Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 6 (1915)

Heft: 3

Artikel: Ueber Leistungsmessungen an Turbinen auf elektrischem Wege

Autor: Strickler, A.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1059617

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 02.10.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

SCHWEIZ. ELEKTROTECHNISCHER VEREIN

BULLETIN

ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

Erscheint monatlich mit den Jahres-Beilagen **„Statistik der Starkstromanlagen der Schweiz"** sowie **„Jahresheft"** und wird unter Mitwirkung einer vom Vorstand des S. E. V. ernannten Redaktionskommission herausgegeben.

Alle den Inhalt des „Bulletin" betreffenden Zuschriften sind zu richten an das

Generalsekretariat
des Schweiz. Elektrotechnischen Vereins,
Neumühlequai 12, Zürich 1 - Telephon 9571

Alle Zuschriften betreffend Abonnement, Expedition und Inserate sind zu richten an den Verlag:

Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei A.-G.,
Hirschengraben 80/82 Zürich 1 Telephon 6741

Abonnementspreis
für Nichtmitglieder inklusive Jahresheft und Statistik:
Schweiz Fr. 15.—, Ausland Fr. 25.—.
Einzelne Nummern vom Verlage Fr. 1.50 plus Porto.

Publié sous la direction d'une Commission de Rédaction nommée par le Comité de l'A. S. E.

Ce bulletin paraît mensuellement et comporte comme annexes annuelles la **„Statistique des installations électriques à fort courant de la Suisse"**, ainsi que l'**„Annuaire"**.

Prière d'adresser toutes les communications concernant la matière du „Bulletin" au

Secrétariat général
de l'Association Suisse des Electriciens
Neumühlequai 12, Zurich 1 - Téléphone 9571

Toutes les correspondances concernant les abonnements, l'expédition et les annonces, doivent être adressées à l'éditeur:

Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei S. A.
Hirschengraben 80/82 Zurich 1 Téléphone 6741

Prix de l'abonnement annuel (gratuit pour les membres de l'A. S. E.), y compris l'Annuaire et la Statistique, Fr. 15.— pour la Suisse, Fr. 25.— pour l'étranger.
L'éditeur fournit des numéros isolés à Fr. 1.50, port en plus.

VI. Jahrgang
VI^e Année

Bulletin No. 3

März
Mars 1915

Ueber Leistungsmessungen an Turbinen auf elektrischem Wege.

Von Dipl.-Ing. *A. Strickler.*

Uebersicht.

Es wird gezeigt, wie in Wasserkraftzentralen die Wirkungsgradversuche an Turbinen auf einfache Weise mit der Eichung der Wechselstromgeneratoren verbunden werden können, indem die angegebene Methode gestattet, die betriebsmässigen Verluste im Generator am Aufstellungsort der Maschine durch hydraulische Messungen an der Turbine zu ermitteln.

Die Durchführung von Garantieversuchen, d. h. die Bestimmung von Leistung und Wirkungsgrad von Kraftmaschinen, die mit elektrischen Stromerzeugern gekuppelt sind, verlangt die genaue Kenntnis der Verluste in der elektrischen Maschine, sofern diese bei den Versuchen zur Belastung des Primärmotors dienen soll.

Die Leistungsmessung mit dem Prony'schen Bremszaum ist für kleinere Maschinen im Prinzip einfacher als die elektrische; für grosse Maschinen wird sie äusserst umständlich oder ganz undurchführbar. Die Wasserbremsen (Föttinger, Froude, etc.) sind für gut eingerichtete Versuchsstände praktisch, aber z. B. für die Leistungsmessung von Turbinen in Wasserkraftzentralen auch zu umständlich, weil zu viel Platz erfordernd. Ebenso kommen im letztern Fall Torsionsdynamometer nicht in Betracht, so dass hier für die Prüfung grösserer Wasserturbinen nur die elektrische Leistungsmessung am Platze ist.

Die Bestimmung der Verluste in den Generatoren wird in den meisten Fällen in den Prüfständen der Konstruktionswerkstätten nach bekannten Methoden durchgeführt. Geht man so vor, dass die Kupferverluste auf Grund von Gleichstrommessungen berechnet und die Reibungs- und Eisenverluste aus dem Leerlaufversuch ermittelt werden, so sind bei betriebsmässiger Belastung die zusätzlichen Kupfer- und Eisenverluste nicht berücksichtigt, so dass unter Zugrundelegung der auf obigem Wege ermittelten Generatorverluste der Primär-

motor bei der spätern Leistungsmessung etwas zu kurz käme. Indessen liegen heute exaktere Prüfmethoden vor, die die genaue Ermittlung der betriebsmässigen Verluste im Generator gestatten.

Bei den heutigen, äusserst scharf fixierten Wirkungsgradgarantien, die für grössere Kraftmaschinen vom Lieferanten eingegangen werden müssen, ist es erklärlich, wenn von Seite des letztern der Wunsch entsteht, die Generator-Verluste in der Zentrale, unter betriebsmässigen Bedingungen zu messen, oder wenigstens zu kontrollieren.

Im folgenden soll nun eine Methode beschrieben werden, welche gestattet, die Verluste und Wirkungsgrade eines Wechselstromgenerators und der mit ihm im normalen Betrieb gekuppelten Antriebsmaschine zu messen und zwar mittelst einfachster Apparatur. Das durchgerechnete Beispiel bezieht sich auf einen Einphasensynchrongenerator, direkt gekuppelt mit einer Pelton-Turbine (mit Ellipsoidschaufeln und Nadeldüse). Der Verfasser hatte Gelegenheit, diese Versuche in der hydraulischen Abteilung des Maschinen-Laboratoriums der Eidgen. Technischen Hochschule durchzuführen. Weder die Verluste der einen noch der andern Maschine waren vorher bekannt. Der Erregerstrom wurde einmal einer separaten Erregergruppe entnommen, das andere Mal wurde die Erregermaschine vermittelst Riemen von der Hauptturbine angetrieben.

