

Versuche¹⁾
in der Primärstation „Lauffen“ der elektrischen Kraft-
übertragung Lauffen a. N. — Frankfurt a. M.,
anlässlich der internationalen elektrotechnischen Ausstellung zu
Frankfurt a. M. 1891.

Die Lauffener elektrische Kraftanlage diente zur Übertragung der elektrischen Energie nach Frankfurt a. M., woselbst dieselbe in mechanische Energie zum Pumpenbetriebe umgesetzt und außerdem zur Lichterzeugung verwertet wurde. Die Hauptteile der Anlage waren: 1. in der Lauffener Zentrale: die 356 PS-Niederdruckturbine, die Dreiphasenwechselstromdynamo, welche die drei primären Wechselströme lieferte und dem primären Transformator unter der Spannung von 55 Volt zuführte. Der erzeugte Strom wurde dann mit einer 155- bzw. 160 mal höheren sekundären Transformatorspannung in der sekundären Leitung fortgeführt. 2. In Frankfurt: der sekundäre Transformator, in welchem die drei eingeleiteten sekundären Ströme in tertiäre von je 65 Volt Spannung umgewandelt wurden. Letztere dienten dann teils zur Erzeugung mechanischer Arbeit, wie z. B. zum Antrieb einer Pumpenanlage, teils speisten sie das Leitungsnetz einer Beleuchtungsanlage. Zur Klarstellung der Gesamtdisposition und der einzelnen Teile der Anlage verweise ich auf den unten näher bezeichneten Bericht¹⁾. Das Programm der Prüfungskommission umfaßte eingehende Untersuchungen sowohl der Gesamtanlage als auch einzelner Teile derselben. Leider konnte das Programm durch eine Reihe äußerer Umstände nicht in dem vollen Umfang und der beabsichtigten Genauigkeit durchgeführt werden.

Da die ganze Anlage und die an ihr vorgenommenen einzelnen Untersuchungen nicht nur ein historisches, sondern auch ein großes, allgemeines Interesse haben, so will ich nicht verfehlen, die hauptsächlichsten Versuche, welche in der Primärstation Lauffen sowohl an der Gesamtanlage, als auch an ihren einzelnen Teilen ausgeführt wurden, an dieser Stelle kurz darzulegen und zwar sollen die folgenden Kapitel behandelt werden:

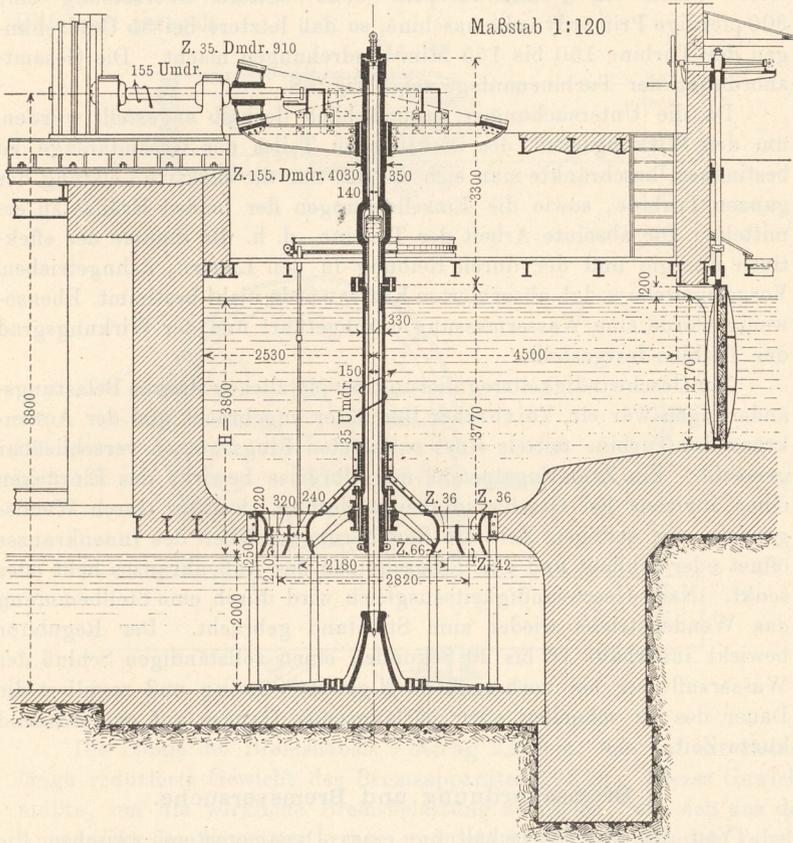
- A. Bremsung der Turbine.
- B. Wirkungsgrad der Dynamo.
- C. Wirkungsgrad der Transformatoren der Allgemeinen Elektrizitätsgesellschaft und der Oerlikon-Aktien-Gesellschaft in Lauffen.
- D. Leerlaufverbrauch der Transformatoren in Lauffen.
- E. Wirkungsgrad der gesamten Arbeitsübertragung bei einer Spannung von etwa 25 000 Volt.

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

A. Bremsung der Turbine.

Die Anlage besteht aus vier gleich gebauten Turbinen, von welchen jedoch nur eine untersucht worden ist. Diese war eine zweikränzige Kombinationsturbine mit einer garantierten Leistung von 304 PS bei 3,8 m Nutzgefälle, 8000 Liter Wasserverbrauch pro Sekunde und 35 Um-

Fig. 68.



drehungen pro Minute. Der äußere Schaufelkranz war als Reaktionsturbine System Jonval gebaut für 4000 Liter pro Sekunde und 3,8 m Gefälle. Dieses ergibt bei einem Wirkungsgrad von 75 Proz. und einer Tourenzahl von 35 pro Minute eine Leistung des äußeren Kranzes allein von 152 PS. Der innere Schaufelkranz war als Aktionsturbine gleichfalls für 4000 Liter in der Sekunde und 3,8 m Gefälle gebaut, und beträgt die Leistung des inneren Schaufelkranzes allein bei demselben Wirkungsgrade und derselben Tourenzahl wie oben gleichfalls 152 PS. Der innere Schaufelkranz war mit einer Schieberregulierung

versehen, derart, daß die Beaufschlagung von einem Sechstel zu einem Sechstel geändert werden konnte. Der äußere Schaufelkranz war durch einen Ringschützen verschließbar, so daß durch Verengung der Durchflußöffnung eine Verringerung der Beaufschlagung herbeigeführt werden konnte. Als Maß dieser Beaufschlagung galt demgemäß bei den späteren Versuchen die Höhe der Ringschützenöffnung in Millimeter.

Die Turbine hat einen Fontaineschen Oberwasserzapfen und betreibt durch ein Winkelräderpaar ohne weitere Übersetzung eine 300 pferdige Primärdynamomaschine, so daß letztere bei 35 Umdrehungen der Turbine 150 bis 155 Min.-Umdrehungen macht. Die Gesamtanordnung der Turbinenanlage zeigt Fig. 68.

Da die Untersuchungen hauptsächlich deshalb angestellt wurden, um den Wirkungsgrad des elektrischen Teiles der Gesamtanlage zu bestimmen, beschränkte man sich darauf, nur die effektive Leistung der ganzen Turbine, sowie die Einzelleistungen der beiden Kränze zu ermitteln. Die absolute Arbeit der Turbine, d. h. die Summe der effektiven Energie und der durch Reibung in den Lagern, Zahngetrieben, Vorgelegewelle u. dgl. absorbierten Kraft, wurde nicht bestimmt. Ebenso wenig wurde eine Wassermessung durchgeführt und der Wirkungsgrad der Turbine festgestellt.

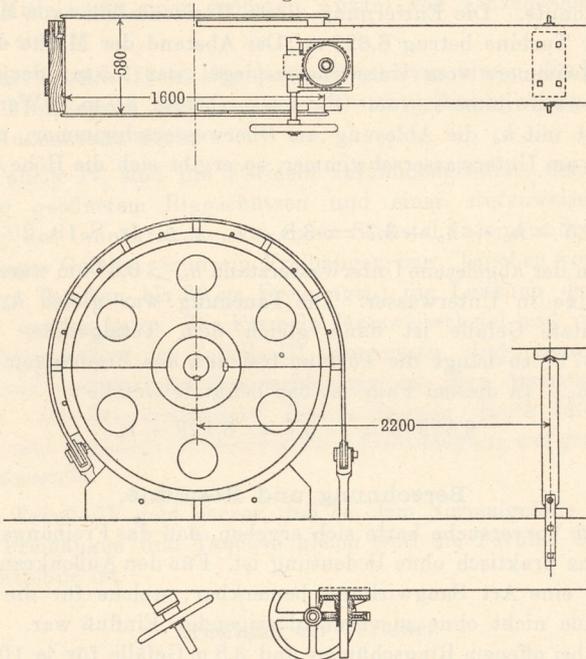
Zur Geschwindigkeitsregulierung bei plötzlichen starken Belastungsänderungen war ein Voithscher Regulator angebracht und der Außenkranz der Turbine mittels eines entlasteten Ringschützen verschließbar gemacht. Ein Zentrifugalpendel mit Ölbremse bewirkt das Einrücken eines Riemens bei Geschwindigkeitsänderung, welcher durch Wendetriebe zur selbigen Zeit die Regulierungsschieber des Innenkranzes öffnet oder schließt und den Ringschützen des Außenkranzes hebt oder senkt. Nach Geschwindigkeitsausgleich wird durch eine Stellhemmung das Wendetriebe wieder zum Stillstand gebracht. Der Regulator bewirkt innerhalb 16 bis 20 Sekunden einen vollständigen Schluß des Wasserzufflusses bei vorhergehender ganzer Öffnung und reguliert die Dauer des zu schnellen oder zu langsamen Ganges auf entsprechend kurze Zeit.

Bremsanordnung und Bremsversuche.

Von der Zwischenschaltung eines Dynamometers zwischen die Turbine und Dynamomaschine zur Messung des Effektes, welcher von der Turbine auf die Dynamomaschine übertragen wurde, mußte wegen der unlösbaren Verbindung beider Maschinen und der Größe des Effektes Abstand genommen werden. Es blieb kein anderer Weg zur Bestimmung des übertragenen Effektes, als die Beaufschlagung und das Gefälle während des Normalbetriebes zu beobachten und vorher oder später unter tunlichst denselben Umständen den Effekt anstatt auf die Dynamomaschine auf ein Bremsdynamometer zu leiten und zu messen. Die Bremsscheibe wurde direkt auf der Welle der Dynamomaschine, da wo

gewöhnlich der Induktor sitzt, angebracht. Die Anordnung der Scheibe und des Bremshebels ist aus Fig. 69 zu ersehen. Der Hebel drückt mittels einer senkrechten Stütze auf eine Dezimalwage. Mittels Schraube und Schneckenrades erfolgte die Anspannung des Bremsbandes von Hand aus. Durch eingeschraubte Rohrstützen in die Löcher der Bremsklötze wurde mittels Kautschukschläuchen aus einem über der Bremse mit Wasser aus der Wasserleitung gefülltem Fasse den Bremsklötzen Wasser zugeführt; der Zufluß wurde durch eine eigens hierzu bestimmte Hilfskraft geregelt.

Fig. 69.



Die Länge des Bremshebels l betrug 2,209 m, das auf die Hebel­länge reduzierte Gewicht des Bremsapparates 196 kg. Dieses Gewicht mußte, um die wirkliche Bremsbelastung zu finden, wie sich aus der Anordnung des Apparates ergab, und wie in der beifolgenden Tabelle geschehen, von dem Wagschalengewicht in Abzug gebracht werden.

