

**Zeitschrift:** Schweizerische Bauzeitung  
**Herausgeber:** Verlags-AG der akademischen technischen Vereine  
**Band:** 72 (1954)  
**Heft:** 12

**Artikel:** Wasserturbinen-Regler mit identischer Integral- und Differential-Wirkung  
**Autor:** Stein, T.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-61156>

### **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:** 03.04.2026

**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

Schluss von Seite 141

## F. Bedingungen für Identität und Optimum

Der Beschleunigungsregler hat das Besondere, dass sein Stellmotor (Servomotor) integrierend wirkt, während bei den anderen Bauarten (Bild 3 c—d) wie beim Kataraktregler 3 a der Stellmotor ein reiner Verstärker ist. Es genügt also, einen Vergleich zwischen dem Beschleunigungsregler und dem Kataraktregler anzustellen, der auch die übrigen Bauarten repräsentiert. Nachdem man durch das PI-Regelgesetz Kataraktregler und Beschleunigungsregler auf die gleiche Form gebracht hat, ist es klar, dass sie sich identisch verhalten müssen, wenn bei beiden Reglerarten die proportionale Konstante  $K_p$  und die integrale  $K_I$  unter sich gleich sind (Tabelle 3). Identischer Regelverlauf bedeutet gleiche Stabilität und gleiche Frequenzhaltung. Es ergibt sich gemäss Tabelle 3:

Kataraktregler    Beschleunigungsregler

proportionale Konstante  
 $K_p$  gleich                       $\frac{1}{x_p} = \frac{T_v}{x_h T_y}$

ferner

integrale Konstante  
 $K_I$  gleich                       $\frac{1}{x_p T_n} = \frac{1}{x_h T_y}$

(5) hieraus die beiden Identitätsbedingungen

$$T_n \equiv T_v$$

und

$$x_p T_n \equiv x_h T_y$$

Nach *Gaden* [6] wird zweckmässigerweise das Produkt der beiden Faktoren im Nenner des Integral-Gliedes  $K_I$  bei beiden Reglern zu einem einzigen Zeitwert  $\tau'$  zusammengefasst. Nach dem PI-Regelgesetz gewinnt der Begriff  $\tau'$  seine physikalische Deutung, indem dieser Zeitwert in vollem Mass bei allen PI-Reglern allein die Grösse des Integral-Gliedes der integrierenden Organe bestimmt. Der von *Gaden* als «promptitude» bezeichnete Zeitwert  $\tau'$  wird in diesem Sinne hier «Integralzeit» genannt<sup>1)</sup>. Durch Einführung der Integralzeit  $\tau'$  ergibt sich (Tabelle 3) das einfache Gesetz, dass Kataraktregler und Beschleunigungsregler sich identisch verhalten, wenn ihre Integralzeiten (promptitude)  $\tau'$  gleich sind und die Nachstellzeit (Isodromzeit)  $T_n$  des Kataraktreglers ebenso gross ist wie die Vorhaltzeit (Beschleunigungszeit)  $T_v$  des Beschleunigungsreglers.

Das PI-Regelgesetz erklärt auch physikalisch die bisher unverständliche Tatsache, dass die optimale Einstellung der Regler beim Katarakt durch eine einzige Konstante, den Proportionalbereich (temporäre Statik) erfolgt, während beim Beschleunigungsregler das Verhältnis von zwei Zeitkonstanten einzuhalten ist. Es wurde gefunden [15]

Kataraktregler    Beschleunigungsregler

(6) Optimale Einstellung     $x_p = 1,8 \frac{T_I}{T_a}; \quad \frac{\tau'}{T_v} = 1,8 \frac{T_I}{T_a}$

Diese eine Optimum-Bedingung berücksichtigt nicht nur die Stabilitätsgrenze, sondern die praktisch günstigste Abklingzeit, und sie gilt praktisch unabhängig vom Grad der Selbstreglung. Sie bedeutet beim Kataraktregler einfach, dass das proportionale P-Glied eine bestimmte Grösse haben muss, die durch den Proportionalbereich  $x_p$  (temporäre Statik) einstellbar ist;  $x_p$  muss um so grösser sein, je grösser die destabilisierende Anlaufzeit  $T_I$  der Wassermassen im Verhältnis zur stabilisierenden Anlaufzeit  $T_a$  der Schwungmassen ist. Dies praktisch unabhängig vom Grad der Selbstreglung, die also die Bedingungen für das P-Glied kaum verbessert.

