

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 21/22 (1893)
Heft: 18

Artikel: Ueber die Regulierung von Turbinen
Autor: Stodola, Aurel
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-18197>

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 10.02.2026

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

INHALT: Ueber die Regulierung von Turbinen. II. — Aus der Baugeschichte der Stadt Luzern. III. — Ein Vorschlag. — Litteratur:

Festschrift. — Miscellanea: Ueber die Verdunstung der Metalle. — Nekrologie: † Dr. Franz Grashof. — Berichtigung.

Ueber die Regulierung von Turbinen.

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

II.

III. Turbine mit Windkessel und verschwindend kleinen Schwungmassen.

In diesem Falle ist $T_1 = 0$, die charakteristische Gleichung wieder quadratisch, und zwar

$$(\alpha_o + 1) T_2 T_3 \varphi^2 + \left[-\left(\alpha_o - \frac{1}{2}\right) T_2 + (\alpha_o + 1) \varepsilon T_3 \right] \varphi + \left[(1 - \varepsilon) \left(\alpha_o - \frac{1}{2}\right) + \frac{3}{2} \right] = 0.$$

Die Bedingung für abnehmende Schwingungen hat die Form:

$$-\left(\alpha_o - \frac{1}{2}\right) T_2 + (\alpha_o + 1) \varepsilon T_3 > 0$$

oder bei Vernachlässigung von 1 neben α_o :

$$T_3 > \frac{T_2}{\varepsilon}. \quad \dots \dots \quad (25)$$

Bei hinreichender Vergrösserung des Windkessels kann die Schwungmasse auf einen beliebig kleinen Wert reduziert werden.

Es ist zu beachten, dass nach Voraussetzung der Windkessel in unmittelbarer Nähe des Leitapparates angeordnet sein muss, weil sonst der Trägheitswiderstand der zwischen den beiden befindlichen Wassermasse die Bewegung störend beeinflussen würde.

IV. Offene Turbine.

Dieser Fall soll als Illustration der Annahme $\alpha_o = 0$ dienen, da bei offenen Turbinen diese Geschwindigkeit klein auszufallen pflegt. Es wird $T_2 = 0$, $T_3 = 0$, $\varepsilon = 0$. Die Differentialgleichungen (6) reduzieren sich auf

$$T_1 \frac{dx}{dt} + (\alpha_o + 1) x = \Pi; \quad \ddot{x} = 0; \quad y = -\alpha_o x; \quad \text{somit ist}$$

$$x = \Pi \left[1 - e^{-\frac{\alpha_o t}{T_1}} \right]$$

d. h. bei der offenen Turbine findet stets ein Uebergang ohne Schwingung statt.

V. Allgemeiner Fall. Turbine mit Schwungmassen und Windkessel.

Hier sind die allgemeinen Formeln (11) bis (19) zu benützen, und man wird insbesondere aus der Bedingung (18) den zulässigen Grenzwert für irgend eine der Grössen T_1 , T_2 , T_3 , ε ausrechnen können, wenn die andern gegeben oder angenommen werden. Das meiste Interesse besitzt die Untersuchung des Einflusses der Windkesselgrösse.

Wir ordnen zu diesem Behufe den Ausdruck (18) nach Potenzen von T_3 . Da α_o im Mittel = 50 und ε stets ein kleiner Bruch ist, können wir 1 gegen α_o und ε gegen 1 vernachlässigen. Wir erhalten dann:

$$\alpha_o \varepsilon [\varepsilon T_1 + \alpha_o T_2] T_3^2 + \left[\varepsilon T_1^2 - \alpha_o^2 T_2^2 - \frac{1}{2} \alpha_o \varepsilon T_1 T_2 \right] T_3 + \frac{1}{2} [T_1 - \alpha_o T_2] T_1 T_2 > 0. \quad \dots \dots \quad (26)$$

Setzen wir

$$\left. \begin{aligned} A &= \alpha_o \varepsilon [\varepsilon T_1 + \alpha_o T_2] \\ B &= \frac{1}{2} [\varepsilon T_1^2 - \alpha_o^2 T_2^2 - \frac{1}{2} \alpha_o \varepsilon T_1 T_2] \\ C &= \frac{1}{2} [T_1 - \alpha_o T_2] T_1 T_2 \end{aligned} \right\} \quad (26 \text{ a})$$

so lautet die linke Seite von (26) als Funktion von T_3 aufgefasst

$$F(T_3) = A T_3^2 + 2 B T_3 + C > 0. \quad (26 \text{ b})$$

Die Werte, welche T_3 erhalten darf, um der Bedingung (26 b) zu genügen, hängen ab von den Wurzeln T_3' und T_3'' der Gleichung $F(T_3) = 0$, und zwar ist

$$\left. \begin{aligned} T_3' &= \frac{-B - \sqrt{B^2 - AC}}{A} \\ T_3'' &= \frac{-B + \sqrt{B^2 - AC}}{A} \end{aligned} \right\} \quad \dots \dots \quad (27)$$