Für eine Wasserturbine mit Quantitätsregelung verläuft die Nutzleistung in einem untern Bereich erfahrungsgemäss linear mit der Wassermenge (s. Fig. 1), im obern Intervall unter Umständen ebenfalls gerade, oder dann leicht gekrümmt. Die Voraussetzung

Tab. 1. **Leerlaufversuch.**

Erregung separat.

				1. Annahme der N_m-Linie					2. Annahme d. N_m-Linie		
n	H	h	Q	N_m	i	V	P_m	P_{Fe}	N_m	P_m	P_{Fe}
p. Min.	m	mm	l/sec	kW	Amp.	Volt	kW	kW	kW	kW	kW
377	42,8	12,6	1,8	0	Generator losgekuppelt						
385	42,8	20,5	3,2	0,41	0	0	0,41	0	0,41	0,41	0
361	42,8	19,0	3,0								
379	42.8	21,8	3,5	0,55	1,6	54,3	0,40	0,15	0,58	0,40	0,18
375	42,8	22,6	3,7	0,63	2,0	67,8	0,38	0,25	0,65	0,38	0,27
377	42,8	24,8	4,2	0,76	3,0	93,5	0,37	0,39	0,82	0,37	0,45
375	42,8	27,2	4,6	0,92	4,05	113,5	—	—	1,00	0,36	0,64
373	42,8	29,0	5,1	1,05	5,0	127	—	—	1,15	0,35	0,80
375	42,8	31,6	5,7	1,27	6,05	143	—	—	1,34	0,34	1,00
373	42,8	33,4	6,2	1,46	6,9	151	—	—	1,52	0,33	1,19
375	42,8	36,1	6,6	1,65	8,2	164	—	—	1,75	0,32	1,43
375	42,8	39,7	7,9	2,00	10,3	178	—	—	2,10	0,31	1,79
375	42,8	17,2	2,7	0,30	0	0	—	—	0,30	0,30	0
375	42,8	17,3	2,8								
370	42,8	12,5	1,75	0	Generator losgekuppelt						
379	42,8	—	—								

Bezeichnungen:

n Tourenzahl.
H Wasserdruck am Turbineneinlauf.
h Ueberfallshöhe am Messüberfall.
Q Wassermenge.
N_m Mechanische Leistung (i./d. Welle übertragen).
v Erregerspannung.
i Erregerstrom.
J Generatorenstrom.
V Klemmenspannung.
P Abgegebener elektrischer Effekt.
E Elektromotorische Kraft.
P_m Mechanischer Verlust
P_{Fe} Eisenverlust
P_{Cu} Kupferverlust
} des Generators.
R_a Effektiver Ankerwiderstand.
N_a Zugeführte hydraulische (absolute) Leistung.
η Wirkungsgrad.

Tab. 2 **Kurzschlussversuch.**
Erregung separat.

				1. Annahme der N_m-Linie					2. Annahme der N_m-Linie			
n	H	h	Q	N_m	i	J	P_m	P_{Cu}	N_m	P_m	P_{Cu}	R_a
p. Min.	m	mm	l/sec	kW	Amp.	Amp.	kW	kW	kW	kW	kW	Ω
375	42,8	17,0	2,7	0,30	0	0	0,30	0	0,30	0,30	0	—
375	42,8	23,2	3,7	0,62	1,75	64,5	0,30	0,32	0,65	0,30	0,35	0,084
380	42,8	26,8	4,4	0,87	2,4	87,0	0,30	0,57	0,91	0,30	0,61	0,0805
379	42,8	30,8	5,5	1,20	3,15	114,6	—	—	1,28	0,30	0,98	0,0745
375	42,8	36,1	6,7	1,65	3,83	139,5	—	—	1,70	0,30	1,41	0,0725
371	42,8	41,9	8,4	2,20	4,6	169	—	—	2,30	0,30	2,00	0,0700
375	42,8	17,0	2,7	0,30	0	0	0,30	0	0,30	0,30	0	—

dazu ist ein konstanter Wasserdruck am Turbineneinlauf, und konstante Tourenzahl. Der Schnittpunkt mit der Abszissenachse kann leicht bestimmt werden durch Messung des Wasserverbrauchs der Turbine bei losgekuppeltem Generator.

Das untere Stück der Leistungslinie wurde zuerst, von diesem Leerlaufspunkt ausgehend, beliebig angenommen [Kurve *a*, Fig. 1]. Die Turbine kann jetzt vorläufig als geeichten Motor betrachtet werden, so dass mit Hilfe dieser N_m-Linie die Leerlaufs- und Kurzschlussverluste des Generators in *erster Annäherung* bestimmt werden können. In Fig. 3 sind diese Verluste in Kurvenform als „1. Resultate" dargestellt. Die Ermittlung der Werte erfolgte auf bekannte Weise; die zugehörigen Daten sind in den Tabellen 1 und 2 bezw. auf Fig. 2 beigegeben.