Beim Beschleunigungsregler mit integrierendem Stellmotor (Servomotor) wird überhaupt kein Stellwert auf den Leitapparat übertragen, der direkt proportional zur Bewegung des Drehzahlreglers wäre. Das proportionale P-Glied entsteht hier durch das Verhältnis der Geschwindigkeiten von

Stellmotor und Drehzahlregler. Da die Geschwindigkeit des Drehzahlreglers durch den Beschleunigungsregler gemessen wird, erscheint gemäss Tabelle 3 e) an Stelle des Proportionalbereichs  $x_p$  beim Kataraktregler das Verhältnis  $\tau'/T_v$  der Zeitkonstanten von Stellmotor und Beschleunigungsregler.

Starken Einfluss hat dagegen die Selbstreglung auf das integrale I-Glied, so dass bei gleicher Anlaufzeit  $T_I$  der Wassermassen mit steigender Selbstreglung immer kleinere Nachstellzeiten  $T_n$  beim Kataraktregler und Vorhaltzeiten  $T_v$  beim Beschleunigungsregler optimal einzustellen sind. Im kritischen Fall fehlender Selbstreglung bei rein ohmscher Belastung kann aus früheren Untersuchungen [15] festgestellt werden, dass, wie in Tabelle 3 f) eingetragen, diese Konstanten auf  $4T_I$  optimal einzustellen sind. Es ergibt sich dann für beide Regler übereinstimmend bei optimaler Einstellung unter (g) = (e) · (f) in Tabelle 3:

(7) Bestes Abklingen bei optimal eingestellten Katarakt- und Beschleunigungsreglern    Integralzeit  $\tau' = 7,2 \frac{T_I^2}{T_a}$

Die Integralzeit (promptitude) ist also bei optimal eingestellten PI-Reglern ein Mass der Stabilität.

## G. PID-Regler (proportional-integral-differential wirkend)

Untersuchungen der letzten Jahre [16] von Daniel [11], [14], Dejou [12] und Alméras [13] ergeben rechnerisch, dass der Uebergang zum PID-Regler gestatten würde, den Regelvorgang der Wasserturbine um ein Vielfaches zu verbessern. Das würde die Tendenz fördern, das  $GD^2$  auf den konstruktionsbedingten natürlichen Wert zu senken und möglicherweise trotzdem erlauben, durch schnellere Regelung auch in schwierigen Fällen die Frequenzhaltung zu verbessern.

Geht man nach Bild 4 a vom Beschleunigungsregler mit integrierendem Stellmotor aus, so ist es klar, dass man für die Herstellung des differential wirkenden zusätzlichen Gliedes zur Einhaltung eines PID-Gesetzes einen Regler hinzufügen muss, der den zweiten Differentialquotienten der Drehzahl misst, weil nach der Integrierung durch den Stellmotor nur so das notwendige D-Glied übrigbleibt. Dem proportional-integral wirkenden PI-Gesetz des Katarakts muss man nach Bild 4 b nur einen einfachen Beschleunigungsregler hinzufügen, weil der nachfolgende Stellmotor nur als Verstärker wirkt, so dass das differential wirkende D-Glied des Beschleunigungsreglers erhalten bleibt.

Die gleiche Wirkung wie ein höherer Differentialquotient der Drehzahl übt ein Druckstossdetektor nach Bild 4 c und d aus, wie *Daniel* nachweist [14], von dem die Bestrebungen zum Uebergang auf PID-Regler bei Wasserturbinen ausgehen [11]. Wenn man den integrierenden Stellmotor in Bild 4 c durch einen Stellmotor mit reiner Verstärkerwirkung nach Bild 4 d ersetzt, kann an Stelle des Beschleunigungsreglers ein Katarakt treten oder aber ein Integrator. Auch den Katarakt in Bild 4 b kann man gemäss Bild 4 e durch einen Integrator ersetzen. Der Katarakt hat dem Integrator gegenüber den Vorteil, dass es sehr leicht ist, eine beliebig starke Integralzeit  $\tau'$  durch eine genügend wirksame, ungesteuerte Drosselstrecke zu erreichen. Beim Integrator muss man mit langen Stellzeiten und sehr kleinen gesteuerten Ventilquerschnitten arbeiten, wodurch störende Unempfindlichkeiten entstehen, wie sie nachfolgend für den Haupt-Stellmotor berechnet werden. Deshalb wurde bei einem Leistungsregler ein versuchsweise 1946 angewandter Integrator verlassen unter Rückkehr zum ursprünglich vorgesehenen Katarakt [18]. Eine besonders einfache Lösung ist der Katarakt mit Rückführverzögerung Bild 4 f. Die Verspätung der Rückführung des Stellmotors um einen Differentialquotienten lässt den Stellmotor gegenüber dem Drehzahlregler um einen Differentialquotienten voreilen, mit dem Effekt, den sonst ein Beschleunigungsregler an Stelle des Drehzahlreglers hätte.

