

**Zeitschrift:** Schweizerische Bauzeitung  
**Herausgeber:** Verlags-AG der akademischen technischen Vereine  
**Band:** 90 (1972)  
**Heft:** 29

**Artikel:** Regelungsverhalten der Wasserkraftwerke bei Verbundbetrieb und Inselbetrieb  
**Autor:** Stein, T.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-85266>

### **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>**

## Regelungsverhalten der Wasserkraftwerke bei Verbundbetrieb und Inselbetrieb

DK 621.224:62-546

Von T. Stein, dipl. Ing. ETHZ, Vicenza/Italien

*In den grossen Versorgungsnetzen für elektrische Energie entsteht durch Zusammenarbeit vieler Kraftwerke der Verbundbetrieb. Die Wasserkraftwerke haben dabei dank ihrer schnell erreichbaren Leistungsänderungen die Lastschwankungen auszugleichen, da die meist vorhandenen Dampfkraftwerke wegen gesteigerter Betriebsbedingungen für veränderliche Last immer weniger anpassungsfähig werden. Bei Zusammenbruch des Verbundnetzes versorgt jedes Wasserkraftwerk ein in sich abgeschlossenes Netz (Inselbetrieb), was gute Frequenzhaltung erfordert, um möglichst schnell durch leichtes Parallelschalten den Verbundbetrieb wieder herstellen und damit über die anpassungsfähige Wasserkraft wieder verfügen zu können. Obgleich der internationale Code [15] Empfehlungen für die Prüfung der Wasserturbinenregler enthält, besteht über die wichtige Frage des Regelungsverhaltens nicht überall die wünschbare Klarheit. Diese sucht der nachfolgende Aufsatz herzustellen.*

Durch die nachfolgende Darstellung des Regelungsverhaltens von Regler und Wasserschloss bei Verbundbetrieb und bei Inselbetrieb gewinnt man einen Überblick, wieweit sich vom Einzelfall unabhängige allgemeingültige Regeln anwenden lassen, oder ob Untersuchungen von Fall zu Fall notwendig sind, sowie wann und in welcher Weise hierfür der Computer-Einsatz nützlich ist.

Für den Verbundbetrieb beschränkt sich die Darstellung auf die primäre kurzzeitige Frequenzregelung im Verbundnetz. Die langsame Sekundärregelung nach Leistungs-Frequenzreglern für den grenzüberschreitenden Energiefluss der internationalen Übergabeleistungen wird nicht behandelt; hierbei können Wasserkraftanlagen durch das natürliche Speichervermögen ihrer Stauseen und durch Pumpspeicherung die langdauernden Laständerungen ausgleichen.

### 1. Nichtlinearität nur durch Messung des Regler-Frequenzgangs erfassbar

Nachdem erwiesen ist [12] [14] [20], dass infolge von Nichtlinearität der Frequenzgang des Reglers (Regeleinrichtung) von der Erregungsamplitude abhängt, gelten die bisher üblichen linearisierten Differential-Gleichungen nur für die Regelstrecke (Abschnitt 2), erfassen aber nicht den Einfluss der Nichtlinearität in der Regeleinrichtung. Nur durch Messung des Regler-Frequenzgangs mit tiefer Erregungsamplitude erhält man ein zutreffendes Bild über das Abklingverhalten des gesamten Regelkreises, der aus den Frequenzgängen von Regler und von Regelstrecke zusammengesetzt ist. Der Computer-Einsatz geschieht hier für den Regler-Frequenzgang bei der Auswertung der Ausgangssignale des am Reglereingang harmonisch erregenden elektronischen Funktionsgenerators [13]. Als verstärkendes Bindeglied zu den Reglern verschiedener Bauarten war die Entwicklung eines Frequenz-Transmitters notwendig [20].

*Die Untersuchung des Regelungsverhaltens von Regler und Wasserschloss zeigt, dass der Verbundbetrieb die Stabilität der Wasserschlosser verbessert und dass für das Verhalten des Reglers Untersuchungen für Verbundbetrieb unnötig sind, wenn genügend Schwungmassen von Dampfkraftwerken stabilisierend wirken. Dagegen sind für Inselbetrieb, bis auf die immer selteneren Fälle, in denen sich ein Inselnetz für direkte Versuche herstellen lässt, Frequenzgang-Messungen notwendig, wenn man mit einem vom Lastverlauf unabhängigen Optimum-Kriterium für die Reglereinstellung dem bei linearisierten Berechnungsformeln nicht erfassten Einfluss von Nichtlinearitäten Rechnung trägt. Dynamische Untersuchungen ergeben, wie sich durch Ausbildung des Reglers der Aufwand für Wasserschloss und Stollen kostensparend vermindern lässt.*

### 2. Auf die Regelstrecke beschränkte Berechnung des Frequenzgangs

Dagegen bleiben die bekannten linearisierten Differential-Gleichungen für die geregelte Anlage (Regelstrecke) weiterhin gültig [19]. Gegen die versuchten Vereinfachungen mit der bisher üblichen graphischen Ermittlung des Frequenzgangs [18] bringt hier der Computer-Einsatz mit Eingabe der Kennwerte der geregelten Anlage eine grundlegende Verkürzung der Frequenzgang-Berechnung [19].

