

**Zeitschrift:** Schweizerische Bauzeitung  
**Herausgeber:** Verlags-AG der akademischen technischen Vereine  
**Band:** 66 (1948)  
**Heft:** 7

**Artikel:** Drehzahlregelung der Wasserturbinen: Stellungnahme  
**Autor:** Fabritz, G. / Stein, Th.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-56668>

### **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:** 14.03.2025

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

$$\frac{df}{dw} = \frac{\mu \cos \frac{w}{\mu} \sin \frac{w}{\mu} - \cos w \sin w}{\cos^2 w \sin^2 \frac{w}{\mu}} \geq 0,$$

mithin nach (14)

$$2 \frac{\text{ctg } \alpha}{\sin^2 \alpha} \frac{d\alpha}{dw} \geq 0,$$

also durchwegs

$$\frac{d\alpha}{dw} \geq 0$$

und damit tatsächlich  $w$  eine eindeutige Funktion von  $\alpha$ .

In Bild 2 ist die Beziehung (14) für verschiedene Verhältnisse  $\mu^2 \geq 1$  ausgewertet, und zwar ist statt  $w_1$  der Faktor

$$(16) \quad k = \frac{2w_1}{\pi},$$

mit dem sich die Knicklast gemäss (13) in der Form

$$(17) \quad P_k = k^2 \frac{\pi^2 E J_x}{l^2}$$

ergibt, als Funktion von  $\alpha$  aufgetragen. Die Kurven, die für stumpfe Winkel  $\alpha$  durch Spiegelung an der Endordinate fortgesetzt werden könnten, steigen mit Ausnahme der Horizontalen  $\mu^2 = 1$  von  $\alpha = 0$  bis  $\alpha = \pi/2$  monoton an und weisen — von der Kurve  $\mu^2 = 4$  abgesehen — an beiden Intervallgrenzen horizontale Tangenten auf. Der gesamte Anstieg geht von  $k = 1$  für  $\mu^2 \geq 4$  bis  $k = 2$  und setzt umso rascher ein, je grösser  $\mu^2$  ist.

Das Kurvenbild zeigt insbesondere, dass das in der Praxis übliche Verfahren, Zylindergelenke wie Kugelgelenke zu behandeln, zwar zweifellos vorsichtig ist, aber den wirklichen Verhältnissen kaum gerecht wird. Sind die Endlager derart ausgebildet, dass sich die Axe der Lagerschale nicht aus der Normalebene zur ursprünglich geraden Stabaxe herausdrehen kann, so ist die wirkliche Knicklast bis viermal grösser als der üblicherweise verwendete Wert

$$P_k = \frac{\pi^2 E J_{\min}}{l^2},$$

und zwar unterscheiden sich die beiden umso stärker voneinander, je mehr sich der Winkel  $\alpha$  zwischen der Lageraxe und der Axe des kleineren Hauptträgheitsmomentes einem rechten nähert.

## Drehzahlregelung der Wasserturbinen

DK 621.24-531.6

Stellungnahme von Prof. Dr. G. Fabritz, Ravensburg

In seiner Veröffentlichung «Drehzahlregelung der Wasserturbinen», SBZ 1947, Nr. 39 bis 41, betont Th. Stein im Abschnitt VII «Reglerkatarakt ohne Rückführung» besonders die Möglichkeit, auf die übliche Rückführverbindung (Steuer-Verbindung «b» in Bild 1) verzichten zu können. Hierzu möge folgendes festgestellt werden:

Aus den für die Schwingungskreise bzw. deren Kopp- lung im einzelnen geltenden Gleichungen<sup>1)</sup>

$$(1) \quad \beta_b \dot{\mu} - \dot{\zeta} + \frac{1}{T_i} (\eta - \zeta) = 0$$

mit  $\beta_b$  als Uebersetzung der Rückführverbindung «b»,

$$(2) \quad \varphi = \delta \eta + \bar{\varphi}_r (\eta - \zeta)$$

mit  $\delta$  der auf  $y_{\max}$  bezogenen Statik des durch keinerlei Ver- stellkräfte belasteten Pendels

$$\text{und } \bar{\varphi}_r = \frac{C y_{\max}}{2 E}$$

( $C$  Charakteristik der Kata- raktfeder,  $E$  Stellkraft des ruhenden Pendels),

$$(3) \quad \dot{\mu} = - \frac{\sigma}{n_1 T_s}$$

mit  $\sigma$  als Steuerventilauslen- kung,

$$(4) \quad \sigma = \eta + \beta_a \mu$$

<sup>1)</sup> Fabritz, G.: Das Stabilitäts- problem der selbsttätigen Turbinenregelung, Wasserwirtschaft, Wien 1928, Heft 21/22. — Die Regelung der Kraftmaschinen, Springer, Wien 1940, S. 354, S. 355 ff.

