

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 71 (1953)
Heft: 10

Artikel: Einfluss der Selbstregelung auf die Stabilität von Wasserkraft-Anlagen
Autor: Stein, T.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-60513>

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: 21.02.2026

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

uns herauszugehen und die Gewalt hinter uns zu lassen, denn von der Gewalt, die alle Wesen bindet, befreit der Mensch sich, der sich überwindet. In diesem Sinne wünsche ich allen, die Stunden des Zusammenseins in unserer grossen technischen Familie froh, gemütlich und zufrieden mit sich selbst und der Umwelt zu begehen.

Mit diesen Worten nehme ich Abschied von diesem ehrenvollen, mir lieb und hochwert gewordenen Amt. Ich lege mit

dem aufrichtigen Dank für alles Schöne, das ich an der Spitze des Technischen Vereins erfahren und erleben durfte, das Steuer mit diesem Hammer in andere berufene Hände und wünsche meinem Nachfolger und Kollegen Max Schmid alles Gute, dem Technischen Verein und allem, was sein Fundament, sein Wirken und sein Leben ausmacht, ein kräftiges Vivat, Crescat, Floreat!

Einfluss der Selbstreglung auf die Stabilität von Wasserkraft-Anlagen

Von Dipl. Ing. T. STEIN, Schio (Vicenza)¹⁾

A. Zusammenfassung

Wenn man die natürliche Selbstreglung als selbständige Erscheinung aus der Untersuchung der Regelvorgänge herauslöst und den Vorgängen gegenüberstellt, die durch die Turbinenreglung hervorgerufen werden, ergibt sich eine vereinfachte physikalische Erklärung der hydraulischen Störungen auf die Stabilität. Die Selbstreglung des Netzes bewirkt eine zuverlässige Verbesserung der Stabilität der Turbinenreglung, weil ihre stabilisierende Wirkung wie der Druckstoss mit der Belastung anwächst und stärker wird, je langsamer man regelt, was der allgemeinen Tendenz der Entwicklung entspricht. Die von Natur aus vorhandene stabile hydraulische Selbstreglung für das Wasserschloss wird durch die Turbinenreglung weitgehend beeinträchtigt, weshalb man für das Wasserschloss grosse Querschnitte braucht. Beim Parallelbetrieb mit einem grossen Netz wird die Stabilität der Turbinenreglung besser, weil in grossen Netzen immer eine Selbstreglung vorhanden ist. Beim Wasserschloss dagegen verbessert der Parallelbetrieb die Stabilität, weil die hydraulische Selbstreglung durch die Turbinenreglung beim grossen Netz in geringerem Mass beeinträchtigt wird. Bei isoliertem Betrieb kann es interessant sein, sowohl für die Turbinenreglung als auch zur Stabilisierung des Wasserschlosses eine künstliche Selbstreglung einzuführen.

B. Vereinfachte Erklärung der Stabilitätsbedingungen

Um zu wissen, welche Massnahmen dazu dienen, die Störung der Stabilität hydraulischer Anlagen durch den Druckstoss in Druckleitungen, Wasserschloss und Stollen in zulässigen Grenzen zu halten, sind sehr weitgehende mathematische Untersuchungen angestellt worden. So sehr es mit dem Fortschritt der Untersuchungen gelungen ist, immer weitere Einflussgrößen mit zu berücksichtigen, um Theorie und Praxis in Uebereinstimmung zu bringen, wurde es dabei aber nicht leichter, sondern schwieriger, die physikalischen Zusammenhänge klar zu erkennen, weil sie sich hinter den notwendigerweise immer komplizierter werdenden mathematischen Ableitungen verbargen.

Man kommt dagegen zu einem einfachen Verständnis der Zusammenhänge, wenn man eine scharfe physikalische Trennung vornimmt zwischen der «Selbstreglung», die sich von Natur aus von selbst abspielt, und den Vorgängen, die wir durch die Regelvorrichtungen an den Turbinen hervorrufen. Im nachfolgenden wird nur der störende Einfluss des Druckstosses auf die Stabilität der hydraulischen Anlagen behandelt.

¹⁾ Erweiterte Fassung eines Vortrages an der Jahresversammlung der «Associazione Elettrotecnica Italiana» in Perugia am 13.10.52.