Es ist sogar möglich, diese Rechnung auf einem Tisch-Computer durchzuführen [21].

### 3. Äquivalenz der PI-Regler von Wasserturbinen

Zu den allgemein gültigen Regeln, die keine Untersuchung von Fall zu Fall erfordern, gilt auch bei Wasserturbinen im Gegensatz zu Dampfturbinen, dass bei Einführung eines Beschleunigungs-Einflusses das Regelungsverhalten äquivalent bleibt. Von den selten verwendeten PID-Reglern [5] wird hierbei abgesehen.

Bei Dampfturbinen führt der differentiale Beschleunigungs-Einfluss der Drehzahl durch proportional-differentiale PD-Wirkung, wie sie bei Dampfturbinen erstmals 1952 eingeführt wurde [6], zu einem bedeutend schnelleren Regelungsverhalten. Das gestattet bei Abschaltung der Turbogruppe vom Netz, die Turbinenleistung so schnell durch den Drehzahlregler auf Leerlauf herabzusetzen, dass die Sicherheits-Schliessorgane nicht anzusprechen brauchen; so kann die Dampfturbine bei dem weiterwirkenden Drehzahlregler wieder leicht parallel geschaltet werden.

Dass die direkte, schon 1921 [1] bei Wasserturbinen eingeführte proportional-differentiale PD-Wirkung allein, die den gleichen Zweck verfolgte, ebenso wie bei Dampfturbinen den Reglervorgang durch schnellere Reaktion des Reglers schneller

durchzuführen, an sich unzulässig ist, liegt am Druckstoss der Wassermassen, den es bei Dampfturbinen nicht gibt [3]. Deshalb muss man bei Wasserturbinen die Differential-Wirkung des Reglers durch langsame Integral-Wirkung des Servomotors wieder rückgängig machen. So entsteht wie bei der vordem ausschliesslich verwendeten nachgiebigen Rückführung ein proportional-integral wirkender PI-Regler [5]. Wegen des Druckstosses wäre der reine PD-Regler mit starrer Rückführung instabil.

Bei Herstellung der notwendigen Integralwirkung durch eine nachgiebige Rückführung kann an sich der Servomotor beliebig schnell wirken, da er nicht aus Stabilitätsgründen zu integrieren braucht [3]. Es gibt aber eine praktische untere Grenze für seine Stellzeit, die oft fälschlicherweise der nachgiebigen Rückführung im Gegensatz zum PI-Regler mit Beschleunigungs-Einfluss zur Last gelegt wird. Dies ist unrichtig, weil auch der Beschleunigungs-Einfluss mit einer Verzögerungszeit ähnlicher Grössenordnung einem Frequenzsprung folgt [8] [9]. Wenn man deshalb richtigerweise bei beiden Abarten der PI-Regelung die vernachlässigbar geringe Zeitverzögerung bei nachgiebiger Rückführung mit dem gleichen Term  $T_b$  bezeichnet, wie die Zeitverzögerung der nicht augenblicklichen Reaktion des Beschleunigungs-Einflusses, so entstehen für  $T_b \sim 0$  allgemeingültige, für beide Abarten von PI-Reglern anwendbare, äquivalente Parameter für die Regler-Einstellung [9].

Wenn man bei Berücksichtigung der Nichtlinearität nach Abschnitt 1 den Regler-Frequenzgang ohnehin messen muss, ist es für die erste versuchsweise Einstellung nach Näherungsformeln [16] für beide Reglerarten berechtigt, die Zeitverzögerung  $T_b$  gleicher Grössenordnung zu vernachlässigen.

So sind die Identitäts-Bedingungen ([3] Formel 43 und 44) für beide Abarten der PI-Regelung anwendbar, die nach den Bezeichnungen des IEC-Code ([15], S. 29, 71) lauten:

$$(1) T_a b_t \equiv T_x \quad (2) T_a \equiv T_n$$

Die nach Formel (2) gültige Identität für die Verzögerungs-Zeitkonstante  $T_a$  (Nachstellzeit) bei Regler mit nachgiebiger Rückführung, die identisch wirkt wie die Beschleunigungs-Zeitkonstante bei Reglern mit Beschleunigungs-Einfluss  $T_n$ , ergibt sich durch die infolge von Gegenkopplung der Rückführung entstehende Umkehr der Beziehungen.

Bei Wirkung der für beide Abarten identischen Zeitkonstanten  $T_a \equiv T_n$  der PI-Regelung ergibt sich, auf ein Beschleunigungs-Glied ausgeübt, eine beschleunigende «Vorhaltzeit»  $T_n$  (die durch integrierenden Servomotor wieder aufgehoben wird). Dagegen bewirkt die identische Zeitkonstante des PI-Reglers, auf die Rückführung statt auf das nicht vorhandene Beschleunigungsglied ausgeübt, eine «beschleunigte Rückführung», die eine temporäre Verzögerung der PI-Regelung mit der «Nachstellzeit»  $T_a$  ergibt. Umgekehrt wurde gezeigt, dass eine verzögerte statt beschleunigte Rückführung, die Wirkung eines Beschleunigungsgliedes am Regler ersetzen kann ([5] Bild 4f statt 4b).

