

Versuch V

(Temperaturbestimmung der einzelnen Teile der Dynamo).

Zur Ermittlung der Temperaturen der einzelnen Teile der Dynamo wurde Versuch If (S. 193) bezüglich der Belastung zugrunde gelegt. Bei demselben war die normale Dauerbelastung etwa 1000 Kilowatt, die mittlere Stromstärke betrug etwa 297 Amp., die Dynamo war vor dieser Belastung schon einige Stunden mit etwa 250 Amp. betrieben worden. Direkt nach Außerbetriebsetzung der Dynamo mit einer Belastung von etwa 1000 Kilowatt wurden mittels mehrerer Thermometer mit sicherer Berührung derselben mit den in Frage stehenden Maschinenteilen die Höchststände der Temperaturen bestimmt; die Thermometer waren mit Watte zugedeckt.

Die so ermittelten Temperaturangaben waren:

im Armatureisen	67,4° C
im Erregermagneteisen	48,5° „
in den Spulen	52,6° „

hierbei betrug die Temperatur der Umgebung der Dynamo 18,9° C.

Vergleich der gefundenen Resultate mit den vertraglichen Garantien.

Im Vertrage war festgelegt, daß die Dynamo eine Nutzleistung von 1000 Kilowatt bei induktiver Belastung und einer Phasenverschiebung von $\cos \varphi = 0,80$, 4000 Volt und 50 vollen Perioden in der Sekunde aufweisen sollte.

Die Resultate der Messungen ergaben, daß die Nutzleistung wesentlich höher ist und zwar leistet die Turbodynamo bei vollem (11 Atm. absolut) Dampfdrucke 1400 Kilowatt.

Bezüglich der Erwärmung war vertraglich bestimmt, daß nach sechsständigem Dauerbetriebe kein Teil des Generators bzw. des Erregers die Temperatur des Maschinenraumes um mehr als 40° C übersteigen soll. Die Temperaturerhöhung (über dieselbe des Maschinenraumes) ergab bei dem Versuch If nach einem Betriebe mit etwa 300 Amp. folgende Werte:

im Armatureisen	etwa 48,5° C
im Erregermagneteisen	„ 30,0° „
in den Erregermagnetspulen	„ 34,0° „

Durch Vermehrung der Lüftung in der Armatur konnte die Bau-firma C. A. Parsons & Co. die vertragliche Bedingung betreffend Temperaturerhöhung im Armatureisen erfüllen.

Die Tourenzahländerung bei allmählichem Übergange vom Leerlauf zur Vollast oder umgekehrt und unveränderlichem Dampfdrucke war vertraglich auf maximal 4 Proz. normiert; die Messung ergab 3,6 Proz.

Durch den Zentrifugalregulator soll die Tourenzahländerung der Dampfturbine bei plötzlicher Belastungsänderung um 25 Proz. der jeweils vorhandenen Belastung nicht mehr als maximal 0,8 Proz. ergeben. Die Messungen zeigten bei plötzlicher Belastungsänderung von 16 bis 63 Proz. eine Tourenzahländerung von 1,0 bis 1,9 Proz. unmittelbar nach der Belastungsänderung und etwa 0,4 bis 1,3 Proz. für die dauernde Änderung; hierbei (plötzliche Belastungsänderung) zeigte die Spannung eine Abweichung von etwa 1,3 Proz. der Ausgangsspannung.

Von dem elektrischen Regulator wird verlangt, daß bei plötzlicher Belastungsänderung um 25 Proz. der jeweiligen Belastung die Spannung sich maximal nur um 1 Proz. ändern darf. Aus den Messungen resultierte, daß bei Belastungsänderungen von 12 bis 62 Proz. die Tourenzahl und entsprechend die Spannung durch den elektrischen Regulator derart reguliert wurde, daß der Mittelwert der Änderung der Spannung nicht mehr als 1,1 Proz. der Ausgangsspannung betrug.

