

Rückblick auf eine vierjährige Anwendung der thermodynamischen Methode bei Wirkungsgradmessungen hydraulischer Maschinen

Autor(en): **Vaucher, R.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins : gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV) und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)**

Band (Jahr): **54 (1963)**

Heft 6

PDF erstellt am: **11.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-916464>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

Gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV)
und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)

Rückblick auf eine vierjährige Anwendung der thermodynamischen Methode bei Wirkungsgradmessungen hydraulischer Maschinen

Von R. Vaucher, Zürich

621.317.66 : 536.531

(Übersetzung)

Die hydraulischen Verluste einer Turbine oder einer Pumpe bewirken eine Erwärmung des Betriebswassers. Durch Messung der Temperaturdifferenz am Ein- und Austritt der Maschine ist es also möglich die Energieverluste zu bestimmen. Diese direkte Art der Verlustmessung wurde seinerzeit von *Barbillon* und *Poirson* [1]¹⁾ vorgeschlagen und später unter dem Namen thermometrische Methode von *Barbillon* und *Gaillard* [2] weiter entwickelt.

Vor einigen Jahren griff die *Electricité de France* das Verfahren erneut auf und entwickelte daraus die sog. thermodynamische Methode.

Bei dieser Methode wird eine kleine Wassermenge vor der Turbine entnommen und unter Druck einem gegen Wärme isolierten Gefäss zugeführt, wo sie durch 2 in Serie geschaltete Ventile auf atmosphärischen Druck entspannt wird. Die Wassertemperaturen werden mit Platinwiderständen gemessen. Diese Thermometer sind als Widerstände einer Wheatstoneschen Brücke mit zwei regulierbaren Potentiometern geschaltet. Bei Temperaturdifferenzen ist das Gleichgewicht der Brücke gestört, und ein hochempfindliches Galvanometer misst den Ausgleichstrom.

Vor den Messungen werden die beiden Widerstandsthermometer in ein mit Wasser gefülltes Gefäss eingetaucht und auf gleiche Temperatur gebracht. Die Brücke wird dann für einen Null-Ausschlag des Galvanometers eingestellt.

Während der Messungen wird das eine Widerstandsthermometer in das Unterwasser der Turbine eingetaucht, währenddem das zweite Thermometer in das isolierte Gefäss, nach der ersten Entspannung eingesteckt wird. Nun wird die erste Entspannung verstellt bis das entnommene Wasser die gleiche Temperatur aufweist wie dasjenige nach der Turbine, d. h. die erste Entspannung hat die gleiche Erwärmungswirkung wie die hydraulischen Verluste in der Turbine selbst. So kann also bei jeder Belastung der Turbine die erste Entspannung proportional den Turbinenverlusten eingestellt werden.

Für Messungen an den Pumpen kann das Verfahren der Temperaturgleichheit nicht angewandt werden; die Instru-

mente müssen vorerst in Funktion der Förderhöhe geeicht sein.

Die Berechnung des Wirkungsgrades erfolgt dann unter Berücksichtigung der Instrumenten-Höhenkoten, der Kompressibilität des Wassers und eines Koeffizienten für die adiabatische Entspannung des Wassers.

Durch diese Analogie beschränkt sich die Messung auf eine einfache Bestimmung von Drücken, was speziell bei industriellen Messungen von Wichtigkeit ist. Diese neue Methode ist in einer Arbeit von *G. Willm* und *P. Campmas* [5] beschrieben.

Diese Publikation machte Hersteller und Benützer von hydraulischen Maschinen auf eine Messart aufmerksam, die sofort ihr grosses Interesse erweckte, da sie keine längere Stillsetzung einzelner Maschinen oder gar ganzer Kraftwerke bedingt. Heute wird die thermodynamische Methode in fast allen europäischen Ländern zur Kontrolle der hydraulischen Wirkungsgrade, oder sogar schon bei offiziellen Abnahmeversuchen angewandt.

Die im Jahre 1957 erschienenen letzten Auflagen der Schweizerischen Regeln für Wasserturbinen (3. deutsche oder 2. französische Auflage) betrachten die thermodynamische Methode als in der Schweiz noch zu wenig bekannt. Immerhin wird sie darin kurz beschrieben und es wird vorgeschlagen, sie zusammen mit einer andern, klassischen Methode durchzuführen, um so möglichst sichere Erfahrungen zu sammeln.