Die «promptitude» (Reaktionszeit)  $T_x$  wird beim Regler mit nachgiebiger Rückführung durch Formel (1) klar erkennbar, weil ausser der Zeitkonstanten  $T_a$  für das Abklingen des temporären P-Grades  $b_t$ , der Wert von  $b_t$  selbst direkt einstellbar ist, also  $T_x = T_a b_t$ .

Der Wert des temporären P-Grades  $b_t$ , der beim identisch wirkenden Regler mit Beschleunigungsglied und integrierendem Servomotor natürlich genau so existiert, wird dadurch verschleiert, dass  $b_t$  nicht direkt einstellbar ist, sondern aus dem Verhältnis des beschleunigenden Einflusses  $T_n$  und der wegintegrierenden Aktion des Servomotors entsteht.

Aus beiden Identitäts-Gleichungen (1) und (2) ergibt sich so

$$(3) b_t \equiv \frac{T_x}{T_a} \equiv \frac{T_x}{T_n}$$

Die Erkenntnis dieser vollen Aequivalenz der beiden Abarten von PI-Reglern in bezug auf temporären P-Grad gemäss Gl. (3) und Zeitkonstante gemäss Gl. (2) ist grundlegend wichtig, um die im Abschnitt 6 behandelte unzutreffende Annahme einer Überlegenheit des Reglers mit nachgiebiger Rückführung für die Wasserschloss-Stabilität abzuklären. Diese Annahme entfällt, sobald man erkennt, dass es auch bei dem vollkommen äquivalent wirkenden PI-Regler mit Beschleunigungs-Einfluss einen temporären P-Grad  $b_t = T_x / T_n$  gibt.

Verallgemeinert kommt man für die PI-Regelung so zum Ergebnis, von einer einzigen Zeitkonstanten zu sprechen, die, auf ein Beschleunigungs-Glied wirkend, zur beschleunigenden «Vorhaltzeit»  $T_n$  führt, dagegen auf die Rückführung wirkend zur verzögernden «Nachstellzeit»  $T_a$ . Ebenso gilt, dass die identische «promptitude» (Reaktionszeit)  $T_x$  beider Abarten der PI-Regler, durch die einzige Zeitkonstante des PI-Reglers dividiert, den gleichen für beide Abarten gültigen temporären P-Grad  $b_t$  bewirkt.

Das setzt die Klarstellung [9] durch Einführung der Zeitkonstanten  $T_b$  voraus, wodurch man erkennt, um wie vernachlässigbar wenig, für beide Abarten der PI-Regelung gültig, die Aequivalenz-Bedingungen von den früher abgeleiteten [3] Identitäts-Bedingungen (1) bis (3) abweichen.

Die Tatsache, dass es im Gegensatz zur Wasserturbine bei der Dampfturbine keine Wasserdruckstoss-Probleme gibt, wird dazu dienen, in Abschnitt 4.2. zu erklären, wieso in Netzen, die ausser mit Wasserturbinen mit Dampfturbinen gespeist werden, so einfache Einstellregeln gelten, wie sie bei reinen Wasserkraftnetzen Abschnitt 4.3. nicht zulässig wären.

#### 4. Verbundbetrieb

Ganz andere Gesetzmässigkeiten gelten für Wasserschloss und Regler, wenn mehrere Wasserkraftwerke in einem Verbundnetz zusammenwirken.

##### 4.1. Wasserschloss

Für normale PI-Regelung der Turbinen, ohne die in Abschnitt 6 behandelte «Störgrössenaufschaltung» zur Kostenersparnis für die hydraulische Anlage, gilt folgendes: Bei der Parallelschaltung von zwei Wasserkraftwerken mit Wasserschlossern, von denen jedes der beiden an der Stabilitätsgrenze arbeitet, bewirkt schon die Parallelschaltung an sich, dass die Wasserschlosser in beiden Kraftwerken weit von der Stabilitätsgrenze entfernt stabil arbeiten [11].

Die Stabilitätsgrenze ist erreicht, wenn gemäss Bild 1 die Ortskurve infolge der Wasserträchtigkeit im Stollen mit der Zeitkonstanten  $T_g$  durch den kritischen Punkt  $P_k = +1$  geht. Mit steigender Zeitkonstante  $T_g$  verschlechtert sich die Stabilität. In Bild 1 ist der extrem ungünstige Fall vorausgesetzt, dass ein Kraftwerk mit der Zeitkonstanten  $T_g = 10$  s (innere  $\omega$ -Pfeile der Ortskurve) mit einem noch um 50% ungünstigeren Kraftwerk mit  $T_g = 15$  statt 10 s parallelgeschaltet wird (äussere  $\omega$ -Pfeile). Trotzdem liegt die Ortskurve für «Kraftwerke parallel» weit vom kritischen Punkt, was hohe Stabilität anzeigt.

