

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 72 (1954)
Heft: 11

Artikel: Wasserturbinen-Regler mit identischer Integral- und Differential-Wirkung
Autor: Stein, T.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-61154>

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: 15.05.2025

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

Wasserturbinen-Regler mit identischer Integral- und Differential-Wirkung

DK 621.248

Von Dipl. Ing. T. Stein, Schio, Italien

A. Vereinfachung und Normalisierung der Reglerbegriffe

Man hat sich bisher in Europa bemüht, den gesamten Regelkreis theoretisch zu erfassen, um die Regler so auszubilden, dass optimale Bedingungen erreicht werden, durch die bei genügender Stabilität die beste Konstanz der geregelten Werte sichergestellt wird (Bild 1). In den USA hat die expansive Entwicklung der Regeltechnik durch Anwendung bei immer weiteren Prozessen hauptsächlich in der Industrie dazu geführt, dass die theoretische Erforschung der destabilisierenden Verzögerungen und der stabilisierenden Selbstregelungsvorgänge [4]*) in der Regelstrecke im Inneren der geregelten Prozesse nicht Schritt mit der Praxis hält. Auch haben theoretische Untersuchungen in dieser Richtung nicht befriedigt [8], so dass man sich darauf beschränkte, die industriellen Prozesse als leicht oder schwer regelbar zu charakterisieren.

Um das Verhalten der Regler im Laboratorium untersuchen zu können, wurden die Regler an Modell-Prozesse z. B. zur Regelung der Temperatur (Leeds and Northrup) [8] oder des Wasserstandes (Bristol) [9] angeschlossen, wobei die inneren Verzögerungen, die die schwierigen Prozesse charakterisieren, durch eine Kette speichernder sowie endlicher Verzögerungen im Modell eingeführt werden. Die Uebereinstimmung solcher Versuche mit der Erfahrung auf dem weiten praktischen Anwendungsfeld hat zum Ergebnis geführt, dass selbst für die Prozesse, die am schwersten zu regeln sind, das Regelgesetz sich auf die Grundform bringen lässt [2]:

Regelgesetz des PID-Reglers

$$(1) \quad \frac{y}{y_h} = K_P x + K_I \int x dt + K_D x'$$

$\uparrow$ $\uparrow$ $\uparrow$
 Proportional-Integral-Differential-Glied
 P I D

x = relative «Regelabweichung» (z. B. der Drehzahl)

y = Stellgrösse des Stellmotors (Servomotor)

y_h = Vollast-Stellbereich.

Für weniger schwer regelbare Prozesse kann das D-Glied weggelassen, für noch leichtere auch das I-Glied (reine Proportional-Regelung). Auf dieser Basis wurden nun in den USA alle Reglerbegriffe genormt und ähnliche Normen auch in England [1], Deutschland [2] und Italien [3] eingeführt oder vorbereitet.

B. Die Anwendung auf Wasserturbinen erklärt identisches Verhalten abweichender Reglerbauarten

Vom Standpunkt der bekannten wohlausgebildeten Theorie des gesamten Regelkreises einer Wasserturbine (Bild 1) aus betrachtet, könnte die Beschränkung der charakterisierenden Regelgesetze auf den Regler selbst, unter Ausschluss der Wasserturbine als eine unnütze und unzulässig normalisierende Vereinfachung angesehen werden, die als Notbehelf notwendig sein kann, wo die genaue Kenntnis der Gesetzmässigkeit der Regelstrecke, d. h. des geregelten Prozesses fehlt. Ganz im Gegensatz dazu ist bei der Wasserturbine die Gesetzmässigkeit der «Regelstrecke» von der Öffnung des Leitapparats bis zur Änderung der Drehzahl unter Einschluss des destabilisierenden Druckstosses und der stabilisierenden Selbstregelung [4], [5] sehr gut erfassbar [6], [7], [10].

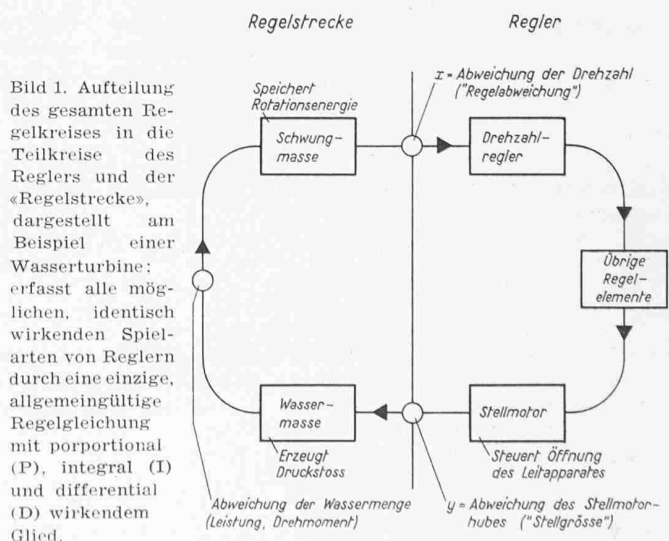
Dazu kommt, dass gemäss Tabelle 1 auch bei den neuesten Industrie-Prozessen keine Wirkungen auftreten, die so destabilisierend wirken, wie der Druckstoss bei Wasserturbinen. Modellversuche und Erfahrungen für solche Prozesse brauchen also nicht für die Beurteilung geeigneter Reglereigenschaften für Wasserturbinen massgebend zu sein. Man muss, wie in der Tabelle 1 zwischen den verschiedenen «Verzögerungen» längs der Regelstrecke (Bild 1) klare Unterscheidungen treffen, da ihre verzögernden Wirkungen nicht