Im Sinne dieser Empfehlungen und um sich selber von der Genauigkeit der Methode überzeugen zu können, wurde diese Methode bei *Escher Wyss* seit 1958 wo immer möglich bei Wirkungsgradmessungen angewandt. 1959 publizierte der Autor einen ersten Artikel [8], der sich hauptsächlich mit der praktischen Anwendung dieses Verfahrens befasste und die nötigen Vorkehrungen dazu beschrieb. Die Arbeit der letzten 4 Jahre ist umso wichtiger, als es sich jetzt darum handelt, die in der Schweiz gesammelten Erfahrungen durchzusehen, um Regeln ausarbeiten zu können, die eine sichere Anwendung der thermodynamischen Methode erlauben. In diesem Sinne möchte der Autor die bei den Versuchen von

¹⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

Anlage	Hersteller der Maschine	Maschinentyp	Gefälle oder Förderhöhe m	Datum des Versuches	Verwendete Instrumente				Versuchsziel	Bemerkungen
					Automatisches Manometer	Entspanner	Brücke Typ Telec	Galvanometer, Typ Sefram		
Mörel	Escher Wyss	Francis	247	Januar 1958	Neyrpic	Neyrpic	3900	SP 4 SD	Wirkungsgradmessungen	Einführung in die Praxis
Valabres	Escher Wyss	Francis	186,6	Mai 1958	Neyrpic	Neyrpic	3900	SP 4 SD	Abnahmeversuche	EdF.; 1 delegierter Beobachter von Escher Wyss
Hugschwendi	Th. Bell	Pelton	822	Dezember 1958	Neyrpic	Neyrpic	3900	SP 4 SD	Vergleich mit thermodynamischen Versuchen von Charmilles	Unter der Leitung von Prof. H. Gerber, ETH
Cavaglia	Escher Wyss	Pelton	210	Januar 1959	Neyrpic	Neyrpic	3900	SP 4 SD	Wirkungsgradversuche; Vergleich mit klassischen Versuchen	Siehe Diagramm
Palü	Escher Wyss	Pelton	270	Januar 1959	Neyrpic	Neyrpic	3900	SP 4 SD	Wirkungsgradversuche	
Häusern	Escher Wyss	Pumpe	206	Februar 1959	Neyrpic	Neyrpic	3900	SP 4 SD	Wirkungsgradversuche; Vergleich mit klassischen Versuchen	Siehe Diagramm
Safien-Platz	Escher Wyss	Francis	422	März 1959	Neyrpic	Neyrpic	3900	SP 4 SD	Wirkungsgradversuche; Vergleich mit klassischen Versuchen	Siehe Diagramm
Freibach	Andritz	Francis	320	Juli 1959	Neyrpic	Neyrpic	3900	SP 4 SD	Wirkungsgradversuche; Vergleich mit klassischen Versuchen	
Häusern	Escher Wyss	Pumpe	218	August 1959	Neyrpic	Neyrpic	3900	SP 4 SD	Vergleichende, thermodynamische Versuche der Firmen Voith; Neyrpic und Escher Wyss	Siehe Diagramm Unter der Leitung von Prof. Dr. Huttarew, Stuttgart
Häusern	Escher Wyss	Francis	203	August 1959	Neyrpic	Neyrpic	3900	SP 4 SD		
Waldshut	Voith	Pumpe	166	August 1959	Neyrpic	Neyrpic	3900	SP 4 SD		
Waldshut	Voith	Francis	157	August 1959	Neyrpic	Neyrpic	3900	SP 4 SD		
Fätschbach	Th. Bell	2 Pelton	610	September 1959	Neyrpic	Neyrpic	3900	SP 4 SD	Vergleichende Versuche verschiedener Messarten	Unter der Leitung von Prof. H. Gerber
Hemsil I	Kvaerner Brug	Francis	510	Januar 1960	Neyrpic	Neyrpic	3900	SP 4 SD	Wirkungsgradversuche; Vergleich mit klassischen Versuchen	Siehe Diagramm
Prutz-Imst	Escher Wyss	Francis	142	April 1960	Neyrpic	Neyrpic	3900	SP 4 SD	Wirkungsgradversuche; Vergleich mit Modellversuchen	Siehe Diagramm
Freibach	Andritz	Francis	320	September 1960	Neyrpic	Neyrpic	3900	SP 4 SD	Wirkungsgradversuche; Vergleich mit klassischen Versuchen	Siehe Diagramm
Hemsil I	Kvaerner Brug	Francis	510	Januar 1961	Neyrpic	Neyrpic	3900	SP 4 SD	Wirkungsgradversuche; Vergleich mit thermodynamischen Versuchen der Techn. Hochschule Trondheim	
Gjuva	Escher Wyss	Pelton	390	Januar 1961	Neyrpic	Neyrpic	3900	SP 4 SD	Abnahmeversuche	
Sils	Escher Wyss	Francis	398	März 1961	Neyrpic	Neyrpic	3900	SP 4 SD	Wirkungsgradversuche	Messung nicht durchführbar
Tinzen	Escher Wyss	Pelton	472	Juni 1961	Neyrpic Escher Wyss	Neyrpic Escher Wyss	3902	SP 4 SD	Wirkungsgradversuche; Vergleich mit klassischen Versuchen	Siehe Diagramm
Sils	Escher Wyss	Francis	398	Juni 1961	Escher Wyss	Escher Wyss	3902	SP 4 SD	Wirkungsgradversuche (Wiederholung)	Messung nicht durchführbar
Löbbia	Escher Wyss	Pelton	736	September 1961	Escher Wyss	Escher Wyss	3900	SP 4 SD	Wirkungsgradversuche; Vergleich mit klassischen Versuchen	Siehe Diagramm
Schwarzenbach	Escher Wyss	Pelton	354,3	Oktober 1961	Neyrpic Escher Wyss	Neyrpic Escher Wyss	3902	SP 4 SD	Wirkungsgradversuche; Vergleich mit klassischen Versuchen	Siehe Diagramm
Lünersee	Escher Wyss	2 Pumpen	980	Januar 1962	Escher Wyss	Escher Wyss	3902	TS 4 SD	Wirkungsgradversuche; Vergleich mit klassischen Versuchen	
Lünersee	Escher Wyss	Pelton	930	Januar 1962	Escher Wyss	Escher Wyss	3902	TS 4 SD	Wirkungsgradversuche; Vergleich mit klassischen Versuchen	Siehe Diagramm

