

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 21/22 (1893)
Heft: 20

Artikel: Ueber die Regulierung von Turbinen
Autor: Stodola, A.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-18203>

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: 01.02.2025

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

INHALT: Ueber die Regulierung von Turbinen. IV. (Schluss.) — Beleuchtungsanlage der Kuranstalten in Ragaz. — Erweiterung. — Miscellanea: Schwabende Drahtseilbahnen. Eine tragbare elektrische Sicherheitslampe. Petroleumbriquettes. Stunden-Zonen-Zeit. Zahnradbahnen. Zehn von der schweiz. Centralbahn bei Maffei in München be-

stellte Duplex-Verbund-Lokomotiven. Ueber die amerikanischen Eisenbahnen und die Weltausstellung in Chicago. Ein neuer Explosivstoff. — Konkurrenzen: Krankenhaus in Änggärden. — Vereinsnachrichten: Stellenvermittlung.

Ueber die Regulierung von Turbinen.

Von *Aurel Stodola*, Professor am eidg. Polytechnikum in Zürich.

IV. (Schluss)

Schlussresultate.

Bei der Wahl der Verhältnisse, welche einzuhalten sind, um das Nichtüberschreiten eines vorgeschriebenen Grenzwertes für x_{max} : II garantieren zu können, ist man angesichts der komplizierten Beschaffenheit der hier vorkommenden Funktionen auf ein probeweises Rechnen angewiesen. Um rascher zum Ziele zu gelangen, würden vorher gerechnete Tabellen notwendig sein, deren gelegentliche Ausarbeitung sich der Verfasser vorbehält.

Sicher ist indessen, dass unter allen Umständen zunehmende Druck- und Geschwindigkeitsschwankungen vermieden werden müssen, und die hierfür als Kriterien aufgestellten Formeln sind glücklicherweise so einfach, dass eine rasche Kontrolle jeder bestehenden oder projektierten Anlage möglich ist. Ebenfalls leicht zu rechnen sind jene Grenzwerte, welche einen Uebergang ohne Schwingung gewährleisten. Um diese Formeln für den Gebrauch handlicher zu machen, sollen sie in den ursprünglichen Bestimmungsgrößen der Turbine ausgedrückt werden. Der ungünstigste Fall für die Regulierung tritt ein, wenn der Motor auf seine maximale Leistungsfähigkeit in Anspruch genommen wird. Es ist dann der Leitkanal voll geöffnet, demnach $f = f_1$ und der Koeffizient α_o wird $= \frac{1}{\delta}$, wo δ wie früher definiert, den totalen Ungleichförmigkeitsgrad des Regulators (abgesehen allerdings von der Eigenreibung desselben) bedeutet. Die Anwendung des langsam wirkenden Hilfsmotors involviert, wie aus der Entwicklung erhellt, stets eine Vergrößerung der Schwungmasse oder des Windkessels, deshalb soll jetzt nur die momentane Regulierung in Betracht gezogen werden.

Für die geschlossene Turbine ohne Windkessel war die minimale zulässige Schwungmasse $T_1 > \alpha_o T_2$; jene, bei welcher ein stetiger Uebergang stattfindet $T_1' > (2 + \sqrt{3}) \alpha_o T_2$. Bezeichnen wir mit

$G_s = Mg$ das reducierte Gewicht der Schwungmassen, so wird, nach Substitution der Werte

$$\alpha_o = \frac{1}{\delta} \text{ und } T_2 = \frac{L}{h_o} \frac{c_o}{g}$$

$$G_s > \left(\frac{1}{\delta}\right) \left(\frac{L}{h_o}\right) \left(\frac{c_o}{v_o}\right) P_o \dots \dots \dots (53)$$

Es bezeichne ferner

G_w das pro Sekunde durchströmende Wassergewicht, dann wird

$$P_o = \frac{\eta G_w H}{v_o}$$

Da es sich hier zumeist um Girardturbinen handelt, und wir uns mit approximativen Grenzwerten begnügen können, werde die Umfangsgeschwindigkeit v_o der halben theoretischen Ausflussgeschwindigkeit $v_o = \frac{1}{2} \sqrt{2 g H}$, und die piezometrische Druckhöhe h_o dem ganzen Gefälle H gleich gesetzt. Die Einführung dieser Werte in obige Formel ergibt

$$G_s > \frac{2 \eta}{g} \frac{L}{H} \frac{c_o}{\delta} G_w \dots \dots \dots (54)$$