Die Größe der gebremsten Arbeit der Turbine berechnet sich dann nach der Formel (31)

$$N_1 = \frac{G \cdot l \cdot n}{716,2} \quad (\text{s. S. 53}),$$

hierbei bedeutet

- l die Länge des Bremshebels,
- G die wirksame Bremsbelastung,
- n die Umdrehungszahl der Welle pro Minute.

Die Anzahl der Umdrehungen wurde durch einfaches Zählen festgestellt, sowie außerdem mit einem Tachometer kontrolliert.

Gefällebestimmung.

Zur Bestimmung des Gefälles dienten zwei Schwimmer, der eine im Oberwasser direkt über der Turbine, der andere in der Unterwassergasse hinter derselben. Die Schwimmer waren mit Stangen versehen und an diesen waren Marken angebracht, deren Abstand von einer gemeinsamen, festen Horizontallinie an einem Maßstabe abgelesen werden konnte. Die Entfernung dieser Horizontallinie von der Unterkante der Turbine betrug 6,829 m. Der Abstand der Marke des Unterwasserschwimmers vom Unterwasserspiegel war 7,5 m, derjenige des Oberwasserschwimmers vom Oberwasserspiegel 3,7 m. Werden nun bezeichnet mit h_o die Ablesung am Oberwasserschwimmer, mit h_u die Ablesung am Unterwasserschwimmer, so ergibt sich die Höhe des Totalgefälles

$$z = 7,5 - h_u + h_o - 3,7 = 3,8 - h_u + h_o \text{ (s. S. 19, 20 u. 39).}$$

Wenn der abgelesene Unterwasserstand $h_u > 0,671$ m war, so taucht die Turbine in Unterwasser. Die Tauchung war gleich $h_u - 0,671$. Das benutzte Gefälle ist dann gleich dem Totalgefälle. Ist aber $h_u < 0,671$, so hängt die Turbine frei und das Freihängen ist gleich $0,671 - h_u$. In diesem Falle ist das benutzte Gefälle

$$6,829 + h_o - 3,7 = 3,129 + h_o.$$

Berechnung und Resultate.

Durch Vorversuche hatte sich ergeben, daß das Freihängen für den Innenkranz praktisch ohne Bedeutung ist. Für den Außenkranz machte sich aber eine Art Saugwirkung bemerkbar, welche für die Leistung der Turbine nicht ohne zu vernachlässigenden Einfluß war. Es ergab sich, daß bei offenem Ringschützen und 3,8 m Gefälle für je 10 cm Freihängen (Tauchen als negatives Freihängen gerechnet) eine Zunahme (bzw. Abnahme) des Effektes von 4,68 PS stattfindet. Diese Zunahme findet aber nur in den Grenzen, in welchen sich die Versuche bewegten, nämlich zwischen 10 cm Tauchen und 30 cm Freihängen, mit genügender Sicherheit statt. Ob das Tauchen für den Innenkranz von Einfluß war, ist nicht untersucht worden.

Da sich das normale Gefälle von 3,8 m nicht einhalten ließ, so mußten die gefundenen Werte der Leistung der Turbine auf dieses Normalgefälle reduziert werden, um miteinander vergleichbare Resultate zu erzielen. Die Leistung der Turbine ändert sich aber mit der 1,5. Potenz des benutzten Gefälles, gemessen vom Oberwasserspiegel bis Unterkante Turbine bei Freihängen; bzw. vom Oberwasserspiegel bis Unterwasserspiegel bei Tauchung.

Die Formel für diese Rechnung lautet:

$$N_{3,8} = N_1 \left(\frac{3,8}{z} \right)^{1,5},$$

wobei bedeutet

$N_{3,8}$ die Leistung der Turbine bei dem Normalgefälle von 3,8 m.
 z das jeweilige Gefälle.

Alle beobachteten und berechneten Werte finden sich in den Tabellen zusammengestellt; es sei jedoch bemerkt, daß in denselben nur die Mittelwerte einer größeren Anzahl von Einzelbeobachtungen angeführt sind.

In der Tabelle III ist für beide Kränze zusammen die Korrektur bezüglich Freihängens oder Tauchens ebenso angebracht, wie in Tabelle II für den Außenkranz allein.

In Tabelle IV sind die Formeln zusammengestellt, nach welchen bei völlig geöffnetem Ringschützen und einer stufenweisen Beaufschlagung des Innenkranzes von einem Sechstel zu einem Sechstel für ein beliebiges Gefälle z und ein Freihängen bzw. Tauchen von f Meter (von 10 cm Tauchen bis 30 cm Freihängen) die Leistung der Turbine berechnet werden kann. Die Formeln für zweisechstel und viersechstel Beaufschlagung sind der Tabelle III entnommen, diejenigen für fünfsechstel und sechssechstel Beaufschlagung aus den übrigen Tabellen berechnet, die für dreisechstel Beaufschlagung durch Interpolation gefunden und diejenige für einsechstel Beaufschlagung auf graphischem Wege festgestellt.

Aus Tabelle IV geht hervor, daß bei dem Normalgefälle von 3,8 m und bei Freihängen und Tauchen gleich Null die Turbine 356 PS zu leisten imstande ist.

Bremsung der Turbine.

Tabelle I. Innenkranz.

Nr.	Beaufschlagung	Touren der Dynamo-welle pro Minute	Belastung kg	Gemessene Leistung PS	Benutztes Gefälle m	Reduktion
						auf Normalgefälle = 3,8 m; Leistung PS
1	$\frac{6}{6}$	153,6	393,3	185,8	3,695	193,7
2	$\frac{5}{6}$	152,2	325,0	152,5	3,822	151,1
3	$\frac{4}{6}$	150,6	255,0	118,3	3,830	116,9
4	$\frac{3}{6}$	151,0	185,0	86,0	3,837	84,8

Tabelle II. Außenkranz.

Nr.	Höhe der Ring-schützen-öffnung mm	Touren der Dynamowelle pro Minute	Belastung kg	Gemessene Leistung PS	Benutztes Gefälle m	Freihängen mm	Tauchen mm	Reduktion auf Normal-gefälle = 3,8 m; Leistung PS
1	228,50	166,14	314,3	161,3	3,782	110,3	—	162,3
2	206,75	167,40	299,0	154,0	3,805	79,0	—	153,7
3	186,00	156,80	314,0	151,7	3,800	61,0	—	151,7
4	168,00	163,10	284,0	142,1	3,801	67,0	—	142,1
5	146,75	155,20	274,0	132,5	3,794	63,0	—	132,9
6	128,00	169,20	234,0	121,9	3,808	96,0	—	121,5

Tabelle III. Beide Kränze zusammen.

Nr.	Beaufschlagung (Ringschützen völlig geöffnet)	Touren der Dynamowelle pro Minute	Belastung kg	Gemessene Leistung PS	Benutztes Gefälle m	Freihängen mm	Tauchen mm	Reduktion auf Normal-gefälle = 3,8 m; Leistung PS
1	$\frac{2}{6}$	156,3	444	213,4	3,771	12	—	215,3
2	$\frac{4}{6}$	167,2	534	269,7	3,772	—	21	279,2

Tabelle IV. Wahrscheinliche Werte der Leistung der Turbine, bei völlig geöffneten Ringschützen des Außenkranzes und bei variabler Beaufschlagung des Innenkranzes.

z = Gefälle.

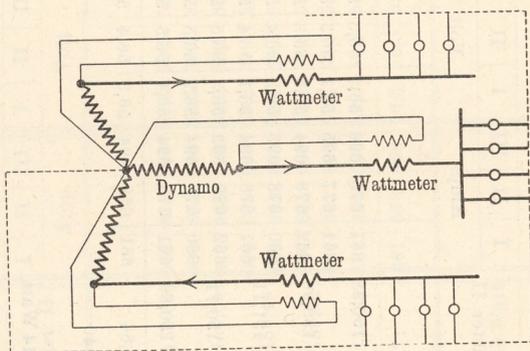
f = Größe des Freihängens bzw. Tauchens der Turbine in Meter.

Beaufschlagung des Innenkranzes	Wahrscheinliche Leistung der Turbine in PS
$\frac{1}{6}$	$N_1 = 188,3 \left(\frac{z}{3,8}\right)^{1,5} + 46,8 \cdot f$
$\frac{2}{6}$	$N_1 = 215,3 \left(\frac{z}{3,8}\right)^{1,5} + 46,8 \cdot f$
$\frac{3}{6}$	$N_1 = 247,1 \left(\frac{z}{3,8}\right)^{1,5} + 46,8 \cdot f$
$\frac{4}{6}$	$N_1 = 279,2 \left(\frac{z}{3,8}\right)^{1,5} + 46,8 \cdot f$
$\frac{5}{6}$	$N_1 = 313,4 \left(\frac{z}{3,8}\right)^{1,5} + 46,8 \cdot f$
$\frac{6}{6}$	$N_1 = 356,0 \left(\frac{z}{3,8}\right)^{1,5} + 46,8 \cdot f$

B. Wirkungsgrad der Dynamo.

Zur Bestimmung des Wirkungsgrades der Dreiphasenwechselstromdynamo wurden die Angaben dreier in die primären Leitungen zwischen Dynamo und primärem Transformator eingeschalteten Wattmeter, deren Nebenschluß an je einer der drei Polklemmen der Dynamo und dem neutralen Punkte der letzteren endigen, festgestellt. Aus den aus der Eichung der Wattmeter bestimmten Konstanten und den Ablesungen während der definitiven Messungen wurde die gesamte Energieleistung, welche von der Dynamo auf den primären Transformator übertragen wurde, ermittelt. Das Verhältnis dieser Leistung zu dem aus der angewandten Beaufschlagung der Turbine und dem benutzten Gefälle gefundenen Leistung der Turbine liefert den Wirkungsgrad. Gleichzeitig mit obigen Angaben wurden die Stromstärken und Spannungen in den drei Zweigleitungen, der Erregerstrom, der Stand des Ober- und

Fig. 70.



Unterwasserspiegels, das totale und benutzte Gefälle und das Freihängen der Turbine durch entsprechende Messungen bzw. Beobachtungen bestimmt. Sämtliche elektrische Apparate sind vor und nach den Versuchen geeicht worden. Der für die Erregung verbrauchte Effekt ist entsprechend in Rechnung gezogen worden. Für die Belastung der Dynamo dienten 3000 Glühlampen und zwar entsprechend der Spannung der Dynamo Lampen von 65 Volt à 16 und à 10 Nk; dieselben wurden auf Brettern montiert und durch Kupferseile von 400 mm² Querschnitt mit der Dynamo verbunden. Das Schaltungsschema gibt Fig. 70.

Die gegebenen Mittel und die lokalen Verhältnisse gestatteten keine großen Unterschiede der Belastung und die höchst erreichbare Belastung betrug nur etwa 113 Kilowatt, d. h. etwa 50 Proz. der normalen Belastung; unter 36 Kilowatt Belastung konnte die Bremsung der Turbine nicht mehr korrekt durchgeführt werden; es mußte somit

Tabelle I.

