

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins  
**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke  
**Band:** 36 (1945)  
**Heft:** 1

**Artikel:** Der Wirkungsgrad der Energieerzeugung im Kraftwerk Innertkirchen  
**Autor:** Aemmer, F. / Gerber, H.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1060193>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **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. [Voir Informations légales.](#)

### **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. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 03.04.2025

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

REDAKTION:

Sekretariat des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins  
Zürich 8, Seefeldstrasse 301

ADMINISTRATION:

Zürich, Stauffacherquai 36 ♦ Telefon 25 17 42  
Postcheck-Konto VIII 8481

Nachdruck von Text oder Figuren ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit Quellenangabe gestattet

XXXVI. Jahrgang

N<sup>o</sup> 1

Mittwoch, 10. Januar 1945

Der Wirkungsgrad der Energieerzeugung im Kraftwerk Innertkirchen

Von F. Aemmer, Innertkirchen, und H. Gerber, Zürich

621.311.21(494.246.1)

In der nunmehr abgelaufenen zweijährigen Betriebsperiode des Kraftwerkes Innertkirchen wurden eingehende Untersuchungen zur Bestimmung des Wirkungsgrades der Energieerzeugung angestellt. Die Resultate stützen sich teils auf Wirkungsgradbestimmungen einzelner Maschinen bei den Abnahmeversuchen in den Werkstätten der Fabrikanten, teils auf Messungen, die nur durch das Zusammenwirken bestimmter Anlageteile möglich wurden, besonders auf die sorgfältigen Wassermessungen.

Bei den vorliegenden Betrachtungen werden die hydraulischen Verluste vom Ablaufkanal Handeck bis zu den Einläufen der Turbinen Innertkirchen, die Verluste in Turbinen, Generatoren (einschliesslich Erreger- und Spurlagerverluste), in den 13,5-kV-Leitungen von den Generatoren zu den Transformatoren und in den 150-kV-Kabeln zwischen den Transformatoren im unterirdischen Kraftwerk und der Freiluftstation Innertkirchen berücksichtigt.

Die Autoren betonen die Notwendigkeit der betriebsmässigen Ueberwachung des Wirkungsgrades, da dieser durch die Veränderungen, die die hydraulischen Anlagen im Betriebe erleiden, beeinflusst wird. Sehr instruktiv wirkt Fig. 14, die die zeitliche Aenderung des Wirkungsgrades zeigt, sowie der Aufsatz von F. Aemmer: Ueber den Einfluss der Abnützung von Nadeln und Düsen auf den Wirkungsgrad von Pelton-Turbinen (Bull. SEV 1943, Nr. 13).

Nachdem das Kraftwerk Innertkirchen der Kraftwerke Oberhasli A.-G. (KWO) nun während zwei Jahren in Betrieb gestanden und in dieser Zeit unserer Volkswirtschaft eine Energieerzeugung von über 735 Millionen kWh zur Verfügung gestellt hat, mag es von Interesse sein, einige Betrachtungen über den Wirkungsgrad der Energieerzeugung, der in dieser nach neuzeitlichen Gesichtspunkten erstellten Grosskraftanlage erreicht wird, anzustellen und die an den verschiedenen Anlageteilen auftretenden Energieverluste einer Analyse zu unterziehen. Dabei wird die Kenntnis des Aufbaues und der technischen Daten des Kraftwerkes Innertkirchen auf Grund von früher erschienenen Veröffentlichungen als bekannt vorausgesetzt, so dass sich die folgenden beschreibenden Angaben und Daten auf diejenigen Objekte beschränken können, welche mit der betrachteten Materie in einem direkten Zusammenhang stehen<sup>1)</sup>.

<sup>1)</sup> A. Kaech, H. Juillard, F. Aemmer: Das Kraftwerk Innertkirchen, die zweite Stufe der Oberhasliwerke. Schweiz. Bauztg. Bd. 120(1942), Nrn. 3...6.

Der zweite Ausbau der Oberhasli-Kraftwerke. Bull. SEV 1942, Nr. 20.

A. Kleiner: Besuch bei den Kraftwerken Oberhasli. Bull. SEV 1943, Nr. 10.

H. Ludwig: Die Hilfsanlagen des unterirdischen Kraftwerkes Innertkirchen. Bull. SEV 1943, Nr. 17.

Après une période d'exploitation de deux ans, qui vient de s'écouler, le rendement de la production d'énergie de l'usine d'Innertkirchen a été déterminé très soigneusement. Les résultats sont basés en partie sur les rendements déterminés pour certaines machines lors des essais de réception chez les fabricants et, en partie, sur des mesures qui ne pouvaient être effectuées qu'après le montage des différentes parties de l'installation, notamment sur des mesures hydrauliques détaillées.

Les auteurs de ce rapport ont tenu compte des pertes hydrauliques entre le canal de fuite de Handeck et les entrées aux turbines d'Innertkirchen, ainsi que des pertes dans les turbines, dans les alternateurs (y compris les pertes dans les excitatrices et les paliers), dans les lignes à 13,5 kV reliant les alternateurs aux transformateurs et dans les câbles à 150 kV reliant les transformateurs de l'usine souterraine et le poste en plein air d'Innertkirchen.

Ils relèvent la nécessité d'un contrôle permanent du rendement, celui-ci diminuant peu à peu en raison des modifications que subissent les installations hydrauliques au cours de l'exploitation. La figure 14, qui indique la modification progressive du rendement, est très instructive à cet égard; il en est de même de l'article de M. F. Aemmer sur l'effet de l'usure des pointeaux et des tuyères sur le rendement des turbines Pelton (Bull. ASE 1943, No. 13).

Das Kraftwerk Innertkirchen (Fig. 1) bildet die untere Stufe der Kraftwerksgruppe Handeck-Innertkirchen mit ihren Stauanlagen Grimsel-Gelmer. Es bezieht demgemäss das zu verarbeitende Wasser als Abwasser der Turbinen des Kraftwerkes Handeck, ergänzt durch das Zusatzwasser aus dem unterhalb der Talsperren Grimsel-Gelmer bis zur Handeck liegenden Zwischeneinzugsgebiet. Vom Ablaufkanal der Turbinen Handeck, dessen freier Spiegel sich auf Kote 1302,24 n. H. befindet, wird das Wasser durch den 10 km langen Zulaufstollen dem Wasserschloss des Kraftwerkes Innertkirchen zugeleitet, von wo es durch den 1,8 km langen Druckschacht der Verteilleitung und von dieser den einzelnen Turbinen zufliesst. Die Turbinendüsen befinden sich auf Kote 629,44 n. H., so dass das gesamte ausgenützte Gefälle vom Ablaufkanal der Turbinen Handeck bis zu den Düsen der Turbinen Innertkirchen 672,8 m beträgt.

Zur Energieerzeugung stehen im gegenwärtigen Ausbau im Kraftwerk Innertkirchen 3 Maschinengruppen zur Verfügung, bestehend aus vertikalen zweidüsigen Pelton-turbinen von je 43 000 kW mit aufgebauten Drehstromgeneratoren von 47 500 kVA bei 13,5 kV verketteter Spannung (Fig. 2). Jeder dieser Generatoren speist über eine ca. 30 m lange,

blank verlegte Verbindungsleitung einen ihm zugeordneten Transformator einer Nennleistung von 47 500 kVA, welcher die Energie auf die Spannung von 150 kV hinaufsetzt, worauf sie über 150-kV-Kabelleitungen, deren Länge für die einzelnen Ma-

kes Innertkirchen werden alle Verluste von der Wasserentnahme im Ablaufkanal des Kraftwerkes Handeck bis zur Energieabgabe an die Sammelschienen der Freiluftstation Innertkirchen in 150 kV Spannung berücksichtigt, also

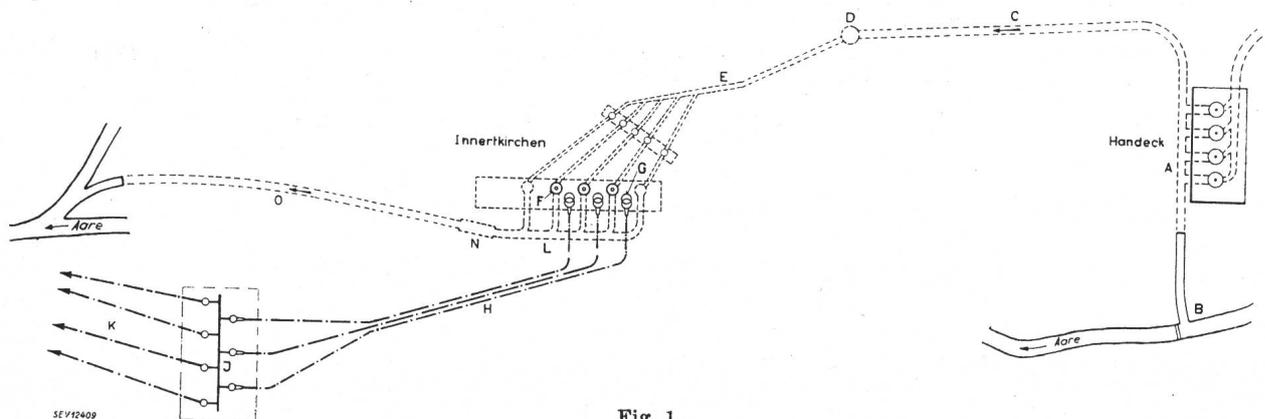


Fig. 1.