Ferner war für die geschlossene Turbine mit sehr kleinen Schwungmassen die minimale Grösse des Windkessels im Falle abnehmender Schwankungen bestimmt durch die Relation $T_3 > \frac{T_2}{\epsilon}$; wir substituieren hier die Werte $T_2 = L c_o : h g$; $\epsilon = \zeta_r L c_o^2 : g b_o d_o$, und berechnen aus $T_3 = l_o P_o : c_o (p_o + p_a)$, das Luftvolumen $W = F l_o$ des Windkessels. Man erhält

$$W_{min} > \frac{\pi}{4} \frac{p_o + p_a}{\rho_o} \frac{d_o^3}{\zeta_r} \dots \dots \dots (55)$$

Man kann leicht in der wiederholt angewendeten Weise zeigen, dass ein Uebergang ohne Schwankung stattfinden werde, wenn der Windkessel entsprechend der Relation

$$W > \frac{1}{\epsilon} (2 - \epsilon + 2 \sqrt{1 - \epsilon}) W_{min}$$

oder für kleine ϵ entsprechend

$$W > \frac{4}{\epsilon} W_{min} \dots \dots \dots (56)$$

gewählt wird.

Nehmen wir schliesslich $\eta = 0,75$; $g \approx 10$; $\delta = 0,05 = \frac{1}{20}$; ferner, um sicher zu gehen, $\zeta_r = 0,02$

und da ein Windkessel doch nur bei Hochdruckturbinen vorkommen wird, als Maximum von $(p_o + p_a) : p_o = (4 + 1) : 4 = 5 : 4$; schliesslich für die Geschwindigkeit in der Zuleitung den passenden Mittelwert

$$c_o = 1 \text{ m}$$

an, so erhalten wir die folgenden bequemen Faustregeln:

$$G_s > 3 \left(\frac{L}{H}\right) G_w \dots \dots \dots (57)$$

$$W_{min} > 50 d_o^3 \dots \dots \dots (58)$$

d. h. das reducierte Minimal-Schwunggewicht der geschlossenen Turbine ohne Windkessel ist gleich dem dreifachen Gewicht des sekundlichen Wasserquantums, multipliziert mit dem Verhältnis der Leitungslänge zum Gefälle. Um einen Uebergang ohne Schwingung zu erzielen, muss das $(2 + \sqrt{3}) = 3,7$ -fache des so gerechneten Gewichtes genommen werden.

Der Windkessel-Luftraum einer geschlossenen Turbine mit beliebig kleinen Schwungmassen soll mindestens den 50-fachen Inhalt eines Kubus mit dem Leitungsdurchmesser als Seitenlänge erhalten und ist unabhängig von der Leitungslänge. Um einen Uebergang ohne Schwingung zu erzielen, muss das 4 : ϵ -fache des so gerechneten Volumens genommen werden.

An Hand dieser Faustregeln kann man auch die Frage entscheiden, ob es vorteilhafter sei grosse Schwungmassen oder grosse Windkessel anzuwenden? Offenbar ist es am zweckmässigsten zum jeweilig billigeren Auskunftsmittel zu greifen, und da die Windkesselgrösse von der Leitungslänge unabhängig ist, somit im Falle einer kurzen Leitung die Kosten des Windkessels schwerer in die Wagtschale fallen, — andererseits das Schwunggewicht mit der Leitungslänge in geradem Verhältnis zunimmt, wird man für kurze Leitungen wohl die Schwungmasse, für lange Leitungen den Windkessel als geeignetes Remedium empfehlen dürfen.

Verfasser hatte letzthin Gelegenheit, eine Anzahl Turbinenanlagen mit hohem Gefälle und langen Leitungen zu studieren, und fand, dass überall, wo die Regulierung allen Anforderungen genügte, die hier entwickelten Beziehungen eingehalten waren. Als Beispiel mögen die elektrische Beleuchtungsanlage in Genf und die Centralstation für elektr. Beleuchtung und Tramwaybetrieb in Vevey-Montreux angeführt werden. Erstere ist beschrieben im bekannten Werk von Turettini: „Utilisation des forces motrices du Rhône“, letztere im September-Heft 1. J. der Zeitschrift „L'Industrie électrique.“