der Gleichung der Steuer-Verbindung «a» (Uebersetzung  $\beta_a$ ) folgt die Steuergleichung des vervollständigten Systems (Bild 1)

$$(5) \quad T_i \bar{\varphi}_r \left( \frac{\delta}{\varphi_r} + 1 \right) n_1 T_s \dot{\mu} + [T_i \bar{\varphi}_r \beta_b + T_i \bar{\varphi}_r \left( \frac{\delta}{\varphi_r} + 1 \right) \beta_a + \delta n_1 T_s] \dot{\mu} + \delta \beta_a \mu + T_i \dot{\varphi} + \varphi = 0,$$

welche sich wegen der bei einer Regelungsauslegung nach modernen Gesichtspunkten bestehenden Beziehung  $T_i \gg n_1 T_s \rightarrow 0$  und damit berechtigten Vernachlässigung des  $\mu$ -Gliedes sowie des additiven Gliedes  $\delta n_1 T_s$  im  $\dot{\mu}$ -Glied in der Form

$$(5a) \quad [T_i \bar{\varphi}_r (\beta_b + \beta_a) + \delta \beta_a T_i] \dot{\mu} + \delta \beta_a \mu + T_i \dot{\varphi} + \varphi = 0$$

darstellt. Kann somit bei kleinen bezogenen Schlusszeiten  $n_1 T_s$  der Einfluss der Pendelstatik  $\delta$  (bei  $\beta_a = 0$ ) vernachlässigt werden<sup>1)</sup>, zeigt Gl. (5a) die additive Wirkung der Steuer-Verbindungen «a» und «b» und damit auch die grundsätzliche Möglichkeit der etwaigen alleinigen Anwendung der Steuer-Verbindung «a».

Da jedoch bei einer Uebersetzung  $\beta_a > 0$  und Wahl dieser nach den Stabilitäts-erfordernissen die Regelung eine darnach bestimmte und u. U. verhältnismässig hohe dauernde Statik erhält, falls  $\delta > 0$  ist, wird auch die von Th. Stein vorausgesetzte Astasie des Pendels notwendig. Eine (einstellbare) Statik der Regelung müsste dann etwa durch eine von der Servomotorstellung abhängig gemachte zusätzliche und dauernde Belastung des Pendels herbeigeführt werden; einfacher wird jedoch dieser Forderung Rechnung getragen durch die Praxis, der Steuer-Verbindung «b» die Stabilisierung, die Einführung einer dauernden (einstellbaren) Statik der Regelung jedoch der Steuer-Verbindung «a» zu übertragen — mit der selbstverständlich notwendig werdenden Anwendung eines statischen Pendels ( $\delta > 0$ ). Dass diese — entgegen der bei Ableitung der Steuergleichung (34) der Steinschen Abhandlung gemachten Voraussetzung — auch Bedingung für die Wirksamkeit der in Bild 5 (1947, S. 545) gezeigten Anordnung zur Drehzahlverstellung im Alleinbetrieb ist, mag erwähnt sein.

Die vorstehenden Feststellungen berühren in keiner Weise den Wert der veröffentlichten Untersuchung über den Einfluss der Selbstregelung bei Antrieb von Drehstromerzeugern durch Wasserturbinen, wobei der überwiegende Einfluss der mit der Güte der Spannungsregelung und der Belastungsart veränderlichen Charakteristik des Lastmomentes besondere Berücksichtigung findet. Es bleibt jedoch zu ergänzen, dass die aus der Voraussetzung  $n_1 T_s \rightarrow 0$  folgende Unterdrückung des in den vollständigen Stabilitätsbedingungen neben dem Parameter der Selbstregelung auftretenden Parameters

$$\mu_0 \tau_r = \frac{\mu_0 T_r}{n_1 T_s} = \left[ \frac{z T_l}{T_s / K} \right]^2$$

ein unvollständigeres Bild vermittelt, nicht so sehr wegen des unter hydraulisch günstigen Verhältnissen bestehenden Einflusses kleiner Werte von  $\mu_0 \tau_r$ , sondern weil die bewusste Anwendung längerer bezogener Schlusszeiten zur Verbesserung der Stabilität — etwa bei

<sup>2)</sup> [ ] in der Abhandlung von Th. Stein benützte Darstellungen.