Grundsätzlich aufschlussreich ist ein Vergleich von Bild 4 e mit Bild 3 b. In beiden Fällen ist ausser dem Drehzahl-

<sup>1)</sup> Die frühere Bezeichnung «Stellzeit» muss ersetzt werden, da nach den neuen Normen [2] die früher mit Schliesszeit bezeichnete Konstante nunmehr Stellzeit genannt werden soll.

regler ein Beschleunigungsregler und ein integrierendes Organ vorhanden. Während bei Bild 3 b die differentiale Wirkung des Beschleunigungsreglers verloren geht, weil der in Serie angeordnete integrierende Stellmotor sie aufhebt, bleibt die Differentialwirkung bei 4 e erhalten, weil der Integrator parallel angeordnet ist. Mit den gleichen Regelementen wird also durch Parallelschaltung statt Serienschaltung aus dem PI-Regler nach 3 b ein PID-Regler nach 4 e.

**H. Unempfindlichkeit des Stellmotors (Servomotor)**

Gleichgültig, ob es sich um die bisher üblichen proportional-integral wirkenden PI-Regler oder um die dazu noch differential wirkenden PID-Regler handelt, findet man bei diesen beiden Kategorien Lösungen, bei denen der Hauptstellmotor ein reiner Verstärker ist, neben solchen mit integrierendem Stellmotor. Die Lösungen mit rein verstärkendem Stellmotor sind einfacher, weil der Differentialquotient der Regler um einen Grad tiefer liegt. Ferner hat der rein verstärkende Stellmotor den Vorteil, dass sich die Handeingriffe des Schaltwärters damit beliebig schnell steuern lassen, ohne Verzögerung durch integrierende Organe [10], [15].

Im Bestreben, nicht ausser dem Druckstoss noch destabilisierende Totzeiten auftreten zu lassen, wie sie nach Tabelle 1 im Stellmotor auftreten können, ist noch zu untersuchen, welchen Einfluss hierauf die Integralzeit  $\tau'$  des Stellmotors hat. Es ist klarzustellen, dass ein Stellmotor, der mit luftfreiem, unkompressiblem Oel arbeitet, die Unempfindlichkeit null hätte, wenn es gelingen würde, den Stellmotorkolben gegen den Zylinder vollkommen abzudichten. Zwar wechselt die Reibungskraft beim Wechsel von Oeffnen zu Schliessen die Wirkungsrichtung, und das kann bei pneumatischen Stellmotoren wegen der Kompressibilität der Luft bedeutende tote Zonen, also Unempfindlichkeiten bedingen. Beim hydraulischen Stellmotor bedeutet die Reibungskraft nur eine Einbusse an Stellkraft. Mit der um die Reibungskraft verminderten Stellkraft würde sich der Stellmotor, wenn sein Kolben dicht wäre, ohne jede tote Zone beim Wechsel des Steuerventils von Oeffnen zu Schliessen schon bei beliebig kleinem Ventilhub sofort nach jeder der beiden Seiten in Bewegung setzen, d. h. die Unempfindlichkeit null sein.

Da aber immer gemäss Bild 5 Undichtigkeit zwischen Kolben und Zylinder besteht, bleibt bei kleinsten Oeffnungen  $x$  des Steuerventils der Kolben noch stehen, weil durch den Sickerverlust der Druckunterschied  $\Delta p$  nicht ausreicht, um die Reibungskraft zu überwinden. Erst wenn dies der Fall ist, beginnt die Bewegung, wobei die Sickermenge  $Q_0$  durchströmt. Auch bei schnellerer Bewegung bleibt  $Q_0$  gleich, wenn man die Reibungskraft  $R$  konstant annimmt. Die Unempfindlichkeit kommt dadurch zustande, dass keine Bewegung stattfindet, so lange weniger als die Sickermenge  $Q_0$  durchfliesst; diese Sickermenge  $Q_0$  muss bei Umkehr der Bewegung auch nach der anderen Seite durch den Sickerspalt fließen. Das Steuerventil muss also  $Q_0$  einmal nach der einen und bei Umkehr der Stellrichtung nach der anderen Seite durchfliessen lassen.

Man kann annehmen, dass die Oelmenge  $Q$  dem Hub  $x$  des Steuerventils proportional ist. Es ist also als Unempfindlichkeit eine tote Reglerabweichung  $x_0$  notwendig, um die Sickermenge  $Q_0$  durchzulassen, bis sich der Stellmotor in Bewegung setzt, und da die grösste Stellgeschwindigkeit durch den Steuerbereich  $x_h$  eingestellt wird, ist wegen der Proportionalität

$$\frac{x_0}{x_h} = \frac{Q_0}{Q_{max}} = q_0$$

wobei  $q_0$  die relative Sickermenge, bezogen auf die maximale Stellölmenge  $Q_{max}$  ist, bei der der volle Stellhub mit maximaler Geschwindigkeit in der Stellzeit  $T_y$  durchlaufen wird.