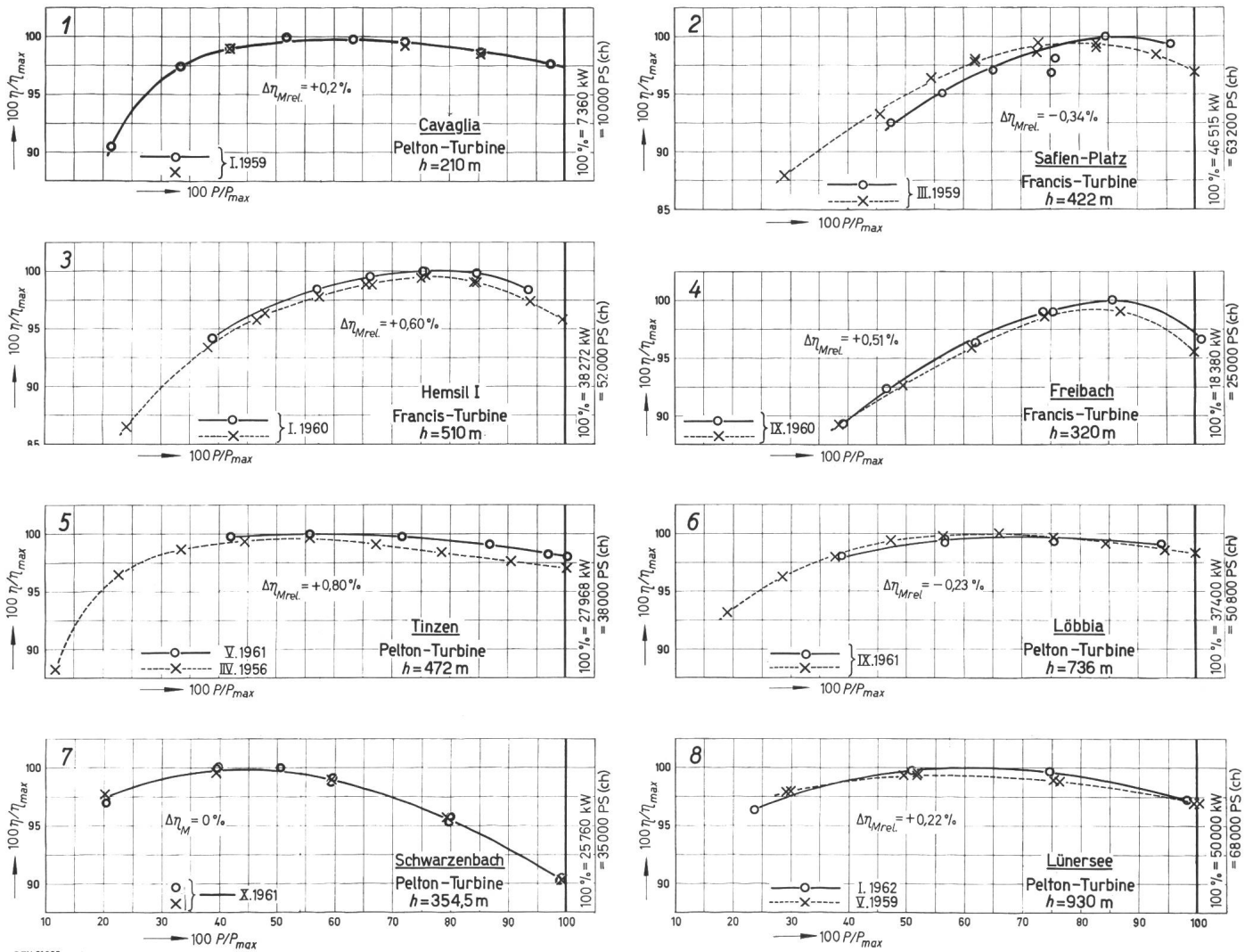


Fig. 1...8

Messresultate

In diesen Diagrammen stellen die Kurven dar:

- Resultate der thermodynamischen Messungen
- x--- Resultate der klassischen Messungen

Die Wirkungsgrade und Leistungen sind in relativen Werten aufgetragen. Der höchste Punkt jeder Kurve wurde mit 100 % angenommen.

