allgemeines 86.  
 — von Seemann 88.  
 — — Ziehl 86.  
 Schornsteine, Zugstärke 3, 4, 6, 13, 210.  
 Schrötersche Einrichtung bei Indi-  
 katoren 33.  
 Schuckert, Ampèrestundenzähler 197.  
 —, Starres System 229.  
 Seemann, Schlüpfungszähler 88.  
 Seilübertragung 70.  
 Selbstinduktion, Bestimmung nach  
 Kapp 124.  
 Siegert-Dürrescher Zugmesser 6.  
 Siemens und Halske, Universal-  
 widerstandskasten 182, 194.  
 Skrubber 63, 64.  
 Spannungsabfall.  
 — in Hausinstallationen 239, 243.  
 — — Transformatoren 162, 163, 165,  
 170.  
 — bei Wechselstrommaschinen 125,  
 126, 129.  
 Speisewassermenge 3, 8, 13, 45, 50, 210.  
 Starres System von Schuckert 229.  
 Steinmetz, Hysteresisverlust bei Trans-  
 formatoren 157, 168, 170.  
 Sternschaltung 83, 118, 120, 123.  
 Streuung elektrischer Maschinen 123.  
 — der Ein- und Mehrphasenmaschinen,  
 Vergleich 118.  
 Streuungsfaktor 124.  
 Streuungsinduktion 123.  
 Stromverbrauchsgegenstände (Hausin-  
 stallationsvorschriften) 256.  
 Substitutionsmethode 242.

**T.**

Tachographen 72.  
 Temperatur der Feuerungsgase 6, 210.

- Thomson, Doppelbrücke 183.  
 —, Wechselstromzähler 198.  
 Torsionsgalvanometer 75.  
 Transformatoren.  
 —, Allgemeines 153.  
 —, Blechstärke 157.  
 —, Eisenverluste 156, 160.  
 —, Hysteresis 157, 168, 170.  
 —, Jahreswirkungsgrad 154, 174.  
 —, Kraftliniendichte 166, 170.  
 —, Kupferverlust 160, 173, 176.  
 —, Leerlauf 154, 160, 167, 170, 176.  
 —, Phasenverschiebung 154.  
 —, Prüfungen, experimentelle 168, 171, 172.  
 —, —, rechnerische 165, 168.  
 —, Spannungsabfall 162, 163, 165, 170.  
 —, Täglicher Wirkungsgrad 174.  
 —, Verlustbestimmung nach Kapp 161.  
 —, Wattloser Strom 154, 167, 171.  
 —, Wattstrom 154, 167, 170.  
 —, Wirkungsgrad 154, 157, 171, 173, 176.  
 Turbinen 70.

## U.

- Übergangsbestimmungen für Hausinstallationsvorschriften 262.  
 Überhitzter Dampf 10.  
 Übersetzungsverhältnis der Antriebsmaschinen 70.  
 Übertragung der Betriebskraft 70.  
 Undichtigkeiten der Kesselmauerung, Nachweis 8, 13.  
 Ungleichförmigkeitsgrad der Antriebsmaschinen und Gleichmäßigkeiten des Ganges 73, 214, 222, 224.  
 Universalwiderstandskasten von Siemens und Halske 182, 194.  
 Uppenborn, Methode zur Isolationsmessung von Hausinstallationen 241.

## V.

- Verbrennungsprodukte, Berechnung 8.  
 Verdampfer für Sauggasanlagen 64.  
 Verdampfungswärme 3, 20.  
 Verdampfungsziffer 3, 14, 48, 50, 210, 211, 222, 224, 225, 227, 228.  
 Vergleich zwischen Ein- und Mehrphasensystem 118.  
 — — Leucht- und Generatorgas 61.  
 Verluste (siehe auch Leerlauf).  
 — bei Dampfmaschinen 15, 17, 18, 20, 30, 46.

- Verluste des Ein- und Mehrphasensystems, Vergleich 120.  
 — bei Elektrizitätszählern 199.  
 — — Gleichstrommaschinen 91, 97, 98, 103, 106, 110, 112, 116, 123, 161.  
 — — Transformatoren 156, 157, 160, 168, 170, 173, 176.  
 — — Wechselstrommaschinen (Ein- und Mehrphasenmaschinen) 118, 120, 122, 123, 132, 135, 136.  
 Verlustbestimmung nach Kapp 161.  
 Verlustkurve 132.  
 Vertragsbedingungen betr. Lieferung von Gleichstromkabeln 268.  
 Verwendungsart verschiedener Sorten Leitungsmaterial 260.  
 Viertaktmaschinen 51.