Setzt man wiederum die Integralzeit  $\tau' = y_h T_y$  ein, so wird

$$(8) \text{ Unempfindlichkeit } x_0 = \frac{\tau'}{T_y} q_0$$

Da bei einer gegebenen Wasserturbine die Stellzeit  $T_y$  und die relative Sickermenge  $q_0$  des Stellmotors festliegende Grössen sind, steigt die Unempfindlichkeit eines integrierenden Stellmotors (Servomotor) proportional mit der einzuhaltenen Integralzeit  $\tau'$ .

In der Steigerung der stabilisierenden Integralzeit  $\tau'$  des integrierenden Stellmotors wird man sich deshalb Beschrän-

kungen auferlegen müssen, um seine Unempfindlichkeit in zulässigen Grenzen zu halten. Dagegen kann man beim rein verstärkenden Stellmotor die Integralzeit und damit die Unempfindlichkeit beliebig heruntersetzen.

So wurden bei Messungen an mehreren Wasserturbinen mit Kataraktreglern einschliesslich aller Zwischenstellmotoren bis zum Nadelstellmotor Unempfindlichkeiten von nur 0,02 bis 0,03 % der Drehzahl gemessen, was der Grenze der Ablesgenauigkeit des verwendeten Messinstrumentes entsprach.

Das erklärt, wieso grundsätzlich zutreffende theoretische Berechnungen über die Güte der Frequenzreglung [17] zu Ergebnissen führen können, die mit der Praxis nicht übereinstimmen, wenn man in der Wahl der Reglerkonstanten ausser acht lässt, dass sich Stellmotoren, die reine Verstärker sind, mit beliebig kleinen Integralzeiten  $\tau'$  betreiben lassen und dass ganz wesentlich kleinere Unempfindlichkeiten auftreten als bei integrierenden Stellmotoren.

Es ist also voll berechtigt, den rein verstärkenden Stellmotor in allen Untersuchungen als feste Gestängeverbindung zu betrachten, da sich bei ihm sowohl die Integralzeit als auch die Unempfindlichkeit beliebig herabsetzen lässt, durch grosse Steuerventile oder grosses Uebersetzungsverhältnis zwischen dem Steuerventil und den Reglern. Nachdem man imstande ist, im Regler selbst die Unempfindlichkeiten zu beseitigen, folgt der Regler unter Einschluss des rein verstärkenden Stellmotors in idealer Weise dem theoretischen Regelgesetz, da weder Zwischenverzögerungen noch tote Zeiten durch Unempfindlichkeiten entstehen.

**J. Zusammenfassung**

Das einfache allgemeingültige Regelgesetz mit proportionalem (P), integralem (I) und differentialem (D) Glied zeigt, dass es bei Wasserturbinen überhaupt nur zwei Regler gibt: den heute allein üblichen proportional-integralen PI-Regler, dessen Spielarten identisch regeln, und ferner den PID-Regler, der in zahlreichen Abarten zur Verbesserung der Regelung vorgeschlagen wird, die alle übereinstimmend anstreben, den heutigen Reglern ein differentiales D-Glied hinzuzufügen. Der Identitätsbegriff, der für einzelne Spielarten früher abgeleitet wurde, gilt dadurch allgemein, und die physikalischen Ursachen identischer Regelung lassen sich durch Vergleich der Konstanten der proportionalen, integralen und differentialen Glieder des Regelgesetzes analysieren.

1. Die normalisierende Vereinfachung der Regelbegriffe ist von USA ausgegangen, weil man dort bei der Regelung der vielen verschiedenen industriellen Prozesse deren Regelkonstanten nicht zweckmässig erfassen konnte, so dass man sich darauf beschränkte, die Vorgänge im Regler selbst zu definieren durch proportionale (P), integrale (I) und differentiale (D) Wirkung.

2. Bei Wasserturbinen dagegen sind die Vorgänge der Regelstrecke zwischen Leitapparat und Drehzahlregler unter Einschluss der Selbstreglung gut erfassbar; der Druckstoss bedeutet durch die Tendenz zur Wirkung in verkehrter Richtung eine so starke Störung, wie sie bei Regelung industrieller Prozesse nicht vorkommt; man muss wegen der Frequenzhaltung schnell genug regeln und ausserdem imstande sein, durch Untersuchung des ganzen Regelkreises unter Einschluss der Wasserturbine das notwendige  $GD^2$  zu berechnen.