## Schematische Darstellung der Anlagen der Kraftwerke Oberhasli

- |   |  |   |  |
|---|--|---|--|
| A | Unterwasserkanal der Turbinen Handeck.       | H | 150-kV-Kabel.                                  |
| B | Wasserfassung für das Zusatzwasser.          | J | 150-kV-Sammelschiene der Freiluftschaltanlage. |
| C | Zulaufstollen des Kraftwerkes Innertkirchen. | K | Abgehende 150-kV-Freileitungen.                |
| D | Wasserschloss des Kraftwerkes Innertkirchen. | L | Unterwasserkanal der Turbinen Innertkirchen.   |
| E | Druckhaucht und Verteilungen.                | N | Messkammer.                                    |
| F | Maschinengruppen 48 000 kW.                  | O | Ablaufkanal.                                   |
| G | Transformatoren 47,5 MVA, 13,5/150 KV.       |   |  |

schinen 323 m bis 420 m beträgt, den Sammelschienen der Freiluftstation Innertkirchen zugeführt wird. Hier wird die Energie des Kraftwerkes Innertkirchen mit der vom Kraftwerk Handeck zugeleiteten Energie vereinigt und über Freileitungen unter einer Spannung von 150 kV zu den Verbrauchern abtransportiert.

Bei den Abnahmeversuchen zeigte sich, dass die maximale verfügbare Leistung der Turbinen die Nennleistung von 43 000 kW (58 400 PS) um 13,5% übersteigt und damit einen Wert von 48 800 kW bei einem Gefälle von 670 m erreicht. Da auch die Wasserzu- und -Ableitungen reichlich dimensioniert sind, und auch die Generatoren und Transformatoren mit ihren Verbindungsleitungen und den 150-kV-Kabeln eine vermehrte Leistung übernehmen können, ohne dass die zulässigen Temperaturen überschritten werden, lässt sich die vergrößerte Leistungsfähigkeit der Turbinen im praktischen Betrieb ohne Einschränkungen ausnützen. Durch die reichliche Dimensionierung der Turbinen, Generatoren, Transformatoren und Leitungen ist somit die Leistungsfähigkeit des Kraftwerkes Innertkirchen gegenüber dem Projekt beträchtlich vergrößert worden. Die verfügbare Leistung, gemessen an den 150-kV-Sammelschienen beträgt bei Betrieb einer einzigen Maschinengruppe 46 MW, bei gleichzeitigem Betrieb von zwei Maschinengruppen 91 MW und bei drei Maschinengruppen 130 MW. Der Rückgang der verfügbaren Leistung pro Maschine bei zunehmender Totalbelastung ist dem Umstand zuzuschreiben, dass bei steigender Totalbelastung der Betriebsdruck der Turbinen infolge des zunehmenden Druckverlustes in der Wasserzuleitung etwas sinkt.

Bei den vorliegenden Betrachtungen über den Wirkungsgrad der Energieerzeugung des Kraftwer-

- A. die hydraulischen Verluste vom Ablaufkanal Handeck bis zu den Einläufen der Turbinen Innertkirchen,
- B. die Turbinenverluste,
- C. die Generatorverluste einschliesslich Erreger- und Spurlagerverluste,
- D. die Verluste in den 13,5-kV-Leitungen von den Generatoren zu den Transformatoren,
- E. die Transformatorverluste,
- F. die Verluste in den 150-kV-Kabeln vom Kraftwerk nach der Freiluftstation Innertkirchen.

Da infolge des grossen Bedarfes an Ladeleistung für das 150-kV-Fernleitungsnetz das Kraftwerk Innertkirchen mit einem Leistungsfaktor arbeitet, der von  $\cos \varphi = 1$  nur unbedeutend abweicht, und zwar zeitweise in voreilendem und zeitweise in nacheilendem Sinne, wurde den folgenden Untersuchungen der Leistungsfaktor  $\cos \varphi = 1$  zu Grunde gelegt.

Entsprechend der Bedeutung und grossen Leistung des Kraftwerkes Innertkirchen von 130 MW wurden die Abnahmeversuche aller Teile mit grösster Sorgfalt durchgeführt. Während bei den Generatoren und Transformatoren sich die Verluste bei den Abnahmeversuchen in den Werken der Lieferfirmen, also schon vor der Inbetriebsetzung des Kraftwerkes Innertkirchen, durch Messung in einwandfreier Weise feststellen liessen, konnte die Bestimmung der hydraulischen Verluste der Wasserzuleitung, sowie des Turbinenwirkungsgrades, naturgemäss erst nach Aufnahme des Kraftwerksbetriebes erfolgen. Bei den 13,5-kV-Leitungen und den 150-kV-Kabeln wurde auf eine messtechnische Bestimmung der Verluste überhaupt verzichtet, da diese Verluste nur einen unbedeu-

tenden Anteil an den Gesamtverlusten ausmachen und sich zudem leicht rechnerisch erfassen lassen. Bei der Bestimmung des Wirkungsgrades resp. der Verluste der Turbinen stellte die Messung des Wasserkonsums die Aufgabe dar, welche von allen zur Bestimmung des resultierenden Wirkungs-

hat eine Länge von 9953,6 m. Er besitzt ein kreisrundes Profil von 3,3 m Durchmesser und verläuft als Druckstollen mit einem durchschnittlichen Gefälle von 4,9 ‰.

Der Zulaufstollen ist auf seiner ganzen Länge teilweise mit Beton, teilweise mit Blechrohren ausgekleidet, wobei der glatten Ausbildung der Stollenwandungen besondere Aufmerksamkeit geschenkt wurde, um dadurch die Gefällsverluste möglichst niedrig zu halten. Sein Schluckvermögen beträgt 40 m<sup>3</sup>/s, wobei aber beim gegenwärtigen Ausbau des Kraftwerkes Innertkirchen mit drei Maschinengruppen nur Wasserführungen bis 24 m<sup>3</sup>/s in Betracht kommen.

Der Druckschacht vom Wasserschloss zur Maschinenanlage Innertkirchen besteht aus zwei Teilstrecken, wovon die obere 995 m lang ist und mit 60 ‰ abfällt, während die untere 810 m misst und ein Gefälle von 12 ‰ aufweist. Der lichte Durchmesser der zur Auskleidung verwendeten Blechrohre beträgt oben 2,6 und unten 2,4 m.

Die Rohre der Verteilung sind wie beim Druckschacht satt in den Fels einbetoniert. Ihr lichter Durchmesser von anfänglich 2,4 m reduziert sich nach jedem Turbinen-Abzweig bis auf 1,55 m bei Turbine 5. Die Zuleitungen zu den Turbinen haben einen lichten Durchmesser von 1,1 und 1,2 m.

Der Druckverlust der Zuleitung vom Unterwasserkanal des Kraftwerkes Handeck bis zu den Turbineneinläufen der Anlage Innertkirchen wurde bei verschiedenen Wasserführungen gemessen, wozu an einen der Turbineneinläufe in Innertkirchen Präzisionsmanometer aufgesetzt worden waren. Aus der Differenz der Manometerablesungen bei stillstehendem Kraftwerk und bei verschiedenen Wasserführungen ergab sich dann der Druckabfall der gesamten Zuleitung, aus welchem durch Berücksichtigung der entsprechenden Geschwindigkeitshöhen der Druckverlust be-