Als weitere Versuchsreihe wurde jetzt eine Serie von Belastungen durchgeführt und die Nutzleistungen der Turbine N_m, auf Grund des gemessenen Effektes und der gefundenen Verluste des Generators bestimmt (Kurve *b*, Fig. 1). (Die Erregerverluste kamen hier für die Leistungsberechnung nicht in Frage, da sie von einer fremden Maschine gedeckt wurden). Dass nun die aus diesen Belastungsversuchen gefundene N_m-Linie nicht mit der zuerst angenommenen übereinstimmt zeigt, dass Linie *a* offenbar zu tief gewählt wurde. Die Reibungs-, Eisen- und Kupferverluste aus den 4 ersten Versuchsreihen (Tab. 1 und 2) wurden jetzt auf Grund der erhaltenen Kurve *b* (in Fig. 1) korrigiert, und ebenso die Nutzleistung der Turbine aus dem Belastungsversuch (Tab. 3) nach den korrigierten Generatorverlusten geändert, es ergab sich so Kurve *c* in Fig. 1. Es muss hervorgehoben werden, dass die Versuche selbst nicht wiederholt werden müssen, sondern nur die Rechnung, und auch diese nur für 2 bis 3 kleine Belastungen resp. Verluste. Nach Kurve *c* könnten nun die Eisen- und Kupferverluste nochmals korrigiert werden; es ist aber ohne weiteres ersichtlich,

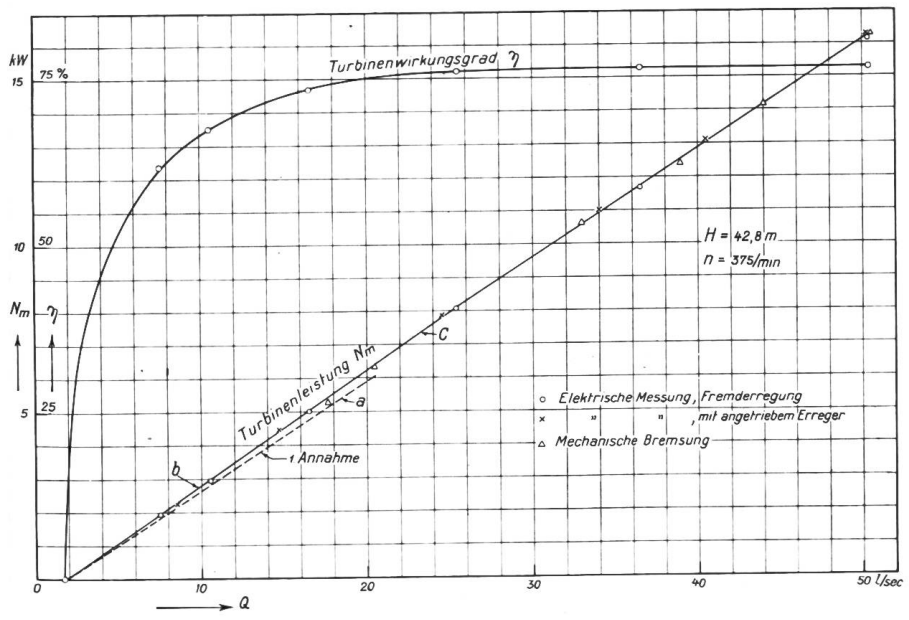

Fig. 1.
Leistung und Wirkungsgrad der untersuchten Freistrahlturbine bei konstantem Gefälle.

dass in dem zur Verlustmessung benützten Bereich Kurven *b* und *c* praktisch zusammenfallen, insofern die 1. Annahme (Kurve *a*) nicht allzuweit von der Wirklichkeit abweicht. Der 1. Annahme können z. B. für Garantieversuche die garantierten Wirkungsgrade zu Grunde gelegt werden.

Diese Methode ist nichts anderes als eine messtechnische Uebertragung der „Regula falsi" der Mathematik, welche ein Verfahren zur Auflösung numerischer Gleichungen darstellt. Sie ergibt schon nach der 1. Korrektur Resultate, deren Genauigkeit vollständig genügt. Zur Kontrolle wurde noch eine Leistungsmessung mit Bremszaum durchgeführt, die Punkte sind in Figur 1 ebenfalls eingetragen, und es zeigt sich volle Uebereinstimmung zwischen beiden Messresultaten. Die praktische Brauchbarkeit der beschriebenen Methode dürfte damit erwiesen sein.

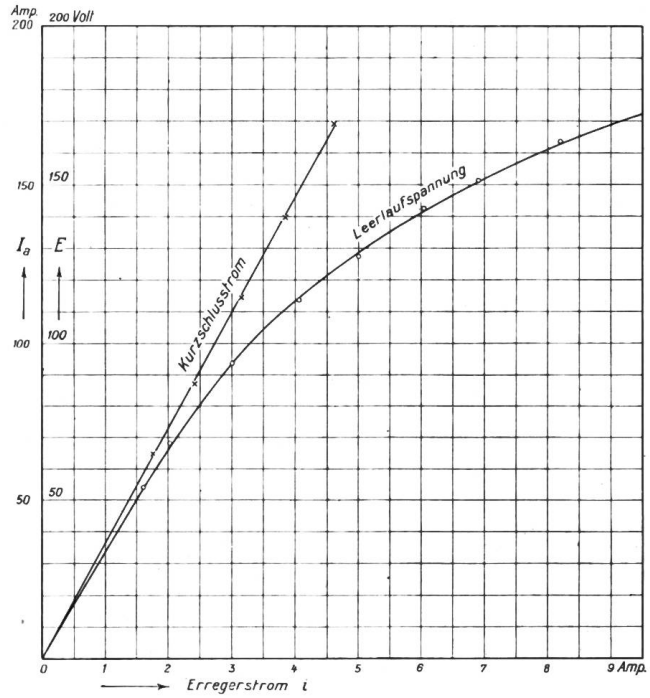

Fig. 2. Leerlaufs- und Kurzschlusscharakteristik des Einphasengenerators (n = 375/Min.)