Da somit für ein allein hinsichtlich Wasserschloss-Stabilität schon an der Grenze liegendes Kraftwerk mit einem noch ungünstigeren Kraftwerk zusammengeschaltet, für beide Kraftwerke Wasserschloss-Stabilität hergestellt ist, zeigt sich, dass es für die Wasserschlosser beim Verbundbetrieb mehrerer Kraftwerke überhaupt keine Stabilitätsprobleme gibt, solange

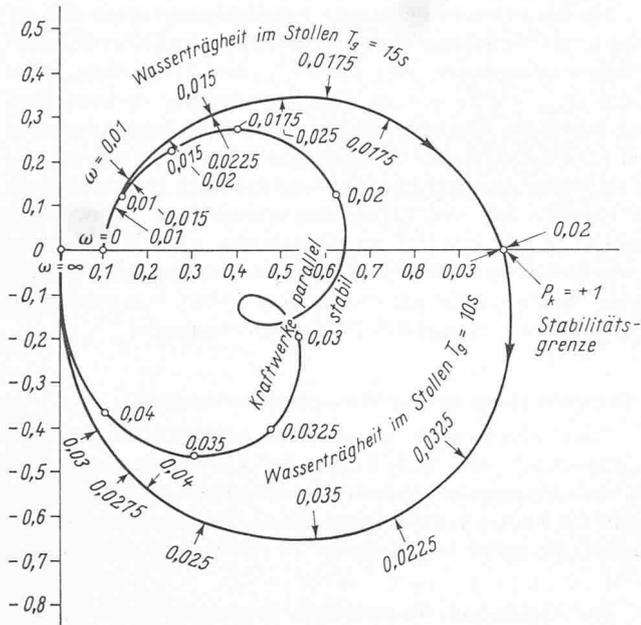


Bild 1. Die stark stabilisierende Wirkung des Verbundbetriebes auf die Wasserschlässe zeigt sich durch Parallelschaltung von zwei Wasserkraftwerken, deren Wasserschlässe beide an der Stabilitätsgrenze arbeiten, so dass ihre Ortskurven des aufgeschnittenen Regelkreises beide durch den kritischen Punkt  $P_k = +1$  gehen. Obgleich angenommen wird, dass das zweite Kraftwerk ( $\omega$ -Pfeile aussen) noch eine um 50 % ungünstigere Zeitkonstante des Stollens  $T_w = 15$  s hat, statt  $T_w = 10$  s des ersten Kraftwerks ( $\omega$ -Pfeile von innen), liegt die Ortskurve für «Kraftwerke parallel» weit vom kritischen Punkt  $P_k = +1$  entfernt, was hohe Stabilität anzeigt

man mit normalen PI-Reglern arbeitet. Wenn man jedoch nach Abschnitt 6 eine «Störgrössenaufschaltung» einführt, um den Aufwand für Wasserschloss und Stollen kostensparend zu vermindern, kann es notwendig sein, auch im Verbundbetrieb hohe Werte für den temporären P-Grad und die Zeitkonstante des PI-Reglers einzuhalten.

#### 4.2. Reglereinstellung im europäischen Verbundnetz

Die UCPT (7) S. 67) gibt als einfache Einstellregel, die jede Berechnung überflüssig macht, an: «Ausschaltung der Ölbremse an den Reglern von Wasserturbinen, sobald der Generator auf das Netz geschaltet ist». Unabhängig von der Regler-Bauart bedeutet dies, dass die Wasserturbinen für die primäre Drehzahlregelung nur mit dem permanenten P-Grad arbeiten sollen.

Bei Diskussionen mit den Verbund-Spezialisten zeigte sich die unzutreffende Auffassung, dass einfach die riesigen Schwungmassen des Verbundnetzes an sich die Stabilität sicherstellen. Das gilt schon deshalb nicht, weil jede hinzukommende Einheit ausser der Schwungmasse eine zusätzliche Leistung hat, wodurch die Anlaufzeiten  $T_a$  der Schwungmassen dem Durchschnitt von  $T_a$  entsprechend nur wenig gegen Einzelbetrieb abweichen. Bei Wasserturbinen kommen ausserdem entstabilisierende Wassermassen hinzu, dagegen nicht bei den Dampfturbinen des Verbundnetzes, deren Schwungmassen für die Wasserkraftwerke stabilisierend wirken.

Wenn man für das europäische Verbundnetz den Anteil der Dampfkraftwerke berücksichtigt, lässt sich nachrechnen [11], dass der permanente P-Grad genügt, um die Stabilität für die Wasserkraftwerke sicherzustellen. So braucht man in der Tat keine Berechnung der Reglereinstellung von Fall zu Fall bei Verbundbetrieb.