3. Trotz dieser Unterschiede ist man auch bei Wasserturbinen bestrebt, die Regler so auszubilden, dass man möglichst

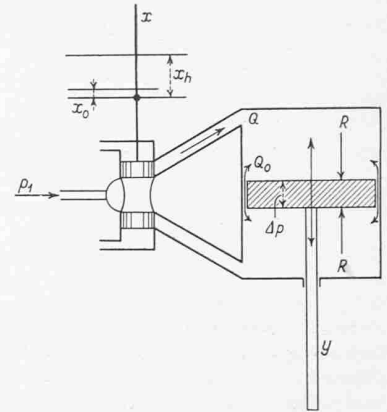


Bild 5. Bestimmung der Unempfindlichkeit  $x_0$  des Stellmotors (Servomotor). Die Unempfindlichkeit wäre null, wenn der Kolben ganz dicht gegen den Zylinder abschliessen würde, sie ist proportional zur relativen Sickerölmenge und zur Integralzeit  $\tau'$ . Gegenüber integrierenden Stellmotoren kommt man deshalb bei rein verstärkenden Stellmotoren auf wesentlich kleinere, kaum messbare Unempfindlichkeiten, da sich hier die Integralzeit beliebig herabsetzen lässt.

wie bei industriellen Prozessen mit den konstruktionsbedingten natürlichen Dimensionen ( $GD^2$ ) auskommt. Es zeigt sich auf beiden Gebieten die gleiche Entwicklung vom proportionalen P-Regler (der ersten Wasserturbinen) zum proportional-integral wirkenden PI-Regler, und auch der für schwer regelbare industrielle Prozesse durch Zufügen einer differentialen D-Wirkung verwendete PID-Regler wird für Wasserturbinen in vielen Abarten studiert, die sich durch den PID-Begriff zweckmässig ordnen und vergleichen lassen.

4. Die Beschränkung der vergleichenden Untersuchung auf den Regler selbst unter Ausschluss der Wasserturbine ist keine unzulässige Vereinfachung, sondern sie bringt eine systematische Klärung darüber, wieso es möglich ist, dass ganz verschiedene Bauarten identischen Regelverlauf ergeben können, d. h. gleiche Stabilität und gleiche Frequenzhaltung.

5. Auch der Umstand, dass an Stelle der früher üblichen Darstellung der Regeleinflüsse als Kette von Differentialquotienten verschiedener Ordnung die Untersuchung von proportionalen, integralen und differentialen Wirkungen tritt, ist unerlässlich, um zu erkennen, in welchen Regelementen sich integrierende Vorgänge abspielen. Erst so ist z. B. erkennbar, dass differentiale Wirkungen von Regelementen durch nachfolgende integrierende Organe wieder aufgehoben werden.

6. Alle gegenwärtig verwendeten Regler von Wasserturbinen sind proportional-integral wirkende PI-Regler. Drehzahlregler und Katarakt stellen zusammen schon einen fertigen PI-Regler dar. Der nachfolgende Stellmotor (Servomotor) ist deshalb ein reiner Verstärker, der in den Regelgleichungen ebensowenig zu erscheinen hat wie Zwischenverstärker oder Uebersetzungsgestänge bei anderen Reglern. Drehzahlregler und Beschleunigungsregler bilden zusammen einen proportional-differential wirkenden PD-Regler. Hier fehlt das zur Stabilisierung der Wasserturbine notwendige Integralglied. Um diese Funktion auszuüben, wird der Stellmotor integrierend ausgebildet, was aber die Differential-Wirkung des Beschleunigungsreglers auf eine proportionale Wirkung reduziert. Mit dem integrierenden Stellmotor zusammen entsteht also ein zum Kataraktregler identischer PI-Regler.

7. Die Regelvorgänge von Kataraktregler und Beschleunigungsregler verlaufen identisch, weil ihre Gesamtwirkung bei beiden ein PI-Gesetz ist. Der Umstand, dass der Beschleunigungsregler, der schneller reagiert, seinen ursprünglichen Vorsprung wieder verliert, erklärt sich durch die Wirkung seines notwendigerweise integrierenden Stellmotors.

8. Die Identitätsbedingungen für diese beiden und andere gezeigte Spielarten des PI-Reglers ergeben sich aus dem Vergleich ihrer Konstanten der auf gleiche Form gebrachten PI-Gleichung. Die Proportionalkonstante des Kataraktreglers wird beim Beschleunigungsregler durch das Verhältnis von zwei Zeitkonstanten ersetzt, weil dieser Wert durch Integration der Differential-Wirkung des Beschleunigungsreglers entsteht, was zusammen einen Proportionalwert ohne Zeitdimension ergibt. Das erklärt, wieso beim Kataraktregler die optimale Einstellung durch einen einzigen Wert  $x_p$  (temporäre Statik) erfolgt, beim Beschleunigungsregler durch Einstellung des Verhältniswertes von zwei Zeitkonstanten.