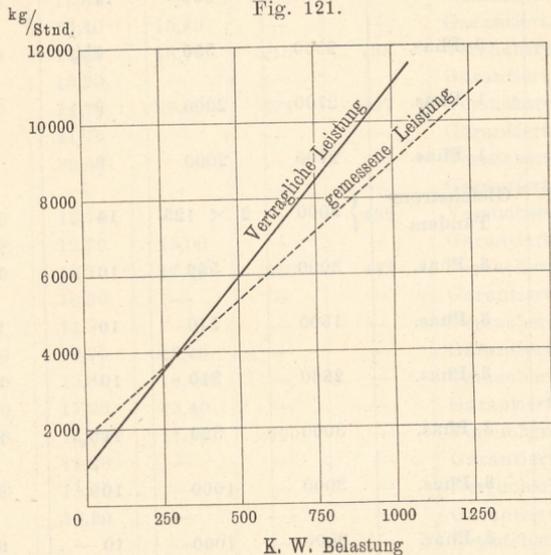
Aus diesen Resultaten geht hervor, daß die Regulatoren gut und zweckentsprechend arbeiten und der Einfluß der momentanen Belastungsänderungen auf die Tourenzahl durch die Reguliervorrichtung sehr rasch übersetzt wird. Der Spannungsabfall darf vertraglich bei konstanter Tourenzahl und Erregung und induktionsfreier Belastung maximal 5 bis 6 Proz. zwischen Leerlauf und Vollast ergeben; durch die Versuchsresultate wurde gezeigt, daß sich derselbe zwischen Leerlauf und der normalen Belastung von 1000 Kilowatt nur auf 1,02 Proz. belief. Dieses ist ein sehr günstiges Resultat für das Arbeiten der Maschine. Ebenso ist der gefundene Spannungsabfall zwischen Leerlauf und Vollast bei induktiver Belastung zu 11 Proz. als gleich günstig zu bezeichnen.

Untenstehende Tabelle und Fig. 121 zeigen einen Vergleich der vertraglich festgelegten und der gefundenen Werte betreffend Dampf-

Be- lastung	Vertragl. Wert des Dampfverbrauches bei 50° Überhitzung		Messungsergebnisse betr. Dampfverbrauch bei 14,3°C mittlerer Überhitzung		Unterschied zwi- schen Vertragswert u. Messungsergebnis	
	pro Kilowatt- Stunde	der Tur- bine in 1 Stunde	pro Kilowatt- Stunde	der Turbine in 1 Stunde	kg/Std.	der Tur- bine in 1 Stunde
	kg	kg	kg	kg		
Kilowatt						
1250	—	—	8,63	10786	—	—
1000	11,0	11000	9,19	9189	— 1,81	— 1811
750	11,3	8475	9,99	7496	— 1,31	— 979
500	12,0	6000	11,41	5707	— 0,59	— 293
250	14,0	3500	15,28	3821	+ 1,28	+ 321
Leerlauf	—	1060	—	1840	—	+ 780

verbrauch. Bei den Versuchen betrug die Überhitzung $14,3^{\circ}\text{C}$, während vertraglich 50°C Überhitzung ausbedungen war; dementsprechend würde der Dampfverbrauch noch geringer, wie angegeben worden. Aus der graphischen Darstellung ersieht man, daß die Kurve des vertraglich genehmigten Dampfverbrauches sich mit derjenigen, welche sich aus den Messungswerten ergab, bei 370 Kilowatt zusammentrifft; somit ist der Dampfverbrauch unter dieser Leistung größer, als vertraglich bestimmt war und umgekehrt. Im normalen Betriebe wird man nur selten unter 370 Kilowatt Leistung kommen und hat somit das günstige

Fig. 121.



Resultat des Dampfverbrauches bei einer Leistung von über 370 Kilowatt praktisch nur Bedeutung; es können somit die gefundenen Dampfverbrauchsziffern als viel günstiger bezeichnet werden, als die vertraglich festgelegten.

Die nun folgenden tabellarischen und graphischen Darstellungen geben einen Überblick über die Dampfverbrauchszahlen pro Kilowatt-Stunde bei 18 verschiedenen Maschinentypen und -arten (Gleich- und Wechsel- bzw. Drehstrom) — unter verschiedenen Verhältnissen, z. B. Belastungen, Überhitzungen usw. — der Parsons-Turbogeneratoren.

Die unter Nr. 3, 6, 13, 15 und 16 (S. 204 u. 205) angegebenen Garantiezahlen und gemessenen Werte des Dampfverbrauches pro Stunde bzw. pro Kilowatt-Stunde der Brown-Boveri-Parsons-Dampfturbinen sind in den Fig. 122 und 126 zur graphischen Darstellung gebracht. Als Abszissen sind in den Figuren die Leistungen in effektiven Kilowatt-Stunden und als Ordinaten die totalen, garantierten, gemessenen und auf 90 Proz. Vakuum reduzierten Dampfverbrauchszahlen