## W.

- Wärmebilanz von Gasmotoren 60.  
 Wärme- und Dampfverlust der Dampfmaschinen 17, 18, 20, 30, 46.  
 Wärmeverlust der Herdrückstände 8, 11, 14, 210.  
 Wärmeverteilung bei Dampfkesseln 11, 14.  
 Wasserdampf, Gesamtwärme 9, 11, 14, 210.  
 Wasserräder 70.  
 Wasserstand 4, 9.  
 Wattloser Strom 154, 167, 171.  
 Wattmeter 77, 79.  
 Wattstrom 154, 167, 170.  
 Wattstundenzähler.  
 —, Allgemeines 197.  
 — von Aron 197.  
 Wechselstrommaschinen (siehe Ein- und Mehrphasen-, Drehstrommaschinen, -generatoren, -motoren).  
 Wechselströme 76, 79, 81.  
 Wechselstrom, Starres System von Schuckert 229.  
 Wechselstromzähler.  
 —, Allgemeines 198.  
 — von Ferraris 198.  
 — — Raab 198.  
 — — Thomson 198.  
 Wettler, Bremsdynamometer 36.  
 Wheatstonesche Brücke 182.  
 White, Dynamometer 40.  
 Widerstandsmessung.  
 — an elektrischen Maschinen 76, 106, 108.  
 — der Isolation von Leitungsmaterial 182.

- Widerstandsmessung an elektrischen Leitungsnetzen 184.  
 — — — Kabeln 185, 188.
- Winderhitzer für Generatorgasanlagen 63, 64.
- Winkelabweichung 71.  
 —, Apparat zur Messung von Mix 73.
- Wirbelstrombremse von Gran 38.
- Wirkungsgrad.  
 — von Akkumulatoren 176, 177, 178, 180.  
 — — Dampfmaschinen 15, 22, 23, 34, 213, 216, 219, 224.  
 — — Dampfkesseln 3, 10, 14, 210, 234.  
 — — Drehstromgeneratoren 123, 129, 130, 135.  
 — — Drehstrommotoren 125, 133, 134, 148, 151, 152.  
 — — Einphasengeneratoren 99, 129, 130.  
 — — asynchronen Einphasenmotoren 133, 134, 145.  
 — des Ein- und Mehrphasensystems, Vergleich 118, 120.
- Wirkungsgrad elektrischer Maschinen allgemein 75.  
 — von Gasmotoren 51, 52, 56, 59, 68.  
 — — Gleichstrommaschinen 39, 90, 91, 96, 98, 100, 104, 106, 110, 112, 116, 161.  
 — — Transformatoren 154, 157, 171, 173, 176.  
 — — —, Jahreswirkungsgrad 154, 174.  
 — — —, täglicher Wirkungsgrad 174.  
 —, kommerzieller 103, 105.

**Z.**

- Ziehl, Schlüpfungszähler 86.
- Zugmesser.  
 — von Fischer 6.  
 — — Siegert-Dürr 6.
- Zugstärke 3, 4, 6, 13, 210.
- Zweiphasengenerator, Allgemeines und Verluste 118, 122.
- Zweiphasenstrom 118.

**Druckfehlerverzeichnis.**

In Fig. 7 Seite 28 ist für die Vakuumlinie 00 statt 0 zu setzen; es fehlt somit unter der Zahl „4“ die „0“.

Seite 78 Zeile 26 von oben lies: bzw. 1,5 statt 1, 5.

Seite 82 Zeile 10 von oben lies: a statt A.

Seite 92 Zeile 12 von unten lies: stationär statt statoinär.

Seite 246 ad 4., Seite 253 Zeile 18 von unten, Seite 254 Zeile 14 von oben, Seite 255 Zeile 14 von unten und Seite 256 Zeile 3 von oben lies: explosive statt explosible.

Seite 252 Zeile 7 von unten lies: Abbrechen statt Umbruch.





S-98

S. 61



WYDZIAŁY POLITECHNICZNE KRAKÓW

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



II-351656

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000294815