Zeitdauer	Von der Dynamo abgegebener Effekt			Stromstärke im Zweige		Spannung im Zweige			Tourenzahl	Erregerstrom Amp.	Turbinenbeaufschlagung	Stand des Oberwassers m	Stand des Unterwassers m	Totales Gefälle m	Benutztes Gefälle m	Freihängen der Turbine m			
	Wattmeter I	Wattmeter III	Wattmeter II	I	II	III	I	II									III		
									Amp.			Volt							
10	Beobachtungsreihe 1000 Ohm																		
	142,17	141,95	149,33	149,21	150,68	150,98	661	676	696	56,3	56,3	55,4	149,0	12,5	Außenkranz	0,464	0,483		
	142,21	142,14	149,13	149,40	150,63	150,96	661	677	695	56,1	56,3	55,4	149,5	12,3	ganz	0,465	0,485		
	142,40	142,24	148,91	149,28	150,71	151,11	660	678	693	56,3	56,4	55,3	149,0	12,4	offen;	0,465	0,483		
	142,07	142,05	148,97	149,62	150,80	150,71	661	678	694	56,1	56,4	55,0	149,5	12,5	Innenkranz	0,464	0,485		
	142,20	142,00	149,11	149,54	150,90	150,89	660	678	694	56,2	56,5	55,0	149,0	12,4	ge-	0,465	0,484		
							661	678	694	56,4	56,5	55,2	149,2	12,3	schlossen	0,466	0,485		
	Mittel	142,14		149,25		150,84	661	678	694	56,3	56,4	55,2	149,2	12,4					
		$C = 0,2623$		$C = 0,2556$		$C = 0,2540$													
	Abgebener elektr. Effekt = 37283 Watt																		
Summe 113745 Watt = 154,54 Pferdestärken																			

Totales Gefälle:
4,977 — (Oberw. + Unterw.)
Benutztes Gefälle:
4,306 — Oberwasser
Bremsseffekt:
 $156,0 \left(\frac{3,841}{3,800} \right)^{1,5} + 46,8 \cdot 0,186$
= 167,2 PS.

Tabelle I (Fortsetzung).

Zeitdauer	Von der Dynamo abgegebener Effekt			Stromstärke im Zweige			Spannung im Zweige			Tourenzahl	Erregerstrom	Turbinenbeanschlagung	Stand des Oberwassers	Stand des Unterwassers	Totales Gefälle	Benutztes Gefälle	Freihängen der Turbine	
	Wattmeter I	Wattmeter III	Wattmeter II	I	II	III	I	II	III									
																		Amp.
Min.																		
10	Beobachtungsreihe																	
	1000 Ohm																	
	142,21	141,95	148,66	148,65	151,05	150,60	662	679	695	56,4	56,5	55,2	149,5	12,3	Außenkranz	0,463	0,485	
	142,20	142,01	148,84	148,72	150,95	150,55	660	678	693	56,3	56,3	55,1	150,0	12,5	ganz offen;	0,464	0,485	
	142,10	141,82	148,63	148,54	150,95	150,49	660	678	694	56,2	56,2	55,1	150,0	12,4	Innenkranz	0,463	0,485	
	141,81	142,12	148,69	148,59	150,60	150,62	663	678	693	56,4	56,3	55,2	149,5	12,4	geschlossen	0,463	0,486	
Mittel	142,04		148,66		150,75	150,57	661	679	692	56,3	56,3	55,4	150,0	12,3		0,463	0,485	
C = 0,2623 C = 0,2556 C = 0,2540 Abgebener elektr. Effekt = 37257 Watt = 37997 Watt = 38280 Watt Summe 113 534 Watt = 154,26 Pferdestärken																		
Totales Gefälle: 4,977 — (Oberw. + Unterw.) Benutztes Gefälle: 4,306 — Oberwasser Bremsseffekt: $156,0 \left(\frac{3,843}{3,800} \right)^{1,5} + 46,8 \cdot 0,186 = 167,3 \text{ PS.}$																		

Tabelle II. Gesamtergebnisse der Untersuchungen an der Dynamo.

Turbinen- beaufschlagung	Benutztes Gefälle		Frei- hängen der Turbine	Touren- zahl der Dynamo	Brems- effekt		Gesamter Elektrischer Effekt an der Dynamo		Verlust = Bremsleistung — Elektrischer Effekt an der Dynamo		Strom- stärke Amp.	Spannung an der Dynamo		Erreger- strom Amp.	Zur Erregung ver- braucher Effekt PS	Er- regungs- effekt: Brems- effekt
	m	m			PS	PS	PS	Volt	Volt	PS						
Außenkranz . . .	3,841	0,186	149,2	167,2	154,54	12,66	678	56,0	12,4	0,39	0,0023					
" . . .	3,843	0,186	149,8	167,3	154,26	13,04	677	55,9	12,4	0,39	0,0023					
Innenkranz . . . ⁵ / ₆	3,853	0,209	149,7	154,3	141,84	12,46	646	53,8	10,8	0,30	0,0020					
" . . . ⁵ / ₆	3,856	0,213	150,0	154,4	141,60	12,80	645	53,8	10,7	0,29	0,0019					
" . . . ⁴ / ₆	3,857	0,232	150,0	120,0	107,41	12,59	471	55,6	10,5	0,28	0,0023					
" . . . ⁴ / ₆	3,870	0,232	150,0	120,1	107,51	12,59	473	55,8	10,5	0,28	0,0023					
" . . . ⁵ / ₆	3,865	0,121	150,0	155,0	142,44	12,56	641	54,6	10,4	0,27	0,0017					
" . . . ⁵ / ₆	3,866	0,125	149,4	155,0	142,53	12,47	644	54,3	10,7	0,29	0,0019					
" . . . ⁵ / ₆	3,866	0,127	149,5	155,0	142,53	12,47	641	54,7	11,2	0,31	0,0020					
" . . . ⁴ / ₆	3,872	0,136	149,8	120,2	107,65	12,55	468	56,6	10,8	0,30	0,0025					
" . . . ⁴ / ₆	3,871	0,138	150,0	120,2	107,61	12,59	467	56,6	10,9	0,31	0,0025					
" . . . ³ / ₆	3,879	0,170	150,0	87,4	75,03	12,37	336	54,7	9,3	0,22	0,0026					
" . . . ³ / ₆	3,878	0,173	150,0	87,4	75,16	12,24	337	54,7	9,5	0,22	0,0026					
" . . . ² / ₆	3,882	0,191	150,0	—	49,34	—	232	52,4	8,0	0,13	—					
" . . . ² / ₆	3,883	0,194	149,7	—	49,46	—	232	52,4	8,0	0,13	—					

von der Feststellung des Energiebedarfes der leer laufenden, unerregten und der leer laufenden, erregten Dynamo aus den Brems- und Gefällmessungen Abstand genommen werden.

Zu einem anderen Verfahren zwecks Ermittlung dieser Größen reichte die zur Verfügung stehende Zeit nicht aus. Die Messungen wurden somit nur bei folgenden Belastungen durchgeführt:

Beaufschlagung der Turbine	Belastung der Dynamo
1. Außenkranz geschlossen; Innenkranz offen zu $\frac{2}{6}$	etwa 36 000 Watt
2. " " " " " $\frac{3}{6}$	" 55 000 "
3. " " " " " $\frac{4}{6}$	" 80 000 "
4. " " " " " $\frac{5}{6}$	" 105 000 "
5. " ganz offen; " geschlossen	" 113 000 "

Mit diesen angegebenen Belastungen wurde eine Anzahl Messungen angestellt. Um einen Überblick über die Art derselben zu gewähren, gebe ich die Mittelwerte zweier Messungsreihen unter der Belastung 5., d. h. 113 000 Watt, siehe Tabelle I (S. 120 u. 121).

In analoger Weise, wie Tabelle I zeigt, wurden noch 13 Beobachtungsreihen aufgestellt. Die Gesamtergebnisse derselben habe ich in Tabelle II (S. 122) zusammengestellt. Die Berechnung und Bedeutung der einzelnen Zahlen ist aus dem Vorhergehenden bekannt. In betreff der Erregerenergie sei hier bemerkt, daß der Widerstand der Erregerwindungen 1,86 Ohm beträgt. Für die Turbinenbeaufschlagung: Innenkranz $\frac{2}{6}$, ist der von der Turbine an die Dynamo übertragene Effekt nicht angegeben, weil derselbe nicht durch Bremsung, sondern auf einem anderen, ziemlich unsicheren Wege ermittelt worden war. Aus der Tabelle II habe ich aus den gleichwertigen Resultaten Mittelwerte gebildet und so die Tabelle III gefunden; aus derselben ermittelt sich der jeweilige Wert für den Wirkungsgrad als Verhältnis des $\frac{\text{ges. el. Effektes}}{\text{Bremsseffekt}}$.

Der Erregerseffekt ist in Anbetracht der kleinen Größe im Verhältnis zum Bremsseffekt und der Unsicherheit bei der Messung des letzteren unberücksichtigt gelassen. Die Übereinstimmung der einzelnen Resultate bei derselben Belastung ist eine sehr gute. Die gleichmäßige Zunahme des Verlustes: Bremsseffekt — elektrischer Effekt garantiert auch für Resultate ohne erhebliche Fehler.

Tabelle III. Mittelwerte.

Bremseffekt PS	Gesamter elektrischer Effekt PS	Verlust = Brems- effekt — elektr. Effekt PS
167,25	154,40	12,85
154,74	142,19	12,55
120,12	107,54	12,58
87,40	75,10	12,30

Die aus obiger Tabelle III erhaltenen Werte der totalen Verluste für konstante Tourenzahl und nahezu konstante Spannung bei variabler Belastung bestehen aus einer konstanten Verlustgröße $V_{D(0)}$, welche in der Nähe von 12 PS liegt, und aus einem mit der Belastung zunehmenden Werte, welcher durch die Größe $c \cdot E_1^2$ gegeben ist. Die konstanten Werte $V_{D(0)}$ und c aus der Relation:

$$V_D = V_{D(0)} + c \cdot E_1^2$$

werden aus den bekannten Werten für den totalen Verlust V_D und den totalen elektrischen Effekt E_1 nach der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt.

Die unten folgende Tabelle IV enthält die Größe des Wirkungsgrades η_D der Dynamo, ohne Berücksichtigung des Erregereffektes, wie schon oben erwähnt, also lediglich als Verhältnis $\frac{\text{gesamter elektr. Effekt}}{\text{Bremsseffekt}}$

Tabelle IV. Wirkungsgrad der Dynamo.

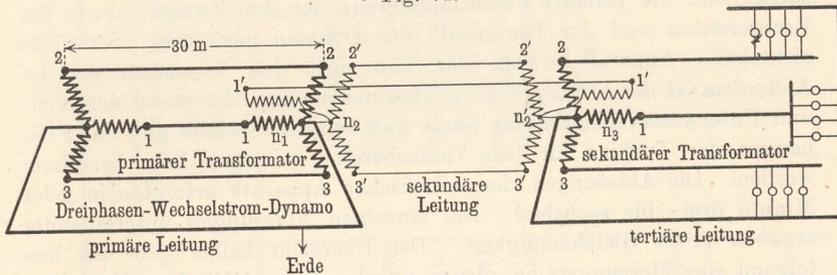
Gesamte elektrische Leistung PS	Verlust = Brems- effekt — elektr. Effekt PS	Wirkungs- grad η_D	Bremseffekt N_1 PS	Wirkungs- grad η_D
60	12,32	0,830	70	0,825
70	12,35	0,850	80	0,845
80	12,38	0,866	90	0,862
90	12,42	0,879	100	0,876
100	12,46	0,889	110	0,887
110	12,50	0,898	120	0,896
120	12,55	0,905	130	0,903
130	12,61	0,911	140	0,910
140	12,67	0,917	150	0,916
150	12,73	0,922	160	0,921
160	12,80	0,926	170	0,925
170	12,87	0,930	180	0,929
180	12,95	0,933	190	0,932
190	13,03	0,935	200	0,934

und zwar in Abhängigkeit von der Bremsleistung und der gesamten elektrischen Leistung. Die Größe des Bremseffektes variierte bei den Untersuchungen zwischen 78 und 197 PS, dementsprechend sind die Werte in der Tabelle für die Bremsleistung bzw. elektrische Gesamtleistung bis auf 200 bzw. 190 PS eingetragen, trotzdem die gemessenen Werte für die Dynamogrößen etwa 40 PS tiefer liegen. In Ermangelung genauere Daten ist diese Ausnahme eingeführt worden. Die normale Leistung der Dynamo (300 PS) soll bei einer Tourenzahl 150 und einer Spannung von 55 Volt eintreten. Würde die oben abgeleitete Relation zwischen dem totalen Verluste und der gesamten elektrischen Leistung der Dynamo auch bei 300 PS Gültigkeit behalten, so wäre der normale Wirkungsgrad der Dynamo $\eta_D = 0,954$.