$n_1 = [1/K]$  setzt die zur Herbeiführung der maximalen Servomotor- Geschwindigkeit notwendige Verstellung des Pendels ins Verhältnis zu dessen wie für Gl. (1) bis (4) definiertem Hub  $y_{\max}$ .  $n_1$  ist jedoch für eine bestimmte Uebersetzung zwischen Pendel und Steuerventil nicht nur Funktion des Durchflusskoeffizienten der jeweils steuernden Ventiquerschnitte, sondern wird wesentlich mitbestimmt durch die Druckspanne, die über den Arbeitsdruck hinaus zur Deckung der Ventilverluste zur Verfügung steht. Damit wird  $n_1$  auch abhängig von der Ausnützung des Reglerarbeitsvermögens und insbesondere von den für die einzelnen Servomotorstellungen bestehenden unterschiedlichen Regulierkräften. Diese Abhängigkeit ist bei Festlegung des jeweiligen  $n_1$ - Wertes zu beachten. Der Einfluss von Änderungen der Druckspanne auf  $n_1$  ist überdies verschieden, je nachdem ob es sich um Windkessel- oder Durchflussregler handelt.

Wirtschaftliche Erwägungen lassen die über dem höchsten Arbeits- druck zur Erzeugung der Durchströmgeschwindigkeit verfügbare Druck- spanne kaum über 1,5 bis 2 at wählen. Es kann ferner als Regel gel- ten, dass die Einschaltung der vollen Servomotorgeschwindigkeit ent- sprechend der konstruktionsgemäss vorgesehenen kürzesten Schluss- zeit bereits bei Drehzahlabweichungen von 1 bis 1,5%, falls kurze be- zogene Schlusszeiten  $n_1 T_s$  angewendet werden sollen, erfolgt. Dem- nach ergeben sich Werte von  $n_1 = 0,06$  bis 0,1, unabhängig von der im Einzelfalle durch Abbildung der Servomotorleitungen herbeigeführ- ten effektiven Schlusszeit, s. Fussnote<sup>1)</sup>.

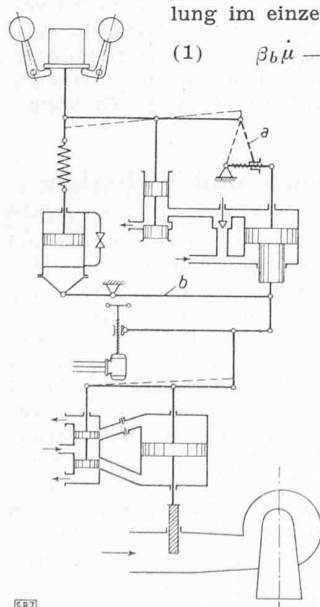


Bild 1

Regelung von Kaplan- oder Freistrahlturbinen — nicht erfasst wird. Wird die in den vorerwähnten Veröffentlichungen<sup>1)</sup> bereits angegebene allgemeine Form der dynamischen Grundgleichung des drehenden Systems, welche neben Druckstoss und Charakteristik des Antriebs- und Lastmomentes auch den Einfluss von Wirkungsgrad- und Gefällsänderungen, unterschiedlicher Proportionalität zwischen Wassermengenänderung und Servomotorstellung berücksichtigen lässt, jedoch unter Beschränkung auf die erstgenannten Einflüsse benützt, so gilt

$$(6) \quad \frac{\mu_0}{2} T_r T_a \ddot{\varphi} + (T_a + \frac{\mu_0}{2} T_r k_N) \dot{\varphi} + k_N \varphi + \mu_0 T_r \dot{\mu} - \mu = 0$$

mit  $k_N = \frac{\Delta N/N_0}{\Delta \omega/\omega_m} = [z_0 e_s]^2$  als dem aus dem relativen Verlauf von Last- und Antriebsleistung folgenden Selbstregelungs-Koeffizienten.