In Montreux sind, abgesehen von der Primärmaschine für die elektrische Tramway, welche nur einen zwischen Null und etwa 60 P. S. variierenden Kraftbedarf aufweist, zwei Hochdruckturbinen von je 300 P. S. installiert, welche je zwei für die Beleuchtung bestimmten Wechselstrom-Dynamos antreiben. Zu jedem der grossen Motoren ge-

hört je eine kleine, mit der Hauptwelle durch einen Riementrieb gekuppelte, etwa 35-pferdige Turbine zur Bethätigung der Erreger-Dynamas. Das Gefälle beträgt 250 m, die Leitung hat eine Länge von 900 m, der Durchmesser derselben beträgt oben 450, unten 400, also im Mittel 425 mm. Es sind zwei Windkessel vorhanden von etwa 870 mm Durchmesser und je 2500 mm Luftraum, d. h. zusammen etwa 3 m³ Luftinhalt. Berechnen wir nach (55) mit $\zeta_r = 0.02$ den minimalen Windkesselinhalt, so resultiert $W_{min} =$ etwa 3.1 m³, also um etwas mehr als vorhanden ist. Die Anlage befindet sich demnach an der Grenze des Zulässigen, und da die Schwungmasse lediglich im Turbinenlauf und der Dynamoarmatur besteht, somit jedenfalls als klein bezeichnet werden darf, mag dies ein Grund sein dafür, dass nicht die grossen Turbinen reguliert werden, sondern die kleinen. Anfänglich wird die Erreger-Dynamo durch den Riementrieb von der Hauptwelle aus mitgenommen; mit steigender Belastung kommt ihre eigene Turbine zur Geltung und giebt schliesslich einen Kraftüberschuss an die Hauptwelle ab; steigt die Belastung weiter, wird von Hand an der grossen Turbine ein Leitkanal mehr aufgemacht, worauf der Regulator der Hilfsturbine den Wasserzufluss hemmt u. s. f. Die Anlage funktioniert indessen in dieser Weise ohne jeglichen Anstand, und es sind nie grosse Druckschwankungen aufgetreten, obwohl am Abend zeitweise bis zu 700 P. S. entwickelt werden.

In Genf besitzt die „Société d'appareillage électrique“ eine Beleuchtungszentrale mit vier Hochdruckturbinen (wovon eine Reserve) von je 200 P. S., welche an die Hochdruckleitung des städtischen Wasserwerkes angeschlossen und mit der bekannten hydraulischen Servomotor-Regulierung des Hrn. Piccard versehen sind. Das ausgebreitete, mehrfachen Ringschluss bildende Hochdrucknetz ist durch eine etwa 4000 m lange Rohrleitung von 600 mm Durchmesser mit dem 123 m hoch gelegenen Reservoir in Bessinges verbunden. Wir haben also, abgesehen vom Ringnetz, das äusserst ungünstige Verhältnis der Leitungslänge zum Gefälle von 4000:123 = 32^{1/2}. Diese aussergewöhnlich lange Leitung würde den Aufwand kolossaler Mittel erheischt haben, um eine Regulierung möglich zu machen, wenn dieselben nicht durch Zufall schon vorhanden wären. Es war nämlich im Anfang ein Hochdruckreservoir nicht vorgesehen, vielmehr dachte man lediglich mit Windkesseln ein Auskommen finden zu können und installierte vier solche von 1,5 m Durchmesser und 12 m Höhe, bei denen also wohl auf einen Luftinhalt von zusammen etwa 50 m³ gerechnet werden kann. Hierzu kommen heute etwa 14 kleinere Windkessel an den Pumpen selbst, von je 1,0—1,1 m Durchmesser, und 4—6 m Luftraum, also auch etwa 50 m³ Inhalt. Auf diese Weise kommt es, dass das Leitungsnetz über ein kolossales Luftkissen von mindestens 100 m³ Inhalt verfügt. Zur Beurteilung der Regulierungsfrage wollen wir die ungünstige Annahme machen, es verhielten sich die drei Turbinen der Centrale wie ein einziger Motor von 600 P. S.

Andererseits darf man wohl voraussetzen, dass der Verbrauch des ganzen übrigen Leitungsgebietes ein gleichmässiger sei, oder sich zumindest langsam ändere, denn die meisten der sich zu mehreren Hundert belaufenden Motoren sind klein (kaum 2—3 von 100 P. S.), und es wird viel Wasser für Hauszwecke verwendet. Die derzeitige grösste Geschwindigkeit im Hauptrohr ist auf ungefähr 1 m normiert und wird durch Beschleunigung oder Verzögerung des Pumpenganges reguliert. Wenn die Turbinen in der Centrale 600 P. S. entwickeln (was zur Zeit noch nicht der Fall ist), so bedingt dies, abgesehen vom automatischen Druckregulator, einen Konsum von etwa 500 l per Sekunde. Die Druckleitung liefert aber nur 280 l, demnach muss das Fehlende durch die Pumpen ersetzt werden. Der Ueberschuss der Pumpenlieferung verteilt sich in das Netz. Da hier die Geschwindigkeit im Druckrohr kleiner ist, als dem Turbinenkonsum entspricht, muss man diese Modifikation in die ursprünglichen Differential-