gleichartig sind. Die energiespeichernde Wirkung der Schwungmassen verzögert zwar die Drehzahländerung, wirkt aber stabilisierend, während weitere Zwischenspeicher, wie sie bei schwer regelbaren industriellen Prozessen mehrfach hintereinander auftreten, eine gewisse destabilisierende Wirkung ausüben. Sehr viel schädlicher für die Stabilität sind Totzeiten, bis der Regelkreis zu reagieren beginnt. Sie treten bei industriellen Prozessen z. B. bei Temperaturregelung in hohem Mass auf, bei Wasserturbinen praktisch nur durch die Unempfindlichkeit des Stellmotors, die später behandelt wird. Die stärkste Störung der Stabilität tritt aber bei Wasserturbinen deshalb auf, weil nicht nur wie bei der Totzeit ein Stillstand, sondern durch den Druckstoss die Tendenz zu einer Wirkung in verkehrter Richtung auftritt [15].

Was ferner dazu zwingt, bei der Wasserturbine den ganzen Regelkreis (Bild 1) unter Einschluss von Wassermassen und Schwungmassen zu untersuchen, ist die Tatsache, dass — wenigstens bisher — die Stabilität der Regelung und die Güte der Frequenzhaltung verlangten, ein bestimmtes GD^2 für den Generator vorzuschreiben. Die Apparatur eines Fabrikations-Prozesses, sei es in der chemischen, metallurgischen oder Lebensmittel-Industrie, wird man kaum der Regelung zuliebe besonders dimensionieren, sondern die Forderung stellen, dass sich der Regler der fabrikationstechnisch bedingten Dimensionierung anpassen lässt. Grundlegend ist dieser Unterschied nicht, da man sich bei der Regelung von Wasserturbinen auch immer mehr bemüht, das GD^2 des Generators auf den konstruktionsbedingten natürlichen Wert zu reduzieren, um Baukosten zu sparen.

Die im Vergleich mit industriellen Prozessen viel schnellere Regelung der Wasserturbinen erschwert die Einhaltung der Stabilität. Auch hier hat nur die Untersuchung des gesamten Regelkreises zum vorteilhaften Resultat geführt, dass uns die *optimalen Bedingungen* für die Einstellung der Regler genau bekannt sind. Dies nicht nur für die Stabilitätsgrenze, sondern unter Einhaltung einer bestimmten Abklingzeit [5] und unter Berücksichtigung der Konstanten der Selbstregelung [15]. Das gestattet, bei genügender Stabilität die beste Frequenzhaltung zu erreichen.

Trotz dieser positiven Ergebnisse der Untersuchung des gesamten Regelkreises darf man nicht verkennen, dass nur die Beschränkung auf den Regler selbst, also unter Ausschluss der Wasserturbine, die wichtige Frage beantwortet, wieso vollkommen verschiedenartige Regler-Bauarten von Wasserturbinen identischen Regelverlauf hervorrufen können. Gerade weil bei all diesen Reglern die «Regelstrecke» der Wasserturbine zwischen Leitapparat und Drehzahlregler über-



*) In eckiger Klammer Hinweis auf Literaturverzeichnis am Schluss des Aufsatzes.

einstimmt, lassen sich nur durch die Beschränkung auf den Teilkreis der verschiedenartigen Regler selbst die Ursachen des unterschiedlichen oder übereinstimmenden Verhaltens abweichender Bauarten lokalisieren.

Die *Identitätsbedingungen* für übereinstimmendes Verhalten von drei scheinbar verschiedenartigen Reglern [10] erschienen zunächst wie ein Zufall, bis immer weitere Bauarten mit identischem Verhalten hinzukamen [12], [13], [14], [16]. Die vereinfachende Normalisierung gemäss Formel (1) lässt alle diese Bauarten als Spielarten von proportional, integral und differential wirkenden Reglern erkennen. Die Identitätsbedingungen ergeben sich aus dem Vergleich der Konstanten K_P , K_I und K_D der Formel (1) für die jeweiligen Bauarten. Auch die im Einzelfall abgeleitete Tatsache, dass der schnellere Beschleunigungsregler durch den bei Wasserturbinen aus Stabilitätsgründen dann notwendigen langsamen Stellmotor (Servomotor) den zeitlichen Vorsprung wieder verliert [15], wird sich durch Formel (1) in einfachster Weise erklären.

C. Tendenz für den Uebergang zum PID-Regler (proportional-, integral-, differential-wirkender Regler)

Es bleibt festzustellen, ob bei allen Unterschieden zwischen der Regelung von Wasserturbinen und von industriellen Prozessen (Tabelle 1), die bei schwer regelbaren industriellen Prozessen angewandten Regelmethode auch für Wasserturbinen vorteilhaft sind.

Bei industriellen Prozessen kommt man mit rein proportional wirkender P-Regelung aus, so lange nur ein einfacher

Energiespeicher vorhanden ist (Regelstrecke 1. Ordnung). Weitere Zwischenspeicher erfordern zur Stabilisierung einen so grossen Proportionalbereich (Statik), dass man die Abweichungen vom Sollwert mit der Zeit wieder aufheben muss. Das geschieht durch das Hinzufügen eines integral wirkenden Gliedes, wodurch ein PI-Regler entsteht. Erst in den letzten Jahren ist man dazu übergegangen, für noch schwierigere Prozesse als weiteres Glied gemäss Formel (1) ein differential wirkendes Organ hinzuzufügen, wodurch ein PID-Regler entsteht [8], [9].