Aus der Zusammenfassung der für

$$\delta = 0, \beta_a = 0, \beta_b \neq 0$$

bzw.

$$\delta = 0, \beta_a \neq 0, \beta_b = 0$$

identisch bestehenden Steuergleichung (5a)

$$T_i \varphi_r \beta \dot{\mu} + T_i \dot{\varphi} + \varphi = 0$$

(5b), mit der vorgenannten dynamischen Gleichung (6) des Systems folgt unter Benutzung bezogener Koordinaten

$$(7a) \quad \alpha_1 = \frac{T_i}{\mu_0 T_r}$$

$$(7b) \quad \alpha_2 = \frac{\varphi_r T_a}{\mu_0 T_r} \text{ mit } \overline{\varphi_r \beta} \begin{matrix} (a) \\ (b) \end{matrix} = \varphi_r$$

die in einer zweifachen Kurvenschar mit den Parametern  $k_N$  und  $\mu_0 \tau_r$  sich darstellende Stabilitätsbedingung, deren Abhängigkeit von den erwähnten Parametern bei den in der Praxis zur Anwendung kommenden verhältnismässig hohen Werten von  $T_i$  mit genügender Genauigkeit aus der Lage der Asymptoten  $\alpha_{2\infty} (T_i = \infty)$  beurteilt werden kann. Man findet unschwer die letztere bestimmende Gleichung zu

$$(8) \quad \left( \frac{1}{\mu_0 \tau_r} + 0,5 \right) \alpha_{2\infty}^2 + \left[ \left( \frac{1}{\mu_0 \tau_r} + 0,5 \right)^2 k_N \varphi_r - \left( \frac{1,5}{\mu_0 \tau_r} + 0,5 \right) \right] \alpha_{2\infty} + \frac{0,5 k_N \varphi_r}{\mu_0 \tau_r} \left[ k_N \varphi_r \left( \frac{1}{\mu_0 \tau_r} + 0,5 \right) - 1 \right] = 0$$

Aus Gl. (8) folgt in den besonderen Fällen

$$(8a) \quad 1. \quad k_N = 0, \quad 0 < \mu_0 \tau_r < \infty \quad \alpha_{2\infty 0} = \frac{3 + \mu_0 \tau_r}{2 + \mu_0 \tau_r}$$

$$(8b) \quad 2. \quad k_N > 0, \quad \mu_0 \tau_r = \infty \quad \alpha_{2\infty \infty} = 1 - 0,5 k_N \varphi_r$$

die Asymptoten an die im Bild 7 der Steinschen Abhandlung dargestellten Kurven festlegend; bzw. 3. für  $k_N > 0, 0 < \mu_0 \tau_r < \infty$  die in Bild 2 dargestellte Abhängigkeit  $\alpha_{2\infty}$  von  $k_N \varphi_r$  und  $\mu_0 \tau_r$ . Beachtet man, dass sich die praktischen Werte von  $k_N \varphi_r$  im allgemeinen zwischen 0,2 bis 0,8 (1,0) bewegen, so erkennt man, dass bei günstigen hydraulischen Verhältnissen (kleinen Werten von  $\mu_0 \tau_r$ ) und geringen Werten von  $k_N \varphi_r$  (schwache Selbstregelung) nicht unwesentliche Steigerungen von  $\alpha_{2\infty}$  eintreten können, bei Steigerung der  $\varphi_r$ -Werte bzw. Verlängerung der bezogenen Schlusszeit  $n_1 T_s$  sich andererseits eine Herabsetzung von  $\alpha_{2\infty}$  unter den für  $\mu_0 \tau_r = \infty$  geltenden Wert ergibt. Damit erscheint auch ein weiterer Beitrag zur Klärung der Stabilität bei Verlängerung der bezogenen Schlusszeiten  $n_1 T_s$  (sinkende Werte von  $\mu_0 \tau_r$  bei vorliegenden  $\mu_0 T_r$ -Werten) gegeben.

**Antwort des Autors**

Mit der Veröffentlichung «Drehzahlregelung der Wasserturbinen» sollte festgestellt werden, wie die Regelung auszubilden ist, damit nicht mit Rücksicht auf die Stabilität zusätzliche Schwungmassen in die Turbinengruppe einzubauen sind, die konstruktiv nicht notwendig wären. Durch Behandlung der einfachsten Regler wurde nachgewiesen, welche Grundformen hierzu imstande sind: der ideale Kataraktregler mit Rückführung, der Kataraktregler ohne jede Rückführverbindung und der Beschleunigungsregler.

Die von Fabritz behandelte Abart Bild 1 ist ebenfalls praktisch brauchbar, wenn man, wie er zeigt, die Steuerverbindung «a» benützt, um mit einem statischen Pendel eine permanente Statik herzustellen, wobei dann die Rückführverbindung «b» zur Stabilisierung notwendig wird. Dies stellt eine andere Ausführungsform des bekannten Kataraktreglers mit Rückführung dar. Dagegen wurde bei der ursprünglichen Reglerform nach Bild 1 ohne Steuerverbindung «a» und «b» die neue Tatsache erläutert, dass manganz ohne Rückführverbindung auskommen kann, wenn der Drehzahlregler astatisch ist.