9. Die Integralkonstante beider Reglerarten lässt sich durch die Integralzeit (promptitude) definieren, die sich bei beiden Reglerarten aus verschiedenen Faktoren zusammensetzt. Bei optimaler Einstellung ist die Integralzeit bei beiden Reglern ein Mass der Stabilität.

10. Der Uebergang zum PID-Regler wäre durch Hinzufügen eines differential wirkenden D-Gliedes beim integrierenden Stellmotor, durch einen Regler für den zweiten Differentialquotienten oder durch einen Druckstossdetektor erreichbar. Bei rein verstärkendem Stellmotor würde ein Beschleunigungsregler oder ein Druckstossdetektor mit Katarakt oder Integrator die gleiche Wirkung erreichen. Eine Rückführverzögerung würde erlauben, mit einem Kataraktregler auszukommen. Berechnungen ergeben die Möglichkeit einer vielfach besseren Stabilität bei PID-Reglung.

11. Aus den gleichen Regelementen: einem Drehzahlregler mit Beschleunigungsregler und integrierendem Organ entsteht, in Serie geschaltet, ein proportional-integral wirkender PI-Regler, parallel zusammenwirkend dagegen ein auch differential wirkender PID-Regler, da dann die Differentialeffekt des Beschleunigungsreglers erhalten bleibt, weil er nicht durch nachfolgende Integrierung aufgehoben wird.

Abarten proportional-integral-differential wirkender PID-Regler

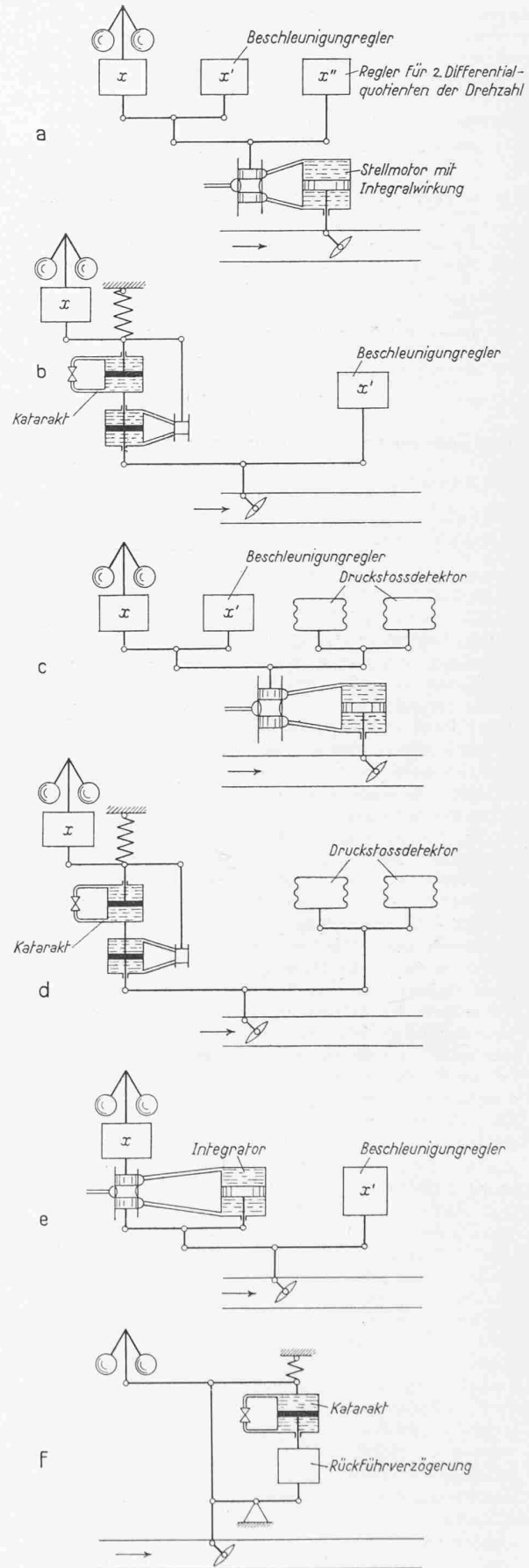


Bild 4. Trotz aller Vielfalt von Regelementen für die Drehzahl und deren 1. und 2. Differentialquotienten, von Katarakt, Integrator, Druckstossdetektor, Rückführverzögerung, integrierendem und rein verstärkendem Stellmotor streben alle Kombinationen den gleichen Effekt an: dem heutigen proportional-integral wirkenden PI-Regler eine differentiale D-Wirkung hinzuzufügen, um die Regelung dadurch zu verbessern.

12. Beim Stellmotor (Servomotor) ist die Unempfindlichkeit proportional zur Integralzeit  $\tau'$ . Integrierende Stellmotoren haben deshalb grössere Unempfindlichkeit als Stellmotoren mit reiner Verstärkung, bei denen man die Integralzeit und damit auch die Unempfindlichkeit beliebig herabsetzen kann.