C. Wirkungsgrad der Transformatoren der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft und der Oerlikon-Aktien-Gesellschaft.

Zur Bestimmung des Wirkungsgrades der zwei Transformatoren der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft von je 100 Kilowatt Leistung, welche dazu dienten, die von der Dynamo in dieselben eingeführte Niederspannungsenergie als Hochspannungsenergie fortzuführen, wurde

Fig. 71.



folgende Schaltungsweise angewandt. Die drei Polklemmen der Dynamo wurden durch ein Kupferkabel von etwa 30 m Länge und 400 mm^2 Querschnitt mit den drei primären Klemmen eines Transformators und die sekundären Klemmen desselben mit den drei sekundären Klemmen des anderen Transformators auf kürzestem Wege verbunden. Die drei primären Klemmen des letzteren wurden mit einem Pole mittels dreier Zweige einer tertiären Leitung mit der Glühlampenbatterie verbunden, welche bereits bei den Untersuchungen an der Dynamo als Belastungswiderstand angewandt worden war; das andere Ende der Glühlampenbatterie war durch die neutrale Leitung mit dem neutralen Knotenpunkt des zweiten Transformators verbunden. Der neutrale Knotenpunkt des ersten Transformators war mit dem neutralen Knotenpunkt der Dynamo in Kontakt. Das Schema der Schaltung ist aus beifolgender Fig. 71 zu ersehen.

Es bezeichnen: 1, 2, 3 die drei Polklemmen der Dynamo bzw. die drei primären Klemmen des ersten bzw. die primären Klemmen des zweiten Transformators, 1', 2', 3' die sekundären Klemmen des ersten bzw. des zweiten Transformators.

Der Effekt in den Zuleitungskabeln von der Dynamo bis zum ersten Transformator bestimmte sich mittels Einschaltung je eines Wattmeters mit der Hauptleitung in je ein Zuleitungskabel bzw. mit der Nebenleitung an die Enden der zugehörigen Kabel und je eines Präzisionsampèremeters in die Zuleitungskabel zu

2,36 PS, 1,57 PS, 0,77 PS und 0,32 PS,

bei den mittleren Stromstärken in den primären Zuleitungskabeln von 662 Amp. 540 Amp. 377 Amp. und 244 Amp.

Zur Bestimmung des Wirkungsgrades der Transformatoren wurden die oben benutzten Wattmeter in die drei tertiären Leitungen mit festen Windungen direkt und mit der Wattmeternebenleitung — welche bei allen Messungen einen Gesamtwiderstand von 1000 Ohm besaß — an den Anfang des betreffenden Zweiges mit einem Ende und an den Anfang der neutralen Leitungen eingeschaltet. Die Voltmeter zur Feststellung der tertiären Spannung lagen an denselben Punkten wie die Wattmeternebenleitungen. Gleichzeitig wurde die primäre Stromstärke und die primäre Potentialdifferenz der drei Zweige, sowie der Erregerstrom und die Tourenzahl der Dynamo gemessen. Sämtliche elektrische Apparate waren vor und nach den Versuchen geeicht. Außerdem ist die Art der Turbinenbeaufschlagung, der Stand des Ober- und Unterwasserspiegels, das totale und benutzte Gefälle und das Freihängen der Turbine für jede Versuchsreihe gemessen bzw. berechnet worden. Die Ablesungen der elektrischen Apparate erfolgten in jeder Minute drei- bis sechsmal. Die einzelnen Ablesungen untereinander ergaben große Gleichmäßigkeit. Der Übersicht halber gebe ich beifolgend eine Messungsreihe, deren einzelne Werte Mittelwerte aus den für jede Minute erfolgten Ablesungen bedeuten (s. Tabelle I, S. 127). Auf diese Weise sind 16 Messungsreihen aufgestellt worden. Die durch dieselben enthaltenen Resultate finden sich in Tabelle II (S. 128). In derselben bezeichne: E'_1 den auf den ersten Transformator von der Dynamo übertragenen Effekt — Unterschied zwischen dem von der Dynamo geleisteten und dem Energieverlust in den primären Zuleitungskabeln —, $i_{1(m)}$ und $e_{2(m)}$ die Mittelwerte der Stromstärke und Spannung in den drei primären Zweigen, e_3 die an einem Zweige gemessene tertiäre Spannung, $\Sigma(E_V)$ die Summe der Effektverluste in den zwei hintereinandergeschalteten Transformatoren und η'_T und η''_T die Wirkungsgrade der zwei Transformatoren. Eine Bremsung der Turbine bei der Beaufschlagung: Innenkranz zu $\frac{2}{6}$ geöffnet, konnte nicht erfolgen; es konnten somit die Werte für den Bremseffekt und den Wirkungsgrad der Dynamo in die IV. Versuchsgruppe nicht eingetragen werden. Die

Tabelle I.

Zeitdauer	Vom zweiten A. E.-G.- Transformator ausgehener Effekt im Zweige			Tertiäre Spannung in d. 3 Gruppen			Primäre Stromstärke im Zweige			Primäre Potentialdifferenz im Zweige			Erregerstrom	Tourenzahl	Turbinen- beaufschlagung	Stand des Oberwassers	Stand des Unterwassers	Totale Gefälle	Benutztes Gefälle	Freihängen der Turbine			
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III									Amp.	Volt	Amp.
10	Widerstand der Nebenleitung 1000 Ohm																						
	117,83	117,85	121,07	120,92	126,02	126,01	56,0	666	660	662	58,1	58,3	58,6	18,7	149,8	3/8 des Innenkranzes; Außenkranz geschlossen;	0,500	0,499					
	117,94	117,87	120,88	120,97	126,18	126,22	56,0	666	660	661	57,9	58,2	58,2	18,4	150,0		0,499	0,502					
							56,1	666	661	660	57,9	58,1	58,4	18,9	150,2		0,494	0,508					
		117,85	117,81	120,97	121,02	126,11	126,10	55,9	668	662	660	58,1	58,1	58,4	18,7	150,2		0,494	0,512				
		117,99	117,94	120,96	120,99	126,22	126,21	55,8	667	657	660	58,2	58,1	58,3	18,7	150,2		0,495	0,510				
	117,79	117,89	120,78	120,90	126,03	126,15	55,8	666	661	660	58,0	58,4	58,5	18,7	150,5		0,496	0,506					
	Mittel 117,88		120,94		126,12		55,9	666	660	660	58,0	58,2	58,4	18,7	150,1		0,496	0,506	3,975	3,811	0,165		
<p>Unter Berücksichtigung der Eichungs-konstante betragen die Energien: 31 108 Watt 31 227 Watt 30 950 Watt in Summa: 93 285 Watt = 126,75 PS</p>																							
															Totales Gefälle: 4,977 — (Oberw. + Unterw.)			Benutztes Gefälle: 4,306 — (Oberwasser)			Bremsseffekt: $151,1 \left(\frac{3,811}{3,800} \right)^{1,5} = 151,7 \text{ PS.}$		

Bestimmung der Werte für die gesamte von der Dynamo geleistete elektrische Arbeit bei der oben erwähnten Beaufschlagung ist bei Untersuchung des Wirkungsgrades der Dynamo erfolgt. Die beobachteten Werte waren:

Turbinen- beaufschlagung	Tourenzahl	Benutztes Gefälle z_b m	Freihängen der Turbine m	Von der Dynamo ge- leisteter Effekt E_1 PS
Innenkranz . . . $\frac{2}{6}$	150,0	3,882	0,191	49,34
" . . . $\frac{2}{6}$	149,7	3,883	0,194	49,46
Mittel		3,8825		49,40

Unter der Versuchsgruppe IV bei Bestimmung des Wirkungsgrades der Transformatoren waren folgende Werte gefunden:

Turbinen- beaufschlagung	Tourenzahl	Benutztes Gefälle z_b PS	Freihängen der Turbine m	Von der Dynamo ge- leisteter Effekt E_1 PS
Innenkranz . . . $\frac{2}{6}$	149,9	3,863	0,228	(49,04)
" . . . $\frac{2}{6}$	149,6	3,860	0,243	(48,98)
" . . . $\frac{2}{6}$	150,0	3,862	0,243	(49,02)
" . . . $\frac{2}{6}$	150,0	3,861	0,241	(49,00)

Für gleiche Tourenzahl und Beaufschlagung der Turbine besteht die Beziehung:

$$\frac{N'_1}{N''_1} = \left(\frac{z'_b}{3,80}\right)^{1,5} : \left(\frac{z''_b}{3,80}\right)^{1,5}$$

Ferner gilt für die Werte von z'_b und z''_b , welche so geringe Unterschiede der Werte von E'_1 und E''_1 ergeben, daß der Wirkungsgrad der Dynamo für beide denselben Wert beibehält, auch die Beziehung:

$$\frac{E'_1}{E''_1} = \left(\frac{z'_b}{3,80}\right)^{1,5} : \left(\frac{z''_b}{3,80}\right)^{1,5}$$

Aus dieser Beziehung sind die eingeklammerten Werte obiger Tabelle aus den Resultaten für $z_b = 3,882$ und $E_1 = 49,40$ PS bei der Dynamountersuchung gewonnen worden.

Innerhalb eines Intervalles der Belastung, in welchem der Wirkungsgrad auf einem längeren Bereiche der Belastung konstant bleibt, konnte der Wirkungsgrad des ersten Transformators, welcher den Effekt E'_1 aufnimmt und den Effekt E_2 abgibt, ohne merklichen Fehler gleich dem Wirkungsgrade des zweiten Transformators gesetzt werden; dieser letztere empfängt den Effekt E_2 und leistet den Effekt E_3 an die äußere

tertiäre Leitung. Die Änderung des Wirkungsgrades über halbe Voll-
last hinaus ist sehr gering. Aus den Relationen

$$\eta'_T = \frac{E_2}{E'_1} \quad \text{und} \quad \eta''_T = \frac{E_3}{E_2} \quad \text{erhält man} \quad \eta'_T \cdot \eta''_T = \frac{E_3}{E'_1}.$$

Für den soeben erwähnten Fall, woselbst, wie aus den erhaltenen
Resultaten erhellt, $\eta'_T = \eta''_T = \eta_T$ gesetzt werden darf, ist also

$$\eta_T = \sqrt{\frac{E_3}{E'_1}}.$$

Die Mittelwerte der einzelnen Resultate sind in der folgenden
Tabelle III zusammengestellt:

Tabelle III.