Sind die Wurzeln T_3' , T_3'' reell, so wird $F(T_3) > 0$ für alle Werte von T_3 , welche entweder grösser als T_3' , oder (algebraisch) kleiner als T_3'' sind. Werden die Wurzeln imaginär, so ist $F(T_3) > 0$ für einen beliebigen Wert von T_3 .

Die Natur der Wurzeln T_3' , T_3'' hängt ab von den Koeffizienten A , B , C , und zwar wie bekannt in folgender Weise:

I. $B^2 - AC$ ist positiv; die Wurzeln sind reell:

i. $C < 0$, es wird T_3' negativ, T_3'' positiv. Da ein negativer Wert für T_3 keinen Sinn hat, bleibt als Bedingung:

$$T_3 > T_3''.$$

ii. $C > 0$ und $B < 0$. Beide Wurzeln sind positiv; es muss T_3 entweder $> T_3''$ oder $< T_3'$ werden.

iii. $C > 0$ und $B > 0$. Beide Wurzeln sind negativ; es genügt, wenn $T_3 > 0$.

II. $B^2 - AC$ ist negativ, die Wurzeln werden imaginär; T_3 ist beliebig.

Um ein Kriterium für den Zeichenwechsel obiger Koeffizienten zu gewinnen, schreiben wir:

$$B = \frac{\varepsilon}{2} \left[T_1 - \left(\frac{1}{4} + \sqrt{\frac{1}{8} + \frac{1}{\varepsilon}} \right) \alpha_o T_2 \right] \left[T_1 + \left(-\frac{1}{4} + \sqrt{\frac{1}{8} + \frac{1}{\varepsilon}} \right) \alpha_o T_2 \right].$$

Da der zweite Faktor stets positiv ist, hängt das Vorzeichen nur vom ersten ab; bezeichnen wir mit Φ den Ausdruck

$$\frac{1}{4} + \sqrt{\frac{1}{8} + \frac{1}{\varepsilon}},$$

so ergibt sich

$$B \leq 0, \quad \text{je nachdem } T_1 \leq \Phi \alpha_o T_2.$$

Aus dem Ausdruck für C erhellt, dass

$$C \leq 0, \quad \text{je nachdem } T_1 \leq \alpha_o T_2 \text{ ist.}$$

Schliesslich ist leicht nachzuweisen, dass

$B^2 - AC \leq 0$ wird, je nachdem $T_1 \leq \Psi \alpha_o T_2$ ist, und zwar variiert das Verhältnis $\frac{\Psi}{\Phi}$ sehr wenig; es ändert sich von etwa $\frac{1}{1.8}$ auf $\frac{1}{2}$, während ε abnimmt von 0.1 auf 0. Da es sich hier nur um ungefähre Grenzwerte handelt, wählen wir die runde Zahl $\frac{1}{2}$ und setzen $\Psi = \frac{1}{2} \Phi$.

Dann ergiebt sich folgende Zusammenstellung:

1. $0 < T_1 < \alpha_o T_2$; die Wurzeln haben verschiedene Vorzeichen; es muss $T_3 > T_3''$ sein.

2. $\alpha_o T_2 < T_1 < \frac{1}{2} \Phi \alpha_o T_2$; beide Wurzeln sind positiv, also muss T_3 entweder grösser als T_3'' od. kleiner als T_3' angenommen werden.

3. $\frac{1}{2} \Phi \alpha_o T_2 < T_1 < \infty$; beide Wurzeln sind entweder negativ oder imaginär; T_3 kann einen beliebigen positiven Wert darstellen.

Dem hier vorkommenden Ausdruck $\alpha_o T_2$ entspricht nach Bedingung (22) die minimale Schwungmasse, mit welcher eine ohne Windkessel arbeitende Turbine ausgestattet werden kann. Wir wollen diese Schwungmasse die „normale“ nennen und dürfen hiernach obige Resultate in folgender Form aussprechen:

Die zulässige (oder notwendige) Grösse des Windkessels ist hauptsächlich bedingt durch das Verhältnis der Schwungmasse zur relativen Leitungslänge und durch die Bewegungswiderstände der Zuleitung, und zwar:

1. Bei Schwungmassen, die kleiner sind als die „normale“, darf das Windkesselvolumen ein gewisses Minimum nicht unterschreiten.