Nr.	Leistung in Kilowatt	Stromart	Touren pro Minute	Spannung Volt	Dampfdruck Atm.	Vakuum bei Vollbelastung Proz.	Überhitzung °C	Dampfverbrauch pro Kilowatt-Stunde bei Belastung				Dampfverbrauch pro Stunde		Bemerkungen
								4/4	3/4	2/4	1/4	leer	leer	
												erregt	unerregt	
1	{ 380 } { 400 }	3-Phas.	3000	2000	7 1/2	90	{ — — —	12,00	—	13,40	15,80	—	550	Garantiert.
2	300	Gleichstrom	3000	600	11	90	{ — — —	10,50	11,27	12,80	17,35	—	920	Versuchsresultate.
3	400	3-Phas.	2500	550	7 1/2	90	{ — — —	11,30	—	12,60	—	—	—	Garantiert.
4	300	1-Phas.	2700	2000	9	90	{ — — —	10,48	11,15	12,50	—	600	—	Versuchsresultate.
5	300	1-Phas.	2700	2000	9	90	{ — — —	12,00	—	13,40	15,80	—	—	Garantiert.
6	280 {	Gleichstrom-Tandem	3000	2 x 125	14	90	{ — — —	10,50	11,30	13,20	16,45	915	735	Versuchsresultate.
7	350							3-Phas.	3000	540	10	90	{ — — —	11,70
8	900	3-Phas.	1500	510	10	90	{ — — —	11,04	11,90	14,72	19,90	679	407	Versuchsresultate.
9	300	3-Phas.	2860	310	10	90	{ — — —	10,30	—	11,70	—	—	—	Garantiert.
10	350	3-Phas.	3000	320	11 1/2	90	{ 250 — —	9,70	—	12,40	—	—	—	Versuchsresultate.
11	350	3-Phas.	3000	1000	10	90	{ — — —	11,50	—	—	—	—	—	Garantiert.
12	350	3-Phas.	3000	1000	10	90	{ — — —	10,58	11,30	12,70	—	—	452	Versuchsresultate.
13	180	Gleichstrom	3500	230	9 1/2	90	{ — — —	11,30	11,80	12,70	15,00	—	—	Garantiert.
14	200	Gleichstrom	3000	250	9	90	{ — — —	10,20	11,30	12,70	17,40	650	443	Versuchsresultate.
15	350-400	3-Phas.	2880	500	11	90	{ 250 — —	9,60	—	10,50	—	—	—	Garantiert.
16	500	3-Phas.	3000	250	10	—	{ — — —	9,20	—	11,30	—	—	—	Versuchsresultate.
17	260	3-Phas.	3000	1000	7	Auspuff	{ — — —	11,50	12,00	12,90	15,40	—	—	Garantiert.
18	260	3-Phas.	3000	1000	7	90	{ — — —	11,50	12,10	13,80	18,40	—	—	Versuchsresultate.
								10,00	10,50	11,20	13,40	—	—	Garantiert.
								9,30	10,20	11,60	15,30	620	—	Versuchsresultate.
								10,00	—	11,20	—	—	—	Garantiert.
								9,82	—	11,00	—	—	—	Versuchsresultate.
								11,50	—	13,20	—	—	—	Garantiert.
								11,03	—	—	—	—	—	Versuchsresultate.
								11,30	11,50	12,30	—	—	—	Garantiert.
								10,90	11,40	12,80	—	387,5	—	Versuchsresultate.
								11,85	—	13,00	—	—	—	Garantiert.
								10,90	11,40	13,20	18,00	—	—	Versuchsresultate (bei kl. Bel. ungenau, weil Oberflächenkondensator undicht).
								10,00	11,00	12,50	—	—	—	Garantiert.
								9,00	9,40	10,30	—	505	—	Versuchsresultate.
								10,50	11,30	12,10	18,00	—	—	Garantiert.
								9,00	9,90	11,00	14,10	743	574	Versuchsresultate.
								11,80	12,70	13,60	20,20	—	—	Garantiert (gesättigter Dampf).
								21,00	—	26,00	—	—	—	Garantiert.
								18,00	—	—	—	—	—	Versuchsresultate.
								11,20	—	13,30	—	—	—	Versuchsresultate bei Kondensation inklusive Kondensationsenergie (10 Kilowatt).

Fig. 122.