Aufgenommener Effekt E'_1 PS	Abgegebener Effekt E_3 PS	Wirkungsgrad η_T	Effektverlust im zweiten Trans- formator V''_T
136,75	126,18	0,961	5,12
104,36	96,04	0,959	4,11
73,36	66,92	0,955	3,15
48,69	43,62	0,947	2,49

Für die Leistungen $\frac{1}{2}(E_3 + E'_1)$, d. h. für die Werte 46,1; 70,1;
100,2 und 131,4 PS erhält man für $\eta_T = 0,961; 0,959; 0,955$ und $0,947$
und für $E_3 = 126,2; 96,0; 66,9$ und $43,6$ erhält man für $\eta_T = 0,961;$
 $0,959; 0,955$ und $0,946$. Mit diesen letzteren Werten von η_T sind
die Verluste V''_T des zweiten Transformators mittels der Beziehung
 $V''_T = (E_3 : \eta_T) - E_3$ erhalten worden. Zur Ermittlung des Wirkungs-
grades des Oerlikon-Transformators unter Benutzung der Resultate der
A. E.-G.-Transformatoren ist es notwendig, für den zweiten A. E.-G.-
Transformator die Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der gelieferten
Leistung E_3 zu kennen. Der Gesamtverlust V_T setzt sich aus dem
Kupferverlust $V_{T(K)}$ — primären und sekundären Windungen — und
aus dem Hysteresis- und Foucault-Verlust $V_{T(H+F)}$ zusammen. Wie
früher schon von mir ¹⁾ dargetan, ist der zweite Teil des Verlustes bei
konstanter primärer Spannung und Periodenzahl unabhängig von der
Leistung des Transformators; hingegen steht der erste Teil des Ver-
lustes nicht in so einfacher Beziehung zur Leistung E_3 .

Nach der Fig. 71 bezeichnen n_1 die Zahl der primären Windungen,
 n_2 und n'_2 die Zahlen der zu der sekundären Leitungsbahn vereinigten
Windungen und n_3 die Zahl der tertiären Windungen. Bei induktions-
freien Leitungen bestehen zwischen der effektiven primären Stromstärke i_1
und sekundären i_2 zu der tertiären Stromstärke i_3 folgende Relationen:

¹⁾ Lehmann-Richter, „Prüfungen in elektr. Zentralen usw.“, S. 156,
157 u. 160.

$$i_1^2 = i_{1,l}^2 + \left(\frac{n_3}{n_2} \cdot \frac{n_2}{n_1} \cdot i_3 \right)^2 + 2 \frac{n_3}{n_2} \cdot \frac{n_2}{n_1} \cdot i_3 \cdot i_{1,l} \cdot \sin(2\pi n x),$$

$$i_2^2 = i_{2,l}^2 + \left(\frac{n_3}{n_2} \cdot i_3 \right)^2 + 2 \frac{n_3}{n_2} \cdot i_3 \cdot i_{2,l} \cdot \sin(2\pi n x).$$

Es seien: R_1, R_2, R_3 die Widerstände und L_1, L_2, L_3 die Selbstinduktionskoeffizienten der primären, sekundären und tertiären Leitung, r_1, r_2, r_2' und r_3' die Widerstände der primären Wicklungen des ersten Transformators, der sekundären Wicklungen des ersten bzw. des zweiten Transformators und die primären Wicklungen des zweiten Transformators, $i_{1,l}$ und $i_{2,l}$ die in den primären und sekundären Wicklungen auftretenden Leerlaufstromstärken und $2\pi n x$ der Winkel der magnetischen Verzögerung. Ferner gelten die Annahmen, daß der Wert

$\frac{R_1}{2\pi n L_1}$ als verschwindend klein im Verhältnisse zu 1 ist und der Wert $\frac{2\pi n L_3}{R_3}$ gegenüber dem Werte $\frac{2\pi n L_2}{R_2}$ vernachlässigt werden kann.

Für den Kupferverlust der zwei Transformatoren bestehen die Werte $(r_1 \cdot i_1^2 + r_2 i_2^2)$ und $(r_2' i_2^2 + r_3' \cdot i_3^2)$ und da außerdem $i_3 \cdot e_3 = E_3$ ist und für die großen Belastungen der Transformatoren die Gleichung

$i_2 = \frac{n_3}{n_2} \cdot i_3$, ohne großen Fehler zu begehen, gesetzt werden darf, so

läßt sich $V_{T(K)}$ durch

$$V_{T(K)} = \left(r_2' \cdot \frac{n_3^2}{(n_2')^2} + r_3' \right) i_3^2 = \frac{1}{e_3^2} \left(r_2' \cdot \frac{n_3^2}{(n_2')^2} + r_3' \right) \cdot E_3^2 = a \cdot E_3^2$$

ausdrücken.

Zwischen den Werten $V_{T(H+F)}$, $V_{T(K)}$ und V_T besteht die Gleichung: $V_T = V_{T(H+F)} + V_{T(K)}$ oder $V_T = V_{T(H+F)} + a \cdot E_3^2$.

Aus den früher gefundenen Werten für V_T und E_3 bei dem zweiten Transformator, nämlich

$$\begin{aligned} V_T &= 5,12, & 4,11, & 3,15, & 2,49 \text{ PS,} \\ E_3 &= 126,20, & 96,00, & 66,90, & 43,60 \text{ PS,} \end{aligned}$$

bestimmen sich nach der Methode der kleinsten Quadrate die Werte $V_{T(H+F)}$ und a zu 2,26 und 0,000 185.

Die Differenz der gemessenen und berechneten Werte für V_T bei den betreffenden Belastungen E_3 war so klein, daß die Formel

$$V_T = V_{T(H+F)} + a \cdot E_3^2$$

für die betreffenden Belastungsgrenzen durchaus anwendbar war.

Zum späteren Gebrauche seien die Werte für E_3 von 40 bis 150 PS, des Verlustes V_T und der Wirkungsgrade η_T in einer Tabelle gegeben (s. S. 132 oben).

Ich gehe jetzt zu den Versuchen an dem Oerlikon-Transformator über. An Stelle des ersten Transformators der A. E.-G. im Schaltungs-

Leistung PS	Verlust PS	Wirkungs- grad	Bemerkungen
40	2,56	0,940	Bei normaler Belastung 100 Kilowatt \sim 140 PS ist der Wirkungsgrad des A. E.-G.-Transformators also 96,0 Proz. Bei dem maximalen Wirkungsgrade von 96,1 Proz. sind die Eisen- und Kupferverluste gleich groß. Von $\frac{1}{2}$ -Normalbelastung bis zu 120 PS steigt der Wirkungsgrad nur von 95,7 bis 96,1 Proz., von da ab fällt derselbe auf 96,0 Proz. bei der normalen Belastung.
50	2,72	0,948	
60	2,92	0,954	
70	3,16	0,957	
80	3,44	0,959	
90	3,76	0,960	
100	4,11	0,960	
110	4,50	0,961	
120	4,92	0,961	
130	5,39	0,960	
140	5,89	0,960	
150	6,43	0,959	

schema Fig. 71 tritt der Oerlikon-Transformator. Die Entfernung der Verbindung zwischen der Dynamo und den primären Klemmen des Transformators wurde so klein gehalten (etwa 2 m), daß der Energieverlust in diesem starken Zuleitungskabel vernachlässigt werden konnte. Es wurden je drei Beobachtungsreihen mit einer Turbinenbeaufschlagung von $\frac{5}{6}$ und $\frac{4}{6}$ des Innenkranzes mit geschlossenem Außenkranz und je zwei mit einer Beaufschlagung von $\frac{3}{6}$ und $\frac{2}{6}$ des Innenkranzes und geschlossenem Außenkranz ausgeführt. Analog den vorhergehenden Untersuchungen seien ein Versuchsprotokoll (Tabelle IV, S. 133) und die Übersicht der Gesamtergebnisse tabellarisch (Tabelle V, S. 134) gegeben. In der Tabelle bezeichnet $\eta_{T(a)} = \frac{E_3}{E_2}$ den Wirkungsgrad des zweiten A. E.-G.-Transformators, $\eta_{T(o)} = \frac{E_2}{E_1}$ den Wirkungsgrad des Oerlikon-Transformators, E_2 den ausgegebenen Effekt des letzteren. Da $\eta_{T(a)} = \frac{E_3}{E_2}$ und $\eta_{T(o)} = \frac{E_2}{E_1}$ ist, so besteht die Relation:

$$\eta_{T(o)} \cdot \eta_{T(a)} = \frac{E_3}{E_1};$$

ferner ist, wie oben gezeigt, der Wert

$$\eta_{T(a)} = E_3 : (E_3 + 2,26 + 0,000185 E_3^2)$$

ableitbar.

Zur Bestimmung des Gesamtverlustes im Oerlikon-Transformator aus den Verlusten beider Transformatoren $\Sigma(V)$ ist der Wert $2,26 + 0,000185 E_3^2$ (s. Spalte 12 der Tabelle, S. 134) von $\Sigma(V)$ in Abzug zu bringen. Die Mittelwerte des Gesamtverlustes $E_1 - E_2$ und die anderen Werte findet man in folgender Zusammenstellung (S. 135):

Tabelle IV.

Zeitdauer	Vom zweiten A. E.-G.-Transformator abgegebener Effekt im Zweige			Tertiäre Spannung im Zweige			Primäre Stromstärke im Zweige			Primäre Potentialdifferenz im Zweige			Erregerstrom	Tourenzahl	Turbinen-beaufschlagung	Stand des Oberwassers	Stand des Unterwassers	Totales Gefälle %	Benutztes Gefälle %	Freihängen der Turbine						
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III									Amp.	Volt	Amp.	m	m	m
	= 1000 Ohm																									
10	119,18	119,51	122,65	123,93	126,31	127,86	54,6	660	643	649	56,4	57,6	57,6	15,6	152,0	0,499	0,524									
	119,30	119,51	123,50	124,13	127,21	127,57	54,5	661	648	652	56,9	57,8	57,8	15,3	150,2	0,470	0,537									
	119,51	119,30	123,00	123,95	127,90	127,60	54,5	660	650	654	57,0	57,7	57,6	15,8	149,5	0,461	0,547									
	119,66	119,68	124,08	123,81	128,34	127,73	54,4	661	648	654	56,8	57,7	57,6	15,9	149,5	0,470	0,553									
	119,96	119,65	123,93	123,80	128,36	127,65	54,5	660	651	652	57,0	57,8	57,7	15,7	150,0	0,470	0,553									
Mittel	119,53		123,68			127,65	54,5	660	649	652	56,8	57,7	57,6	15,7	150,2	0,474	0,543	3,960	3,832	0,128						
<p>Unter Berücksichtigung der Eichungskonstanten tragen die Energien:</p> <p>$E_{3,1}$ $E_{3,2}$ $E_{3,3}$</p> <p>= 31520 Watt = 31885 Watt = 31338 Watt</p> <p>in Summa: $E_3 = 94743$ Watt = 128,73 PS</p>																										
																		<p>Totales Gefälle:</p> <p>4,977 — (Oberw. + Unterw.)</p>			<p>Benutztes Gefälle:</p> <p>4,306 — Oberwasser</p>			<p>Bremsseffekt:</p> <p>$151,1 \left(\frac{3,832}{3,800} \right)^{1,5} = 153,0$ PS.</p>		

i_1	E_1	E_2	$E_1 - E_2$	$\eta_{T(o)}$
Amp.	PS	PS	PS	
654	140,42	134,16	6,26	0,956
480	105,78	99,67	6,11	0,942
341	73,61	68,32	5,29	0,928
234	48,79	44,40	4,39	0,910

Die Scheidung des Eisenverlustes von dem veränderlichen Kupferverluste drückt sich aus durch die Formel

$$V_T = E_1 - E_2 = V_{T(H+F)} + (r_1 \cdot i_1^2 + r_2 \cdot i_2^2).$$

Erinnern wir uns der früher gegebenen Beziehungen für große Belastungen der Transformatoren, so bestehen folgende Relationen:

$$i_1 = \frac{n_3}{n_2} \cdot \frac{n_2}{n_1} \cdot i_3, \quad i_2 = \frac{n_3}{n_2} \cdot i_3$$

und somit

$$i_2 = \frac{n_1}{n_2} \cdot i_1.$$

Es ist somit für V_T die Form

$$V_T = V_{T(H+F)} + b \cdot i_1^2$$

gestattet.