2. Bei mittelgrossen Schwungmassen $[\alpha_o T_2 < T_1 < \frac{1}{2} \Phi \alpha_o T_2]$ ist das Windkesselvolumen entweder sehr gross oder sehr klein anzunehmen. Für diejenigen Werte desselben, welche zwischen die durch T_3' und T_3'' bestimmten Grenzen fallen, finden Druck- und Geschwindigkeitsschwankungen mit zunehmender Amplitude statt.

3. Nur bei bestimmt grossen Schwungmassen $[T_1 \geq \frac{1}{2} \Phi \alpha_o T_2]$ ist das Windkesselvolumen beliebig.

Diese Resultate gewinnen an Wichtigkeit, wenn man bedenkt, dass ein anfänglich genügend grosser Windkessel durch Luftabsorption (bei Unterlassung des Nachfüllens) auf ein gefährliches, zwischen T_3' und T_3'' liegendes Volumen gebracht werden kann, womit ein Versagen der Regulierung mitten im Betriebe verbunden wäre. Um solchen Vorkommnissen vorzubeugen, erscheint es ratsam, im Falle der Verwendung eines Windkessels die Schwungmasse stets der Bedingung

$$T_1 \geq \frac{1}{2} \Phi T_2 \quad \dots \quad (27a)$$

entsprechend zu wählen.

Einen bedeutenden Einfluss auf die Windkesselgrösse üben auch die Geschwindigkeit im Zuflussrohr und die Bewegungswiderstände des Wassers aus. Denken wir uns eine verhältnismässig kurze Rohrleitung (kleines $\frac{L}{h_o}$) mit grossem Durchmesser und kleiner Geschwindigkeit, für welche die Grösse ϵ gleich Null gesetzt werden kann, so ergibt sich aus der Bedingung (27):

$$T_3 < \frac{T_1 [T_1 - \alpha_o T_2]}{2 \alpha_o^2 T_2}, \quad \dots \quad (28)$$

d. h. bei verschwindend kleinen Bewegungswiderständen darf das Windkesselvolumen eine bestimmte obere Grenze nicht überschreiten.

In diesem Fall muss die Schwungmasse stets grösser als „normal“ sein $[T_1 > \alpha_o T_2]$, weil sonst das Windkesselvolumen negativ werden würde. Man kann auch die Windkesselgrösse von vorneherein annehmen und die Schwungmasse berechnen. Die Bedingung (27) ergibt

$$T_1 > \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{8 \frac{T_3}{T_2} + 1} \right] \alpha_o T_2. \quad (28a)$$

Hier kann der Quotient $\frac{T_3}{T_2}$ bei kleiner Geschwindigkeit α_o recht beträchtliche Werte annehmen; ein Vergleich mit der Bedingung (22) ergibt demnach den Satz:

Im Grenzfalle $\epsilon = 0$ erfordert eine mit einem Windkessel versehene Turbine eine grössere Schwungmasse, als wenn kein Windkessel vorhanden ist.

Dieses Verhalten verdient eine gewisse Beachtung schon deshalb, weil jede Rohrleitung zufolge der Elasticität ihrer Wandung bei eintretenden Druckschwankungen einer entsprechenden Ausdehnung fähig ist, welche die gleiche Rolle spielt, wie ein kleiner Windkessel an einer starren Leitung. Es ist deshalb angezeigt, die Schwungmassen nicht allzu knapp zu bemessen. (Fortsetzung folgt.)

Aus der Baugeschichte der Stadt Luzern.

III.

Das XVII Jahrhundert. Mit dem Anfang dieses Zeitabschnittes begann der Neubau des Rathauses am Kornmarkt durch Anton Isenmann, welcher, als anderwärts die Renaissance bereits zur Neige gieng, wahrscheinlich mit italienischen Arbeitern nach dem Vorbild des alten, einen wahrhaft monumentalen Bau ausführte, der wieder als Rathaus und Kornhaus dienen sollte. Von den markigen Gliederungen des Baues, dessen grünliche Steine zu Hertenstein bei Weggis gebrochen wurden, heben sich die reinen archi-

tektonischen Formen, die zierlichen Ornamente in den Friesen der Portale und Fenstereinfassungen vorteilhaft ab. Reiner und glücklicher ist der Bau ausgeführt als der des Ritterschen Palastes. Er imponiert durch die Harmonie, die zwischen Kraft und Zierde, sowohl in den dekorativen und plastischen Details des Aeußern, als in der vornehmen und massvollen Pracht des Innern besteht. Die Wendeltreppen, die Hallen mit Stern- und Netzgewölben unter denselben sind musterhaft ausgeführt. Auch die Ausstattung der Innenräume durch Täfelwerk, schöne Oeven und namentlich durch die berühmten Standesscheiben der eidgenössischen Orte entsprechen dem Ganzen. Durch die Erhöhung des Turmes gewann der stattliche Bau noch viel an Ansehen.