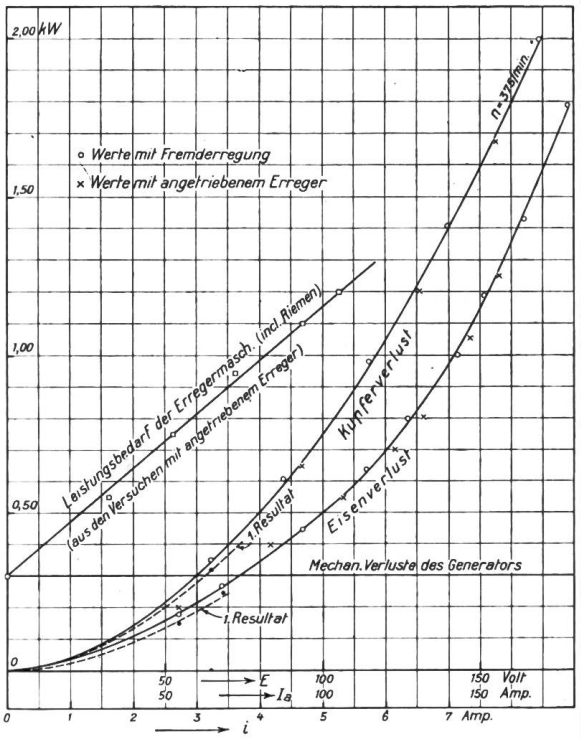

Fig. 3. Einzelverluste des Einphasengenerators (n =375/Min.) und Leistungsbedarf des Erregers.

Auf die Durchführung und Ausarbeitung dieser Versuche soll noch etwas näher eingegangen werden.

1. Die *Wassermessung* wurde mittelst Ueberfall mit Seitenkontraktion durchgeführt. Vor den Versuchen war derselbe mit Hilfe eines Reservoirs geeicht worden (Fig. 4) und es wurden namentlich auch Punkte für ganz kleine Wassermengen aufgenommen. Es zeigte sich, dass die Ueberfallkoeffizienten nach Frese am besten mit den Versuchen übereinstimmten. Die Messung der Ueberfallshöhe geschah mit Spitzenpegel, der mit Mikrometerschraube und Nonius versehen war.

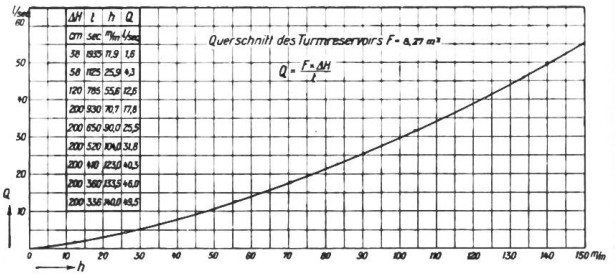

Fig. 4. Eichung des Messüberfalles der Freistrahlturbine.

2. Zur *Gefällsmessung* war vor dem Turbineneinlauf ein Präzisionsmanometer angebracht. Das Konstanthalten des Gefälles wurde erreicht durch leichte Drosselung mit einem Absperrschieber, der sich weiter rückwärts in der Rohrleitung befand.

3. Die Einstellung der konstanten Tourenzahl geschah derart, dass die Nadel der Düse mit Handrad so weit verstellt wurde, bis die am Tachometer abgelesene Tourenzahl die richtige war.

Tab. 3.

Belastungsversuch bei konstantem äusseren Widerstand.

Erregung separat.

n	H	h	Q	Nadelhub	i	V	J	P	i_k	i_r	E	Nach 1. Annahme der N_m-Linie					Nach Korrektur der N_m-Linie					
												P_m	P_{Fe}	P_{Cu}	ΣP	N_m	P_{Fe}	P_{Cu}	ΣP	N_m	N_a	$\eta_{Turb.}$
p. Min.	m	mm	l/sec.	mm	Amp.	Volt	Amp.	kW	Amp.	Amp.	Volt	kW	kW	kW	kW	kW	kW	kW	kW	kW	kW	%
375	42,8	38,5	7,5	3,7	1,6	35,0	40,0	1,40	1,1	1,16	39	0,30	0,10	0,15	0,55	1,95	0,10	0,15	0,55	1,95	3,15	62
373	42,8	49,7	10,5	5,5	2,0	45,0	51,0	2,25	1,4	1,43	49	0,30	0,15	0,21	0,66	2,91	0,16	0,23	0,69	2,94	4,4	66,8
373	42,8	67,8	16,5	9,5	2,7	60,2	68,2	4,1	1,85	1,97	66	0,30	0,22	0,35	0,87	4,97	0,26	0,38	0,94	5,04	6,92	73
375	42,8	90,1	25,4	15,8	3,6	77,2	87,5	6,8	2,4	2,7	86	0,30	0,33	0,56	1,19	7,99	0,38	0,60	1,28	8,08	10,65	75,8
375	42,8	115	36,5	27,0	4,5	93,8	106,4	10,0	2,9	3,45	103	—	—	—	—	—	0,53	0,84	1,67	11,67	15,3	76,3
374	42,8	141,6	50,5	54,5	5,75	111	126	14,0	3,45	4,6	123	—	—	—	—	—	0,72	1,15	2,17	16,17	21,2	76,3

4. Der erzeugte Wechselstrom wurde in einem induktionsfreien, wassergekühlten Draht-Widerstand in Wärme umgesetzt. Die am Wattmeter abgelesene Leistung entsprach bis auf kleine Fehler dem Produkt aus Stromstärke × Spannung.