Aus den soeben gegebenen Werten für V_T und i_1 ermitteln sich nach der Methode der kleinsten Quadrate die Werte

$$V_{T(H+F)} = 4,56 \quad \text{und} \quad b = 0,000\,004\,58.$$

Der Unterschied der beobachteten und der nach obiger Formel berechneten Werte für V_T ist so gering, daß die Anwendung der letzteren, ohne große Fehler zu begehen, gestattet ist; derselbe beträgt im Mittel 0,34 PS, allerdings sind in diesem Mittelwerte alle Fehler in der Bestimmung der Verluste der letzteren Transformatoren, bei welchen auch

Tabelle VI.

Leistung PS	Wirkungs- grad	Leistung PS	Wirkungs- grad	Bemerkungen
50	0,913	140	0,954	Bei der normalen Leistung von 207 PS entsprechend 152 Kilowatt betrug der Wirkungsgrad somit 95,7 Prozent.
60	0,923	150	0,955	
70	0,932	160	0,956	
80	0,938	170	0,957	
90	0,943	180	0,957	
100	0,946	190	0,957	
110	0,949	200	0,957	
120	0,951	210	0,957	
130	0,953	220	0,957	

Tabelle I. Versuche über den Leerlauf der Lauffener Trans-

formatoren der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft.

Versuchsnummer	Zeit (Versuchsdauer) Min.	Mittlere Tourenzahl der Dynamomaschine (gezählt)	Turbinen- beauf- schlagung		Scheinbarer						Effekt			Summe der Effekte Watt	Erreger- stromkreis			Spannung am Schaltbrett			Mittlere Spannung am Schaltbrett	Bemerkungen	
					Stromkreis I			Stromkreis II			Stromkreis III				Volt	Amp.	Watt	Volt					
					Wattmeter I			Wattmeter II			Wattmeter III							Stromkreis I	Stromkreis II	Stromkreis III			
					Mittlere Ablesung	Widerstand im Nebenschluß	Watt	Mittlere Ablesung	Widerstand im Nebenschluß	Watt	Mittlere Ablesung	Widerstand im Nebenschluß	Watt										
12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23												
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	
2	7	87,8	19/12 reguliert durch die Schützen		8,35	500	1180	9,04	500	1220	8,52	500	1160	3560	40,7	22,2	904	37,3	37,2	37,3	37,3	1. Der Stromkreis der Nebenspule der Wattmeter war an d. Schaltbrett angeschlossen; das Cardew-Voltmeter desgl.	
3	7	88,4			8,22	500	1170	9,12	500	1230	8,51	500	1160	3560	41,1	22,2	912	37,6	37,6	37,6	37,6		37,6
4	7	90,2			5,75	500	820	6,41	500	860	5,78	500	790	2470	14,4	7,8	112	29,1	29,1	29,1	29,1		29,1
5	7	90,1			5,61	500	800	6,43	500	870	5,99	500	820	2490	14,4	7,8	112	29,0	29,0	29,1	29,0		29,0
6	6	109,8			5,25	500	750	5,95	500	800	5,52	500	750	2300	9,4	5,1	48	29,1	29,2	29,1	29,1		29,1
7	7	110,3			7,66	500	1090	8,51	500	1150	7,88	500	1070	3310	16,2	9,2	149	37,9	37,9	38,0	37,9		37,9
8	7	152,2			6,98	500	990	7,48	500	1010	7,19	500	980	2980	8,2	4,7	39	38,6	38,4	38,5	38,5		38,5
9	8	150,7			4,54	500	650	5,19	500	700	4,98	500	680	2030	6,0	3,5	21	29,1	29,1	29,3	29,2		29,2
10	7	94,7			9,54	500	1360	10,78	500	1460	10,06	500	1370	4190	69,0	37,5	2590	42,6	42,7	42,7	42,7		42,7
11	6	93,5			9,48	500	1350	10,79	500	1460	10,02	500	1360	4170	69,6	37,0	2575	42,4	42,0	42,1	42,2		42,2
12	6	108,6			11,32	500	1610	12,66	500	1710	11,81	500	1610	4930	63,4	32,9	2080	48,9	48,9	48,8	48,9		48,9
13	6	108,4			11,17	500	1590	12,69	500	1720	11,70	500	1590	4900	63,7	32,7	2080	48,5	48,5	48,6	48,5		48,5
14	7	114,8	9,38	500	1330	10,46	500	1410	9,68	500	1320	4060	20,2	11,3	228	43,9	43,9	44,0	43,9	43,9			
15	6	115,2	9,35	500	1330	10,49	500	1420	9,63	500	1310	4060	20,6	11,5	237	44,0	44,1	44,0	44,0	44,0			
16	5	149,8	8,68	500	1230	9,64	500	1300	8,93	500	1220	3750	11,0	6,3	69	44,4	44,4	44,5	44,4	44,4			
17	7	148,8	8,56	500	1220	9,57	500	1290	8,91	500	1210	3720	11,1	6,6	73	44,1	44,0	44,0	44,0	44,0			
18	6	153,8	10,25	500	1460	11,25	500	1520	10,50	500	1430	4410	13,0	7,5	98	49,6	49,4	49,7	49,6	49,6			
19	6	161,0	10,63	500	1510	11,85	500	1600	11,03	500	1500	4610	13,2	7,7	102	51,7	51,8	52,0	51,8	51,8			
20	6	119,3	10,75	500	1530	11,67	500	1580	11,00	500	1500	4610	27,8	15,4	428	47,9	47,8	48,1	47,9	47,9			
21	5	119,7	10,55	500	1500	11,92	500	1610	10,97	500	1490	4600	27,2	15,0	408	47,9	48,0	48,0	48,0	48,0			
22	7	104,1	11,16	500	1590	12,53	500	1690	11,19	500	1520	4800	26,8	15,0	3070	47,5	47,4	47,4	47,4	47,4			
23	6	104,2	10,99	500	1560	12,47	500	1680	11,27	500	1530	4770	26,8	15,0	3030	47,4	47,3	47,4	47,4	47,4			
24	6	117,0	8,49	750	1810	9,54	750	1930	8,60	750	1750	5490	80,0	39,1	3130	53,2	53,2	53,3	53,2	53,2			
25	5	117,0	8,48	750	1810	9,54	750	1930	8,60	750	1750	5490	79,8	38,8	3100	53,3	53,2	53,1	53,2	53,2			
26	6	138,5	7,76	750	1650	8,72	750	1770	8,04	750	1640	5060	22,2	11,0	244	53,0	52,7	52,8	52,8	52,8			
27	6	137,6	7,71	750	1640	8,55	750	1730	7,99	750	1630	5000	21,6	10,9	235	52,2	52,2	52,3	52,2	52,2			
28	4	162,4	7,40	750	1580	8,40	750	1700	7,87	750	1600	4880	15,4	8,0	123	53,3	53,1	53,3	53,2	53,2			
29	3	160,5	7,56	750	1610	8,48	750	1720	7,90	750	1610	4940	15,8	8,0	126	53,4	53,4	53,4	53,4	53,4			

1. Der Stromkreis der Nebenspule der Wattmeter war an d. Schaltbrett angeschlossen; das Cardew-Voltmeter desgl.

2. Stromverhältnisse waren sehr konstant.

3. Die Nebenspulen der Wattmeter waren mit den primären Klemmen der Transformatoren in Verbindung. Das Cardew-Voltmeter war wie bisher an das Schaltbrett angeschlossen.

Tabelle II. Versuche über den Leerlauf des Lauffener

Versuchsnummer	Zeit (Versuchsdauer) Min.	Mittlere Tourenzahl der Dynamomaschine (gezählt)	Turbinenbeaufschlagung		Scheinbarer					
					Stromkreis I			Stromkreis II		
			Innenkranz	Außenkranz	Wattmeter I			Wattmeter II		
					Mittlere Ablesung	Widerstand im Nebenschluß	Watt	Mittlere Ablesung	Widerstand im Nebenschluß	Watt
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2	6	150,6	} ganz offen, reguliert durch die Schützen	}	4,09	750	870	4,65	750	940
3	5	148,6			4,07	750	870	4,60	750	930
4	6	118,8			4,78	750	1020	5,37	750	1090
5	4	119,0			4,80	750	1020	5,26	750	1070
6	6	118,9			4,64	750	990	5,22	750	1060
7	5	148,6			6,60	750	1410	7,38	750	1490
8	5	148,8			6,53	750	1390	7,44	750	1510
9	6	170,5			6,41	750	1370	7,32	750	1480
10	5	170,5			6,30	750	1340	7,36	750	1490

Tabelle III. Scheinbarer Leerlaufeffekt (Kilowatt) zweier in Reihe geschalteter Transformatoren der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft bei variabler Spannung und Periodenzahl. (Aus den Wattmeterangaben,

Spannung in Volt	Touren und Periodenzahl pro Minute							
	90	100	110	120	130	140	150	160
	1440	1600	1760	1920	2080	2240	2400	2560
16000	2,54	2,39	2,27	2,18	2,10	2,04	2,00	
16500	2,65	2,50	2,37	2,28	2,20	2,14	2,09	
17000	2,75	2,60	2,47	2,38	2,30	2,23	2,18	
17500	2,86	2,70	2,57	2,48	2,39	2,32	2,27	
18000	2,96	2,81	2,68	2,58	2,49	2,42	2,37	
18500	3,06	2,91	2,78	2,68	2,59	2,52	2,46	
19000	3,16	3,02	2,89	2,78	2,69	2,62	2,55	
19500	3,27	3,12	2,99	2,88	2,79	2,71	2,65	
20000	3,37	3,23	3,09	2,99	2,89	2,81	2,75	
20500	3,47	3,33	3,20	3,07	2,98	2,90	2,84	
21000	3,57	3,43	3,30	3,18	3,07	2,99	2,92	
21500	3,69	3,53	3,41	3,30	3,19	3,10	3,03	
22000	(3,85)	3,65	3,52	3,40	3,30	3,22	3,15	
22500		3,76	3,63	3,51	3,42	3,33	3,27	

Transformators der Maschinenfabrik „Oerlikon“.

Effekt	Stromkreis III			Summe der Effekte Watt	Erregerstromkreis			Spannung am Schaltbrett			Bemerkungen
								Volt			
	Wattmeter III				Volt	Amp.	Watt	Stromkreis I	Stromkreis II	Stromkreis III	
	Mittlere Ablesung	Widerstand im Nebenschluß	Watt								
12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
4,45	750	910	2720	15,9	8,8	140	52,6	52,5	52,7	52,6	Schaltung der Wattmeter und des Cardew-Voltmeters wie in den Versuchsreihen Tabelle I.
4,30	750	880	2680	16,0	8,8	140	51,9	51,9	51,9	51,9	
4,95	750	1010	3120	53,8	28,7	1540	52,5	52,5	52,6	52,5	
4,95	750	1010	3100	53,8	28,5	1530	52,5	52,5	52,5	52,5	
4,90	750	1000	3050	50,9	24,7	1260	52,1	52,2	52,2	52,2	
6,85	750	1400	4300	76,0	38,8	2950	68,1	68,1	68,0	68,1	
6,85	750	1400	4300	75,9	38,1	2890	67,8	67,9	67,9	67,9	
6,85	750	1400	4250	33,0	17,1	560	71,1	71,1	71,2	71,1	
6,85	750	1400	4230	32,4	17,0	560	70,5	70,4	70,5	70,5	

geschalteter Transformatoren der Allgemeinen Elektrizitäts-Spannung und Periodenzahl. Tabelle I, interpoliert.)