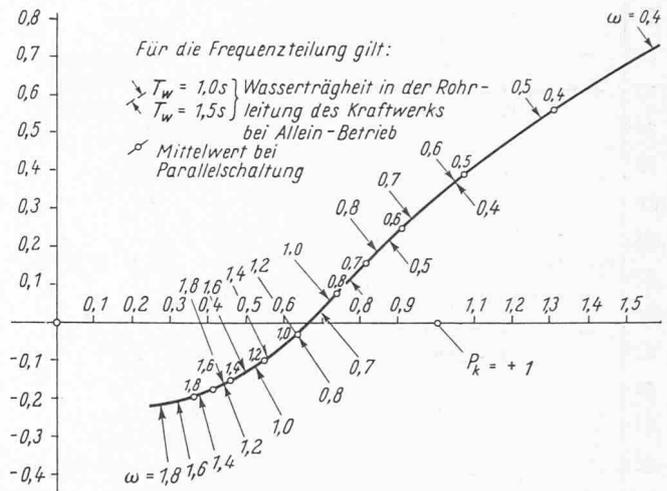


Bild 2. Im Gegensatz zur stabilisierenden Wirkung des Verbundbetriebes auf die Wasserschlässe bringt die Parallelschaltung von zwei Wasserkraftwerken an sich keine höhere Stabilitätssicherheit der Regelung im Verbundbetrieb durch verbesserte Lage der Ortskurve des aufgeschnittenen Regelkreises gegenüber dem kritischen Punkt  $P_k = +1$ . Vielmehr bleibt die Gestalt der Ortskurve unverändert, und es bildet sich nur ein Mittelwert der Frequenzteilung zwischen den Werten des günstigeren Wasserkraftwerks mit der Wasseranlaufzeit  $T_w = 1,0$  s ( $\omega$ -Pfeile von oben) und dem um 50 % ungünstigeren Wert  $T_w = 1,5$  s ( $\omega$ -Pfeile von unten)

#### 4.3. Verbundbetrieb reiner Wasserkraftwerke

Für den besonderen Fall, dass nicht wie meist genügend Dampfturbinen im Verbundnetz stabilisierend wirken, entsteht nicht durch Parallelschaltung allein die Stabilität für die Wasserturbinenregelung.

Wie das Beispiel der Parallelschaltung von zwei Kraftwerken in Bild 2 zeigt, von denen für das eine die Konstante  $T_w$  der Wasserträgheit in der Rohrleitung (analog zum Wasserschloss Bild 1) einen um 50 % ungünstigeren Wert von  $T_w = 1,5$  statt 1 s hat, entsteht nicht wie beim Wasserschloss Bild 1 durch die Parallelschaltung an sich eine stabile Regelung. Vielmehr bleibt die Gestalt der Ortskurve für die in beiden Kraftwerken optimal eingestellten Regler unverändert, und es ergibt sich nur in der Frequenzteilung ein Mittelwert zwischen den Frequenzteilungen beider Kraftwerke. Im Verbundnetz ist also allgemein der Durchschnitt der Wasseranlaufzeiten der verschiedenen Wasserkraftwerke massgebend für das Regelungsverhalten, was den Kraftwerken mit ungünstig hoher Wasseranlaufzeit zugute kommt.

Die UCPT-Einstellregel [7], beim Anschluss an das Verbundnetz nur mit dem permanenten P-Grad zu arbeiten, wird hier ungültig. Es genügt aber, wie Bild 3 zeigt, eine geringe vorübergehende Verzögerungswirkung des Turbinenreglers beizubehalten, damit die Ortskurve innerhalb des die Stabilitätsgrenze bestimmenden kritischen Punkts  $P_k = +1$  verläuft.

Hier können im Gegensatz zum europäischen Verbundnetz Berechnungen für das optimale Verhalten nützlich sein. Dabei geht man von den auch bei stochastischen (zufälligen) Störungen im Verbundnetz vorliegenden statistischen Gesetzmässigkeiten [19] aus.

#### 5. Optimale Reglereinstellung bei Inselbetrieb

Die im intakten Verbundnetz vorliegenden statistischen Gesetzmässigkeiten für den Einfluss von Störungen werden bei Ausfall des Verbundnetzes für das Inselnetz mit seinem unbekanntem, stark gestörtem Belastungsverlauf ungültig und nicht

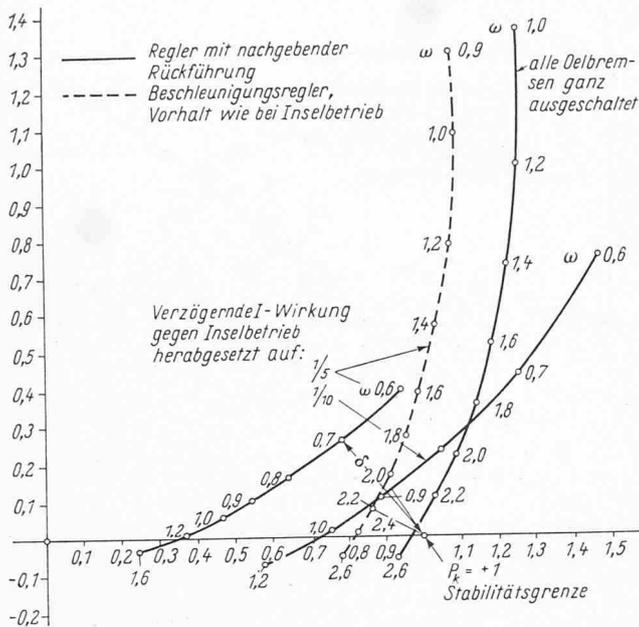


Bild 3. Bei reiner Wasserkraft im Verbundnetz ist es nicht mehr zulässig, entsprechend der UCPTE-Regel [7] «Ölbremesen ausschalten», nur mit dem permanenten P-Grad der Regelung zu arbeiten. Es genügt aber, einen kleinen Bruchteil der Verzögerungswirkung bei Inselbetrieb zur Sicherung der Stabilität einzuhalten, wodurch sich die Ortskurve des aufgeschnittenen Regelkreises vom kritischen Punkt  $P_k = +1$  entfernt

mehr anwendbar. Dazu kommt, dass immer seltener nur für Versuchszwecke über die Reglereinstellung für beste Frequenzhaltung ein Inselnetz tatsächlich herstellbar ist.