5. Mit Gleichstrom im Stillstand, kalt gemessen, beträgt der Widerstand der Ankerwicklung 0,026 Ω; aus der direkten Messung der Kupferverluste (Tab. 2) ergibt sich aber ein effektiver Widerstand von über 0,07 Ω, als Folge der zusätzlichen Wirbelstromverluste und der Temperaturerhöhung des Armaturkupfers. Diesen zusätzlichen Verlusten wird meist durch einen auf den Gleichstromwiderstand gemachten Zuschlag Rechnung getragen. Eine Vernachlässigung hätte hier zu einem bedeutenden Fehler geführt; bei 126 Amp. Belastung (Tab. 3) würde der Unterschied 0,7 kW betragen, oder der Wirkungsgrad der Turbine wäre um ca. 3 % zu klein berechnet worden.

Bei dieser Gelegenheit sei noch auf den Verlauf der in Tabelle 2 berechneten Werte des effektiven Ankerwiderstandes aufmerksam gemacht. Dieser scheint mit kleinerem Ankerstrom zuzunehmen; eine Folge der im Kurzschluss noch vorhandenen Eisenverluste, die bei dieser Maschine relativ gross ausfallen.

6. Zur Berechnung der EMK bei Belastung (Tab. 3) wurde folgender Weg eingeschlagen. Das total aufzuwendende Erregerfeld bei Belastung setzt sich zusammen aus dem resultierenden Feld und dem Kurzschlussfeld, welche in unserem Fall, im Erregerstrom ausgedrückt, der Beziehung gehorchen:

$$i^2 = i_k^2 + i_r^2$$

Aus der Kurzschlusscharakteristik (Fig. 2) ergibt sich zu jedem Ankerstrom J der zugehörige Kurzschlusserregerstrom i_k. Aus diesem und dem bei Belastung gemessenen Erregerstrom i, berechnet sich die dem resultierenden Feld entsprechende Erregerkomponente:

$$i_r = \sqrt{i^2 - i_k^2}$$

und die dazugehörige EMK bei Belastung kann jetzt sofort der Leerlaufcharakteristik (Fig. 2) entnommen werden. Setzt man an Stelle dieser EMK bei Belastung die Klemmenspannung, so hat dies zur Folge, dass die Generatorverluste zu gering angenommen und damit der Turbinenwirkungsgrad zu klein erscheint. Der Fehler ist jedoch im allgemeinen gering. Im vorliegenden Falle beträgt er bei der höchsten Belastung 0,6 % zu Ungunsten des Turbinenwirkungsgrades. Bei Abnahmeversuchen an grossen Turbinen ist es nicht immer auf einfache Weise möglich, den Wasserwiderstand zu regulieren, um bei konstanter

Klemmenspannung verschiedene Belastungen einzustellen, wie der normale Betrieb sie ergibt; dagegen ist es in jedem Falle sehr einfach, bei fest eingestelltem Wasserwiderstand vermittelst Erregung auf kleinere Spannungen nahezu beliebig kleine Belastungen zu erreichen. Sind beide Belastungsarten durchführbar, so ergibt sich daraus eine Kontrolle für die Genauigkeit der gemessenen Generator-Verluste.

Bezüglich der relativ geringen Turbinenwirkungsgrade sei bei dieser Gelegenheit bemerkt, dass sie bei Vollast bis Halblast über 80% betragen, wenn die Turbine beim Konstruktionsgefälle 42,8 m mit ihrer richtigen Tourenzahl 500/min laufen würde. Ferner sei erwähnt, dass Turbine und Generator nicht für gleiche Normalleistungen gebaut sind. Der vollen Turbinenleistung von 16 kW entspricht noch nicht die Normalleistung des Generators; letztere wäre bei ca. 20 kVA.

Hat die Hauptturbine ausser dem Generator noch die Erregermaschine anzutreiben, so lässt sich die elektrische Leistungsmessung ebenfalls nach der oben beschriebenen Methode durchführen, nur muss hier die Erregerleistung durch eine weitere Versuchsreihe bestimmt werden.

Ein solcher Versuch konnte mit denselben Maschinen wie oben durchgeführt werden. Die verwendete Gleichstromdynamo wurde vermittelst Riemen von der Turbinenwelle aus angetrieben. In erster Linie sind die Verluste ermittelt worden, welche sich im Leerlauf des erregten Generators ergaben; hierauf wurden die Erregerverluste für sich allein bestimmt, von den zugehörigen Leistungen der ersten Versuchsreihe subtrahiert, um so die Eisenverluste zu gewinnen. Dies benötigt aber für die zweite Versuchsreihe die Ausschaltung der Generatorerregung. Zu diesem Zwecke wurde im vorliegenden Fall der Generator losgekuppelt, der Rotor also stillgesetzt; die Feldwicklungen dienten hiebei als Belastungswiderstand für den Erregerstrom. In vielen Fällen wird man nicht so verfahren können, vielmehr wird man allgemein die Erregermaschine auf einen besondern Belastungswiderstand arbeiten lassen. Eine andere Lösung wäre noch die, dass man die erste Versuchsreihe wiederholte, aber mit Fremderregung; dies gibt dann direkt die Eisenverluste, und der Erregerverlust ist die Differenz gegenüber den Leistungen aus der ersten Versuchsreihe.