Die Regelung der Kraftmaschinen, die sich unabhängig davon entwickelt hat, zeigt die gleiche Tendenz. Für die Regelung der Dampfturbinen, bei denen die Schwungmassen in der Hauptsache den einzigen Energiespeicher darstellen, kommt man in der Regel mit proportional wirkenden (statischen) P-Reglern aus. Das galt für die Anfänge im Bau von Wasserturbinen, so lange die Trägheit der Wassermassen noch klein war im Verhältnis zu derjenigen der Schwungmassen [10]. Trotzdem es sich durch Wirkung in verkehrter Richtung beim Druckstoss, der bei relativ grösseren Wassermassen in steigendem Masse entsteht, um eine Wirkung handelt, die stärker destabilisiert als alle in industriellen Prozessen auftretenden Verzögerungen, könnte man grundsätzlich auch hier durch immer grösseren, aber praktisch unzulässigen Proportionalbereich (Statik) die Stabilität sicherstellen. Die zusätzliche Integralwirkung dient auch bei Wasserturbinen dazu, mit der Zeit den Sollwert wieder herzustellen, wobei zu beachten ist, dass durch eine begrenzte «Ueberschwingweite» die Frequenzregelung gut bleibt.

Bis heute ist man mit proportional-integral wirkenden PI-Reglern für Wasserturbinen ausgekommen. In den letzten Jahren durchgeführte Berechnungen [11], [12], [13], [14], [16] zeigen aber, dass wie bei schwer regelbaren industriellen Prozessen auch bei Wasserturbinen durch PID-Regler eine weitere Verbesserung grundsätzlich möglich ist.

Am Aufbau der Formel (1) befremdet zunächst, dass ausser der Regelabweichung x nicht einfach verschiedene Differentialquotienten von x auftreten, wie bei bisherigen mathematischen Ableitungen, sondern gleichsam treppauf und treppab sowohl der Differentialquotient x' als auch das Integral $\int x dt$. Bisher war es üblich, den Inhalt der Formel (1) zu schreiben:

$$(2) \quad \frac{y'}{y_h} = A x + B x' + C x''$$

indem man also nicht die Stellgrösse y , sondern die Stellgeschwindigkeit y' zu Grunde legte, und das wurde ursprünglich auch in USA so gehandhabt [8]. Der entscheidende Sachverhalt, dass bei Wasserturbinen zwischen Regelabweichung x , also Hub des Drehzahlreglers, und Stellgrösse y , also Hub des Stellmotors (Servomotor), ein *Integrationsorgan* einzuschalten ist, wird aber durch die mathematisch einfachere Formel (2) vollkommen verschleiert. Wie es neuerdings durch Aufstellung der *Uebergangsfunktion* zwischen dem Eingang zum Regler (Regelabweichung) und dem Ausgang vom Stellmotor (Stellgrösse) üblich ist, kann nur ein Vergleich der *Hub-Reaktion* am Ausgang mit dem Regler-*Hub* am Eingang Aufschluss darüber geben, was für Umwandlungen der Regler zwischen Eingang und Ausgang hervorruft (Bild 2).

D. Bestimmung der Konstanten in Bild 2

Die Uebergangsfunktionen gestatten auch eine anschauliche Interpretation der Konstanten der Gleichung (1). Beim proportional wirkenden P-Regler (Bild 2a) steht im Nenner der Konstanten von x der Proportionalbereich x_p (Statik). Dieses Regelgesetz wird ausser dem PI-Regler, der zur Stabilisierung dient, bei jeder Wasserturbine zusätzlich eingeführt, um den Parallelbetrieb mit anderen Kraftmaschinen zu regeln.

Tabelle 1.

Trotz aller neuen Anwendungsgebiete der Regeltechnik bleibt die Regelung der Wasserturbinen das schwierigste Problem, weil die Regelung schneller zu erfolgen hat, im kritischen Fall des isolierten Betriebes mit rein ohmscher Belastung die stabilisierende Selbstregelung wegfällt und bei keinem industriellen Prozess die stärkste destabilisierende Wirkung «in verkehrter Richtung» auftritt wie durch den Druckstoss bei Wasserturbinen, wobei man ferner bestrebt ist, durch kleines GD^2 Baukosten zu sparen.

Eigenschaften des geregelten Vorganges (Regelstrecke)	Wirkung auf die Regelung	Verhältnisse bei Wasserturbinen
<i>Verzögerungen durch:</i>		
Energiespeicher an der Regelgrösse (z. B. Schwungmasse für die Drehzahländerung)	verbessert die Stabilität	GD^2 soll möglichst klein sein, um Baukosten des Generators zu sparen, das erschwert die Stabilität
Zwischenspeicher zwischen Stellmotor und Regelgrösse (z. B. Drehzahl)	geringe Schwächung der Stabilität	praktisch nicht vorhanden
Totzeit im Regelkreis	stärkere Schwächung der Stabilität	kann durch Unempfindlichkeit im Stellmotor (Servomotor) auftreten
Druckstoss	stärkste Schwächung der Stabilität, weil Wirkung in verkehrter Richtung (negative Glieder der Differentialgleichung des Regelvorganges)	tritt immer auf um so stärker, je grösser die Anlaufzeit der Wassermassen
<i>Selbstregelung</i> durch Aenderung der Regelgrösse (z. B. Drehzahl) bei Aenderung der Stellgrösse (Leistung) bei stillgesetztem Regler	verbessert die Stabilität	fällt ganz weg im kritischen Fall von isolierten Netzen mit rein ohmscher Belastung
Regelgeschwindigkeit zur Einhaltung begrenzter «Ueberschwingweite» der Regelgrösse (z. B. Netzfrequenz)	Notwendigkeit grosser Regelgeschwindigkeit erschwert die Regelung	genügende Regelgeschwindigkeit zur Frequenzhaltung notwendig, da die Periode einer Regelschwingung nach Sekunden zählt, statt nach Minuten wie bei Regelung industrieller Prozesse