Kaum war der Rathausbau vollendet, so kamen Wasserbauten (Reusschwelle, Verbesserung des Burggrabens) an die Reihe, dann folgte der Bau der Muttergotteskapelle bei den Franziskanern und endlich der Neubau der 1633 abgebrannten Stiftskirche durch Jakob Kuhner von Ingolstadt. Die Kirche wurde in den Stilformen der italienischen Renaissance ausgeführt; da jedoch die Mittel nicht ausreichten, so verzichtete man auf eine strenge Durchführung des Stils, liess die gotischen Türme stehen, versah sogar die Kirche zum Teil mit gotischen Altären und führte am Langschiff und Chor das gotische Fenstersystem durch.

Die Friedhofshallen mit ihren toskanischen Säulen, die der Umgebung der Kirche ein so reizvolles, an italienische Bauwerke erinnerndes Aussehen verleihen, stammen auch aus jener Zeit; sie traten an Stelle der drei niedergelegten Chorhöfe. Hauptzierden der Kirche sind die grossartige Orgel und die von Nikolaus Geissler ausgeführte schöne Kanzel.

In die zweite Hälfte des Jahrhunderts fällt der Bau der St. Antonius-Kapelle bei den Franziskanern und die nach dem Plane eines unbekannten Meisters 1667—1673 im Barockstil ausgeführte Jesuitenkirche mit ihren vier Kapellen an den beiden Langseiten. Imposant an diesem Bau ist das kühn gebaute Schiff mit dem gewaltigen Hochaltar. In den Jahren 1679 bis 1687 wurde das mehr durch seine reizende Lage als durch wirkliche Pracht ausgezeichnete Kloster der Ursulinerinnen mit der Kirche Maria Hilf erbaut, die in ihrem Innern eine fast übermässige Höhenentwicklung im Verhältnis zur Breite und Länge des Schiffes aufweist.

Wie in früherer Zeit bauten die meisten Bürger noch sehr einfach; doch gab es immerhin einige Ausnahmen. So das von Moos'sche Haus gegenüber der Kaserne, das im Innern reich ausgestattete Haus des Marschall Franz Pfyffer von Wyer am Mühlenplatz, dessen reiches, von vergoldeten Säulen getragenes Getäfer nach Biel verkauft wurde, ferner das Mayr'sche Haus, das Haus auf dem Bramberg, das Stadthaus am Graben, die ganz in Stein erbaut sind, während die Spitalmühle im Obergrund, ein ungemein malerischer Bau, in Fachwerk hergestellt wurde.

In jener Zeit wurde noch streng auf Beachtung der Zunftordnungen gehalten; demnach war es einem Steinmetzen nicht erlaubt, den Bau eines ganzen Hauses zu übernehmen, d. h. sich als Baumeister zu gerieren; man musste, wie ein Ratsentscheid von 1608 zeigt, vielmehr mit Maurern, Zimmerleuten und Steinmetzen verschiedene Verträge abschliessen.

Das XVIII. Jahrhundert war für Luzern ein unglücklicher Zeitabschnitt. Am 30. Juli 1701 explodierte während eines Gewitters das im Heuturme auf der Musegg magazinierte Pulver und richtete eine gewaltige Zerstörung an Wohnhäusern und Kirchen an. Fast kein Haus blieb unversehrt und noch heute sind Spuren dieses Ereignisses nachweisbar. Beim Beginn der Toggenburgerwirren sah sich der Rat nach einem Festungsbaumeister um, der in Pietro Morettini gefunden wurde. Bekannt ist dieser aus Vaubans Schule hervorgegangene Ingenieur durch die von ihm vorgenommene Sprengung des Urnerloches (1707 bis 1708) und seine Befestigung von Freiburg und Solothurn. Sein Befestigungsplan für Luzern wurde jedoch nicht ausgeführt; nur das malerische untere Thor wurde durch ein