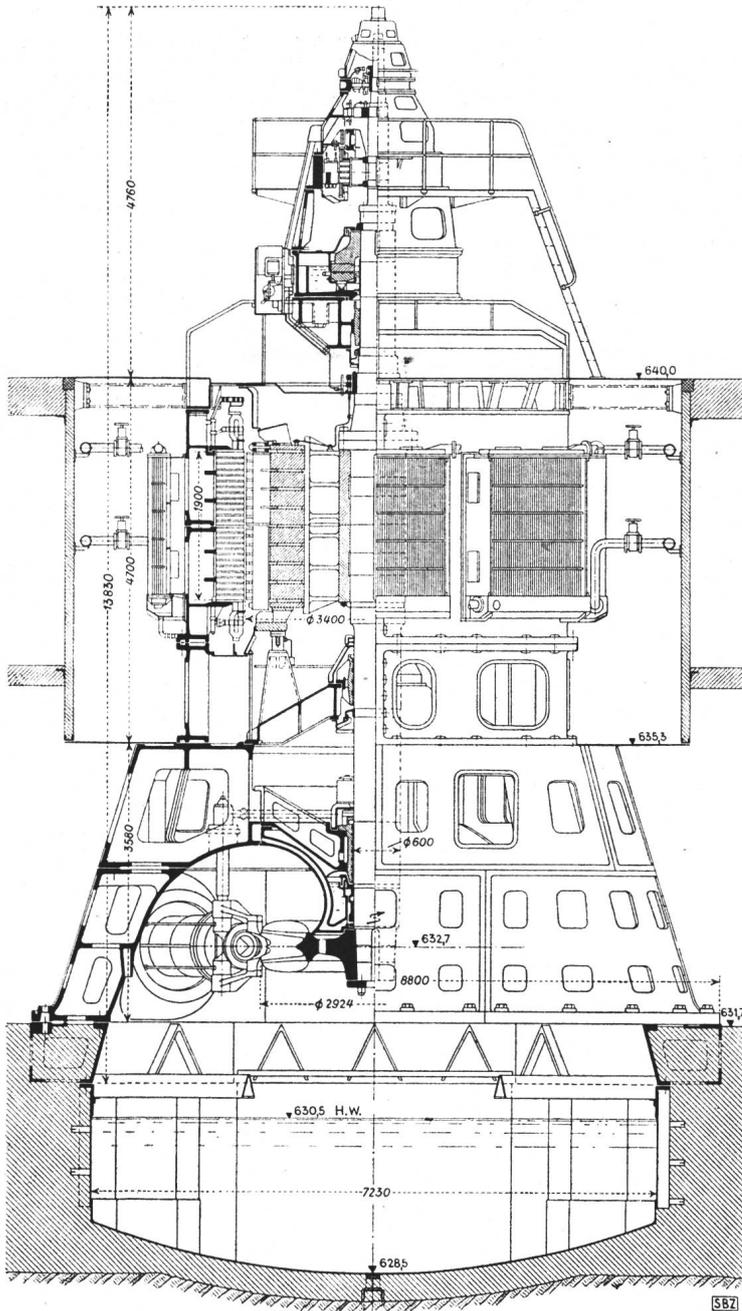


Fig. 2.  
48 000-kW-Maschinengruppe  
1 : 100

grades durchzuführenden Messungen die höchsten Anforderungen verlangte und infolgedessen auch das grösste Interesse bietet. Demgemäss wird im folgenden der Beschreibung der verschiedenen angewendeten Wassermessmethoden, sowie der Beurteilung ihrer Ergebnisse, besondere Aufmerksamkeit geschenkt.

#### A. Zulaufstollen, Druckschacht und Verteilung

Der Zulaufstollen vom Kraftwerk Handeck nach dem Wasserschloss des Kraftwerkes Innertkirchen

rechnet werden konnte. Die Messung des Wasserdurchflusses erfolgte mit Hilfe der Venturi-Rohre

#### Druckverluste Handeck-Innertkirchen

Tabelle I

Wasser-Durchfluss m <sup>3</sup> /s	Druckverlust m	Druckverlust in Prozent des Bruttogefälles
6	2,5	0,37
12	7,0	1,04
18	14,7	2,18
24	25,0	3,72

und der daran angeschlossenen Wassermengen-Anzeiger, welche bei den Wirkungsgradbestimmungen der Turbinen geeicht worden waren. Das Resultat der Bestimmungen des Druckverlustes ist aus der Tabelle I ersichtlich.

## B. Turbinen

Die Hauptdaten der Turbinen sind:

Typ: Vertikalachsige Pelton-Turbine mit 2 Strahlen  
 Nennleistung: 43 000 kW bei 670 m Gefälle  
                   36 400 kW bei 600 m Gefälle  
 Drehzahl: 428,6/min

Die Abnahmeversuche der Turbinen wurden in der Weise durchgeführt, dass die zu messende Maschinengruppe mit der gewünschten Belastung in Betrieb gehalten wurde, wobei gleich wie im Normalbetrieb die erzeugte Energie an das 150-kV-Netz abgegeben wurde. Um Belastungsschwankungen zu vermeiden, wurde der Turbinenregler blockiert und dadurch die Stellung der Nadeln festgehalten, so dass die Wassermenge unverändert auf dem gewünschten Wert blieb.

Die Durchführung der Messungen der Wassermenge und des Gefälles erfolgte gemeinsam durch das Personal der Escher-Wyss Maschinenfabriken A.-G. und der Kraftwerke Oberhasli A.-G., während die Bestimmung der vom Generator abgegebenen Leistung den technischen Prüfanstalten des SEV übertragen war.

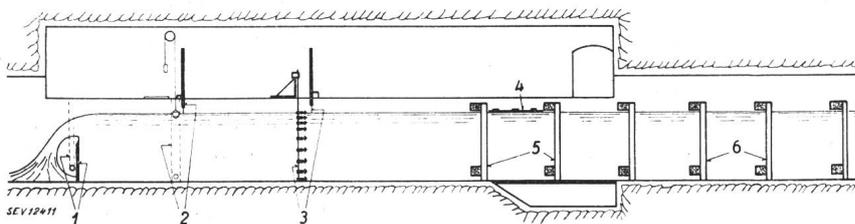


Fig. 3.  
 Skizze der allgemeinen Versuchsanordnung in der Messkammer des Kraftwerkes Innertkirchen

- 1 Messüberfall.
- 2 Stech- und Schwimmerpegel.
- 3 Flügelmessquerschnitt.
- 4 Beruhigungsfloss.
- 5 Feinrechen.
- 6 Grobrechen.

### 1. Bestimmung der Wassermenge

Bei der Vorbereitung der Wassermessung konnte auf die Erfahrungen im Kraftwerk Handeck zurückgegriffen werden, wo seinerzeit eingehende Vergleichsmessungen durchgeführt worden waren<sup>2)</sup>. Der Grösse und Wichtigkeit des Werkes entsprechend waren deshalb für das Kraftwerk Innertkirchen bereits bei der Projektierung für die Durchführung von einwandfreien Wassermessungen bei den Abnahmeversuchen die nötigen Vorkehrungen getroffen worden.

Als massgebende Methode waren Flügelmessungen in Aussicht genommen worden. Um diese Messungen zu ermöglichen, ist eine Strecke des Ablaufkanals des Kraftwerkes Innertkirchen als Meßstrecke ausgebildet und zur Schaffung der Zugänglichkeit zu einer Messkammer erweitert worden, so dass hier sowohl Flügelmessungen, als auch Wassermessungen durch einen Ueberfall vorgenommen werden konnten (Fig. 1 und 3). Der Ueberfall sollte bei den Flügelmessungen geeicht werden.

<sup>2)</sup> W. Dietrich: Wassermessungen mit Ueberfall in der Zentrale Handeck der Kraftwerke Oberhasli A.-G.; Schweiz. Bauztg. Bd. 99(1932), Nr. 1.

Im weitem ist in die Zuleitung jeder Turbine ein Venturi-Rohr eingebaut, speziell geeignet zum Anschluss von Wassermengen-Anzeigern und -Zählern. Auch diese Messeinrichtungen sollten bei den Abnahmeversuchen der Turbinen geeicht werden. Eine weitere Messmethode von grosser Genauigkeit bestand in der Verwendung der aus vielen Versuchen bekannten Eichkurve der Turbinendüsen<sup>3)</sup>.

Da es kaum so bald wieder möglich sein wird, in einem Werk vergleichende Wassermessungen nach so zahlreichen verschiedenen Methoden in so eingehender Weise vorzunehmen, sollen diese näher beschrieben werden.

#### a) Flügelmessung

Die allgemeine Anordnung geht aus der Skizze nach Fig. 3 hervor. Das Flügelmessprofil lag ca. 9 m vor der Ueberfallwand. Die Beruhigungseinrichtungen in Form von Grob- und Feinrechen, sowie einem schweren Floss wurden den örtlichen Verhältnissen angepasst.

Die Flügelmessung war mit dem Ueberfall kombiniert, derart, dass die sich einstellende Wassertiefe im Flügelmessprofil von der Ueberfallhöhe abhing. Dies gestattete eine genaue Einteilung der Flügel auf der vertikalen Stange in der Weise, dass jeweils bei den hauptsächlichsten Garantiepunkten der oberste Flügel möglichst nahe der Wasseroberfläche stand. Für ein Messprofil von 3,7 m Breite

und max. 2,8 m Tiefe schreiben die SIA-Normen mindestens 45 und höchstens 81 Messpunkte vor. In Innertkirchen wurde gleichzeitig mit 9 Flügeln an vertikaler Stange gemessen, und zwar auf 11 Vertikalen, so dass für die Berechnung der Wassermenge rund 25 % mehr Geschwindigkeitspunkte zur Verfügung standen, als durch die SIA-Normen vorgeschrieben sind.

Wie seinerzeit im Kraftwerk Handeck wurde auch hier die Wassermenge mit zwei verschiedenen Flügelsystemen gemessen. Da keine Ringflügel zur Verfügung standen, wurde je ein vollständiger Satz von dreischaufeligen Ott-Speichenflügeln und Ott-Schräkantflügeln, beide von 12 cm Durchmesser, verwendet. Sämtliche Flügel wurden vor den Versuchen im Eidg. Amt für Wasserwirtschaft in Bern mit der entsprechenden Befestigungseinrichtung geeicht.

Die Messung der Wassertiefe erfolgte nach zwei verschiedenen Methoden: Einmal waren über den Flügeln jeweils drei geeignete Stechpegel vorhanden, deren Einstellung jeweils vor und nach den

<sup>3)</sup> H. Gerber: Wassermessung in Freistrahlturbinenanlagen; Schweiz. Bauztg. Bd. 117(1941), Nr. 14.