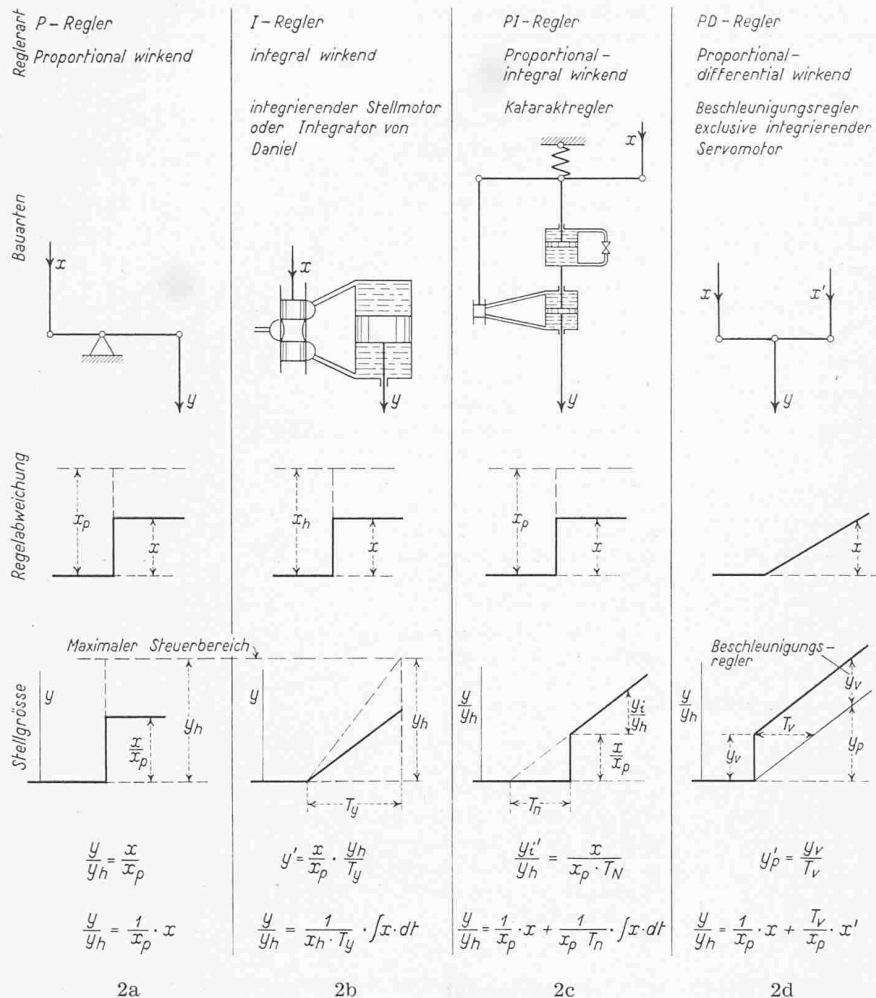


Bild 2. Uebergangsfunktionen von P-, I- und PD-Regel-elementen zeigen die Aenderung der Stellgrösse y am Ausgang des Regel-elementes bei Aenderung der Regelgrösse x am Eingang

Beim rein integral wirkenden I-Regler (Bild 2b) ist die Stellgeschwindigkeit y' proportional zur Regelabweichung x und erreicht bei vollem Steuerbereich x_h die maximale Stellgeschwindigkeit, bei der der maximale Stellbereich (Servomotorhub) y_h in der Stellzeit T_y durchlaufen wird. Also ist $y' = \frac{y_h}{T_y} x$

bei maximaler Regelabweichung x_h $y' = \frac{y_h}{T_y}$

bei der Regelabweichung x $y' = \frac{x}{x_h} \cdot \frac{y_h}{T_y}$

also

$$\frac{y'}{y_h} = \frac{1}{x_h T_y} x \text{ und } \frac{y}{y_h} = \frac{1}{x_h T_y} \int x dt$$

Die integrale Wirkung wird im Stellmotor des Beschleunigungsreglers angewendet oder bei dem von Daniel [14] mit Integrator bezeichneten Reglement.