Spannung in Volt	Touren und Periodenzahl pro Minute							
	90	100	110	120	130	140	150	160
	1440	1600	1760	1920	2080	2240	2400	2560
23000		3,89	3,74	3,62	3,53	3,45	3,39	
23500		4,02	3,85	3,72	3,63	3,56	3,51	
24000		4,16	3,95	3,83	3,74	3,67	3,63	
24500	(4,65)	4,30	4,10	3,95	3,85	3,78	3,74	
25000		4,47	4,24	4,08	3,98	3,92	3,86	
25500		4,64	4,40	4,24	4,13	4,04	3,98	
26000		4,77	4,55	4,39	4,26	4,16	4,09	
26500			4,71	4,54	4,41	4,30	4,21	
27000	(5,40)	(5,40)	4,87	4,70	4,54	4,43	4,33	
27500			5,02	4,84	4,68	4,56	4,45	
28000			5,17	4,98	4,83	4,69	4,57	4,46
28500			5,32	5,14	4,98	4,82	4,69	4,58
29000				5,28	5,12	4,98	4,84	4,73
29500				5,43	5,27	5,13	5,01	4,91

die Verluste des Oerlikon-Transformators eine Rolle spielen, mit enthalten. Da für große Belastungen i_1 proportional i_2 ist und zwischen i_2 und e_2 (sekundäre Spannung) nur eine geringe Variation der Phasendifferenz besteht, so darf, ohne großen Fehler zu begehen, für $b \cdot i_1^2$ der Ausdruck $c \cdot E_2^2$ gesetzt werden.

Aus der Formel $V_T = V_{T(H+F)} + c \cdot E_2^2$, aus folgenden Werten

$$E_2 = 134,1 \quad 99,7 \quad 68,3 \quad 44,4$$

und aus $V_T = 6,26 \quad 6,11 \quad 5,29 \quad 4,39$

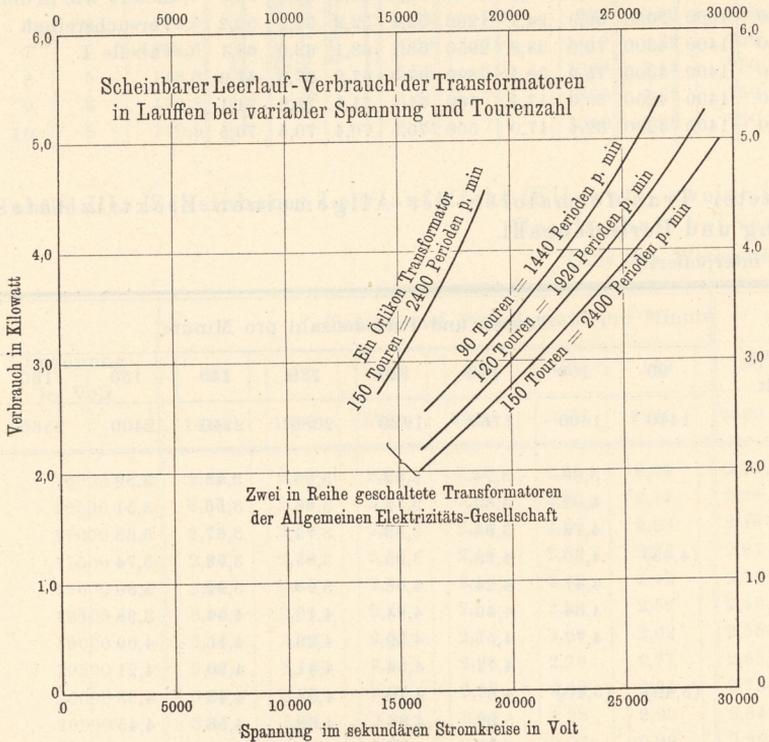
finden sich die Konstanten $V_{T(H+F)} = 4,60$ und $c = 0,0001075$.

Die vorstehende Tabelle VI (S. 135) gibt die einzelnen Wirkungsgrade bei verschiedenen Belastungen.

D. Leerlaufverbrauch der Transformatoren in Lauffen a. N.

Da die Ermittlung der Leerlaufarbeit der Anlage und zwar besonders der Transformatoren in der Zentrale Lauffen zu interessanten

Fig. 72.



Ergebnissen führte, so gebe ich noch einen kurzen Überblick über diese Messungen, wengleich dieselben nicht in allen Teilen als einwandfrei wegen der Nichtberücksichtigung des Einflusses der Wirbelströme und

der Hysterisis im Eisen der Transformatoren, sowie der Abweichung der Gestalt der Stromkurve von der Sinuslinie zu betrachten sind. Bei diesen Versuchen wurden folgende Werte mittels geeichter Apparate bestimmt: Tourenzahl der Dynamo, scheinbarer Effekt und die Spannungen in den drei Stromkreisen von der Dynamo zu den Transformatoren mittels dreier Wattmeter, sowie aus diesen die Summe der drei Effekte, die Spannung und Stromstärke des Erregerstromkreises.

Die Resultate sind in den Tabellen I, II und III (S. 136 bis 139) zusammengestellt.

Wie schon oben gesagt, sind die sekundären Einflüsse bei Ermittlung der Effektverluste nicht berücksichtigt und die gefundenen Resultate als „scheinbarer Effekt“ in den Tabellen eingesetzt. Die Werte der Tabelle III (S. 138 u. 139) sind durch Interpolation aus den Tabellenwerten Nr. I graphisch gewonnen. Fig. 72 gibt einen Überblick über den scheinbaren Energieverbrauch der Lauffener Transformatoren für die Tourenzahlen 90, 120 und 150. Die Darstellung für die A. E.-G.-Transformatoren bezieht sich auf zwei in Reihe geschaltete und für den Oerlikon-Transformator auf nur einen. Aus der Tabelle III (S. 138 u. 139) und Fig. 72 ersieht man, daß der Leerlauf der Transformatoren bei konstanter Primärspannung mit der Periodenzahl abnimmt.

E. Wirkungsgrad der gesamten Arbeitsübertragung bei einer Spannung von etwa 25 000 Volt.

Eine der Hauptarbeiten der „offiziellen Prüfungskommission“ war es, den Wirkungsgrad der Lauffener Übertragung bei der Betriebsspannung von etwa 25 000 Volt und einer normalen effektiven Nutzleistung in Frankfurt zu ermitteln. Zur Bestimmung des Wirkungsgrades dienten drei geeichte Wattmeter, mittels derer der verbrauchte Effekt an der Lampenbatterie in Frankfurt gemessen wurde, sowie die beobachteten Ober- und Unterwasserstände und die Umdrehungszahl der Welle, mittels derer der von der Turbine, mit Benutzung der Resultate der schon erfolgten Bremsversuche, abgegebene Effekt berechnet wurde. Außerdem waren geeichte Ampèremeter und Voltmeter vorhanden, welche die Stromstärken in den drei Hauptstromkreisen der Wechselstrommaschine und dem Erregerstromkreise der letzteren, sowie die Spannungen der Hauptstromkreise des Erregerstromkreises und der Nutzspannungen in Frankfurt an der Lampenbatterie bestimmten. Für die erforderlichen Hochspannungsuntersuchungen benutzte man umstehende Schaltung (s. Fig. 73, S. 144). Aus derselben erhellt, daß die Maschine auf die parallel geschalteten Primärwickelungen zweier A. E.-G.-Transformatoren arbeitete und die Sekundärwickelungen der Transformatoren hintereinander geschaltet waren. Analog war die Schaltung der Transformatoren in Frankfurt mit der Fernleitung bzw. der Lampenbatterie.

Voruntersuchungen ergaben, daß man mit einer höheren Tourenzahl als 90 bei einer Spannung von 25 000 Volt, ohne die Primär-

Tabelle I. Lauffener Messungen

Energieübertragung in Lauffen.

Versuchsnummer	Zeit (Versuchsdauer) Min.	Wechselstrommaschine							Tur- bine		Tourenzahl der Dynamo				Effektive Leistung der Turbine PS		Bemerkungen				
		Hauptstromkreise						Erregerstromkreis		Beaufschlagung		Gefällshöhe				gemessen		normal	bei normaler Tourenzahl	umgerechnet auf die gemessene Tourenzahl	
		Ableseungen am Ampèremeter			Ableseungen am Cardew-Voltmeter			Ampère	Weston-Voltmeter	Innenkranz	Außenkranz	Ableseungen		Benutztes Gefälle	Freihängen						
		I	II	III	Volt							Volt im Mittel	Oberwasser			Unterwasser					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
1 a	10	1275	1210	1270	38,08	37,78	38,59	38,15	8,0	15,0	4/12	voll	0,539	0,589	3,767	0,082	92,15	159,3	216,4	178,0	Die Energieübertragung erfolgte mit zwei hintereinandergeschalteten A. E. - G. - Transformatoren. Am Versuchstage war die Witterung hell und trocken. Bei der Unterwasserablesung von weniger als 0,671 m hängt die Turbine frei und das nutzbare Gefälle beträgt 4,306 m. Die berechneten Turbineneffekte sub 21 enthalten einen Fehler von etwa 2,5 Proz. Bei Versuch 4 b waren größere Schwankungen im Wasserstand und in der Tourenzahl vorhanden.
1 b	10	1270	1205	1270	38,02	37,81	38,55	38,13	8,1	15,2	4/12	"	0,558	0,598	3,748	0,073	92,19	158,9	214,3	176,6	
2 a	10	1375	1300	1370	41,01	40,56	41,58	41,05	9,9	18,5	6/12	"	0,599	0,612	3,707	0,059	93,38	158,0	240,9	200,6	
2 b	10	1370	1305	1370	41,14	40,83	41,87	41,28	10,1	19,0	6/12	"	0,615	0,608	3,691	0,063	92,00	157,7	239,5	197,9	
3 a	4	1490	1400	1485	44,12	43,92	44,96	44,33	14,1	26,3	8/12	"	0,599	0,590	3,707	0,081	92,00	158,0	272,8	225,2	
3 b	5	1500	1415	1485	45,26	44,61	45,76	45,21	14,1	26,5	8/12	"	0,548	0,573	3,758	0,098	91,38	159,1	279,2	228,6	
3 c	5	1495	1405	1475	44,68	44,10	45,28	44,69	13,9	25,9	8/12	"	0,558	0,607	3,748	0,064	91,25	158,9	276,5	226,4	
3 d	5	1495	1400	1470	44,33	43,94	44,94	44,40	13,8	25,9	8/12	"	0,570	0,619	3,736	0,052	91,25	158,6	274,6	225,0	
3 e	5	1520	1425	1535	45,37	44,81	45,88	44,25	14,1	26,8	8/12	"	0,515	0,526	3,791	0,145	92,38	159,8	285,0	234,3	
4 a	15	1485	1395	1475	44,62	44,09	45,30	44,67	13,9	26,3	8/12	"	0,549	0,626	3,757	0,045	91,25	159,1	276,6	226,3	
4 b	10	1480	1395	1465	44,48	44,01	45,15	44,55	14,0	26,5	8/12	"	0,557	0,635	3,749	0,036	91,13	158,9	275,3	225,2	
5 a	5	1475	1410	1450	48,00	47,92	48,96	48,29	15,0	28,7	6/12	"	0,553	0,617	3,753	0,054	89,38	159,0	245,0	198,0	
5 b	5	1475	1410	1450	47,92	47,80	48,97	48,23	15,1	28,7	6/12	"	0,555	0,616	3,751	0,055	89,63	159,0	244,9	198,3	
5 c	5	1480	1415	1455	47,94	47,72	48,86	48,17	15,0	28,8	6/12	"	0,556	0,606	3,750	0,065	89,63	158,9	245,3	198,6	
5 d	5	1485	1415	1455	48,00	47,85	49,04	48,30	15,0	28,9	6/12	"	0,557	0,605	3,749	0,066	89,50	158,9	245,2	198,4	

Messungen in Frankfurt.