In unserem Beispiel wurde im übrigen wie angedeutet vorgegangen. Die Versuchswerte sind dieser Mitteilung nicht im Detail beigegeben; indessen sind die Resultate in die Kurvenblätter eingetragen.

Für die Eisen- und Kupferverluste zeigte sich gute Uebereinstimmung mit den früher gefundenen Werten (Fig. 3), ebenso für die Turbinenleistungen (Fig. 1). Es muss hier noch bemerkt werden, dass die verwendete Erregermaschine im Verhältnis zum Generator zu gross war, daher die Erregerverluste abnormal hoch erscheinen.

Die bei diesen Versuchen angewandte Methode der Wassermessung mit Ueberfall war eine äusserst bequeme und genaue. In Wasserkraftzentralen ist dies nicht immer möglich, namentlich dort nicht, wo es sich um grosse Wassermengen handelt, die mit Flügel gemessen werden müssen. In diesem Falle kann man sich dadurch helfen, dass man für die Verlustmessungen die Turbinenleistung in Funktion einer geometrischen Grösse festlegt, z. B. des Servomotorhubes, oder sonst einer Indikatorstellung. Die Wassermessung kann dann auf die eigentlichen Belastungsversuche beschränkt werden. Voraussetzung zu einer exakten Verlustmessung ist ein konstant bleibendes Gefälle innerhalb desjenigen Leistungsbereiches, das zur Bestimmung der Verluste benützt wird, sowie die Möglichkeit eines absolut scharfen Ablesens des Indikators (feine Einteilung, kein toter Gang!). Da der Zusammenhang zwischen Indikatorteilung und Wassermenge im allgemeinen kein linearer ist, so müssen im Belastungsversuch eine grössere Zahl Punkte bei kleiner Leistung aufgenommen werden, damit die gekrümmte N_m-Linie in Funktion der Indikatorstellung mit genügender Schärfe aufgezeichnet werden kann.

Bei Rohrleitungsturbinen mit Absperrschieber ist die Möglichkeit einer weitern Variation gegeben. Hier kann die Leistung bei unverändertem Leitapparat durch Drosseln des Druckes mit dem Absperrschieber reguliert werden. Erfahrungsgemäss verläuft dann bei konstanter Tourenzahl die Turbinenleistung linear mit dem Druck.

Tab. 4. **Leerlaufversuch.**

Erregung separat, Regulierung des Wasserdruckes.

		1. Annahme der N_m-Linie					2. Annahme			
n	H	N_m	i	v	P_m	P_{Fe}	N_m	P_m	P_{Fe}	Nadelhub
p. Min.	m	kW	Amp.	Volt	kW	kW	kW	kW	kW	mm
376	8,3	0	0	Generator losgekuppelt.						54,5
375	9,0	0,30	0	0	0,30	0	0,30	0,30	0	54,5
374	9,3	0,50	1,5	50	0,30	0,20	0,45	0,30	0,15	54,5
376	9,7	0,70	2,5	80	0,30	0,40	0,65	0,30	0,35	54,5
375	10,3	—	4,0	113	—	—	0,90	0,30	0,60	54,5
375	10,9	—	5,5	135	—	—	1,20	0,30	0,90	54,5
375	11,6	—	7,0	152	—	—	1,50	0,30	1,20	54,5

Tab. 5 **Kurzschlussversuch.**

Erregung separat, Regulierung des Wasserdruckes.

		1. Annahme der N_m-Linie					2. Annahme			
n	H	N_m	i	J	P_m	P_{Cu}	N_m	P_m	P_{Cu}	Nadelhub
p. Min.	m	kW	Amp.	Amp.	kW	kW	kW	kW	kW	mm
375	9,0	0,30	0	0	0,30	0	0,30	0,30	0	54,5
375	9,5	0,58	1,5	55	0,30	0,28	0,55	0,30	0,25	54,5
375	10,3	1,00	2,5	91	0,30	0,70	0,90	0,30	0,60	54,5
374	11,6	—	3,5	128	—	—	1,50	0,30	1,20	54,5
375	13,3	—	4,6	169	—	—	2,30	0,30	2,00	54,5

Tab. 6. **Belastungsversuch.**

Erregung separat, Regulierung des Wasserdruckes.

								1. Annahme der N_m-Linie											
n	H	h	Q	V	J	P	E	P_m	P_{Fe}	P_{Cu}	Σ_p	O_m	P_m	P_{Fe}	P_{Cu}	ΣP	N_m	N_a	$\eta_{Turb.}$
p. Min.	m	mm	l/sec.	Volt	Amp.	kW	Volt	kW	kW	kW	kW	kW	kW	kW	kW	kW	kW	kW	%
375	9,0	86,0	23,7	0	0	0	0	0,30	0	0	0,30	0,30	0,30	0	0	0,30	0,30	2,10	14,2
375	13,9	99,0	29	53,7	36,7	1,9	57	0,30	0,23	0,14	0,67	2,57	0,30	0,20	0,13	0,63	2,53	3,95	64,0
376	18,8	109,0	33,5	76	52,3	3,95	80	0,30	0,40	0,26	0,96	4,91	0,30	0,35	0,24	0,89	4,84	6,17	78,5
375	24,0	118,0	38	95,5	65,7	6,2	100	0,30	0,57	0,39	1,26	7,46	0,30	0,50	0,36	1,16	7,36	8,90	82,5
375	29,0	126,0	42	109	76	8,2	114	—	—	—	—	—	0,30	0,63	0,46	1,39	9,59	11,95	80,5
377	33,2	131,5	45	119	85	10,0	125	—	—	—	—	—	0,30	0,76	0,56	1,62	11,62	14,80	78,5
373	38,2	137,0	48	130	93	12,1	137	—	—	—	—	—	0,30	0,93	0,65	1,88	13,98	17,95	78,0
374	43,0	142,5	51	140	101	14,1	148	—	—	—	—	—	0,30	1,11	0,76	2,17	16,27	21,50	75,8
375	48,0	148,0	54	150	108	16,1	158	—	—	—	—	—	0,30	1,30	0,85	2,45	18,55	25,40	73,0
376	52,8	152,0	56,5	159	114,5	18,1	168	—	—	—	—	—	0,30	1,54	0,95	2,79	20,89	29,20	71,5
381	66,5	163,0	63	142	163	23,3	157	—	—	—	—	—	0,30	1,30	1,85	3,45	26,75	41,00	65,5