DK 621.24—53

Seit der Erkenntnis vom Einfluss der Selbstreglung auf die Regelvorgänge an den Maschinen, die mehr als 20 Jahre zurückliegt [1]²⁾, wurden die die Selbstreglung kennzeichnenden Gesetzmäßigkeiten oft in die mathematischen Ableitungen eingeführt wie irgend eine andere Beziehung zwischen zwei der zahlreichen Größen im Kreis der Regelvorgänge. Damit kann man zutreffende Rechnungsergebnisse gewinnen, aber keinen klärenden Fortschritt in der Erkenntnis der physikalischen Zusammenhänge. Aehnlich wie man bei Untersuchungen so vorgeht, dass man die Eigenschwingung eines Regelsystems als physikalische Erscheinung abtrennt von der Gesetzmäßigkeit, die unter den äusseren Einflüssen, z. B. des Verlaufs der Belastung, die Eigenschwingung erregen und zusammen zum Ergebnis einer erzwungenen Schwingung führen, muss man hier vorgehen. Man stellt zunächst fest, was durch Selbstreglung geschehen würde, wenn keine Regler vorhanden wären, und fragt sich dann, wie Regler und Selbstreglung zusammenwirken.

Personifiziert gedacht steht auf der einen Seite die Natur mit dem Gesetz der Selbstreglung, auf der anderen Seite die menschliche Technik, die ihren hydraulischen Anlagen einen anderweitigen Regelverlauf aufzwingen will. Man ist gewohnt, dass im Kampf der Technik um die Vollkommenheit die Natur einem dauernd Schwierigkeiten macht, so dass man z. B. nie den Wirkungsgrad 1 erreicht. Darum blieb es in der Regeltechnik lange rätselhaft, wieso gewisse Regler besser arbeiteten, als es die damalige Theorie ergab, und erst das Gesetz der Selbstreglung gab die Uebereinstimmung von Theorie und Praxis. Dieses harmonische Zusammenwirken der Selbstreglung mit den Regelvorrichtungen hat aber keine Allgemeingültigkeit. Wie sich beim Einfluss des Druckstosses auf die Stabilität des Wasserschlosses zeigen wird, bewirkt hier der Regler der Wasserturbine eine starke Beeinträchtigung der von Natur aus stabilen Selbstreglung. Dieses gegensätzliche Zusammenwirken gilt es, physikalisch im einzelnen zu erklären.

C. Das Gesetz der natürlichen Selbstreglung

Als Gesetz der Selbstreglung wird die physikalische Tendenz der Natur bezeichnet, nach Störungen von sich aus ein neues Gleichgewicht herzustellen [1]. Wenn auch die Selbstreglung genügen kann, um zu verhindern, dass Störungen katastrophale Folgen haben, können dabei doch die Größen, auf die es in der Technik ankommt, z. B. Drehzahl, Druck, Wasserstand, bei Wiederherstellung des neuen Gleichgewichts so

²⁾ Die Zahlen in eckigen Klammern verweisen auf das Literaturverzeichnis am Schluss des Aufsatzes.

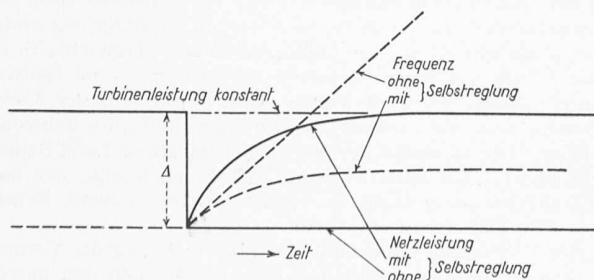


Bild 1. Selbstreglung des Netzes. Bei konstanter Turbinenleistung und plötzlich um Δ herabgesetztem Leistungsverbrauch im Netz würde in Netzen ohne Selbstreglung (rein ohmsche Belastung, Spannung konstant, Selbstreglungskonstante $e_s = 0$) die Netzfrequenz linear unbegrenzt anwachsen. In Netzen mit Selbstreglung stellt sich dagegen bei steigender Frequenz durch Zunahme des Verbrauchs wieder die ursprüngliche, der Turbinenleistung entsprechende Netzleistung ein, und der Anstieg der Frequenz käme auch ohne Regler von selbst zum Stillstand (Selbstreglungskonstante $e_s = 2$ angenommen).

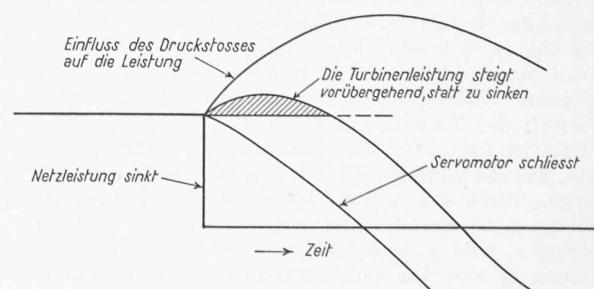


Bild 2. Ursache der starken Störung der Stabilität durch den Druckstoss. Die Trägheit der Wassermassen bewirkt nicht wie bei anderen Regelvorgängen eine Verzögerung der Reglung, sondern durch den Druckstoss eine Reaktion in verkehrter Richtung: Trotzdem der Servomotor bei sinkender Netzleistung unter dem Einfluss des Drehzahlreglers schliesst, kann im ersten Augenblick die Zunahme der Leistung durch den Druckstoss überwiegen. Die Turbinenleistung steigt dann vorübergehend, statt zu sinken.

stark abweichende Werte annehmen, dass man Regler einführen muss, um die erforderliche Konstanz dieser Werte sicherzustellen.