Die maximale Leistung, deren absoluter Wert zum Größenvergleich ebenfalls angeführt ist, entspricht 100 % Leistung.

Das Mittel der Wirkungsgradunterschiede wurde an Hand genauerer Diagramme berechnet als derjenigen dieser Figuren. Nur die Versuche Safien Platz (2) befriedigen nicht, obwohl das Mittel der Wirkungsgradunterschiede sehr klein ist. In dieser Anlage wurde das gesamte Kühlwasser dem Unterwasser in der Nähe des Messquerschnittes zugeführt. Eine Untersuchung der Energieverteilung in diesem Querschnitt war daher unmöglich, und man musste sich mit einem einzigen Punkt begnügen, dessen Temperatur durch das Kühlwasser nicht beeinflusst wurde. Die Distorsion der thermodynamisch gemessenen Kurve ist also eine Funktion der Verteilung von Geschwindigkeit und gesamter Restenergie am Ausgang des Saugkrümmers

Escher Wyss erzielten Resultate veröffentlichen und einige Erfahrungen besprechen.

Tabelle I ist das chronologische Verzeichnis aller thermodynamischen Versuche, die bis Ende Januar 1962 durchgeführt wurden. In dieser sind unter anderem die Drücke, die verwendeten Instrumente und besonders das Ziel des Versuches angegeben. Einige gemessene Maschinen waren ausländischer Konstruktion und verschiedene Messungen wurden unter Leitung oder in Zusammenarbeit mit Direktoren dreier hydraulischer Institute durchgeführt. Das grosse Interesse an dieser neuen Methode erlaubte es nicht nur mit französischen Kollegen zu arbeiten; man hatte sogar Gelegenheit Maschinen verschiedener Herkunft in Zusammenarbeit mit deren Konstrukteuren zu messen.

Die Instrumente konnten in einem Druckbereich von 142...980 m eingesetzt werden, wobei sowohl Francis- und Pelton-turbinen als auch grosse Speicherpumpen untersucht wurden.

Es konnten nicht alle Messungen vergleichend durchgeführt werden. 8 Messungen an Turbinen und 2 an Pumpen eignen sich zu einem Vergleich zwischen der thermodynamischen und anderen, klassischen Messungen. Die 4 nicht in Betracht gezogenen vergleichenden Versuche konnten nicht mit der nötigen Sorgfalt durchgeführt werden, oder die zwischen 2 verschiedenen Versuchsarten verfllossene Zeit war zu gross. Im Falle Sils war die Temperatur im Abflusskanal nicht stabil und so eine Messung nicht möglich.

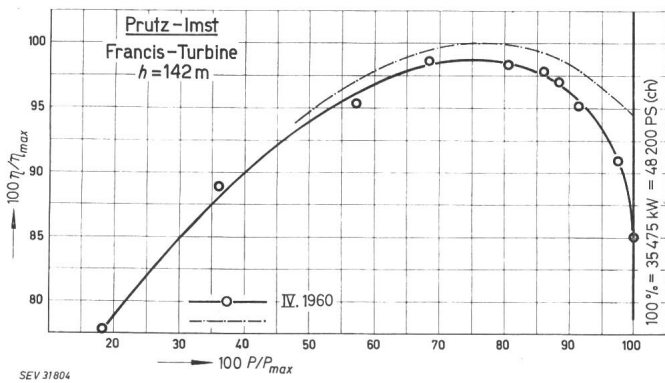


Fig. 9

Thermodynamische Versuche an einer der Turbinen des Kraftwerkes Prutz-Imst

- thermodynamischer Versuch
- - - - - aufgewertete Wirkungsgrade des Turbinenmodells

Bemerkenswert ist die grössere Streuung der Messpunkte bei diesem kleineren Gefälle als bei den anderen Anlagen. Der Unterschied zwischen den beiden Wirkungsgraden lässt sich leicht erklären, wenn man weiss, dass die Turbine anlässlich der thermodynamischen Messungen schon fast 22 000 h in Betrieb war und über $525 \cdot 10^6$ kWh erzeugt hatte. Vor den Messungen wurde sie das dritte Mal revidiert

In den hier wiedergegebenen Diagrammen, sind die gemessenen Unterschiede der Resultate der thermodynamischen und der klassischen Messung berechnet. Diese betragen zwischen +0,80 und -0,34 ‰. Die mittlere relative Abweichung ist +0,22 ‰, d. h. 0,19 ‰ absolut. Dieses Resultat ist ausgezeichnet und erlaubt darauf zu schliessen, dass die Genauigkeit der thermodynamischen Methode unter bestimmten Betriebsbedingungen derjenigen der klassischen entspricht.