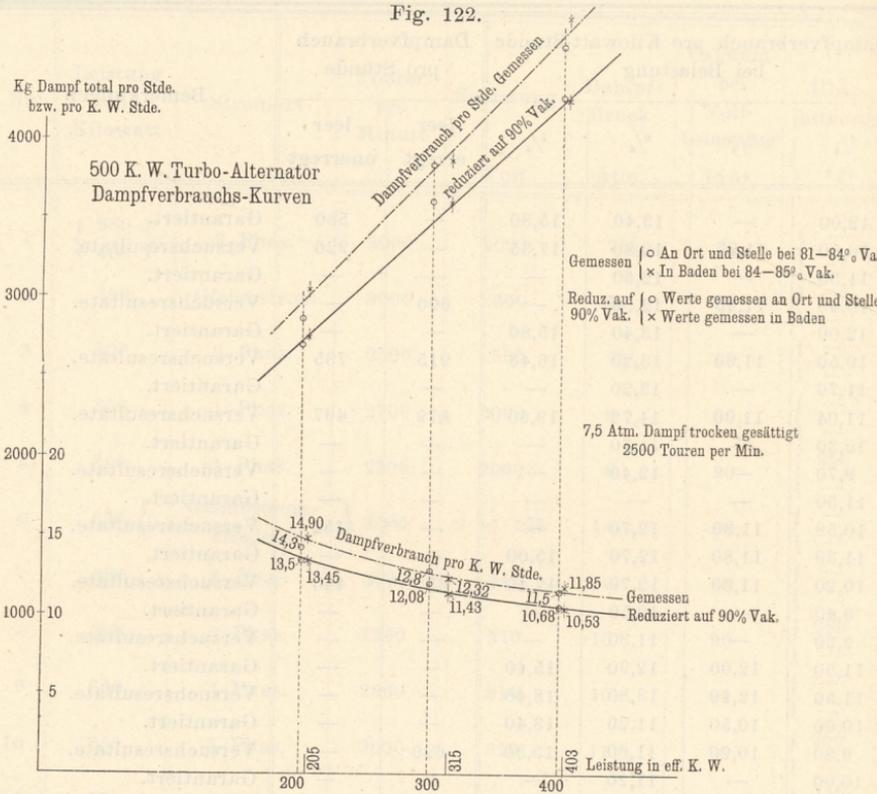


Fig. 123.

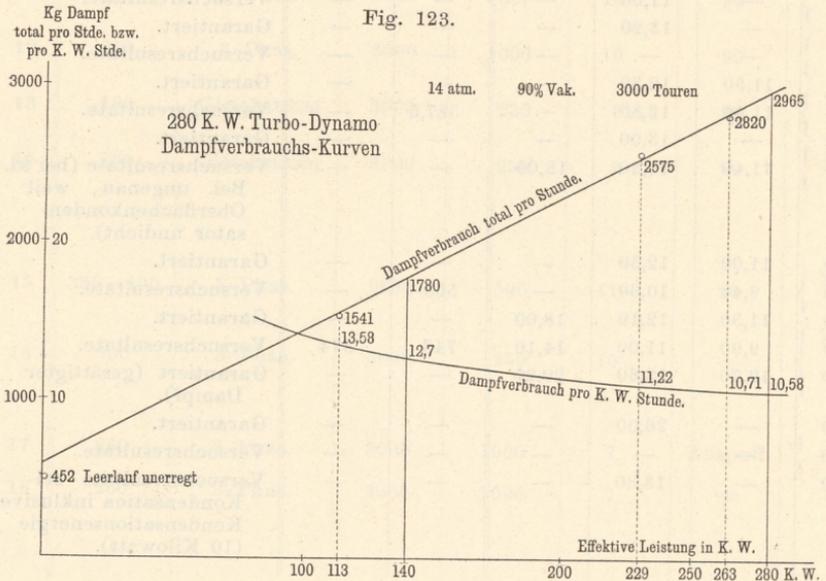


Fig. 124.