Versuchen kontrolliert wurde. Eine zweite Methode bestand darin, dass unmittelbar nach Beendigung der Messung in einer Vertikalen die Flügelstange soweit gehoben wurde, bis der jeweils oberste Flügel mit seiner Spitze genau den Wasserspiegel berührte. Mit Hilfe der an der Stange abgelesenen Anhebung, sowie der bekannten Einteilung der Flügel, konnte ebenfalls die Wassertiefe berechnet werden. Die Ergebnisse der beiden Methoden wichen nur unwesentlich voneinander ab. Die Registrierung der Flügelsignale, entsprechend je 10 Flügelumdrehungen, erfolgte gleichzeitig für alle Flügel auf einem Chronographen, zusammen mit den Schlägen einer elektrischen Sekundenuhr.

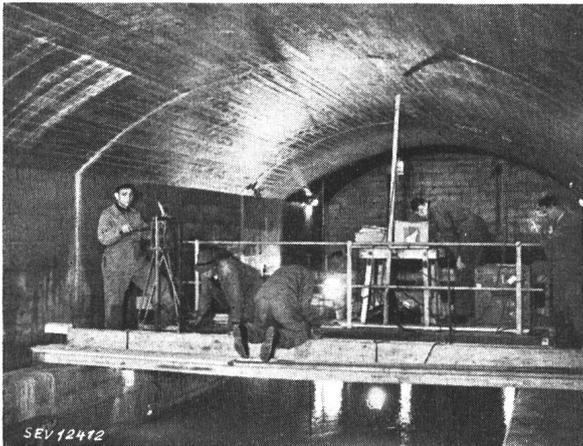


Fig. 4.  
Messkammer während einer Messung

Fig. 4 zeigt eine Aufnahme der Messkammer während einer Messung mit Speichenflügeln; im Hintergrund sind die drei Stechpegel zum Ueberfall zu erkennen.

#### b) Ueberfall

Der als Gleitschütze konstruierte Ueberfall entsprach in seinen Dimensionen genau den Vorschriften des SIA für Ueberfälle ohne Seiteneinschnürung, wobei jedoch die zulässige maximale Wehrhöhe von 800 mm in Innertkirchen mit 1100 mm erheblich überschritten wurde. Die Messung der Ueberfallhöhe erfolgte mit drei Präzisionsstechpegeln mit Noniuseinteilung, ca. 3,6 m vor der Ueberfalltafel. Für die Kontrolle des Beharrungszustandes während den Messungen war im linksseitigen Schwimmerschacht ein Registrierpegel montiert, welcher die Schwankungen des Wasserspiegels in natürlicher Grösse aufzeichnete.

#### c) Venturi-Rohre

Die Venturi-Rohre sind für eine Wassermenge von 8,5 m<sup>3</sup>/s und eine Druckdifferenz von 6 m Wassersäule konstruiert. Während der theoretische Wasserdurchfluss sich auf Grund der Dimensionen zu

$$Q_{\text{theor}} = 3,581 \cdot \sqrt{\Delta p}$$

berechnet, hat die Lieferfirma rechnermässig die Eichgleichung angegeben zu

$$Q_{\text{eff}} = 3,470 \cdot \sqrt{\Delta p}$$

Dies entspricht einem Durchflusskoeffizienten von  $\mu = 0,969$ , welcher als ausserordentlich hoch zu bezeichnen ist. Die Messung der Druckdifferenz erfolgte mit Hilfe eines geeigneten Quecksilber-Differentialmanometers.

#### d) Turbinendüse

Die für die Turbine Innertkirchen gültige Kurve der Düsenwassermenge war bereits früher auf Grund der vorliegenden Unterlagen unter Berücksichtigung des absoluten Gefälles berechnet und für informatorische Messungen verwendet worden. Die Anwendung der Düsen Eichkurve setzte lediglich eine genaue Messung des Nadelhubes voraus. Diese erfolgte mit Hilfe von Präzisionschieblehren, welche durch geeignete Vorrichtungen immer in genau derselben Lage gehalten wurden.

### 2. Messung des Gefälles

Der an der Turbine zur Verfügung stehende Druck wurde an jedem Düsen einlauf getrennt gemessen und zwar jeweils sowohl mit einem Präzisions-Federmanometer, als auch mit einem Ge-

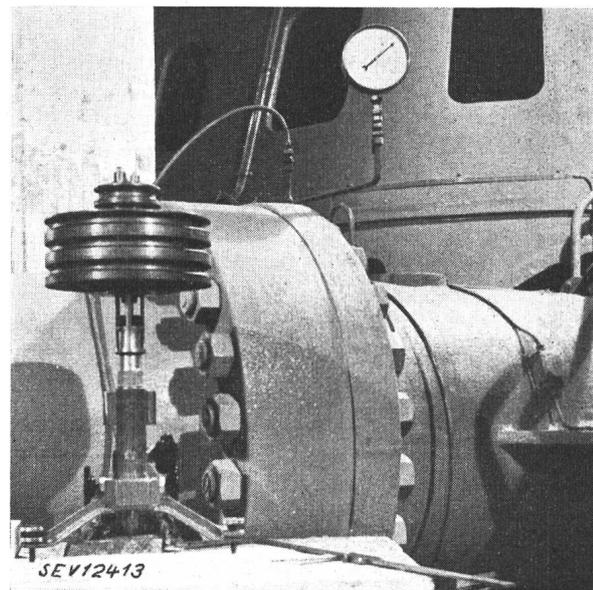


Fig. 5.  
Turbineneinlauf mit Gewichts- und Federmanometer

wichtsmanometer, dessen Stempelende von genau 1 cm<sup>2</sup> Fläche in der Mittellage auf der Höhe der Strahlachse lag. Durch Rotation des Kolbens konnte die Reibung in vertikaler Richtung eliminiert werden. Fig. 5 zeigt den Anschluss der Manometer am Turbineneinlauf.

### 3. Messung der abgegebenen Leistung

Die von der Turbine abgegebene mechanische Leistung wurde berechnet aus der vom Generator abgegebenen elektrischen Leistung, unter Berücksichtigung des bei den Abnahmeversuchen des Generators bestimmten Wirkungsgrades.

Die elektrischen Messungen wurden durch die technischen Prüfanstalten des SEV vorgenommen. Zu diesem Zweck wurden die folgenden amtlich geeichten Präzisions-Messeinrichtungen installiert:

- 1 Satz Präzisions-Meßinstrumente des SEV,
- 1 Präzisions-Eichzähler des SEV, welcher während der Flügelmessung bei jedem Messpunkt abgelesen wurde,

ferner

- 1 Satz Präzisions-Instrumente der KWO zur Kontrolle.

Die Abweichung der Angaben der Präzisions-Instrumente und des Eichzählers SEV betrug höchstens 0,2 ‰, diejenige der Präzisionsinstrumente SEV und KWO höchstens 0,16 ‰. Der Wirkungsgrad-Bestimmung wurden die Wattmeter-Messungen des SEV zu Grunde gelegt.

Als Messwandler dienten die normalen Betriebsstrom- und Spannungswandler. Diese gehören der Genauigkeitsklasse 0,2 VDE an und können somit als Präzisionswandler angesprochen werden. Zudem wurden deren Fehler bei der Auswertung der Messung berücksichtigt.

#### 4. Durchführung der Versuche, Ergebnisse

Unmittelbar nach Beendigung einer Wassermessung wurden die Flügel ausgewechselt und der Versuch mit unveränderter Einstellung der Turbine wiederholt. Eine Wassermessung dauerte im Mittel 25 Minuten, die Auswechslung der Flügel nahm etwa 13 Minuten in Anspruch. Insgesamt wurde in zwei Serien bei total 13 verschiedenen Belastungen je doppelt gemessen.

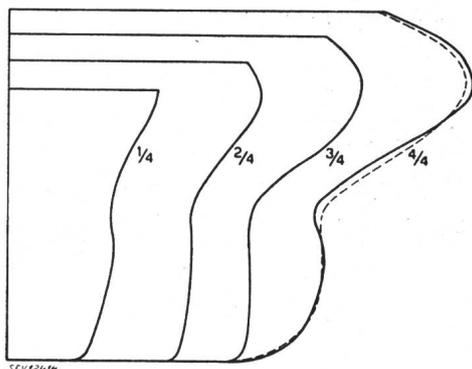


Fig. 6.

Vergleich der Geschwindigkeitsverteilung auf einer Vertikalen in Mitte Kanal bei verschiedenen Belastungen  
 — Speichenflügel. - - - - - Schrägkantflügel.

Von besonderem Interesse ist der Vergleich der Ergebnisse der verschiedenen Wassermessmethoden. Für die Darstellung wurde die neue Rehbock-Formel 1929 verwendet:

$$Q = \left[ 1,783 + 0,24 \cdot \frac{h_e}{s} \right] \cdot B \cdot h_e^{3/2}$$

Aus der Ueberfallhöhe  $h_{ii}$  lässt sich berechnen:

$$h_e = h_{ii} + 1,1 \text{ in mm}$$

Reduziert man diese Formel mit  $B \cdot h_e^{3/2}$ , so ergibt sich die vereinfachte Form der Gleichung einer Geraden:

$$y = a + b \cdot x$$

In Fig. 7 sind die Ergebnisse der einzelnen Wassermessmethoden verglichen mit denjenigen Wassermengen, welche sich aus den zwei Ueberfallformeln Rehbock 1929 und SIA 1924 berechnen lassen.