Beim Kataraktregler (Bild 2c) ist das verdrängte Oelvolumen, das durch die Drosselöffnung strömt, dem Geschwindigkeitsunterschied zwischen den Bewegungen von y und x proportional. Bezeichnet man mit y_h den Katarakthub und mit x_p den Proportionalbereich (temporäre Statik) des Reglers, der dem maximalen Stellhub entspricht, so ist an der Eintrittseite des Katarakts der Hub

$$\frac{x}{x_p} y_h$$

und die Geschwindigkeit

$$\frac{x'}{x_p} y_h$$

Bei der grössten Federkraft, die der grössten Regelabweichung x_p entspricht, wird der Hub y_h in der «Nachstellzeit» (Isodromzeit) T_n durchlaufen, also mit der Geschwindigkeit y_h/T_n . Bei Federkräften, die kleineren Regelabweichungen x entsprechen, ist der Geschwindigkeitsunterschied kleiner im Verhältnis x/x_p , also

$$y' - \frac{x'}{x_p} y_h = \frac{x}{x_p} \cdot \frac{y_h}{T_n}$$

oder

$$\frac{y}{y_h} = \frac{1}{x_p} x + \frac{1}{x_p T_n} \int x dt$$

Die Uebergangsfunktion Bild 2c veranschaulicht deutlich, dass der Kataraktregler wie ein Proportionalregler der Regelabweichung x folgt, aber zusätzlich ein Integralglied hat. Aus der Tangente des zusätzlichen Integralhubes y_i' lässt sich die Nachstellzeit T_n als Subtangente der Verlängerung von y_i bis zur Abszissenaxe einfach bestimmen.

Der Beschleunigungsregler Bild 2d hat ausser dem Drehzahlregler einen die Beschleunigung messenden Zusatzregler. Um klarzustellen, welches die Funktion dieser Regelemente allein im Vergleich zu den übrigen Elementen (Bild 2a-c) ist, wird hier vom Einfluss eines nachgeschalteten integrierenden Stellmotors (Servomotor) abgesehen.

Der Drehzahlregler wirkt genau wie beim einfachen Proportionalregler nach der Gleichung

$$\frac{y}{y_h} = \frac{1}{x_p} x$$

Für das Beschleunigungselement ist es zweckmässig, die «Vorhalt»-Zeitkonstante T_v ebenfalls auf den Proportionalbereich zu beziehen. Man hat dann das Regelgesetz

$$\frac{y}{y_h} = \frac{1}{x_p} x + \frac{T_v}{x_p} x'$$

Zur anschaulichen Darstellung der Zusammenhänge wird hier als Regelabweichung eine konstante Beschleunigung der Regelgrösse zugrunde gelegt (Bild 2d). Diese löst durch den Beschleunigungsregler einen Stellhub y_v aus. Durch den proportional wirkenden Drehzahlregler entsteht ein zusätzlicher Stellhub y_p nach dem proportionalen Gesetz

$$y_p = \frac{1}{x_p} x$$

Aus dem Anstieg von y_p und dem Stellhub y_v , der durch den Beschleunigungsregler hervorgerufen ist, bestimmt sich die Zeitkonstante T_v in Bild 2d nach der Beziehung

$$y_p' = \frac{y_v}{T_v}$$

E. Identische PI-Regler (proportional-integral wirkend)

Heute kommt man bei Wasserturbinen allgemein mit PI-Reglern aus. Wie bei anderen Regelvorgängen ist das Prinzip des PI-Reglers, den Proportionalbereich (P) so zu steigern, dass die Regelung stabil bleibt und ferner die Drehzahlabweichung, die beim reinen P-Regler zu gross würde, durch Hinzufügen eines integrierenden (I) Elementes einzuschränken. Dieser Integrier-Vorgang darf zeitlich nicht zu schnell erfolgen, weil dadurch die vom P-Regler erreichte Stabilität wieder aufgehoben würde. Die Bedingungen für die optimale Zeitkonstante des Integriervorganges [15] bei Wasserturbinen werden später behandelt.

Aus Bild 2c geht hervor, dass der Katarakt selber, ohne Hinzufügen weiterer Regelemente, schon ein vollständiger PI-Regler ist.

(3) Kataraktregler

$$\frac{y}{y_h} = \frac{1}{x_p} x + \frac{1}{x_p T_n} \int x dt$$

P-Glied I-Glied

Konstanten gemäss Formel (1)

$$K_p = \frac{1}{x_p} \quad K_I = \frac{1}{x_p T_n}$$

Die P-Konstante K_p lässt sich durch den Proportionalbereich (temporäre Statik) x_p so einstellen, dass die Stabilität sichergestellt ist, und die I-Konstante K_I sorgt durch ge-

Tabelle 2. Formelzeichen

1)	2)	3)	
T	T_a	T_a	Anlaufzeit der Maschine
Θ	T_l	T_l	Anlaufzeit der Wassermassen
k, δ'	δ_t	x_p	Proportionalbereich (temporäre Statik)
βk	δ	x_h	Steuerbereich zur Herstellung der maximalen Stellgeschwindigkeit relativ zur geregelten Drehzahl
τ	T_s	T_y	Stellzeit (Schliesszeit, Oeffnungszeit) des Stellmotors (Servomotor)
τ''	T_i	T_n	Nachstellzeit (Isodromzeit)
m	T_{ac}	T_v	Vorhaltzeit (Beschleunigungszeit)
τ'	τ'	τ'	Integralzeit (promptitude)
k, δ', τ''	$\delta_t T_i$	$x_p T_n$	für Katarakt-Regler
	δT_s	$x_h T_y$	für Beschleunigungsregler
$\Delta \omega$	φ	x	Regelabweichung relativ zur Drehzahl
		y	Stellgrösse (Abweichung des Servomotors)
		y_h	Stellbereich (grösster Hub des Servomotors)
Δp_0	μ	y/y_h	relative Abweichung der Stellgrösse
		x_0	Unempfindlichkeit relativ zur Drehzahl
		q_0	Sickerölmenge des Stellmotors (Servomotor) zwischen Kolben und Zylinder relativ zur maximalen Stellölmenge

1) nach Gaden.

2) vom Verfasser bisher verwendet.