Für den Fall, dass man trotzdem Wert auf beste Frequenzhaltung bei Inselbetrieb legt, wurde als Optimum-Kriterium, das unabhängig vom unbekanntem Lastverlauf im Inselnetz gültig ist, die Bedingung eingeführt [16], dass eine Grössenordnung der Zahl von  $a_{1/10} \approx 4$  Halbschwingungen nach beiden Richtungen bis zum Abklingen eines Frequenzsprungs auf 1/10 einzuhalten ist, ohne dass Dauerschwingungen in störendem Ausmass übrigbleiben.

So nützlich für diese Bestimmung der Reglereinstellung die Computer-Berechnung für die Regelstrecke (geregelt Wasserturbine) durch linearisierte Grundgleichungen auch ist, führt die entsprechende Berechnung für den Regler zu einem unbrauchbaren Ergebnis, weil dieses nichts über das Verschwinden von Dauerschwingungen infolge der Nichtlinearität im Regler aussagt. Deshalb sind für den Regler Frequenzgangmessungen anstelle der Berechnung notwendig, falls man die optimale Reglereinstellung ohne die Möglichkeit der Nachprüfung durch effektiven Inselbetrieb finden will.

Das fast völlige Verschwinden von Dauerschwingungen lässt sich nur durch eine tiefe Erregungsamplitude von z. B.  $x_0 = 0,25\% = 0,125$  Hz messen, weil dann in der Regelungszeit die Frequenzabweichung auf 1/10, also auf den vernachlässigbaren Wert von 0,0125 Hz abklingt.

In einem durchgemessenen Fall [12] ergab sich, dass bei Berechnung für den Regler nach linearisierten Grundgleichungen bei vollkommener Vernachlässigung der Stellzeit des Servomotors für einen Regler mit nachgiebiger Rückführung die Zahl der Halbschwingungen nur  $a_{1/10} = 2,1$  betrug und dass dieser Wert nur unmerklich zunahm, wenn man linear eingesetzt die Verzögerung durch den nicht augenblicklich reagierenden Servomotor berücksichtigt.

Bei der Messung des Regler-Frequenzgangs ergab sich infolge seiner Nichtlinearität bei Verwendung der bisher üblichen Erregungs-Amplitude von  $x_0 = 1\%$  der Trugschluss, dass durch  $a_{1/10} = 4,25 \approx 4$  die Reglereinstellung optimal war. Erst durch die Messung mit der tiefen Erregungs-Amplitude von  $x_0 = 0,25\%$  wurde der ganz unzulässige Wert von  $a_{1/10} = 2,9$  Halbschwingungen erkennbar und damit die Notwendigkeit, zur Optimierung eine höhere Reglereinstellung anzuwenden. Dagegen ergibt sich bei der Berechnung nach linearisierten Grundgleichungen für den Regler mangels Berücksichtigung seiner Nichtlinearität der unzutreffende Wert von annähernd  $a_{1/10} \sim 2,1$  statt tatsächlich 2,9 Halbschwingungen.

## 6. Regler-Wirkung auf die Wasserschloss-Stabilität

Nach Thoma wird vereinfachend angenommen, dass der augenblicklich wirkende Regler die Turbinenleistung auch bei Schwingungen des Wasserschloss-Spiegels einregelt. Dabei ergibt die Thoma-Formel Querschnitte für Wasserschloss und Stollen, die höher liegen als die betriebsmässig notwendigen [17].

Da Regler und Wasserschloss zusammen ein verkettetes System von Differential-Gleichungen sehr hoher Ordnung bilden [2], wurde versucht, den Regler so auszubilden, dass sich die Abmessungen von Wasserschloss und Stollen kostensparend vermindern lassen.

Aus der Tatsache, dass die Eigenschwingung des Systems Wasserschloss-Stollen sehr viel höhere Grössenordnung hat als das System Regler-Rohrleitung, schloss man, dass infolge loser Verkettung der Differentialgleichungen für Regler und Wasserschloss untereinander die Beziehungen zwischen den beiden Systemen fast völlig aufhören. Dadurch wird für das System Wasserschloss-Stollen eine leicht lösbare charakteristische Gleichung zweiten Grades bestimmend ([2] S. 202), und es würde durch eine genügend verzögerte Regler-Wirkung die Thoma-Bedingung hinfällig.

In begrenztem Mass wurde messtechnisch eine Verbesserung der Wasserschloss-Stabilität, trotz kleinerer Abmessungen durch verzögerte Reglereinstellung nachgewiesen [4]. Eine allgemeine Nachrechnung ergibt aber, dass bei immer zunehmender Verzögerung des Reglers die Stabilität sich wieder verschlechtert, bis selbst die Thoma-Formel nicht mehr ausreicht.