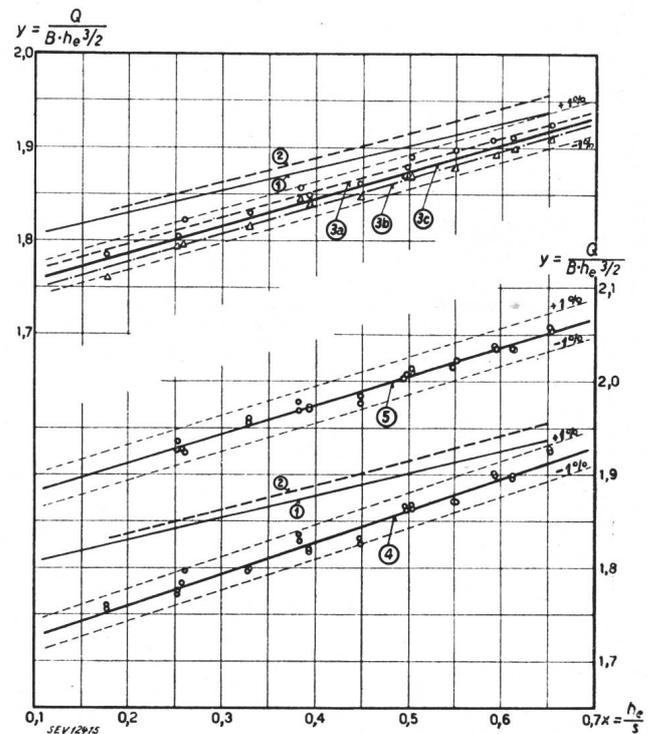


Fig. 7.

- Ergebnisse der verschiedenen Wassermessmethoden (Streuung der Versuchspunkte.)
- 1 Ueberfall Rehbock 1929.
  - 2 Ueberfall SIA 1924.
  - 3a Speichenflügel
  - 3b Schrägkantflügel
  - 3c Mittlere Q-Gerade.
  - 4 Turbinendüse.
  - 5 Venturimeter.

Dabei zeigt sich folgendes: Die beiden Flügel-systeme weisen unter sich im Garantiebereich für Innertkirchen eine Differenz von 0,6...0,8 ‰ auf. Da die Messungen in genau derselben Weise durchgeführt und die Flügel unmittelbar vor den Versuchen in derselben Prüfanstalt geeicht worden waren, kann dies nur damit erklärt werden, dass die zwei Flügelarten in verschiedener Weise auf die vorhandene Turbulenz reagierten. Für das gleiche Flügelsystem ist die Streuung der Messpunkte ausserordentlich gering, so dass sich, berechnet nach der Methode der kleinsten Quadrate, ohne weiteres die mittlere Ausgleichsgerade durch die Versuchspunkte legen lässt. Da die beiden Flügel-systeme gleichwertig sind, wurde für die Berechnung der Turbinenwirkungsgrade das Mittel der beiden Flügelwassermengen als verbindlich angenommen.

Auch die Messungen mit der Turbinendüse und mit dem Venturi-Rohr weisen verhältnismässig geringe Streuungen auf.

In Fig. 8 sind die verschiedenen Wassermessmethoden, d. h. die durch die Messpunkte gelegten Ausgleichsgeraden, miteinander verglichen. Im Be-

reich der für Innertkirchen abgegebenen Garantien zeigen bereits die beiden Ueberfallformeln kleinere Unterschiede voneinander. Die mittlere Gerade der Flügelmessung liegt im Durchschnitt 1,5...2,5 % unter der mittleren Ueberfallwassermenge. Die Uebereinstimmung ist also nicht besonders gut.

Dagegen ist die Differenz zwischen den Wassermessungen mit Flügeln und der Turbinendüse eher kleiner als die Differenz zwischen den beiden Ueberfallformeln unter sich. Es ist dies ein erneuter Beweis dafür, dass zum mindesten im Neuzustand mit den Turbinendüsen zuverlässige Wassermessungen durchgeführt werden können.

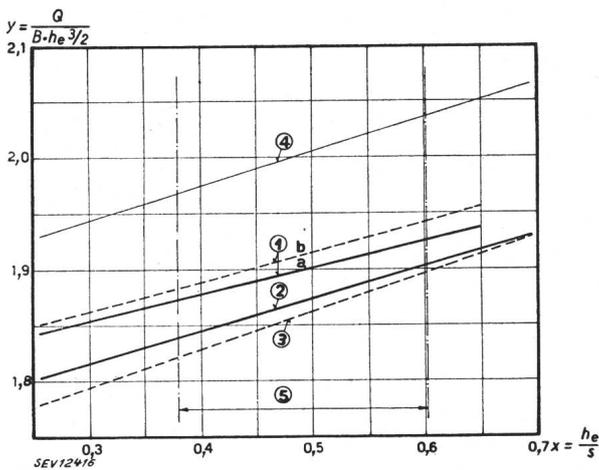


Fig. 8.

Vergleich der mittleren Ausgleichsgeraden der verschiedenen Wassermessmethoden

- 1a Ueberfall Rehbock 1929.
- 1b Ueberfall SIA 1924.
- 2 Mittlere Flügelgerade.
- 3 Turbinendüse.
- 4 Venturimeter.
- 5 Garantie-Bereich.

Die mit dem vom Lieferanten angegebenen Durchflusskoeffizienten berechneten Wassermengen des Venturi-Rohres liegen im Mittel 7 % zu hoch. Damit ergibt sich endgültig ein Durchflusskoeffi-

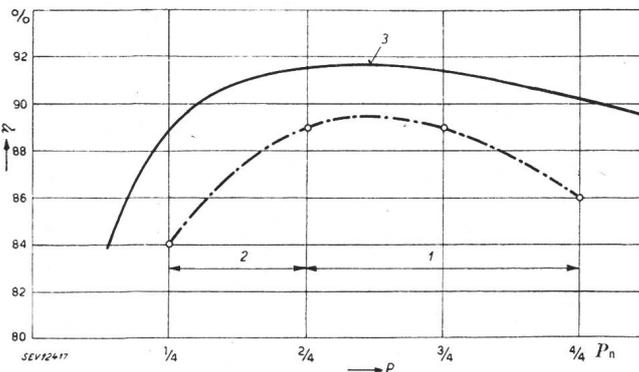


Fig. 9.

Wirkungsgrad der Turbinen

- bei  $n = 428,6$  U./min und  $H = 670$  m Gefälle.
- 1 Garantie. 2 Information. 3 Versuch.
- $P_n = 43\ 000$  kW (58 400 PS).

zient von  $\mu = \sim 0,9$ , was mit den Messergebnissen anderer Venturi-Rohre übereinstimmt.

In Fig. 9 sind die Ergebnisse der Messungen, unter Berücksichtigung der mittleren Flügelwasser-

mengen, verglichen mit der seinerzeit bei der Bestellung abgegebenen Garantie dargestellt. Es zeigt sich, dass die Kurve einen Scheitelwert von 91,7 % erreicht und von Garantievollast bis 30 % derselben über 90 % liegt. Auf das Garantiegefälle von 670 m umgerechnet beträgt die Maximalleistung 48 800 kW und sie überschreitet die garantierte Leistung von 43 000 kW somit um rund 13,5 %.

Diese Ergebnisse wurden erzielt an einer Maschinengruppe, welche im Zeitpunkt der Messungen bereits ca. 2 700 Stunden im regulären Betrieb gearbeitet und während dieser Zeit eine Energieproduktion von über 70 Millionen kWh erzeugt hatte.

### C. Generatoren

Die drei gegenwärtig im Kraftwerk Innertkirchen eingebauten Drehstrom-Generatoren weisen folgende Hauptdaten auf:

Nennleistung bei Nennspannung	47 500 kVA bei $\cos \varphi$ 0,7
Maximale Leistung (bei 10 % erhöhter Spannung)	52 250 kVA bei $\cos \varphi$ 0,7
Nennspannung	13 500 V
Nennstrom	2 030 A
Drehzahl	428,6/min

Die Abnahmeversuche wurden durch die Technischen Prüfanstalten des SEV in der Fabrik vorgenommen, nach der Methode der Einzelverlustmessung, nach den Regeln des VDE (REM), mit folgendem Ergebnis:

Tabelle II

	10300	20600	30900	41200	48600	kW
Turbinenleistung	10300	20600	30900	41200	48600	kW
Generatorleistung bei $\cos \varphi = 1$	9630	20000	30200	40300	47600	kW
Reibungs- und Ventilationsverluste	410	410	410	410	410	kW
Eisenverluste (13,5 kV)	200	200	200	200	200	kW
Kupferverluste (Stator)	12	54	118	204	285	kW
Erregungs- und Zusatzverluste	48	56	72	86	105	kW
Totalverluste	670	720	800	900	1000	kW
Wirkungsgrad	93,5	97,1	97,5	97,8	98,0	%

### D. Verbindungsleitungen

zwischen Generatoren und Transformatoren

Die Verbindungsleitungen zwischen Generatoren und Transformatoren bestehen aus 3 Aluminiumschienen pro Pol von je  $80 \times 8$  mm, total  $1920 \text{ mm}^2$  Querschnitt, und einer Länge von je ca. 30 m.