3) genormt [2] oder in den Normen nicht festgesetzt.

Tabelle 3. Bedingungen für Identität und Optimum

	Kataraktregler	Beschleunigungsregler
a) K_p = Konstante des Proportional-Gliedes	$\frac{1}{x_p}$	$\frac{T_v}{x_h T_y} = \frac{T_v}{\tau'}$
b) K_I = Konstante des Integral-Gliedes	$\frac{1}{x_p T_n} = \frac{1}{\tau'}$	$\frac{1}{x_h T_y} = \frac{1}{\tau'}$
c) Integralzeit (promptitude) τ'	$x_p T_n$	$x_h T_y$
d) Identisch wenn	$T_n = T_v$	
und	$x_p T_n = x_h T_y$	
d. h.	$\tau' = \tau'$	
e) Optimale Einstellung bei der günstigsten Abklingzeit unabhängig vom Grad der Selbstreglung	$x_p = 1,8 \frac{T_l}{T_a}$	$\frac{\tau'}{T_v} = 1,8 \frac{T_l}{T_a}$
f) Optimale Zeitkonstanten T_n und T_v für den kritischen Fall fehlender Selbstreglung bei rein ohmscher Belastung	$T_n = 4 T_l$	$T_v = 4 T_l$
g) Bei optimaler Einstellung gilt (Selbstreglung 0) für beide Reglerarten e) $\times$ f)	$\tau' = x_p T_n = 7,2 \frac{T_l^2}{T_a}$	$\tau' = 7,2 \frac{T_l^2}{T_a}$

Der Vergleich der Konstanten des proportional-integralen (PI) Regelgesetzes zeigt, dass Kataraktregler und Beschleunigungsregler sich hinsichtlich Stabilität und Frequenzreglung identisch verhalten, wenn die Integralzeit τ' (promptitude) und die Zeitkonstanten T_n und T_v beider Regler gleich sind. Bei optimal eingestellten Reglern kennzeichnet die Integralzeit (promptitude) τ' allein bei beiden Reglern das Mass der Stabilität.

nügend grosse Integrierwirkung mit Hilfe des Produktes $x_p T_n$ dafür, dass nicht durch zu schnelles Nachstellen oder besser gesagt Rückstellen der nachgebenden Rückführung des Katarakts die Stabilität wieder beeinträchtigt wird. Die PI-Regelglieder zur Sicherstellung der Stabilität sind also im Katarakt allein vollkommen enthalten. Das gestattet, den nachfolgenden Stellmotor (Servomotor) als reinen Kraftverstärker auszubilden. So werden auch in andern Reglerbauarten Verstärker, in denen keine Umwandlung des Regelgesetzes zwischen Eingang und Ausgang stattfindet, in allen Berechnungen unberücksichtigt gelassen. Deshalb darf man beim Kataraktregler mit reiner Kraftverstärkung im Stellmotor (Servomotor) ebensowenig wie bei Kraftverstärkern anderer Regler dem Stellmotor zusätzliche Zeitkonstanten zuschreiben.

Die ausgezeichneten Untersuchungen von Evangelisti [7], die auch den Einfluss der Reglerkonstanten auf die Stabilität des Wasserschlosses einbeziehen, würden einfacher und zugleich allgemein-gültiger, wenn nicht für den rein verstärkenden Stellmotor des Kataraktreglers eine komplizierende Zeitkonstante eingesetzt würde, die von Evangelisti selbst bei andern reinen Verstärkern richtigerweise weggelassen wird. Da sich identisch wirkende, nur in der Bauart abweichende PI-Regler auch dem Wasserschloss gegenüber identisch verhalten müssen, geht aus den Identitätsbedingungen Tabelle 3 hervor, auf welche Zeitkonstanten (T_n und T_v) der verschiedenen Bauarten es bei der Stabilisierung des Wasserschlosses ankommt.

Auch bei andern Reglern würde die Einführung von Zeitkonstanten für reine Zwischenverstärker zu komplizierteren Formeln führen, die die Zusammenhänge nicht aufklären, sondern verschleiern und gültige Vergleiche verschiedener Bauarten illusorisch machen. Dies ist beim «idealen» Kataraktregler [10] um so weniger angebracht, als man es ganz in der Hand hat, durch reichliche Dimensionierung der Steuerventile und starkes Uebersetzungsverhältnis zwischen Drehzahlregler und Steuerventil schon bei beliebig kleinen Drehzahlabweichungen die maximale Stellgeschwindigkeit herzustellen [10], [15]. Der Beschleunigungsregler (Bild 2d) allein wirkt proportional-differential (PD). Ein integral wirkendes Glied ist

aber notwendig, um dem Druckstoss entgegenzuwirken. Dies wird eingeführt, indem man in Serie zum Beschleunigungsregler den Stellmotor (Hauptservomotor) integral arbeiten lässt, gemäss Bild 2 b und 3 b.