Spätere mit Frequenzgang-Berechnungen durchgeführte Untersuchungen [10] ergaben, dass bei proportional-integraler PI-Regelung nicht die Regelzeitkonstante  $T_a$  oder  $T_n$  den grössten Einfluss hat, sondern der temporäre P-Grad  $b_t$  eine weit stärkere stabilisierende Wirkung auf das Wasserschloss ausübt. Bei der fehlenden Erkenntnis, dass auf Grund der Äquivalenz-Bedingungen der PI-Regler nach den Formeln (1) bis (3), Abschnitt 3, auch Regler mit Beschleunigungswirkung einen temporären P-Grad  $b_t = T_x/T_n$  haben, wurde eine nicht existierende Überlegenheit des Reglers mit nachgiebiger Rückführung abgeleitet. Dies weil hier augenfällig der temporäre P-Grad  $b_t$  direkt einstellbar ist.

Ganz unabhängig von der Bauart der PI-Regler sind praktisch die damaligen [10] Ergebnisse nicht anwendbar, weil sie zur Verbesserung der Wasserschloss-Stabilität einen Selbstregelungsfaktor  $e_g$  des Netzes bis zu  $e_g = 3$  voraussetzen. Da heute praktisch der Selbstregelungsfaktor des Netzes  $e_g = 0$  ist, wäre für hohe Selbstregelungsfaktoren eine künstliche Spannungs-Frequenz-Beziehung einzuschalten.

Dagegen ist der Vorschlag sehr aussichtsreich [17], durch «Störgrössenaufschaltung» die Wasserschloss-Stabilität so zu verbessern, dass keine Rücksicht mehr auf die Thoma-Formel zu nehmen ist. So ergeben sich Kostenersparnisse durch

kleinere Abmessungen der Wasserschläsler und Wegfall von Energieverlusten bei Einführung einer stabilisierenden Drosselung. Dies geschieht, indem man ausser der Drehzahl (Regelgrösse) die Wasserspiegelschwankung als *Störgrösse* auf den Regler wirken lässt.

Bei den hierdurch herabgesetzten Abmessungen des Wasserschlosses müssen bei Verbundbetrieb aus Stabilitätsgründen im Gegensatz zu Abschnitt 4.1. relativ hohe Werte für den temporären P-Grad  $b_t$  und die Zeitkonstante  $T_a$  des Reglers eingehalten werden [17]. Dies weil bei Wasserschläslern, deren Werte weit unter denen der Thoma-Formel liegen, die in Abschnitt 4.1. gezeigte Stabilitätsverbesserung bei Verbundbetrieb für ein stabiles Regelungsverhalten nicht ausreicht.

### Formelzeichen

Anstelle der nachfolgenden Bezeichnungen gemäss Code [15] wurde deutschsprachig die Zeitkonstante für die Dämpfungseinrichtung statt mit  $T_d$  bisher mit «Nachstellzeit»  $T_n$  bezeichnet, die Zeitkonstante des Beschleunigungsgliedes statt mit  $T_n$  bisher mit «Vorhaltzeit»  $T_v$ , was zu beachten ist, um Verwechslungen zu vermeiden.

### Proportional-integraler PI-Regler

$T_b$  Reaktions-Verzögerung gleich geringer vernachlässigbarer Grössenordnung, in der Stellzeit des Servomotors bei nachgiebiger Rückführung, oder im Beschleunigungsglied bei Reglern mit Beschleunigungs-Einfluss [9].

$T_a$  Zeitkonstante der Dämpfungseinrichtung, die das Abklingen des Rückführsignals vom Servomotor bei Reglern mit nachgiebiger Rückführung kennzeichnet (*Nachstellzeit*), Bild 4 ([15] S. 29, Fig. 11)

$T_n$  Beschleunigungszeitkonstante (*Vorhaltzeit*) des Beschleunigungsgliedes bei Reglern mit Beschleunigungseinfluss, Bild 5 ([15] S. 29, Fig. 10)

$T_x$  Zeitkonstante der «promptitude» (*Reaktionszeit*); Verhältnis der relativen Drehzahlbeschleunigung zur relativen Servomotorgeschwindigkeit bei astatischer Regelung, bezogen auf eine bestimmte bleibende Drehzahlabweichung von ihrem Sollwert ([15] S. 27, Fig. 9).