Fabritz zeigt, dass die Beschränkung der Ableitungen auf den vereinfachten Fall des idealen Kataraktreglers

(Schliesszeit 0 des Servomotors) der Tatsache nicht Rechnung trägt, dass in günstigen Fällen mit starker Selbstregelung ( $k_N \gg \gg$ ) und kleiner Trägheit der Wassermassen ( $\tau_r \ll \ll$ ) eine Verlängerung der Schlusszeiten ( $n_1 T_s$ ) des Servomotors die Stabilität verbessern kann, weil die Selbstregelung stärker wird. Für das aktuelle Problem, in kritischen Fällen mit beschränkten Schwungmassen auszukommen, darf man dennoch die Schliesszeit des Servomotors beim Kataraktregler vernachlässigen. Im kritischen Fall mangelnder Selbstregelung und grosser Trägheit der Wassermassen verschwindet nicht nur der verbessernde Einfluss verlängerter Schliesszeiten. Setzt man in vorstehender Formel (8a)  $T_s = 0$  ein, so ist  $\tau_r = T_r : n_1 T_s = \infty$ . Der Stabilitätswert  $\alpha_{2\infty}$ , der möglichst klein sein soll, nähert sich dem Werte 1, während er bei grösserer Schliesszeit ( $T_s >, \tau_r <$ ) ungünstiger wird. In kritischen Fällen verschlechtert also eine verlängerte Schliesszeit des Servomotors die Stabilität statt, sie zu verbessern. Die Näherung an den idealen Kataraktregler (Schliesszeit 0 des Servomotors), für den die Stabilitätskurven ermittelt wurden, ist dann nicht nur die mathematisch einfachste, sondern auch die beste Lösung. Th. Stein

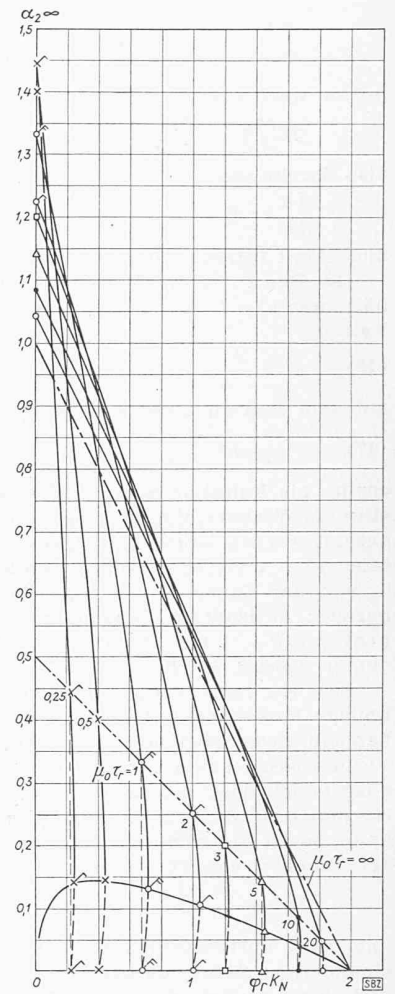


Bild 2

**Standesfragen der Ingenieure und Techniker**

DK 331.71:62

Der alte Gegensatz der Interessen von Arbeitnehmer und Arbeitgeber ist infolge der lebhaften Konjunktur der letzten Jahre und der damit im Zusammenhang stehenden Teuerung auch in den Kreisen der Ingenieure wieder akuter geworden. Auf eine fast unzulässig vereinfachende Formel gebracht, könnte man sagen, dass die Arbeitgeber das heutige Niveau der Ingenieur-Gehälter als kaum tragbar ansehen, während die unselbständig erwerbenden Ingenieure finden, dass gerade sie relativ am meisten unter der Teuerung zu leiden hätten, und zwar mehr als die Arbeiterschaft einerseits, die leitenden Persönlichkeiten andererseits. Daher ist auch, wie übrigens schon früher, der Wunsch nach einer gewerkschaftlichen Organisation der Ingenieure laut geworden oder die Anregung, der S. I. A. sollte eine konsequente Gewerkschaftspolitik treiben, was natürlich ungefähr das Gegenteil seiner heutigen Haltung wäre.

Solche Fragen haben in der Sektion Waadt des