Der Begriff des Proportionalbereiches verliert hier seinen Sinn, weil wegen der Integrationswirkung des Stellmotors die maximale Regelabweichung von x nicht mehr proportional auf y übertragen wird. Die Regelabweichungen des Beschleunigungsreglers sind deshalb auf die maximale Abweichung x_h zu beziehen, die dem Hub des Steuerventils entspricht, welcher die maximale Stellgeschwindigkeit herstellt. Bezeichnet man mit x_1 die Hubverbindung zwischen Beschleunigungsregler und Steuerventil (Bild 3 b), so gilt

$$\text{für den Beschleunigungsregler} \quad \frac{x_1}{x_h} = \frac{1}{x_h} x + \frac{T_v}{x_h} x'$$

$$\text{für den integrierenden Servomotor (Bild 2 b)} \quad \frac{y}{y_h} = \frac{1}{x_h T_y} \int x_1 dt$$

hieraus

$$(4) \quad \text{Beschleunigungsregler mit integrierendem Stellmotor (Servomotor)} \quad \frac{y}{y_h} = \frac{T_v}{x_h T_y} x + \frac{1}{x_h T_y} \int x dt$$

$\uparrow$ $\uparrow$
 P-Glied I-Glied

Konstanten

$$\text{gemäss Formel (1)} \quad K_p = \frac{T_v}{x_h T_y} \quad K_I = \frac{1}{x_h T_y}$$

Es entsteht also durch den integrierenden Servomotor das sonst fehlende Integral-Glied. Zugleich wird durch die Integration die Eigenschaft des Beschleunigungsreglers aufgehoben, schneller als der Drehzahlregler auf den Leitapparat der Wasserturbine einzuwirken.

Dies erklärt allgemein in einfachster Weise die am Einzelfall abgeleitete Tatsache [15], dass der Beschleunigungsregler den anfänglichen Vorsprung gegen den Kataraktregler am Ende der Regelkette wieder verliert. Das muss geschehen,

weil die Differentialwirkung des Beschleunigungsorgans und die unerlässliche Integralwirkung des Servomotors sich gegenseitig aufheben. Ebenso einleuchtend geht aus dem Zusammenwirken von differential und integral wirkenden Regелеlementen hervor, dass es sehr verschiedene Bauarten mit völlig identischem Regelverhalten geben kann, sofern sie nämlich gleiche Proportional- und Integral-Konstanten für die Beziehung zwischen Regelabweichung und Stellwirkung auf den Leitapparat aufweisen. Dass ein astatischer Drehzahl-Regler (Bild 3 c) an seinem Katarakt keine Rückführung braucht, wurde schon nachgewiesen, ebenso seine Identität mit einem statischen (proportional wirkenden) Drehzahlregler mit rückgeführtem Katarakt [10].

An Stelle eines Katarakts kann man gemäss Bild 3 d nach Daniel [14] einen Integrator verwenden. Um die proportionale Verbindung herzustellen, wirkt der Drehzahlregler ausser auf den Integrator parallel dazu noch direkt auf den Stellmotor, der auch hier als reiner Verstärker wirkt. Die proportional-integrale Wirkung kommt durch die Summe der proportionalen Wirkung (Bild 2 a) und der integralen (Bild 2 b) zustande. Sie ersetzen zusammen den Katarakt.

(Schluss folgt)

Die Kunstgewerbeschule Zürich

DK 373.7

Diese Schule feierte dieses Jahr ihr fünfundsiebzigjähriges Bestehen, und statt einen Rückblick auf ihre Vergangenheit zu geben, der die ganze Verwirrung des Geschmacks seit den achtziger Jahren des vorigen Jahrhunderts aufrollen würde, gab sie in der Januar/Februar-Ausstellung ein Bild ihres heutigen Standes, das ungleich erfreulicher aussieht. Unter den Direktoren Jules de Praetere, Alfred Altherr und Johannes Itten ist die Zürcher Kunstgewerbeschule und das ihr angegliederte Museum zu einem Institut von internationalem Ansehen geworden, das durch seine Erziehungsarbeit und durch seine Ausstellungen auch auf die Entwicklung der

Architektur grossen Einfluss ausgeübt hat. Von Direktor Altherr ist 1918 auch der Impuls zur Gründung des Schweiz. Werkbundes ausgegangen, der stets in enger Fühlung mit der Schule geblieben ist. Es rechtfertigt sich deshalb, dieser Feier auch an dieser Stelle zu gedenken. Die Ausstellung bot einen umfassenden Ueberblick über die Erziehungsarbeit der Schule; es ist imponierend, was bereits die 16- bis 17-jährigen Schüler der Vorbereitungsklassen leisten, und unter den ausgeführten Arbeiten der älteren Schüler findet sich Vorzügliches. Verdienstlicherweise hat sich die Schule der so naheliegenden Gefahr, auf ein weltanschaulich-doktrinäres Gleis zu geraten, bisher entziehen können, und wir hoffen, dass es so bleiben werde, denn die Schüler sollen für die wirkliche Praxis erzogen werden und nicht nur zur Produktion für Ausstellungen und Zeitschriften.

Die Ausstellung gab zugleich Rechenschaft über die Tätigkeit des derzeitigen Direktors *Johannes Itten*, die mit ihr ihren Abschluss findet. Man hätte sich keinen schöneren Ausklang wünschen können und nicht nur die Schüler, sondern alle am kulturellen Leben Zürichs Beteiligten sind ihm und seinen Mitarbeitern zu herzlichem Dank verpflichtet.

Im folgenden geben wir einige Abschnitte — gekürzt — aus dem Text von Direktor Itten in der anlässlich dieser Ausstellung herausgegebenen Wegleitung Nr. 200. Auch diese stets lehrreichen und schön illustrierten Hefte sind unter den Leistungen der Schule nicht zu vergessen.