Ein solcher Versuch mit der gleichen Maschinengruppe ist in Tab. 4, 5, 6 und Fig. 5 dargestellt. An Stelle der Wasser*menge* spielte hier der Wasser*druck* die Rolle der unabhängig Variablen oder des Vergleichsmittels für die andern Grössen. Die Düse war immer auf volle Oeffnung eingestellt.

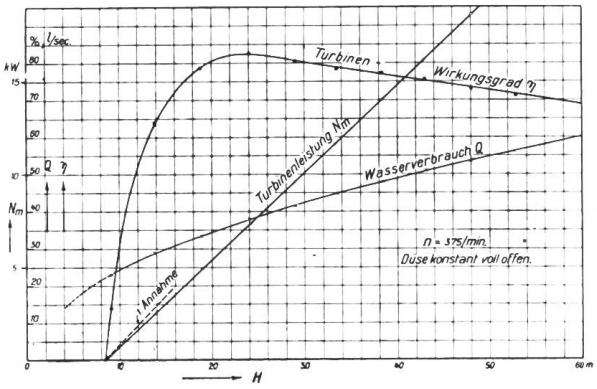

Fig. 5. Leistung, Wasserverbrauch und Wirkungsgrad der untersuchten Freistrahlturbine bei veränderlichem Gefälle.

Für die Verlustmessungen wurde ein geeichtes Präzisions-Manometer bis zu 20 m Wasserdruck verwendet, für die Leistungsmessungen bei höheren Drücken ein solches bis zu 60 m. Aus Fig. 5 zeigt sich die bemerkenswerte Eigenschaft der Peltonturbine, dass bei konstanter Nadelstellung und konstanter Tourenzahl die Nutzleistung genau linear abhängig ist vom Wasserdruck; dies erleichtert die erste probeweise Annahme der N_m-Linie. Im untersuchten Intervall ist die konsumierte Wassermenge genau proportional zu $\sqrt{H}$ oder $\sqrt{2gH}$, was auf die Konstanz des Ausflusskoeffizienten in diesem Bereich schliessen lässt. Der maximale Wirkungsgrad tritt bei einem Gefälle von 24 m ein ($n = 375$/min). Dies entspricht den Verhältnissen, für welche die Turbine ursprünglich gebaut wurde, d. h. für 500 Touren pro Minute bei einem Druck von 43 m; es besteht die Beziehung:

$$\frac{500}{375} \approx \sqrt{\frac{43}{24}}$$

Diese lineare Abhängigkeit der Leistung vom Gefälle tritt auch normalerweise bei Francisturbinen auf. Fig. 6 zeigt die Verhältnisse der zum Antrieb des Erregers verwendeten vierstufigen Reaktionsturbine. Die Linearität gestattet also die beschriebene Methode der Generator-Eichung auch auf Gruppen mit Francisturbinen anzuwenden, denen das Wasser durch eine Rohrleitung zugeführt wird. Trotz des Umstandes, dass der Belastungsversuch noch bei konstantem Druck wiederholt werden muss, um die den wirklichen Verhältnissen entsprechende Quantitätsregelung zu untersuchen, dürfte die Generator-Eichung mit Drosselregulierung in den meisten Fällen vorzuziehen sein, wenn sie möglich ist; denn Manometer-Ablesungen sind einfacher als Wassermessungen, und der Zeitaufwand dürfte eher geringer sein.

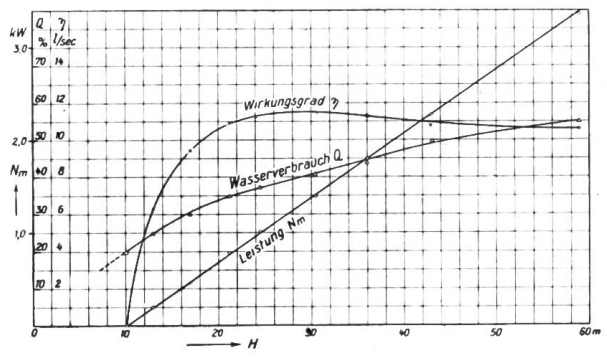

Fig. 6. Beispiel des Verlaufs der N_m-Linie für eine 4-stufige Reaktionsturbine bei veränderlichem Gefälle. ($n = 750$/Min.)