Da jede Messung, sei sie thermodynamisch oder klassisch, Fehler aufweist, sind die Vergleiche nicht absolut. Es ist durchaus möglich, dass z. B. im Falle Tinzen das Resultat einer der beiden Methoden der Wirklichkeit näher lag, oder dass im entgegengesetzten Falle Schwarzenbach, der wirkliche Wirkungsgrad höher oder tiefer liegt, als es das identische Resultat der beiden Versuchsarten ergab. Immerhin kann auf Grund der 8 Versuche gesagt werden, dass es sehr wahrscheinlich ist, dass die wirkliche mittlere Abweichung sehr nahe bei 0 liegen muss. Der bei den 8 Versuchen konstatierte kleine Unterschied ist sowohl für die thermodynamischen als auch für die klassischen Messungen ein Genauigkeitsbeweis.

Bewusst wurde bereits erwähnt, dass die thermodynamische Methode unter gewissen Betriebsbedingungen eine den klassischen Methoden ebenbürtige Genauigkeit aufweise. In den 4 Jahren während denen die neue Methode angewendet werden konnte, ist man auf Schwierigkeiten gestossen, die nicht vorauszusehen waren. Bei den ersten Messungen wurde mit der gleichen Apparatur gearbeitet, wie sie Willm und Campmas in ihrer Arbeit [5] beschrieben; dieselbe befriedigte. Im Laufe der Zeit meldeten sich jedoch Verbesserungswünsche und so wurde beschlossen, einzelne Elemente neu zu bauen. So ist der Entspanner eigener Fabrikation für hohe Drücke besser geeignet und entspricht speziell den Anforderungen bei der Messung von Pumpen. Innert 4 Jahren

wurde ein neuer Satz von Instrumenten gebaut, der sich den örtlichen Bedingungen besser anpasst.

Bei den Turbinen hatte man mit den thermodynamischen Messungen Erfolg, was aber nicht auch unbedingt bei den Pumpen der Fall war. Bei den Pumpen müssen die elektrischen Instrumente in Funktion der Förderhöhe geeicht werden, was die Genauigkeit der Messungen vermindert. Die bisher durchgeführten Messungen erlaubten noch keine eindeutige Auswertung der Resultate, so dass in dieser Hinsicht noch einige Punkte zu untersuchen sind. Immerhin darf man sagen, dass wenn bei Turbinen der Betriebsdruck bis auf 150 m gesenkt werden kann, dieser bei Pumpen mindestens 220 m betragen sollte.

Man machte auch die Erfahrung, dass bestimmte Kraftwerke für thermodynamische Messungen schlecht geeignet sind. So können z. B. Kavernen-Kraftwerke, bei denen das Unterwasser nicht zugänglich ist, nur mit klassischen Methoden gemessen werden. Bilden ein See, ein Fluss, oder ein grosser gemeinsamer Kanal das Unterwasser, kann nur der Praktiker die Möglichkeiten einer Messung abschätzen. Schon bei der Projektierung sollten alle Fremdwasserzuführungen (Kühlwasser usw.) ins Unterwasser so vorgesehen werden, dass sie die bei späteren Messungen einzuführende Sonde nicht beeinflussen.

Es ist klar, dass Kraftwerke nicht nur gebaut werden, um die Turbinen messen zu können; wenn jedoch die Möglichkeit besteht, periodische Messungen durchzuführen, ist dies bestimmt kein vernachlässigbarer Vorteil. Besonders die thermodynamische Methode ist in dieser Hinsicht interessant, da sie ohne nennenswerte Betriebsunterbrüche Kontrollen erlaubt.

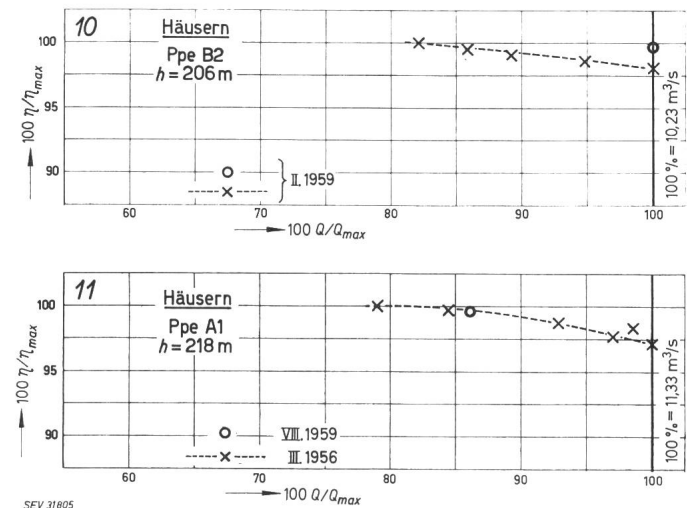


Fig. 10 und 11

Messungen an Pumpen

- je 1 Punkt thermodynamisch gemessen
- - - - - Resultate der klassischen Messungen, die mit klassischen Methoden verglichen werden können, wurden in ähnlicher Art wie diejenigen an den Turbinen in Fig. 1...8 dargestellt. Bei jedem Versuch wurde nur ein Wirkungsgradpunkt mit der thermodynamischen Methode bestimmt. Bei der Pumpe A1 von Häusern wurden die Flügelmessungen schon 3 Jahre vor den thermodynamischen durchgeführt, so dass ein Vergleich unsicher ist.