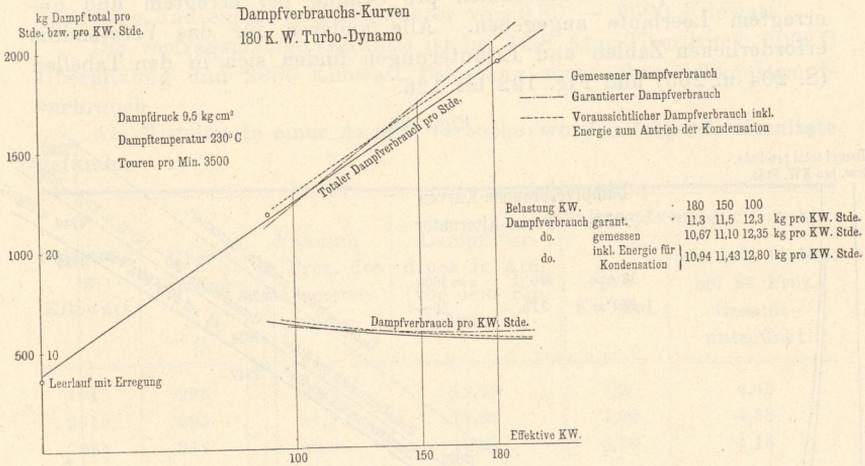
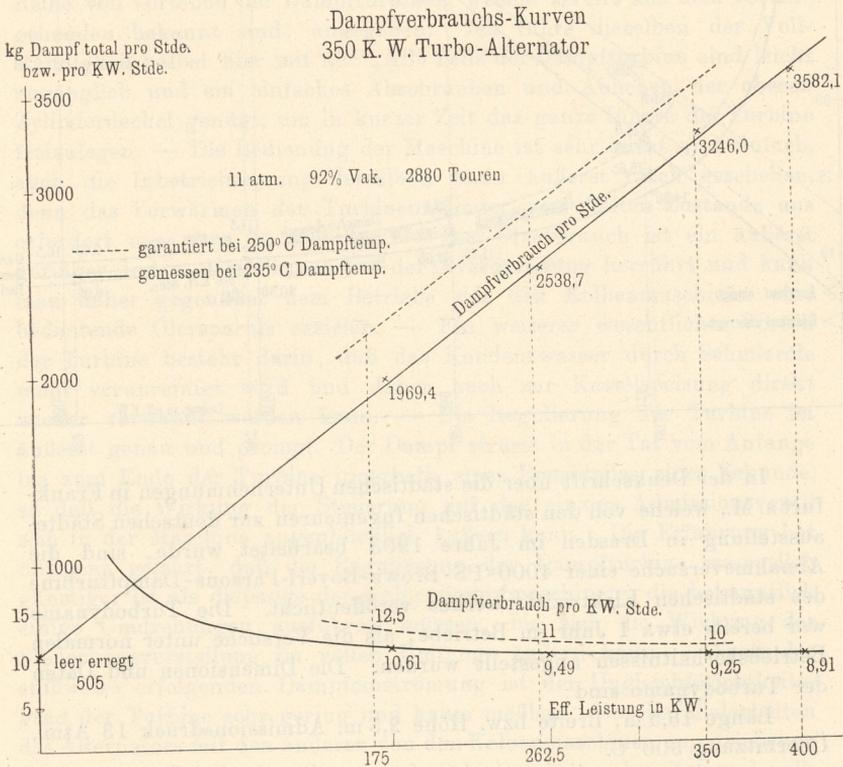
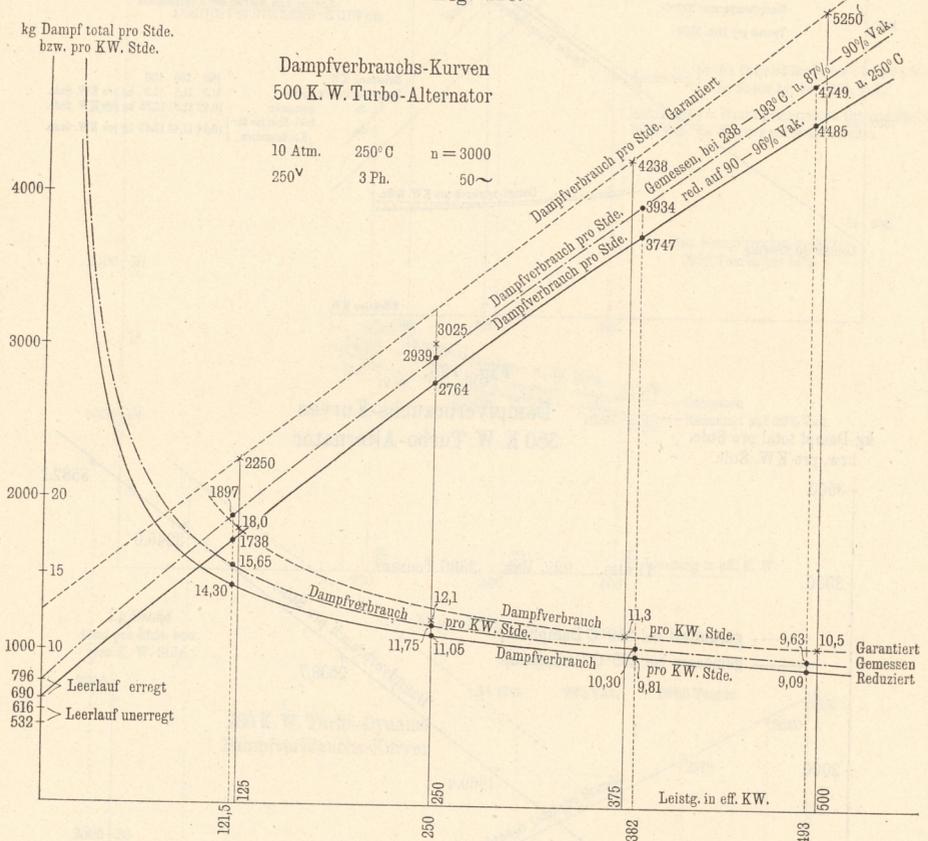


Fig. 125.



zahlen pro Stunde bzw. pro Kilowatt-Stunde eingetragen; außerdem sind die Dampfverbrauchszahlen pro Stunde bei erregtem und unerregtem Leerlaufe angegeben. Alle anderen für das Verständnis erforderlichen Zahlen und Erläuterungen finden sich in den Tabellen (S. 204 u. 205) und Fig. 122 bis 126.

Fig. 126.