Bei einem Stromwärmeverlust von 71,5 W/m ergibt sich bei der maximalen Belastung von 47 500 kVA bei 13,5 kV ein Verlust von total 6,5 kW pro Maschinengruppe.

### E. Transformatoren

Die drei gegenwärtig eingebauten Transformatoren weisen folgende Hauptdaten auf:

Nennleistung	47 500 kVA
Maximale Leistung (bei 10 % erhöhter Primärspannung)	52 250 kVA
Uebersetzung im Leerlauf	$\frac{12900/13500}{160\ 000} \frac{14100}{14700/15\ 300}$ V
Nennstrom	2030/172 A

Die Abnahmeversuche wurden durch die technischen Prüfanstalten des SEV, nach den Regeln des VDE (RET) in der Fabrik vorgenommen. Bezogen auf das Uebersetzungsverhältnis 13 500/160 000 V wurden folgende Resultate erreicht:

Tabelle III.

Turbinenleistung	10300	20600	30900	41200	48600	kW
Transformatorleistung bei $\cos \varphi = 1$	9630	20000	30200	40300	47600	kW
Eisenverluste	80	80	80	80	80	kW
Kupferverluste	9	45	103	184	257	kW
Totalverluste	89	125	183	264	337	kW
Wirkungsgrad	99,08	99,38	99,4	99,35	99,29	%

**F. Hochspannungskabel zwischen Transformatoren und Freiluftstation**

Diese Kabelverbindung ist für 150 000 V Uebertragungsspannung dimensioniert, mit je einem Kabel von 150 mm<sup>2</sup> Kupfer-Querschnitt pro Pol. Die Stranglängen betragen:

Maschinengruppe 1	420 m
Maschinengruppe 2	345 m
Maschinengruppe 3	323 m

Bei einem mittleren effektiven Wechselstrom-Widerstand von 0,163 Ohm pro Pol und km betragen die Verluste im Kabelstrang der mittleren Maschinengruppe bei der maximalen Belastung von 47 500 kVA ca. 6,5 kW, einschliesslich der dielektrischen Verluste.

**G. Der resultierende Wirkungsgrad**

Der resultierende Wirkungsgrad der Energieerzeugung im Kraftwerk Innertkirchen in Abhängigkeit der abgegebenen Leistung bei einem Leistungsfaktor  $\cos \varphi = 1$  ist in Fig. 10 dargestellt. Es geht daraus hervor, dass der Maximalwert des Wirkungsgrades bei einer Belastung von 25...30 MW

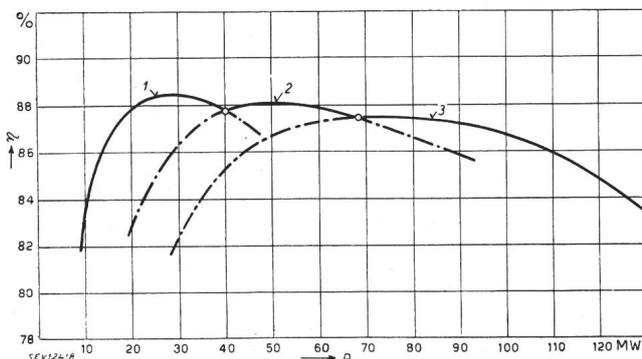


Fig. 10.

Resultierender Wirkungsgrad des Kraftwerkes Innertkirchen von der Wasserentnahme im Ablaufkanal des Kraftwerkes Handeck bis zur Energieabgabe in 150 kV Spannung  
1, 2, 3 Zahl der im Betrieb stehenden Maschinengruppen.

erreicht wird und 88,4 % beträgt. Bei zunehmender Belastung fällt er langsam zurück, beträgt aber bei der beim gegenwärtigen Ausbau maximal verfügbaren Kraftwerksleistung von 130 MW immer noch

über 83 %. Bei Belastungen unter 15...20 MW sinkt der Wirkungsgrad rasch ab. Er beträgt bei 12 MW, entsprechend 25% der maximalen Leistung einer Maschinengruppe, noch 85 %, bei 8 MW, entsprechend ca. 16 % der Maximalleistung einer Maschine, noch 82 %. Kleinere Belastungen als 8 MW sind im praktischen Betrieb nicht zu erwarten. Sie lassen sich beim Verbundbetrieb, an welchem zahlreiche Kraftwerke beteiligt sind, durch entsprechende organisatorische Massnahmen der Lastverteilung auf die verschiedenen parallel laufenden Kraftwerke ohne Schwierigkeiten vermeiden.

Die Energiebilanz bei der dem gegenwärtigen Ausbau entsprechenden Maximalbelastung von 130 MW ist in Fig. 11 dargestellt.

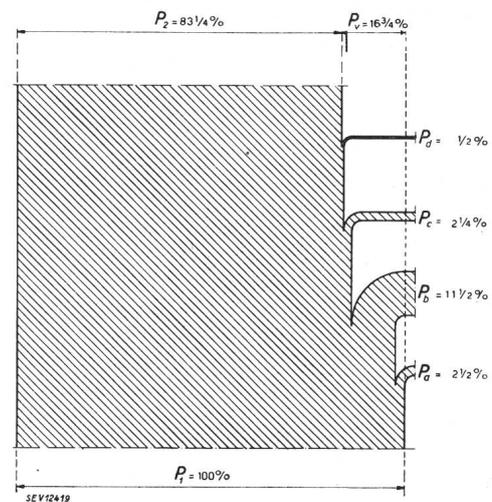


Fig. 11.

Energiebilanz des Kraftwerkes Innertkirchen für eine Nutzleistung von 130 MW von der Wasserentnahme im Ablaufkanal des Kraftwerkes Handeck bis zur Energieabgabe in 150 kV Spannung

- $P_1$  Aufgenommene Leistung.
- $P_2$  Abgegebene Leistung.
- $P_v$  Verluste.
- Aufteilung der Verluste:*
- $P_a$  Wasserzuleitung.
- $P_b$  Turbinen.
- $P_c$  Generatoren einschl. Spurlager.
- $P_d$  Transformatoren und elektr. Leitungen.

Die Kurve des Wirkungsgrades (Fig. 10) ist für Energieabgabe mit einem Leistungsfaktor  $\cos \varphi = 1$ , der den beim Kraftwerk Innertkirchen tatsächlich vorhandenen Verhältnissen entspricht, aufgetragen. Ein Abweichen des Leistungsfaktors hat eine Verschlechterung des Wirkungsgrades zur Folge. Diese beträgt beispielsweise für einen Leistungsfaktor  $\cos \varphi = 0,8$  nachteilig über den ganzen Belastungsbereich im Mittel 0,6 %.

Aus der Wirkungsgradkurve Fig. 10 geht auch deutlich hervor, dass es bei Belastungen zwischen 40 und 46 MW wirtschaftlicher ist, 2 Maschinen mit gleichmässig verteilter Last in Betrieb zu halten, als die Belastung mit nur einer einzigen Maschine zu übernehmen. Die analogen Folgerungen können gezogen werden für den Uebergang von 2 auf 3 Maschinen bei Belastungen zwischen 68 und 91 MW. Dieses Ueberschneiden der Wirkungsgradkurven für den Betrieb mit 1, 2 oder

3 Maschinen zeigt also, dass es zum Erreichen des maximalen Kraftwerks-Wirkungsgrades jeweils nötig ist, bei steigender Totalbelastung eine weitere Maschinengruppe in Betrieb zu nehmen, schon bevor die Leistungsfähigkeit der bereits laufenden Maschinen voll ausgenützt ist. Diese Massnahme zur Erzielung des maximalen Wirkungsgrades erfüllt gleichzeitig eine weitere Forderung einer sorgfältigen Kraftwerks-Betriebsführung, welche verlangt, dass jederzeit eine gewisse rotierende Reserveleistung zur Verfügung stehen soll, um bei unerwarteten Vorkommnissen, z.B. beim Ausfall von andern am Parallelbetrieb beteiligten Kraftwerken, momentan mit zusätzlicher Leistung eingreifen zu können. Die Erfüllung dieser Forderung ist besonders für ein Speicherkraftwerk wie das Kraftwerk Innertkirchen von grosser Bedeutung.