gleichungen (6) einführen und findet z. B. für die Windkesselgrösse, welche bei zunehmend kleinen Schwungmassen zur Vermeidung zunehmender Schwankungen notwendig ist, den Wert

$$T_3 > \frac{c_0'}{c_0} \frac{T_2}{\varepsilon}$$

und hieraus approximativ

$$W_{min} > \frac{c_0'}{c_0} \frac{d_0^3}{\zeta_r} \dots \dots \dots (58)$$

hierin bedeutet:

c_0 die in der Zuleitung faktisch vorhandene Geschwindigkeit,

c_0' die Geschwindigkeit, welche in der Leitung auftreten müsste, wenn der ganze Konsum des Motors durch die Hauptleitung bestritten würde.

In unserem Fall haben wir $c_0 = 1$ m (derzeit vorgeschrieben), $c_0' =$ ungefähr 1,8 m, somit ergibt sich $W_{min} > 19,4$ m³, vorhanden aber sind 100 m³, d. h. das 5-fache des Mindestwertes. (Kleinen Werten von c_0 tagsüber entspricht auch ein kleines c_0' , weil mit geringer Kraft gearbeitet wird.) Trotz der ungewöhnlichen Länge der Leitung in Genf, ist es deshalb nach den entwickelten Beziehungen nicht bloss begreiflich, sondern es muss geradezu für notwendig erklärt werden, dass die Regulierung anstandslos vor sich gehe und zwar sozusagen ohne Rücksicht auf die Schwungmassen der Turbine, lediglich als Folge des überaus reichlichen Windkesselvolumens.

Eine gleiche Uebereinstimmung mit unseren Resultaten weisen auch andere Anlagen auf; der Verfasser glaubt deshalb, die angeführten Relationen für die Grenzwerte der Schwungmasse und Windkesselgrösse der Beachtung der geehrten Fachgenossen empfehlen zu dürfen, und würde das Regulierungsproblem betreffende Mitteilungen aus der Praxis sehr dankbar entgegennehmen.

Die Untersuchung bedarf noch mancher Ergänzung, insbesondere betreffs der Hilfsmotoren mit konstanter Geschwindigkeit, betreffs des Einflusses einer die Bewegung des Regulators hemmenden Oelbremse etc. Diese, sowie die Erörterung der konstruktiven Durchbildung der Regulierapparate mögen einer späteren Besprechung vorbehalten bleiben.

Beleuchtungsanlage der Kuranstalten in Ragaz.

Die Beleuchtungsanlage in den Kuranstalten in Ragaz, welche seit Juni vorigen Jahres im Betriebe ist, umfasst etwa 2000 Glühlampen zu 16, 25 und 50 Kerzen und 42 Bogenlampen zu 6, 8 und 12 Ampères. Ausserdem werden von der Centrale aus zwei Elektromotoren von 5—7 P. S. zum Betrieb von zwei Personenaufzügen mit elektrischem Strom versorgt. Die Anlage ist nach dem Gleichstrom-System gebaut mit 110 Volt Lampenspannung.

Die Betriebskraft, der Tamina entnommen, hat eine Grösse von 500 P. S. und resultiert aus einem Gefälle von 16 m und einer Wassermenge von 3 m³.

Etwa 200 m oberhalb des Dorfes Ragaz, am Eingang in die weltbekannte Taminaschlucht, liegt die Wasserfassung des Werkes. Bevor das Wasser die Druckleitung erreicht, fliesst dasselbe durch einen 130 m langen, im Felsen eingehauenen Tunnel, an dessen Ende sich, vor dem Einlauf der Druckleitung, ein Reservoir mit Schlammkasten und Leerlauf befindet. Die Druckleitung hat einen Durchmesser von 1,4 m und eine Länge von rund 80 m.

Die Centrale, welche auf dem Gebiete der Kuranstalten, neben der nun ausser Betrieb gesetzten Gasfabrik steht, ist ein massives, im Unterbau aus Cementguss, im Oberbau aus Cementsteinen hergestelltes, mit einem Eisen-dach bedecktes Gebäude von 23 m Länge, 12 m Breite und 5 m Höhe. (Fig. 1, 2, 3.) Dasselbe enthält drei Turbinenkammern für zwei Turbinen zu 200 P. S. und eine solche zu 100 P. S.

Sämtliche drei Turbinen sind bereits zur Aufstellung gelangt. Dieselben, nach System Girard gebaut mit voller Beaufschlagung, haben vertikale Wellen, und sind für 150