$b_t = T_x/T_a = T_x/T_n$  temporärer P-Grad ([15] S. 31)

$b_p$  permanenter P-Grad ([15] S. 25, Fig. 7)

### Regelstrecke (geregelter Anlage)

$T_a$  Anlaufzeit der Schwungmassen

$T_w$  Anlaufzeit der Wassermassen in der Rohrleitung

$T_g$  Zeitkonstante des Stollens (galerie)

$e_g$  Selbstregelungs-Faktor der Last

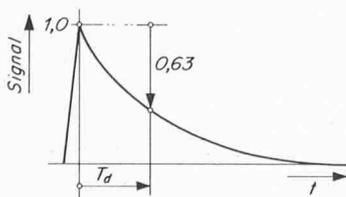


Bild 4. Zum Begriff der Zeitkonstanten der Dämpfungseinrichtung  $T_d$

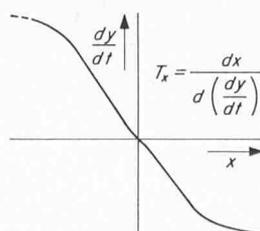


Bild 5. Zum Begriff der «promptitude»  $T_x$

### Abklingverhalten

$x_0$  Erregungsamplitude der aufgedrückten Sinusschwingung

$T_{1/10}$  Abklingzeit auf 1/10 (Regelzeit) in s

$a_{1/10}$  Zahl der Halbschwingungen (nach beiden Richtungen) in der Zeit  $T_{1/10}$

### Literaturverzeichnis (in Reihenfolge der Weiterentwicklung)

- [1] Lieber, J.H.: Ausrüstungen für Wasser- und Kernkraftwerke. «Technische Informationen von Charmilles» Nr. 13 anlässlich des Jubiläums ihres 50jährigen Bestehens 1921 bis 1971, S. 7.
- [2] Evangelisti, G.: La regolazione delle turbine idrauliche. Bologna 1947, Zanichelli Editore.
- [3] Stein, T.: Drehzahlregelung der Wasserturbinen. «Schweiz. Bauzeitung» 65 (1947), Nr. 39, S. 531–535; Nr. 40, S. 543–547; Nr. 41, S. 564–568.
- [4] Ghetti, A.: Ricerche sperimentali sulla stabilità di regolazione dei gruppi idroelettrici con derivazione in pressione e pozzo piezometrico. «L'Energia Elettrica» 28 (1951), No. 11.
- [5] Stein, T.: Wasserturbinen-Regler mit identischer Integral- und Differential-Wirkung. «Schweiz. Bauzeitung» 72 (1954), Nr. 11, S. 137–141; Nr. 12, S. 151–154.
- [6] 150 Jahre Escher Wyss, 1805–1955, «Escher Wyss Mitteilungen» 1954/55, S. 115.
- [7] U.C.P.T.E. (Union pour la Coordination de la Production et du Transport de l'Electricité) Jahresbericht 1958–1959, S. 47.
- [8] Schiott, H.: Optimum setting of water-turbine governors. «Transactions of the Society of Instrument Technology» 12 (1960) No. 1, S. 22–29.
- [9] Quazza, G., Saccomanno, F.: Considerazioni sul proporzionamento dei regolatori di frequenza per turbine idrauliche in relazione alle caratteristiche della rete. Rendiconto dell' A.E.I. (Associazione Elettrotecnica Italiana) 1960 Ancona, memoria 160.
- [10] Evangelisti, G.: On the Problem of Frequency Control in Hydroelectric Stations. «Automatic and Remote Control» Proceedings of IFAC-Congress Moscow 1960, Vol. 4, S. 99–104.
- [11] Stein, T.: Stabilitätsgrenzen und Optimalregelung der Wasserkraft im Verbundnetz. «Regelungstechnik» 10 (1962), H. 4, S. 151–157.
- [12] Stein, T.: Stabilitätsprüfung in grossen Wasserkraftwerken. «Schweiz. Bauzeitung» 86 (1968), H. 40, S. 703–707.
- [13] Fasol, K.H., Schedelberger, I., Tielsch, W.: Ein neues Gerät für Frequenzgangmessungen in Wasserkraftwerken. «Österreichische Zeitschrift für Elektrizitätswirtschaft» ÖZE 22 (1969) H. 7, S. 333–336.
- [14] Fasol, K.H.: Bemerkung zur Stabilitätsprüfung in Wasserkraftwerken. «Schweiz. Bauzeitung» 88 (1970) H. 16, S. 363–364.
- [15] IEC (International Electrotechnical Commission): International code for testing of speed governing systems for hydraulic turbines. Publication 308. First Edition 1970.
- [16] Stein, T.: Optimale Frequenzregelung von Wasserturbinen bei Trennung vom Verbundnetz. «Schweiz. Bauzeitung» 88 (1970), H. 41, S. 915–920.
- [17] Lein, G.: Die Stabilität von Wasserkraftanlagen mit Wasserschloss. «Schweiz. Bauzeitung» 80 (1970), H. 7, S. 149–158.
- [18] Stein, T.: Vereinfachte Frequenzgang-Bestimmung für die Regelung von Wasserturbinen. «Schweiz. Bauzeitung» 90 (1972), H. 6, S. 115–119.
- [19] Tschumy, A.: Optimale Werte der Regelungsparameter einer hydro-elektrischen Gruppe. «Schweiz. Bauzeitung» 90 (1972), H. 15, S. 337–345.
- [20] Fasol, K.H.: Rationelle regeldynamische Untersuchungen in Kraftwerken. Erscheint demnächst in «ETZ-A».
- [21] Wührer, W.: Frequenzgangberechnung auf Tisch-Computer. Interner Bericht Escher Wyss Ravensburg.

Adresse des Verfassers: T. Stein, d.pl. Maschinening. ETH, I-36 100 Vicenza, Via Mantovani 36.