Der erreichte Wirkungsgrad der Energieerzeugung des Kraftwerkes Innertkirchen darf sowohl in seinem absoluten Wert, als auch in seinem Verlauf in Abhängigkeit der Totalbelastung des Werkes als überaus günstig bezeichnet werden. Trotzdem die Messungen an einer Maschinengruppe durchgeführt wurden, welche schon 2700 Stunden in Betrieb gestanden hatte, überschreiten die gemessenen Werte die der Projektierung des Kraftwerkes zu Grunde gelegten Annahmen. Dadurch wird die Produktionsfähigkeit des Kraftwerkes gegenüber dem Projekt wesentlich vergrössert. Das günstige Ergebnis wurde erreicht einmal durch eine reichliche Dimensionierung und sorgfältige Bauausführung der wasserführenden Organe, speziell des Zulaufstollens, des Druckschachtes und der Verteilleitung, dann auch speziell durch eine sorgfältige Projektierung der Turbinen, verbunden mit eingehenden Modellversuchen, wobei vorsichtig vermieden wurde, bei der Festsetzung der Drehzahl in das Gebiet zu gelangen, in welchem eine Gewichtsersparnis nur mit einer spürbaren Verschlechterung des Wirkungsgrades und einer Verminderung der Korrosionsbeständigkeit der Laufräder erkauft werden kann. Schlussendlich haben auch die Herstellerfirmen der Generatoren und Transformatoren zum guten Ergebnis beigetragen, indem sie für die von ihnen gelieferten Objekte Wirkungsgrade erreichten, welche noch vor wenigen Jahren als unmöglich betrachtet wurden.

#### H. Die betriebsmässige Ueberwachung des Wirkungsgrades

Die angegebenen Wirkungsgradwerte stützen sich auf Verlustmessungen, die an den Anlageteilen im neuen Zustand oder doch wenigstens in neuwertigem Zustand vorgenommen wurden. Bei den Generatoren, Transformatoren und elektrischen Verbindungsleitungen ist nicht zu erwarten, dass die Verlustwerte durch Alterungserscheinungen beeinflusst werden. Anders liegen hingegen die Verhältnisse beim Zulaufstollen, beim Druckschacht und speziell bei den Turbinen. Die wasserführenden Organe dieser Objekte können im Laufe der Zeit Veränderungen erfahren durch Aufrauhren der Betonoberfläche der Stollenauskleidung, durch

Rostbildung an den Wandungen der mit Blech ausgekleideten Stollen- und Rohrleitungen, sowie durch Korrosions- und Kavitationserscheinungen der vom Wasser benetzten Flächen, welche eine nicht unbedeutende Vergrösserung der Verluste zur Folge haben. Besonders die Turbinen sind wegen der in diesen Maschinen vorhandenen grossen Wassergeschwindigkeiten diesen Einwirkungen in hohem Masse ausgesetzt<sup>4)</sup>, so dass hier eine merkbare Vergrösserung der Verluste schon nach einigen Tausend Betriebsstunden eintritt. Ausserdem können zusätzliche Verluste verursacht werden durch Geschiebe und in die Einläufe der Turbinen eingeklemmte Holzteile usw., durch welche die Strahlbildung gestört wird.

Aus diesen Gründen ist es wünschenswert, den Wirkungsgrad der Energieerzeugung nicht nur bei den Abnahmeprüfungen einmalig zu bestimmen, sondern ihn auch während des Betriebes dauernd zu überwachen. Hierzu ist erforderlich, sowohl die von jedem Generator gelieferte elektrische Energie, als auch die von jeder Turbine aufgenommene Wassermenge fortlaufend durch entsprechende Zählereinrichtungen zu bestimmen. Eine Erfassung des Brutto-Gefälles ist hierfür in der Regel nicht notwendig, da dessen Grösse im praktischen Betrieb nur unbedeutende Schwankungen aufweist.

Die Messung der elektrischen Energie ist mit den heute verfügbaren Mitteln, d. h. mit Präzisionsmesswandlern und Präzisionszählern, bei verhältnismässig geringem Aufwand an Apparaten leicht

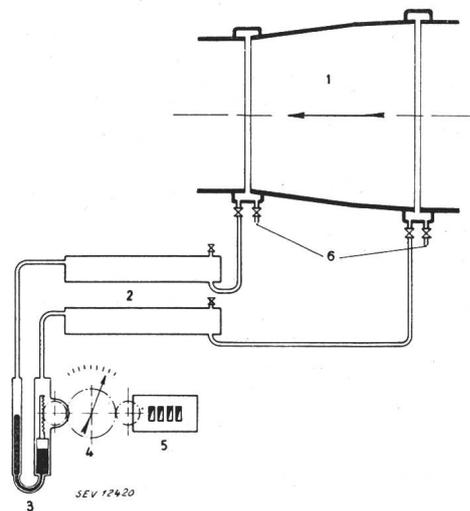


Fig. 12.

Schematische Darstellung der Venturi-Wassermesseinrichtung

- |                                       |   |
|---------------------------------------|---|
| 1 Venturi-Rohr.                       | 4 Wassermengen-Anzeiger (m <sup>3</sup> /s).      |
| 2 Schlammabscheider.                  | 5 Wassermengenzähler (m <sup>3</sup> ).           |
| 3 Differential-Quecksilber-Manometer. | 6 Anschlüsse für Kontroll-Differential-Manometer. |

durchführbar. Falls die Zähler einer regelmässigen periodischen Nacheichung unterzogen werden, lassen sich die Fehler der elektrischen Messung auf Werten unterhalb 0,5 % halten.

<sup>4)</sup> F. Aemmer: Ueber den Einfluss der Abnützung von Nadeln und Düsen auf den Wirkungsgrad von Pelton-Turbinen. Bull. SEV 1943, Nr. 13.

Bedeutend schwieriger ist die betriebsmässige Bestimmung der von den einzelnen Turbinen aufgenommenen Wassermenge. Zur Schaffung dieser Messmöglichkeit wurden in der Schieberkammer des Kraftwerkes Innertkirchen in die Zuleitungen der einzelnen Turbinen Venturi-Rohre eingebaut für eine Druckdifferenz von 6 m WS, bei einer Durchflussmenge von 8,5 m<sup>3</sup>/s. Die Registrierung der Durchflussmengen erfolgt durch an die Venturi-Rohre angeschlossene mechanische Wassermengenzähler. Der schematische Aufbau dieser Einrichtungen ist aus Fig. 12 ersichtlich, und die Disposition der ganzen Anlage ist in Fig. 13 dargestellt.

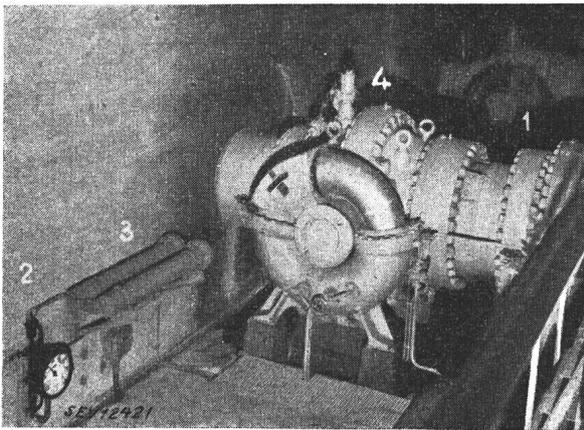


Fig. 13.

Venturi-Wassermesseinrichtung in der Schieberkammer des Kraftwerkes Innertkirchen

- 1 Venturi-Rohr.
- 2 Wassermengen-Anzeiger und Zähler.
- 3 Schlammabscheider.
- 4 Drehschieber, als Diffusor des Venturi-Rohres gebaut.

Die Eichung der Venturi-Rohre erfolgte wie oben ausgeführt durch Flügelmessungen anlässlich der Abnahmeversuche der Turbinen. Die Eichkonstante ist einzig bestimmt durch die geometrische Gestaltung der Rohre. Sie kann sich also auch im Laufe der Zeit nicht verändern, vorausgesetzt, dass die Rohrwandungen ständig von Rost frei gehalten werden, und dass beim Ausbau und Wiedereinbau der Rohre dafür Sorge getragen wird, dass durch genau gleichen Zusammenbau der Montageflanschen die geometrischen Verhältnisse keine Änderung erfahren. Im Gegensatz zu den Venturi-Rohren handelt es sich bei den Wassermengenzählern um aus zahlreichen mechanischen Teilen bestehende mechanische Apparate, die gleich wie die elektrischen Zähler eine periodische Nacheichung verlangen, falls Wert auf grosse Genauigkeit gelegt wird. Diese Nacheichung ist leicht an Ort und Stelle durchführbar, indem die Registrierung der Wassermengenzähler verglichen wird mit der aus der bekannten Eichkonstante des Venturi-Rohres berechneten Wassermenge, wobei die Druckdifferenz des Rohres mit Hilfe eines Quecksilber-Differentialmanometers bestimmt wird. Dabei wird während der Messung die entsprechende Turbine auf dem gewünschten Belastungswert blockiert.

Es liegt in der Natur der physikalischen Verhältnisse, dass die Genauigkeit der Wassermessung mit Hilfe der Venturi-Rohre und der Wassermengenzähler nicht an die Genauigkeit heranreicht, die bei der Messung der abgegebenen elektrischen Energie möglich ist. Dass aber trotzdem eine bemerkenswerte Genauigkeit der Wassermessung erreichbar ist, geht aus dem im folgenden beschriebenen Kontrollversuch hervor.