Versuchsnummer	Zeit (Versuchsdauer) Min.	Nutzleistung in Frankfurt					Spannung am Schaltbrett				Bemerkungen
		Stromkreise Watt			Summe der Leistungen I + II + III		Stromkreise			Mittel	
		I	II	III	Watt	PS	I	II	III		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1 a	10	31900	33020	31460	96380	131,0	51,2	51,8	49,7	50,90	Die angegebenen Werte sind Mittelwerte aus je 30 Ableseungen. — Die eingeschalteten Glühlampen flimmerten ziemlich stark, trotzdem Stromstärke und Spannung konstant waren. Dieses Flimmern erklärt sich durch die geringe Periodenzahl der stromgebenden Dynamo. Zweimal mußten die Messungen unterbrochen werden, weil Hauptbleisicherungen im primären Stromkreise durchgeschmolzen waren. Der Versuch mußte auf Wunsch der Kgl. Württ. Generaldirektion der Verkehrsanstalten abgebrochen werden. — Bei der Effektberechnung (Rubrik 6 u. 7) wurde der Verlust in den Leitungen zwischen den sek. Klemmen der Transformatoren und der Schalttafel in Frankfurt a. M. nicht berücksichtigt. Die Witterung war dauernd gut (kalt und trocken).
1 b	10	31810	32820	31430	96060	130,5	51,0	51,7	49,6	50,77	
2 a	10	36970	38000	36270	111240	151,1	54,7	55,3	53,4	54,47	
2 b	10	36860	37620	36240	110720	150,4	54,7	55,5	53,3	54,50	
3 a	4	42150	43660	43090	128900	175,1	57,9	58,6	56,7	57,73	
3 b	5	43750	44980	43100	131830	179,1	59,0	59,8	57,5	58,77	
3 c	5	43240	44360	43100	130700	177,6	58,5	59,3	57,2	58,33	
3 d	5	42880	44040	42150	129070	175,4	58,5	59,0	56,9	58,13	
3 e	5	44440	45570	43500	133510	181,4	59,6	59,9	57,6	59,03	
4 a	15	43380	44690	42500	129570	176,0	57,1	59,4	57,3	57,93	
4 b	10	42810	43830	42010	128650	174,8	58,2	58,7	56,9	57,93	
5 a	5	37030	36550	34810	108390	147,3	66,1	67,5	65,2	66,27	
5 b	5	37000	36440	34820	108260	147,1	66,2	67,6	65,2	66,33	
5 c	5	36960	36540	34790	108290	147,2	66,2	67,6	65,3	66,37	
5 d	5	37140	36500	34820	108460	147,4	66,3	67,7	65,4	66,47	

maschine zu gefährden, keinen dauernden Betrieb aufrecht erhalten konnte. Da die normale Tourenzahl zu 160 bei 3,8 m Gefälle angenommen war, so mußten bei der Effektberechnung die gefundenen Resultate entsprechend durch folgende Relation:

$$E_x = E_n \cdot \frac{n_x}{n_n} \left(2 - \frac{n_x}{n_n} \right)$$

umgerechnet werden, in welcher

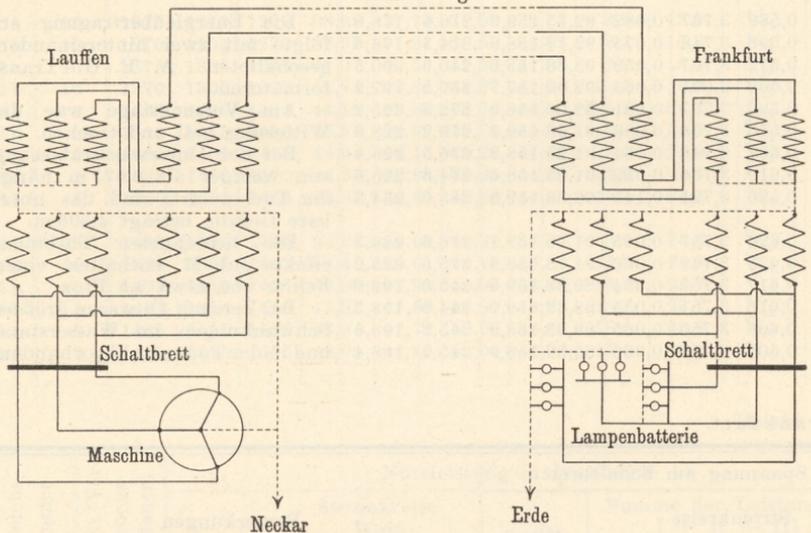
E_n den Effekt bei normaler Geschwindigkeit n_n und

E_x „ „ „ einer Geschwindigkeit n_x

bezeichnet.

Fig. 73.

Fernleitung



Hierbei sei jedoch bemerkt, daß die früher beschriebenen Turbinenbremsungen mit Geschwindigkeiten (145 bis 175 pro Minute) erfolgten, welche zu weit von der Tourenzahl 90 entfernt liegen, so daß die Umrechnung durch die oben genannte Relation nicht einwandfrei ist¹⁾. Da jedoch der hierdurch entstehende Fehler das Gesamtergebn der Untersuchung nicht sehr beeinflußt, so konnten die früher gefundenen Werte demnach in der oben angegebenen Weise verwertet werden. Die Beobachtungen in Lauffen und Frankfurt erfolgten (nach vorheriger telegraphischer Verständigung) gleichzeitig und zwar in kurzen und regelmäßig aufeinander folgenden Zwischenräumen; der Strom im Nebenschlusse der Wattmeter wurde hierbei kommutiert. Aus den jeweiligen Werten der mittleren Maschinenspannung $e_{1(m)}$ und der mittleren Nutz-

¹⁾ Die genaue Kenntnis für n_n fehlt. Für die Tourenzahl zwischen 150 und 170 käme der Fehler kaum in Betracht. In obigem Falle bedingt diese Unsicherheit einen Fehler von etwa 2,5 Proz.

spannung in Frankfurt $e'_{1(m)}$, sowie aus den Übersetzungsverhältnissen der Transformatoren in Lauffen ($1/160$) und in Frankfurt ($1/123$) sind die Hochspannungen ¹⁾ (s. Spalte 11 u. 12, Tab. II a. f. S.) unter Berücksichtigung der Relationen: $e_{1(m)} \cdot 2 \cdot 160 \cdot \sqrt{3}$ und $e'_{1(m)} \cdot 2 \cdot 123 \cdot \sqrt{3}$ gewonnen.

Aus Versuchsnummer 3 (Tabelle II) geht hervor, daß der größte Nutzeffekt von etwa 180 PS bei etwa 91,5 Umdrehungen pro Minute und 25 000 Volt Hochspannung übertragen wurde bei einem Wirkungsgrade von etwa 77,5 Proz.; hierbei ist der unter Rubrik 4 berechnete Turbineneffekt als richtiger Wert zugrunde gelegt. Zieht man die eventuell eintretenden Fehler mit in Rechnung, so kommt man demnach unter obigen Verhältnissen auf mindestens einen Wirkungsgrad von 75 Proz. Der Verlust im Erregerstromkreise beträgt bei obiger Belastung maximal nur 378 Watt, d. h. etwa 0,25 Proz. des Dynamoeffektes. Der Unterschied der Hochspannungen in Lauffen und Frankfurt kann durch den Einfluß der Kapazität der Fernleitung oder aber auch durch die Ungenauigkeit der Kenntnis der Transformationsübersetzung bedingt sein; inwieweit dieser Unterschied auf den einen oder anderen Umstand zurückzuführen ist, wurde nicht ermittelt.

Zur Kontrolle der durch Umrechnung gefundenen Turbineneffekte wurde die Belastung und Betriebsspannung der Versuchsreihe 3, Tabelle II (a. f. S.) in Frankfurt beibehalten und in Lauffen mittels dreier Wattmeter der von der Dynamo abgegebene Effekt gemessen. Aus dem Wirkungsgrade der Dynamo konnte man den Turbineneffekt berechnen und diesen Wert mit den gleichzeitig beobachteten Turbinenverhältnissen vergleichen. Wenngleich die Berechnung des elektrischen Effektes, durch eventuelle Selbstinduktions- und Kapazitätswirkung beeinflusst, nicht ganz sicher schien, so konnten die so gefundenen Werte doch zum Vergleiche für die Berechnung der Turbineneffekte bei niedriger Tourenzahl dienen. Die wenigen durchgeführten Untersuchungen führten jedoch zu dem Schlusse, daß die in der Spalte 4, Tabelle II (a. f. S.) durch Umrechnung gefundenen Werte den wirklich abgegebenen Turbineneffekten möglichst gleich kommen. Der genaueste Weg zur Ermittlung der Turbineneffekte bei niedriger Tourenzahl wäre ja eine weitere Bremsung gewesen. Leider konnte dieselbe sowie die weiteren Untersuchungen, wie unter den „Bemerkungen“, Tabelle I (S. 142 u. 143) schon erwähnt, wegen der Betriebseröffnung des Heilbronner Elektrizitätswerkes und des Einspruches der Königl. Württembergischen Generaldirektion der Verkehrsanstalten nicht stattfinden.

¹⁾ Bei dieser Methode der Bestimmung der Hochspannungen ist allerdings die Streuung der Transformatoren nicht berücksichtigt und außerdem die Annahme gemacht, daß die eingeführten bzw. entnommenen Ströme in die bzw. aus den Transformatoren sinusförmig verlaufen. Wenngleich also diese Methode Fehlerquellen enthält, so war man doch auf dieselbe angewiesen, da man damals noch keine Instrumente für Spannungen über 5000 Volt besaß.

Tabelle II. Lauffener Energieübertragung.
Gesamtresultate.

Versuchsnummer	Versuchsdauer Min.	Effekt in Frankfurt		Effekt der Turbine		Wirkungsgrad Proz.	Effekt im Erregerstromkreis Watt	Tourenzahl der Dynamo	Mittlere Stromstärke Amp.	Mittlere Maschinen- spannung Lauffen $\epsilon_1 (m)$	Mittlere Nutz- spannung Frankfurt $\epsilon_2 (m)$	Hochspannung		
		PS	3	PS	4							5	6	7
1														
1 a	10	131,0		178,0		73,7	120	92,15	1250	38,15	50,90	21100	21700	
1 b	10	130,5		176,6		73,9	123	92,19	1250	38,13	50,77	21100	21600	
2 a	10	151,1		200,6		75,4	183	93,38	1350	41,05	54,47	22800	23200	
2 b	10	150,4		197,9		76,0	192	92,00	1350	41,28	54,50	22900	23200	
3 a	4	175,1		225,2		77,8	371	92,00	1460	44,33	57,73	24600	24600	
3 b	5	179,1		228,6		78,9	375	91,38	1465	45,21	58,77	25100	25000	
3 c	5	177,6		226,4		78,5	360	91,25	1460	44,69	58,33	24800	24900	
3 d	5	175,4		225,0		78,0	357	91,25	1455	44,40	58,13	24600	24800	
3 e	5	181,4		234,3		77,4	378	92,38	1495	45,35	59,03	25100	25200	
4 a	15	176,0		226,3		77,8	365	91,28	1455	44,67	57,93	24800	24700	
4 b	10	174,8		225,2		77,6	371	91,13	1445	44,55	57,93	24700	24700	
5 a	5	147,3		198,0		74,5	430	89,38	1445	48,29	66,27	26800	28200	
5 b	5	147,1		198,3		74,3	433	89,63	1445	48,23	66,33	26700	28300	
5 c	5	147,2		198,6		74,1	432	89,63	1450	48,17	66,37	26700	28300	
5 d	5	147,4		198,4		74,2	434	89,50	1450	48,30	66,47	26800	28300	