#### Literaturverzeichnis

- [1] *British Standards Institution*, London: Glossary of Terms used in Automatic Controlling and Regulating Systems, British Standard 1523 : 1949.
- [2] *Deutscher Normenausschuss*, Berlin: Regelungstechnik, Begriffe und Bezeichnungen. Entwurf Februar 1952, DIN 19226.
- [3] *Regulator S. R. L.*, Milano: Tecnica delle regolazioni, Concetti e Simboli secondo le Norme DIN 19226 (Bozza 1953).
- [4] *Stein T.*, Selbstreglung, ein neues Gesetz der Regeltechnik, «Z. VDI» 1928, Nr. 6, S. 165.
- [5] *Stein T.*: Systematik der Reglerarten, «Escher Wyss-Mitteilungen» 1940, S. 56.
- [6] *Gaden D.*: Considérations sur le problème de la stabilité, Lausanne 1945.
- [7] *Evangelisti G.*: La regolazione delle turbine idrauliche, Bologna 1947.
- [8] *Peters J. C.* (Leeds and Northrup): Experimental Studies of Automatic Control, «Transactions A. S. M. E.», April 1942.
- [9] *The Bristol Company*: Pneumatic Controller Actions and their Application to Automatic Control of industrial process, Product Data. No. A 100. 1—2, 15. 11. 49, Waterbury (Conn., USA).
- [10] *Stein T.*: Drehzahlreglung der Wasserturbinen, SBZ 1947, Nr. 39, 40, 41.
- [11] *Daniel J.*: Accélération du réglage de vitesse des turbines hydrauliques, «La Houille Blanche» 1948, Nr. 1, 2.
- [12] *Dejou A.*: Considérations sur les régulateurs des groupes générateurs hydroélectriques de basse chute, «Revue générale de l'électricité» 1948, Août.
- [13] *Almérés M. P.*: Procédés d'amélioration des qualités de réglage des groupes hydroélectriques, «La Houille Blanche» 1949, Janvier-Février.
- [14] *Daniel J.*: Le statisme des régulateurs et son élimination, «La Houille Blanche» 1950, Janvier-Février.
- [15] *Stein T.*: L'optimum nella regolazione delle turbine idrauliche, «L'Energia Elettrica» 1951, Nr. 4. — Die optimale Reglung von Wasserturbinen, SBZ 1952, Nr. 20.
- [16] *Dennis N. G.*: Water Turbine Governors, «The Institution of mechanical Engineers» Proceedings (B) 1952—53, Vol. 1 B, No. 9.
- [17] *Volta E.*: Sensibilità accelerometrica e insensibilità reali nei regolatori tachimetrici per turbine idrauliche, «L'Energia Elettrica» 1952, Nr. 8.
- [18] *Stein T.*: Universelle Verwendbarkeit des Escher Wyss-Leistungsreglers, «Escher Wyss-Mitteilungen» 1952/53, S. 81.

## Bewässerung und Krafterzeugung am Murray in Australien

DK 626.81 + 621.29

Von Eduard Gruner, Ingenieur, Basel

Kurzreferat, gehalten an der 3. Jahresversammlung des Schweizerischen Nationalkomitees für Bewässerung und Entwässerung in Bern, am 11. Dezember 1953.

Australien ist in mancherlei Hinsicht ein benachteiligter Kontinent. Vor allem fehlt dieser weiten Landmasse das Wasser als lebenspendendes Element. Die Folgen dieses Mangels werden besonders augenfällig durch einen Vergleich zwischen Australien und Indien. Beide liegen unter den Wendekreisen. Australien misst 7,7 Mio km<sup>2</sup> und hat 8,8 Mio Einwohner, Indien ist halb so gross, hat aber 40mal mehr Einwohner. Ueber zwei Drittel Australiens empfangen jährlich weniger als 250 mm Niederschlag, haben also Wüstenklima. Der Passat trifft nämlich an der Ostküste auf Randgebirge, wo er sich entleert. Die Hafenstadt Sydney hat 1230 mm, Alice Springs in Landesmitte aber nur 290 mm Regen pro Jahr. Fast überall ist die Verdunstung von freien Wasserflächen grösser als der anfallende Regen. Verbrauch und Bedarf von Wasser sollen durch zwei extreme Werte charakterisiert werden: Die Millionenstädte Sydney und Melbourne müssen pro Einwohner im Mittel 300 l pro Tag und zu Spitzenzeiten 1000 l pro Tag abgeben können. Ein Trockenfarmbetrieb von 400 ha, der belebt wird durch die Bauernfamilie, 10 Kühe und 300 Schafe, kann dagegen mit 3000 l pro Tag auskommen. Ursprünglich schien der artesischen Brunnen den Weg zur Intensivierung der Landwirtschaft zu weisen. Seit der Mitte des letzten Jahrhunderts wurden in steigender Zahl solche Brunnen im weiten Tafelland Inner-Australiens abgeteuft. Viele ergaben