In der Zeit vom 5. bis 31. Juli 1944 wurde auf die Zuleitung von Zusatzwasser beim Kraftwerk Handeck verzichtet, so dass während dieser Zeit die Wassermengen der Werke Handeck und Innertkirchen genau gleich gross waren, wie anhand von Fig. 1 leicht verständlich ist. Da die Turbinen des Kraftwerkes Handeck gleich wie die enigen des Kraftwerkes Innertkirchen mit Venturi-Rohren und Wassermengenzählern ausgerüstet sind, bot sich während dieser Zeit Gelegenheit, die Registrierungen der verschiedenen Apparate miteinander zu vergleichen. Die Eichung der Venturi-Rohre des Werkes Handeck war bei den Abnahmeversuchen der Turbinen Handeck mit Hilfe von Flügelmessungen im Jahre 1931 durchgeführt worden, so dass zwischen der Vornahme der Eichungen der Venturi-Rohre Handeck einerseits und Innertkirchen andererseits ein Zeitintervall von 12 Jahren liegt. Bei den Wassermengenzählern Handeck und Innertkirchen handelt es sich um Apparate neuester Konstruktion, die mit Hilfe des Differential-Manometers periodisch nachgeiecht werden. Die Auswertung der

*Registrierungen der Wassermengen-Zähler der Kraftwerke Handeck und Innertkirchen in der Zeit vom 5. bis 31. Juli 1944.*

Während der Messperiode waren beide Messeinrichtungen von derselben Wassermenge durchflossen.

Tabelle IV

Datum Juli 1944	Messeinrichtung Handeck 1000 m <sup>3</sup>	Messeinrichtung Innertkirchen 1000 m <sup>3</sup>	Differenz	
			1000 m <sup>3</sup>	Prozent
5.	675,9	675,9	—	—
6.	589,8	588,8	— 1,0	— 0,17
7.	535,8	534,3	— 1,5	— 0,28
8.	370,1	369,8	— 0,3	— 0,08
9.	102,3	98,6	— 3,7	— 3,62
10.	647,5	647,3	— 0,2	— 0,03
11.	774,4	772,4	— 2,0	— 0,26
12.	806,2	805,7	— 0,5	— 0,06
13.	863,6	865,3	+ 1,7	+ 0,20
14.	840,9	840,9	—	—
15.	619,9	619,7	— 0,2	— 0,03
16.	182,0	177,6	— 4,4	— 2,42
17.	740,1	739,2	— 0,9	— 0,12
18.	841,3	838,7	— 2,6	— 0,31
19.	947,1	943,4	— 3,7	— 0,39
20.	952,8	949,6	— 3,2	— 0,34
21.	803,5	802,4	— 1,1	— 0,14
22.	599,3	597,8	— 1,5	— 0,25
23.	150,0	147,2	— 2,8	— 1,87
24.	813,3	813,8	+ 0,5	+ 0,06
25.	964,6	961,6	— 3,0	— 0,31
26.	893,1	889,2	— 3,9	— 0,44
27.	849,8	848,7	— 1,1	— 0,13
28.	770,8	768,0	— 2,8	— 0,36
29.	639,4	639,0	— 0,4	— 0,06
30.	127,7	126,1	— 1,6	— 1,25
31.	689,2	690,2	+ 1,0	— 0,15
5.—31. 7.	17790,4	17751,2	— 39,0	0,22

Vergleichsdaten erfolgte auf Grund der Eintragungen des Maschinistenpersonals in die Betriebsrapporte, in welchen jeweils um Mitternacht die Zählerstände sämtlicher Wassermengenzähler vermerkt werden. Die Wassermenge Handeck wurde bestimmt als Summe der Registrierungen der Wassermengenzähler der 4 Turbinen Handeck, die Wassermenge Innertkirchen analog als Summe der Registrierungen der 3 Wassermengenzähler in Innertkirchen.

Das Ergebnis dieser Vergleichsmessungen ist in Tab. IV zusammengestellt. Es geht daraus hervor, dass die beide Zentralen durchfliessende Wasser-

Zur Erläuterung der praktischen Bedeutung der täglichen Wirkungsgradbestimmungen ist in Fig. 14 für die Zeit vom 1. August bis 30. November 1944 der mittlere tägliche Wirkungsgrad des Kraftwerkes Innertkirchen graphisch aufgetragen. Dabei wurde auf die Eintragung der Werte der Samstage und Sonntage verzichtet, da sich diese infolge der stark veränderten Belastungsverhältnisse nicht mit den Werten der Wochentage vergleichen lassen.

Wie aus Fig. 14 hervorgeht, sinkt der Wirkungsgrad vom 1. August bis 12. Oktober langsam ab, was auf die fortschreitende Verschlechterung der Na-

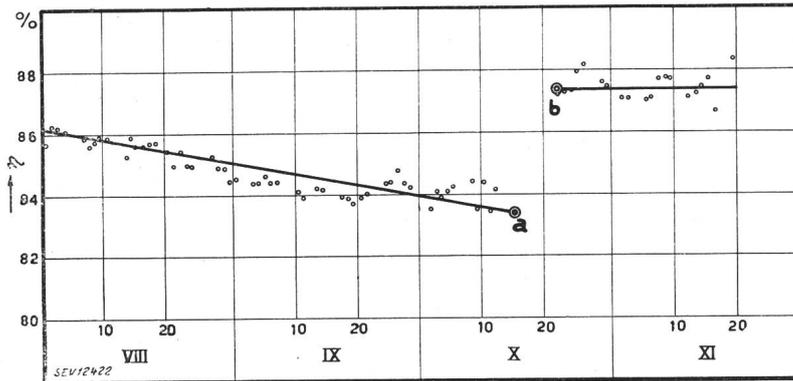


Fig. 14.

Verlauf des mittleren täglichen Wirkungsgrades des Kraftwerkes Innertkirchen, berechnet aus den betriebsmässigen Ablesungen der kWh- und der Wassermengen-Zähler (August bis November 1944). a-b In dieser Zeit wurden die korrodierten Nadeln und Düsen bei allen drei Maschinengruppen ersetzt.

menge während der Messperiode von 27 Tagen durch die Messeinrichtungen Innertkirchen um 0,22 % kleiner registriert worden ist als durch die Messeinrichtungen Handeck. Dabei sind die eigentlichen Streuungen der Abweichung sehr gering. Einzig an Sonntagen, an welchen die Maschinen und demgemäss auch die Wassermesseinrichtungen mit ungünstigen Teilbelastungen arbeiteten, liegen die Abweichungen über 1 %.

Da die Eichung der Venturi-Rohre Handeck und Innertkirchen auf Grund der jeweiligen Flügelmessungen erfolgte, kann aus der guten Uebereinstimmung der Vergleichsmessungen die Folgerung gezogen werden, dass die im Jahre 1931 im Kraftwerk Handeck durchgeführten Flügelmessungen mit den Flügelmessungen des Jahres 1943 im Kraftwerk Innertkirchen praktisch übereinstimmen. Dieses Ergebnis ist um so bemerkenswerter, da die beiden Flügelmessungen nicht nur mit vollständig verschiedenen Messinstrumentarien, sondern auch in verschiedenartigen Messkanälen durchgeführt worden sind.

deln und Düsen der Turbinen zurückzuführen ist. Vom 16. bis 22. Oktober wurden die Nadeln und Düsen der 3 Turbinen ersetzt, worauf der Wirkungsgrad um 4 % auf ca. 87,5 % stieg, d. h. wieder ungefähr den Wert erreichte, der bei mittlerer Kraftwerksbelastung mit den neuen Turbinen gemessen worden war.

Durch dieses Beispiel dürfte dargelegt sein, von welcher Wichtigkeit die fortlaufende Ueberwachung des Wirkungsgrades für die rationelle Betriebsführung eines Grosskraftwerkes ist. Dass zur Schaffung dieser Möglichkeit die Aufwendungen für die erforderlichen Messeinrichtungen wirtschaftlich vollkommen berechtigt sind, geht daraus hervor, dass eine nur unbedeutende Verbesserung des Wirkungsgrades eine ganz beträchtliche zusätzliche Energieproduktion ermöglicht. So entspricht beispielsweise beim Kraftwerk Innertkirchen eine Verbesserung des mittleren Wirkungsgrades von 1 % einer jährlichen Mehrproduktion von 3,7 Millionen kWh.

## Application pratique au réglage fréquence-puissance

Par E. Soloveïcik, Zoug

621.316.728

Es werden vorerst die Grundlagen der Frequenz-Leistungs-Regulierung in Erinnerung gerufen. Anschliessend beschreibt der Autor eine Einrichtung zur automatischen und kontinuierlichen Registrierung der mittleren Abweichung von der Normalfrequenz und des Energie-Austausches zweier gekuppelter Netze.

Après avoir rappelé les principes fondamentaux de la méthode de réglage fréquence-puissance, l'auteur décrit un appareillage automatique enregistrant continuellement les écarts moyens de la fréquence et les puissances moyennes échangées entre deux complexes voisins.

L'extension des interconnexions de grands réseaux électriques et l'expérience acquise dans ce domaine durant les dix dernières années a démontré

que, pour assurer une exploitation rationnelle des réseaux de transport d'énergie, les puissances échangées entre chaque participant à l'interconnexion et