In der Denkschrift über die städtischen Unternehmungen in Frankfurt a. M., welche von den städtischen Ingenieuren zur deutschen Städteausstellung in Dresden im Jahre 1903 bearbeitet wurde, sind die Abnahmeversuche einer 4000-PS-Brown-Boveri-Parsons-Dampfturbine des städtischen Elektrizitätswerkes veröffentlicht. Die Turbodynamo war bereits etwa 1 Jahr im Betriebe, als die Versuche unter normalen Betriebsverhältnissen angestellt wurden. Die Dimensionen und Daten der Turbodynamo sind:

Länge 16,5 m, Breite bzw. Höhe 2,5 m, Admissionsdruck 13 Atm., Überhitzung 300° C.

Die Leistung beträgt — bei 1360 Umdrehungen pro Minute 3000 Volt Spannung und einem Leistungsfaktor von 0,80 — 2600 Kilowatt.

Die vertragsmäßige Garantie ist bei 12,8 Atm. Überdruck, 300° C Überhitzung und 2600 Kilowatt Belastung nicht über 7,2 kg Dampfverbrauch.

Als Mittelwerte einer Anzahl Versuche wurden folgende Resultate gefunden:

Belastung in Kilowatt	Über- hitzung ° C	Vakuum in Proz. des Barometer- standes	Dampfüber- druck in Atm. (vor dem Ein- laßwinkel)	Dampfverbrauch in kg	
				pro Kw.-Std.	pro ind. PS-Std. bei 84 Proz. Gesamt- nutzeffekt
1945	298	93,2	12,63	7,20	4,45
2518	295	91,8	12,80	7,09	4,38
2995	312	90,0	10,60	6,70	4,14

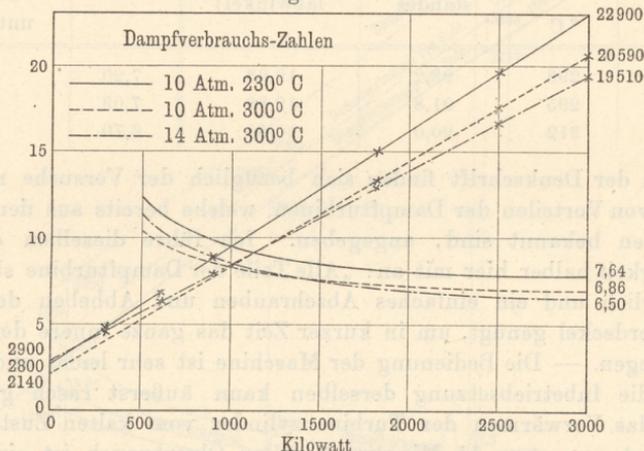
In der Denkschrift finden sich bezüglich der Versuche noch eine Reihe von Vorteilen der Dampfturbinen, welche bereits aus dem Vorhergehenden bekannt sind, angegeben. Ich führe dieselben der Vollständigkeit halber hier mit an: „Alle Teile der Dampfturbine sind leicht zugänglich und ein einfaches Abschrauben und Abheben der oberen Zylinderdeckel genügt, um in kurzer Zeit das ganze Innere der Turbine freizulegen. — Die Bedienung der Maschine ist sehr leicht und einfach, auch die Inbetriebsetzung derselben kann äußerst rasch geschehen, denn das Vorwärmen der Turbinenzylinder vom kalten Zustande aus erfordert nur etwa 15 Minuten. — Der Ölverbrauch ist ein äußerst geringer, indem derselbe nur von der Ölverdunstung herrührt und kann man daher gegenüber dem Betriebe mit den Kolbenmaschinen eine bedeutende Ölersparnis erzielen. — Ein weiterer wesentlicher Vorteil der Turbine besteht darin, daß das Kondenswasser durch Schmieröle nicht verunreinigt wird und daher auch zur Kesselspeisung direkt wieder verwandt werden kann. — Die Regulierung der Turbine ist äußerst genau und prompt. Der Dampf strömt in der Tat vom Anfange bis zum Ende der Turbine innerhalb eines Bruchteiles einer Sekunde, so daß die Wirkung der Steuerung auf das einzige Admissionsventil sich in der Maschine augenblicklich äußern kann. Die Erfahrung hat übrigens gelehrt, daß die Regulierung der Dampfturbine wesentlich günstiger ist als diejenige der Kolbendampfmaschinen, die bekanntlich einige Umdrehungen ausführen müssen, bis sich die Wirkung der Steuerungsverstellung im vollen Umfange äußern kann. — Trotz der stoßweise erfolgenden Dampfströmung ist der Ungleichförmigkeitsgrad der Turbine sehr gering und kaum meßbar. Das Parallelarbeiten des Alternators mit den anderen von den Kolbenmaschinen angetriebenen Alternatoren hat in der Tat niemals Schwierigkeiten bereitet und voll-

zieht sich stets in vorzüglicher Weise. Dazu trägt auch die besondere Bauart des rotierenden Magnetfeldes bei, welches nach Art der Rotoren von asynchronen Motoren ausgeführt ist, eine Anordnung, welche über- dies noch wesentliche Vorteile in mechanischer Hinsicht bietet.“

In der „Elektrotechnischen Zeitschrift“, Heft 34, S. 749 u. f. (1904) finden sich weitere Versuche an einem Turbogenerator von 3200 Kilo- watt Leistung (des städtischen Elektrizitätswerkes Frankfurt) bezüglich Regulierungsfähigkeit, Dampf- und Ölverbrauch. Im nachfolgenden seien die Versuche auszugsweise wiedergegeben.