Die Erfahrungen in Bezug auf Messungen an Pumpen sind noch nicht so gross wie an Turbinen. Die Methode ist schwieriger anzuwenden, was dazu führte, einen minimalen Förderdruck von 220 m statt 150 m vorgeschlagen

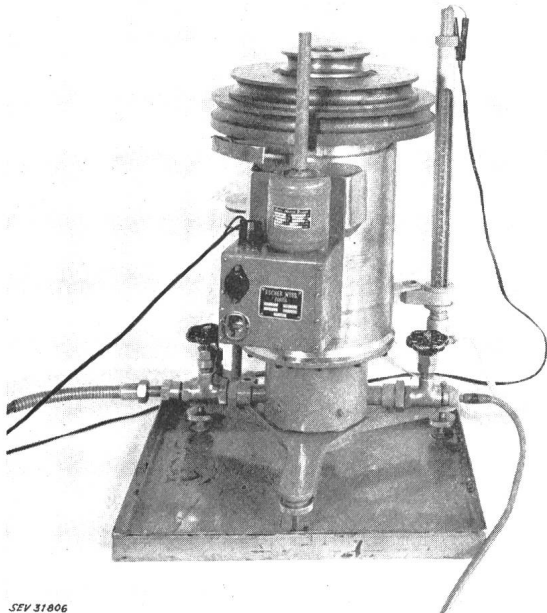


Fig. 12

Automatisches Manometer eigener Konstruktion

Eine auf dem Messkolben liegende Glocke taucht in ein mit Wasser gefülltes Ringgefäß. Kleine Druckänderungen auf den Kolben bewirken ein Aus- oder Eintauchen der Glocke, wodurch deren Auftrieb verändert wird. Diese Veränderungen können an dem rechts aufgestellten Piezometer beobachtet werden. Die Gußscheiben, deren Gewicht justiert wurde, bilden das Grundgewicht.

Zur Verminderung der axialen Reibung wird der Kolben in Rotation versetzt. Das gummiüberzogene Wellenende eines kleinen Motors gibt einer auf dem Gewichtsteller befestigten Feder bei jeder Umdrehung einen Impuls. Dieser Antrieb beeinflusst den Messkolben in axialer Richtung nicht.

Das Gewichtsmannometer erlaubt Messungen zwischen 8 und 150 kg/cm² mit einer Präzision von ± 3 cm WS

Die thermodynamische Methode erheischt keine langen Stillstandszeiten zum Einbau der Instrumente, benötigt aber für die Messung jedes Lastpunktes bedeutend längere Zeiten. Bei klassischen Messungen ist nur die hydraulische Stabilität erforderlich, die einzig vom Wasserschloss abhängt, so dass die Messungen sich in einem relativ raschen Rhythmus folgen können. Anders ist es bei der thermodynamischen Messung. Natürlich muss auch die hydraulische Stabilität vorhanden sein; von grösster Wichtigkeit ist jedoch die thermische Stabilität, die zu erlangen oft sehr viel Zeit benötigt. Nach Erreichen der allgemeinen Stabilität benötigt die Messung für einen Punkt ca. eine Stunde. Der Messende muss sich dabei ständig überzeugen, dass die Anfangsstabilität stets vorhanden ist und nichts das Resultat beeinflusst. Diese minutiöse Geduldsarbeit erfordert viel Zeit; es besteht jedoch die Möglichkeit, die Messung jederzeit unterbrechen zu können, sobald es die Betriebserfordernisse bedingen.

Man konnte feststellen, dass der Entnahmeort im Rohrleitungsquerschnitt ohne Wichtigkeit ist, und daher auch eine Untersuchung dieses Einlaufquerschnittes, wenn sich davor keine Störung befindet, unnötig ist. Demgegenüber muss bei Pumpen die sich im Austritt befindende Entnahmesonde eine eingehende Untersuchung des Querschnittes ermöglichen. Näher als 30 mm an der Rohrwand sollten keine Entnahmen erfolgen; diese Schicht wird thermisch und möglicherweise auch hydraulisch von der nahen Wand beeinflusst.