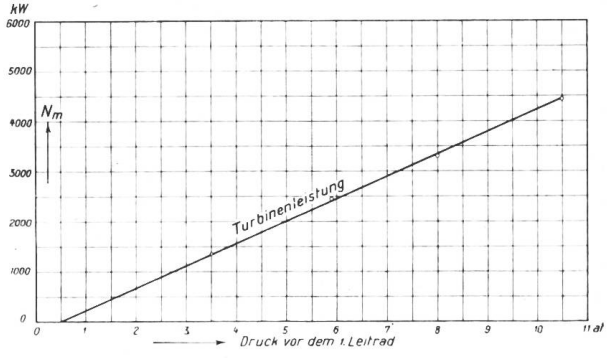

Fig. 7. Beispiel des Verlaufs der N_m-Linie für eine 4000 kw Zoelly-Dampfturbine. (Nach Diagramm im Katalog der Firma Escher Wyss & Cie.)

Von besonderer Bedeutung ist aber die Eichung auf diese Art bei Dampfturbinen, die im normalen Betrieb mit Drosselregulierung arbeiten. Auch hier erleichtert der lineare Zusammenhang zwischen Turbinenleistung und Druck vor dem 1. Leitrad die Durchführung

der Generator-Eichung. Fig. 7 zeigt diese Grössen für eine Zoelly-Turbine. Die sehr umständlichen Dampfmessungen können auf die eigentlichen Belastungsversuche im Garantiebereich beschränkt werden.

Miscellanea.

Asynchron-Motoren mit automatischer Kurzschluss-Vorrichtung.*) Im Bericht über die Schweizerische Elektrizitätsindustrie an der Landesausstellung in Bern (Bulletin No. 7 1914), sind als Neuerung der Firma *Brown, Boveri & Cie.* Asynchron-Motoren mit selbsttätiger Anlassvorrichtung erwähnt worden. Im Nachfolgenden soll die interessante Neukonstruktion näher beschrieben werden.

Die Eigenschaft des neuen Motors besteht darin, dass er, im normalen Betrieb in gleicher Weise wie gewöhnliche Asynchron-Motoren arbeitend, im Anlauf unter sehr geringer Stromentnahme aus dem Netz ein hohes Anzugsmoment entwickelt. Das Fehlen dieser Eigenschaft ist bekanntlich ein schwerer Mangel des Motors mit Kurzschlussanker, der zur Folge hat, dass viele Elektrizitätswerke den Anschluss der genannten Motoren schon bei relativ kleinen Leistungen nicht zulassen und die Verwendung von Motoren mit gewickeltem Anker verlangen, welche beim Anlassen besondere und etwas umständliche Manipulationen erfordern.

Die Wirkungsweise des neuen Motors beruht auf der an sich bekannten Gegenschaltung von Rotorwicklungsteilen in der Periode des Anlaufs; diese Gegenschaltung wird im letzten Drittel der Anlaufperiode durch eine automatisch wirkende Kurzschluss-Vorrichtung aufgehoben. Die bisher bekannte Gegenschaltung ist gebunden an Drahtwicklungen im Rotor, welche aber nur bei kleinen Motoren mit Vorteil anwendbar ist.

Für grössere Motoren, welche schablonenmässig hegestellte Stabwicklungen erfordern, verwendet die Firma eine geschützte Schaltung, welche mit jedem beliebigen Wicklungs-Schema kombiniert werden kann; nach diesem Schema wird die Wicklung einer Phase in der Mitte (z. B. am sogenannten Umkehrpunkt des Wicklungs-Schemas) aufgetrennt, Fig. 1, die eine Hälfte wird in Dreieck, die zweite in Stern, beide Hälften nach Fig. 2 hintereinander geschaltet. Es ist zu ersehen, dass die Spannung z. B. zwischen den Punkten I und II, welche in Fig. 1 den Wert E hat, nach vollzogener Schaltung nur mehr

$$\frac{e}{2} = \frac{E}{2 \cdot \sqrt{3}}$$

beträgt. Diese Spannungs-Reduktion bei nahezu

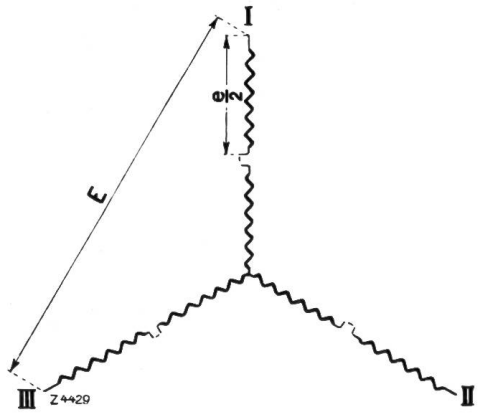

Fig. 1.

konstantem innern Widerstand der Wicklung ist also in ihrer Wirkung ähnlich dem Einschalten von Widerstand in den Stromkreis eines gewöhnlichen Motors mit gewickeltem Anker.

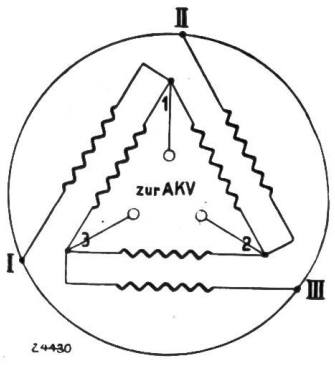

Fig. 2.

Hat der Motor eine bestimmte Tourenzahl erreicht, so werden die Punkte 1, 2, 3 kurzgeschlossen; es kann dann in jedem der 6 Wicklungsteile 1—2, 2—3, 3—1, 1—I, 2—II, 3—III der normale Belastungsstrom fliessen, so dass der Motor wie ein gewöhnlicher Asynchron-Motor

*) Aus den „Mitteilungen" der Firma Brown, Boveri & Cie., Jahrgang I, Heft 2.