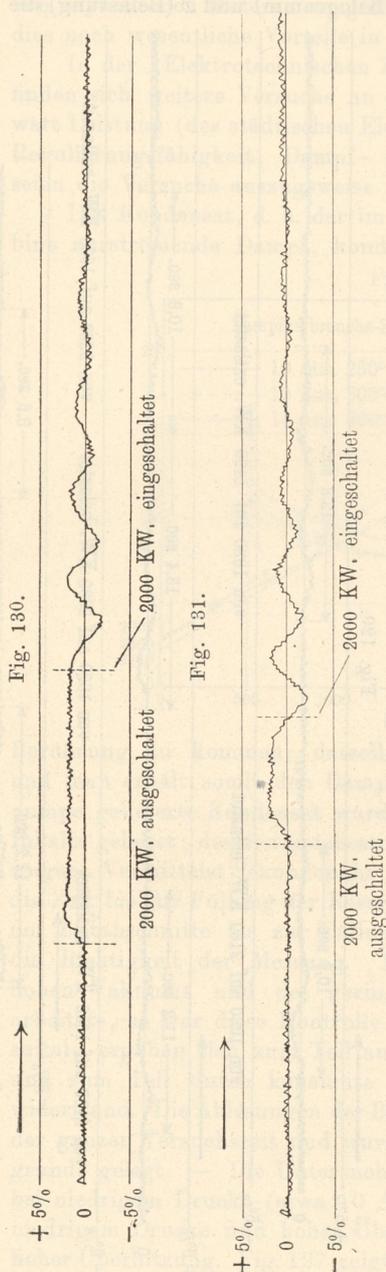
Das Kondensat, d. h. der im Oberflächenkondensator aus der Tur- bine ausströmende Dampf, kondensiert, ohne mit dem Kühlwasser in

Fig. 127.



Berührung zu kommen; dasselbe wird aufgefangen und abgewogen und man erhält somit den Dampfverbrauch. Das von der Kondensatpumpe gelieferte Kondensat wurde in Reservoir von genau bekanntem Inhalte geleitet; die Gewichtsbestimmung erfolgte auf geeichten Dezimalwagen. Vermittelt Sekundenuhr mit Fünftel-Sekunden-Anzeiger wurde die Zeit bis zur Füllung der Reservoir bestimmt. Die Übereinstimmung der Zeitabschnitte bis zur Füllung der Reservoir ergab ein Maß für die Richtigkeit der Messung. Da die Kondensatpumpe infolge des hohen Vakuums und des geringen Gefälles zeitweise unregelmäßig arbeitete, so war diese Kontrolle notwendig. — Die nachfolgenden Resultate ergaben sich zum Teil aus dem normalen Betriebe der Turbine und zum Teil durch konstante Belastung derselben mittels Wasserwiderstand. Die Ablesungen der Belastung in Kilowatt erfolgten während der ganzen Versuchszeit und wurde der Mittelwert der Berechnung zugrunde gelegt. — Die Untersuchungen erstreckten sich auf Prüfungen bei niedrigem Drucke (etwa 10 Atm.) und niedriger Überhitzung, bei niedrigem Drucke und hoher Überhitzung und bei hohem Drucke und hoher Überhitzung. Fig. 127 zeigt die Ergebnisse der Untersuchungen in

Gleichung für den Dampfverbrauch der ganzen Belastungsmöglichkeit einer Maschine. Aus der graphischen Darstellung (Fig. 127) lassen