Bis jetzt konnten noch keine Untersuchungen über den Einfluss der Wasserkondensation auf den Turbinengehäusen durchgeführt werden, und man kennt auch nicht die Wirkung der Luftzufuhr unter den Rädern von Francis- und Pelton-turbinen. Weiter wäre es interessant zu erfahren, inwieweit die grossen Warmluftkanäle der horizontalen Generatoren die Messung beeinflussen. Diese Kanäle sind oft nur durch dünne Wände vom Unterwasser getrennt und lassen diesem möglicherweise eine nicht vernachlässigbare Wärmemenge zukommen.

Alle diese Probleme hatte man auch bei den 8 erwähnten Anlagen, doch scheinen diese äusseren Einflüsse nur sehr schwache Auswirkungen auf die Messungen gehabt zu haben.

Ohne dem Entwurf der künftigen Regeln über die thermodynamische Messmethode vorgreifen zu wollen, wäre es begrüssenswert, wenn diese eine kurze Zusammenfassung der Theorie enthielten, so dass alle die inskünftig Messungen zu kontrollieren haben auch wissen, auf was sie Gewicht legen müssen. Bestimmt wird jeder von der Einfachheit dieser neuen Messart, im Gegensatz zu den klassischen Methoden, begeistert sein.

Die Regeln sollten auch die Benützungsgrenzen genau definieren und Beispiele von Messquerschnitten anführen. Die zulässigen Unstabilitäten sollten nicht nur klar definiert, sondern es sollte auch deren Einfluss auf das Resultat aufgezeigt werden. Die Koeffizienten der adiabatischen Entspannung und der Kompressibilität des Wassers sollten Gegenstand einer Tabelle oder eines Diagrammes sein. Schliesslich sollte auch ein Weg zur Berechnung der Messfehler, gleich wie es die internationalen Regeln empfehlen, angegeben werden.

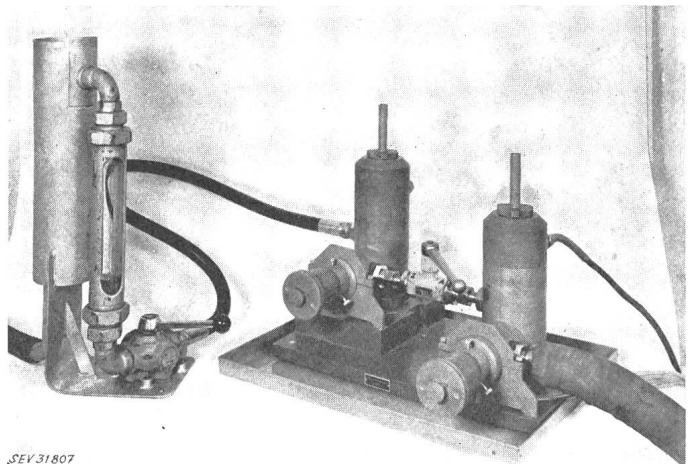


Fig. 13

Kalorimetrischer Entspanner mit Durchflussmesser

Der mit einem Hochdruckschlauch mit dem Entspanner verbundene Mengenmesser kann weiter, als im Bild dargestellt, vor diesem aufgestellt werden, so dass bei einer Messung zwischen den beiden Instrumenten noch die Messbrücke und das Galvanometer Platz haben. Der Entspanner besteht aus 2 identischen Stufen. Mit der ersten stellt man die Teilentspannung ein und die zweite besorgt die Gesamtentspannung. Die Öffnung jedes Entspanners kann an Hand seiner Manipuliertrommel genau bestimmt werden. Der Schieber zwischen den 2 Stufen kann zur Messung des Staudruckes geschlossen werden. Dieses Gerät wurde für einen Druck von 150 kg/m² konstruiert. Die Spülung ist einfach und verursacht keinen Zeitverlust. Die Entnahmewassermenge kann ausserdem für verschiedene Entspannungsverhältnisse auf einem konstanten Wert gehalten werden, was bestimmt Eichungen bei Pumpenmessungen vereinfacht.

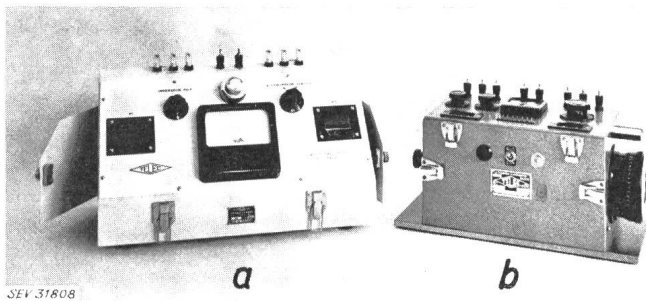


Fig. 14

Messbrücken «Telec» nach dem Schema der EdF

a Gerät mit 2 eingebauten Präzisions-Potentiometern; *b* Gerät mit einem Präzisions-Potentiometer und einem Hilfspotentiometer ohne Skala