anfänglich einen guten Ertrag von Süsswasser, das gelegentlich auch unter Druck austrat. Es handelt sich dabei meist um archaisches Wasser, das sich wie Öl in flachen Becken angesammelt hat, die heute keine oder nur eine geringe Speisung durch Tagwasser erhalten. Deshalb versiegen solche Brunnen langsam und die daraus gespiessenen Pflanzungen und Farmbetriebe gehen wieder ein. Von Staatswegen wurde eine rationelle Bewirtschaftung des Grundwassers ver-

sucht. Es gelang jedoch nicht, den Raubbau zu meistern. Der fruchtbare Boden würde bei Bewässerung jährlich zwei Ernten oder vier bis sechs Schnitte von Luzerne ermöglichen. Während im normalen Zustand die spärliche Vegetationsdecke den Humus befestigt, wird dieser auf brachliegenden Feldern vom Wind ergriffen und verweht. Der Winderosion folgt die Wassererosion, welche weite Gebiete so zerfurcht, dass sie in keiner Weise mehr nutzbar sind. Kaum ein Prozent der Gesamtfläche Australiens wird heute bepflanzt, trotzdem unternehmungsfreudige Farmer bis in Gebiete mit nur 350 mm Niederschlag pro Jahr vorgedrungen sind. Die ganze landwirtschaftliche Planung dieses Kontinentes beruht auf Bewässerung. Aus dieser Erkenntnis sollen nach gigantischen Plänen die wenigen Abflüsse aus den australischen Alpen und den blauen Bergen, den Gebirgen an der Südost-Küste, zwischen Sydney und Melbourne, rationell und allseitig genutzt werden. Dem Prospekt, der im November 1953 über die Anleihe von 60 Mio Schweizerfranken aufgelegt wurde, ist zu entnehmen, dass Australien jährlich einen Drittel der Aufwendungen für öffentliche Arbeiten, nämlich das Äquivalent von 950 Mio Franken in Werken zur Energieerzeugung, Wasserversorgung und Bewässerung anlegt. Der bedeutendste Fluss Australiens ist der Murray (Bild 1). Er entspringt am Mount Kosciusko, etwa 2000 m

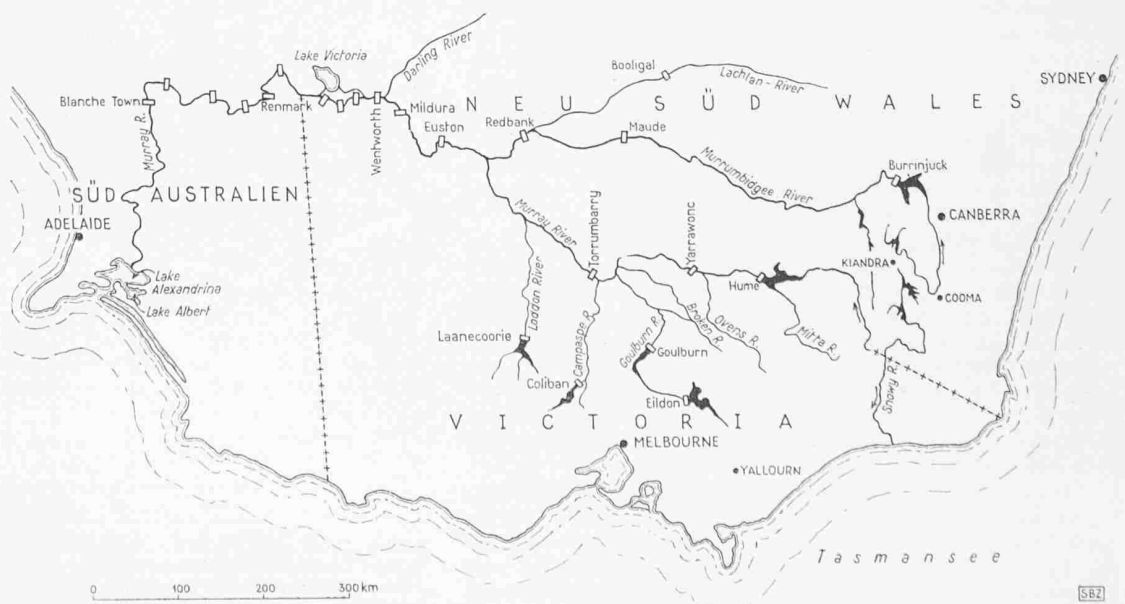


Bild 1. Das Stromgebiet des Murray in Südastralien, Masstab 1:8 500 000