sich alle Fehlerwerte, deren Eintragungen außerhalb der geraden Linie liegen, sofort überblicken. Die in Fig. 127 (S. 210) angegebenen Punkte sind die Konstruktionspunkte für die Dampfverbrauchslinien. Aus der Lage der Punkte erkennt man die Richtigkeit obiger Relation $y = f(x)$, welche die gerade Linie darstellt; in der Formel bedeutet, wie bereits gesagt, x eine Konstante welche bei einer und derselben Maschine von dem Dampfdruck und der Überhitzung abhängig ist, und b den Dampfverbrauch bei Leerlauf mit Erregung. — Nach genauer Untersuchung des Einflusses des Dampfdruckes, der Überhitzung und des Vakuums auf den Dampfverbrauch wurden alle Versuchswerte auf gleiche Basis umgerechnet. — In Fig. 127 bedeutet: 1. die gerade ausgezogene Linie den Dampfverbrauch pro Stunde bei niedrigem Drucke und niedriger Überhitzung und 90 Proz. Vakuum; 2. die gestrichelte gerade Linie den Verbrauch bei hoher Überhitzung und niedrigem Drucke; die Einwirkung der Überhitzung zwischen 230° und 300° beträgt für je $6,5^{\circ}$ Mehrüberhitzung eine Abnahme von 1 Proz. des Dampfverbrauches. Die Kalorienwärmemehrzufuhr bei $6,5^{\circ}$ Überhitzung beträgt nur 0,5 Proz.; somit ist mit der Überhitzung auch eine nicht unbedeutende Kohlenersparnis verbunden; 3. die gerade strichpunktiierte Linie den Dampfverbrauch bei hoher Überhitzung und hohem Drucke; diese Linie schneidet diejenige sub 2 näher bezeichnete bei etwa 1250 Kilowatt;

unter diesem Belastungswerte ist es günstiger, mit hoher Überhitzung und niedrigem Drucke die Maschine zu betreiben; über diesem Belastungswerte ist hoher Druck vorteilhafter für den Betrieb. — Die Höhe des Vakuums wirkt, wie schon erwähnt, auf den Dampfverbrauch sehr günstig ein; die Versuche zeigten, daß 1 Proz. höheres Vakuum 2 Proz. geringeren Dampfverbrauch erforderten. Die Versuchswerte sind auf 90 Proz. Vakuum bezogen. Der Dampfverbrauch pro Kilowatt-Stunde ist nach der gegebenen Relation [Formel (4), S. 149] einfach graphisch darzustellen, s. Fig. 127, S. 210 (gekrümmte Linien). Aus den Kurven geht hervor, daß der Dampfverbrauch mit der Belastung abnimmt. Der Verbrauch pro N_i bzw. pro Kilowatt-Stunde — unter Hinzurechnung von 2 Proz. für Erregung und Kondensation — beläuft sich auf 3,9 bzw. 6,63 kg. Der Kalorienwert ergibt sich bei hohem Drucke und hoher Überhitzung für die obigen Werte bei 3000 Kilowatt zu nur 2800 pro N_i . — Der Ölverbrauch würde durch die Ölzuführung vermittelt einer Preßpumpe durch die Lager und Rückleitung zur Pumpe auf ein Minimum reduziert; der Ölverlust war nur durch Verdunstung bedingt und wurde zu entsprechenden Zeiten ersetzt. — Bezüglich der Regulierung der Turbine sind eine große Anzahl Versuche angestellt worden; Fig. 128 u. 129 (S. 211) zeigen die gefundenen Geschwindigkeitsdiagramme; eine Geschwindigkeits-Zu- oder -Abnahme von $\frac{1}{2}$ Proz. ist aus den Diagrammen zu ersehen. Bei Belastungs- und Entlastungsänderungen von ein Drittel bis ein Viertel der jeweiligen Belastung ergaben sich Geschwindigkeitsänderungen an der Turbine von $\frac{1}{2}$ bis max. 1 Proz.; die normale Tourenzahl war schon nach einigen Sekunden wieder erreicht. Bei Entlastung oder Belastung (vom Leerlauf) von 2000 Kilowatt trat nur eine Tourenzahländerung von 2 Proz. ein; Fig. 130 u. 131 (S. 212) zeigen den Verlauf der Tourenzahlschwankungen.

Messungen an einer Westinghouse-Parsons-Turbine ¹⁾.

Bei dem jetzt folgenden Beispiele wurden gleichfalls keine besonderen Versuche mit der Turbine allein gemacht, sondern es wurde der ganze Maschinensatz, da die Dynamo direkt gekuppelt und mit der Turbine auf einer gemeinsamen Grundplatte montiert war, als ein zusammenhängendes Ganzes geprüft, d. h. beim Wirkungsgrade wurde das Verhältnis der abgegebenen elektrischen Energie zu der in Dampfform aufgenommenen bestimmt. Die Turbine gehörte zu den Zweifach-Expansionsmaschinen; die Schaufelräder des Zylinders werden parallel beaufschlagt. Zwischen dem Dampfaustritte des Hochdruckzylinders und dem Dampfeintritte des Niederdruckzylinders ist ein Kondenswasserabscheider in die Rohrleitung eingeschaltet. Das sich ansammelnde Kondenswasser wird beim normalen Betriebe abgelassen; bei den jetzt

¹⁾ Siehe auch Electrical World, 20. Februar 1904.