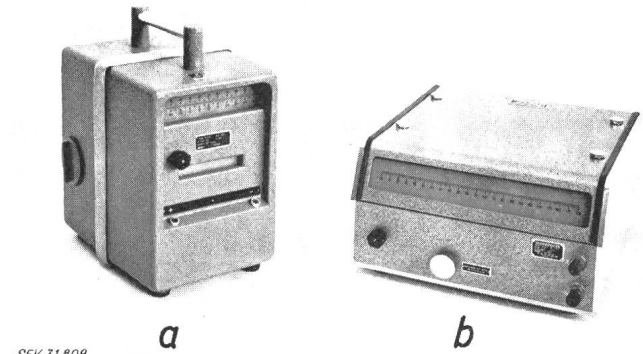
Bis heute wurden nur Versuche nach dem Prinzip der äusseren Entspannung durchgeführt, wie sie von *G. Willm* und *P. Campmas* in ihrer Arbeit beschrieben sind. Seit deren Publikation wurden andere Methoden entwickelt und mit mehr oder weniger Erfolg angewendet. Bei den Versuchen hat man sich bewusst nur auf das ursprüngliche Prinzip beschränkt, ohne sich mit den andern Arten zu beschäftigen.

G. Willm und *P. Campmas* entwickelten die thermodynamische Methode durch äussere Entspannung einer dem Eintritt (eventuell zusätzlich auch Austritt) der Turbine entnommene Wassermenge. Andere Ingenieure beschäftigen sich dagegen heute damit, weitere Methoden zu entwickeln, die jedoch nicht von der Grundmethode abweichen.

Es ist z. B. gelungen eine Entnahmesonde zu bauen, in der der partielle Entspanner und die thermometrische Sonde eingebaut sind [9], so dass nur die Endentspannung ausserhalb der Rohrleitung bewerkstelligt wird. Dieses System hat den Vorteil, dass die Kaloriezufuhr auf einen vernachlässigbaren Wert verringert wird. Es vereinfacht überdies die äusserliche Apparatur. Der Einbau von 2 Elementen in die Entnahmesonde bedingt grössere Dimensionen, was möglicherweise bei kleinen Maschinen einen Einfluss auf den Wirkungsgrad haben kann.

Vom gleichen Prinzip ausgehend, jedoch mit einer totalen Entspannung arbeitend, ist es ebenfalls möglich die Apparatur zu vereinfachen. Dieses System bedingt jedoch eine komplette Eichung der elektrischen Instrumente zur Bestimmung des Wertes der Einheitsteilung in mWS ihrer Skalen.

Diese Methode ist besonders bei Pumpenmessungen von Interesse, da mit dem ursprünglichen System ebenfalls eine Eichung der elektrischen Instrumente notwendig ist.



SEV 31809

Fig. 15

Galvanometer

a Galvanometer mit Schwimm-Meßsystem; *b* Galvanometer mit einer 220-mm-Skala (Empfindlichkeit = $11 \cdot 10^{-9}$ A/mm)

Es ist noch nicht alles versucht und geprüft worden; zukünftige Normen sollten daher alle diese Abarten kurz beschreiben, so dass ihrer Anwendung nichts entgegensteht.

Literatur

- [1] *Barbillion, L.* und *A. Poirson*: Note sur un nouveau procédé de mesure du rendement des turbines hydrauliques (Méthode thermométrique). Bull. Rech. sci., industr. et Inventions 2(1921)23, S. 566...568.
- [2] *Barbillion, L.*: Méthode thermométrique de mesure du rendement des turbines hydrauliques. Rev. gén. Electr. 26(1929)13, S. 487...497.
- [3] *Fontaine, M.*: Mesure du rendement des turbines hydrauliques par la méthode thermométrique. Houille blanche 4(1949), n° spéc. B, S. 675...679.
- [4] *Fontaine, M.*: Quelques applications de la méthode thermométrique Poirson. Houille blanche 6(1951)1, S. 12...20.
- [5] *Willm, G.* und *P. Campmas*: Mesure du rendement des turbines hydrauliques par la méthode thermométrique Poirson. Houille blanche 9(1954)4, S. 449...460; 5, S. 590...607.
- [6] *Willm, G.*: La précision de la méthode thermodynamique à la lumière de deux années d'application industrielle. Houille blanche 11(1956)4, S. 608...616; Diskussion S. 616...618.
- [7] *Chappuis, J.*: Première application en Suisse de la méthode thermodynamique à la mesure du rendement de turbines hydrauliques. Bull. techn. Suisse rom. 82(1956)11, S. 165...170.
- [8] *Vaucher, R.*: Thermodynamische Wirkungsgradmessungen an hydraulischen Maschinen. Escher Wyss Mitt. 32(1959)2/3, S. 39...45.
- [9] *Brand, F. L.*: Die Messung des Wirkungsgrades von hydraulischen Maschinen nach dem thermodynamischen Verfahren. Voith Forsch., Konstr. -(1961)7, S. 7,1...7,22.

Adresse des Autors:

R. Vaucher, Ingenieur, Escher Wyss AG, Hardstrasse 319, Zürich 5.