P. M.

Pädagogisch-methodisches zum Kunstunterricht

Die alte Handwerkererziehung und damit auch die Erziehung der Maler, Bildhauer und Architekten bestand darin, dass die Lehrlinge (Schüler) zuerst einfache Handreichungen aller Art für die Ausführung eines gegebenen praktischen Auftrages leisten mussten. Der Meister (Lehrer) oder Gehilfe machte die Handreichung vor — der Lehrling versuchte sie solange nachzumachen, bis er sie beherrschte. So reichte sich Handgriff an Handgriff, Erfahrung an Erfahrung, bis schliesslich eine einfache selbständige Arbeit vom angehenden Gehilfen erwartet wurde. Diese Arbeiten waren Kopien früherer Ausführungen oder Arbeiten nach Entwürfen des Lehrmeisters. Auch ein Leonardo, Michelangelo mussten als Lehrlinge Zeichnungen, Malereien, plastische Arbeiten der Meister kopierend nacharbeiten und an den Werken der Lehrmeister mitarbeiten. Die Erziehungsweise war empirisch und nicht mit methodischen und pädagogischen Kenntnissen belastet. Psychologie, Arbeitsphysiologie in unserem Sinne waren unbekannt.

Diese ganze Art zu lehren und zu lernen bezeichne ich als die akademische. Sie ist auch heute noch die vorherrschende. Den überall da, wo Schüler und ganze Klassen von Schülern so arbeiten wie ihre Lehrer, da ist die Unterrichts- und Erziehungsweise im dargelegten Sinne akademisch. Die Eigenartigkeit, Einmaligkeit jedes jungen Menschen wird mit dieser akademischen Unterrichts- und Erziehungsweise missachtet und unterdrückt. In seltenen Fällen können sich starke Persönlichkeiten frei machen vom Akademismus und sich zu selbständigem, originalem Arbeiten durchringen¹⁾.

Eine andere Lehr- und Lernweise geht aus von der unantastbaren, einmaligen Schülerpersönlichkeit, die durch Erziehen und Lernen in voller Freiheit sich entwickeln soll. Diese Freiheit heisst nun nicht Zügellosigkeit und rücksichtslose, hemmungslose Persönlichkeitsduselei. Jedem Recht auf individuelle Freiheit steht gleichwertig gegenüber eine Pflicht zur Achtung des Allgemeinen. Im Unterricht werden demgemäss erstens Aufgaben gestellt, die genau der Stufe der einzelnen Schülerpersönlichkeit angepasst sind und auch in persönlicher, originaler Weise gelöst werden können und müssen, und zweitens werden Aufgaben allgemeiner Art gestellt, die von den Form- und Farbgesetzmässigkeiten handeln und entweder im Sinne dieser Grundgesetze und Grundordnungen gelöst werden müssen oder aber fehlerhaft, falsch gelöst sind.

So entwickelt sich ein Wachsen und Reifen, welches viel mehr Zeit benötigt zur Erreichung einer höheren Gestaltungs-

¹⁾ Hierüber kann man in guten Treuen anderer Meinung sein, ohne dass das die Hochschätzung der Zürcher Kunstgewerbeschule und ihrer Methoden schmälern würde. Die Mehrzahl der Schüler hat gar keine «Originalität», oder diese entwickelt sich erst mit wachsendem Können, und wirkliche Originalität kann nie unterdrückt werden. Direktor Itten nennt sie selbst «unantastbar». Es ist gerade das Merkmal der starken Persönlichkeit, dass sie sich gegen Hindernisse durchsetzt.

P. M.

Identische proportional-integral wirkende PI-Regler

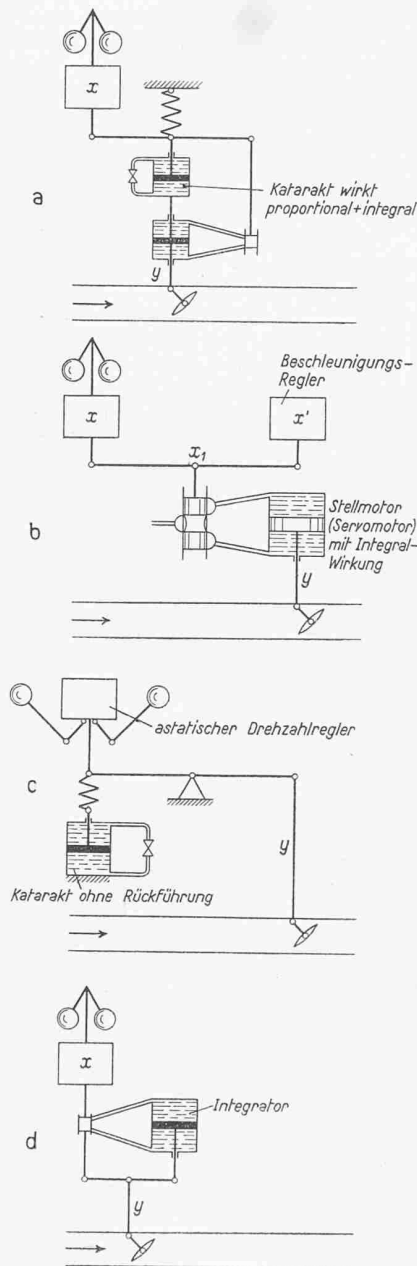


Bild 3. Alle heute verwendeten Regler für Wasserturbinen sind PI-Regler. Der Beschleunigungsregler hat identischen Regelverlauf wie die übrigen Bauarten, also auch gleiche Stabilität und Frequenzhaltung, weil seine Differentialwirkung durch die Integralwirkung des nachfolgenden integrierenden Stellmotors (Servomotor) wieder aufgehoben wird.