Der Mangel der ursprünglichen Regler-Theorien bestand darin, dass man für die Bestimmung der Mengen, die von den Verbrauchern aufgenommen werden, den geregelten Wert, also z. B. die Drehzahl, konstant annahm. Man übersah dabei, dass schon die kleinsten, oft kaum messbaren Abweichungen des geregelten Wertes, die im Verlauf des Regelvorganges auftreten, die Stabilität — eben durch Selbstreglung — grundlegend beeinflussen können. Dies, weil solche Abweichungen eine stabilisierende Änderung der Mengen hervorrufen, die durch das geregelte Organ fliessen und die von den Verbrauchern aufgenommen werden. So kam man z. B. zum Trugschluss, dass jeder Servomotor eines Reglers eine Rückführung brauchte, um stabil zu sein. Dagegen können sowohl viele Druckregler in thermischen Anlagen als auch Drehzahlregler von Flugzeugpropellern ohne Rückführung in gewissen Grenzen vollkommen stabil arbeiten, weil schon bei kleinsten Abweichungen des geregelten Wertes eine Selbstreglung einsetzt, die an Stelle der Rückführung stabilisierend wirkt.

Die Selbstreglung hat aber zwei Eigenschaften, die bewirken, dass man sich auf ihre stabilisierende Wirkung auf vielen Gebieten nicht verlassen kann:

1. Bei Teillasten wird ihre stabilisierende Wirkung immer kleiner, und zwar proportional zum Verhältnis der gesteuerten Teillastmenge zur Vollastmenge, d. h. proportional zum Belastungsfaktor, Gleichung (1).

2. Die Selbstreglung wird schwächer, je schneller man regelt. Je langsamer man regelt, um so besser hat die Selbstreglung Zeit, ihre stabilisierende Wirkung zu entwickeln, Bild 3.

Bei druckgeregelten Dampfturbinen muss man deshalb auf eine konsequente Ausnützung der Selbstreglung verzichten, weil man wegen der bei Teillast versagenden Stabilisierung eine Rückführung braucht und diese nur wirksam ist, wenn man möglichst schnell regelt, was wiederum die Selbstreglung unwirksam macht [2]. Die Drehzahlregler der Flugzeugpropeller können zwar selbst im Leerlauf ohne Rückführung stabil arbeiten, weil unabhängig von der Belastung zusätzlich eine aerodynamische Selbstreglung wirksam ist. Die allgemeine Tendenz, immer schneller zu regeln, bedingt aber auch beim Flugzeugpropeller eine Schwächung der Selbstreglung, durch die es notwendig werden kann, Rückführungen vorzusehen [3].

D. Stabilität der Turbinen-Reglung

Ganz im Gegensatz hierzu hat bei der Reglung der Wasserturbinen die Selbstreglung bei allen Belastungen eine zuverlässige Wirkung, die bei den herrschenden Entwicklungstendenzen auf dem Gebiet der hydraulischen Anlagen immer stärker hervortritt. Dies erklärt sich folgendermassen:

1. Die Selbstreglung bewirkt [5], dass bei steigender Drehzahl, bzw. steigender Frequenz, das Netz mehr Leistung

aufnimmt bei gleicher Stellung der Regelorgane, Bild 1. Die Steigerung der Frequenz kommt also von selbst stabil zum Stillstand.

2. Der Druckstoss provoziert eine extrem starke Störung der Stabilität, wie sie nur bei der Reglung hydraulischer Anlagen auftritt. Durch die Trägheit der Wassermassen, die den Druckstoss hervorruft, entsteht nicht nur wie sonst bei Regelvorgängen eine Verzögerung, sondern eine Reaktion in der verkehrten Richtung, die es bei anderen Regelvorgängen nicht gibt [11]. Wird z. B. bei steigender Drehzahl das Zuflussorgan der Turbine geschlossen, um durch den kleineren Querschnitt die Leistung zu senken, so kann durch den Druckstoss das Gefälle und die Wassermenge zunächst so stark steigen, dass im ersten Augenblick nicht weniger, sondern mehr Leistung erzeugt wird, trotzdem der Querschnitt kleiner ist (Bild 2).

3. Dieser verkehrten Reaktion widersetzt sich die Selbstreglung, indem die mit der Drehzahl steigende Frequenz den Leistungsverbrauch des Netzes ansteigen lässt. Das wirkt der vom Druckstoss bewirkten Leistungszunahme entgegen, so dass schon kleinere Schwungmassen genügen, um den Druckstoss zu stabilisieren. Es gilt hierfür folgende Gleichung [5] [7]:

$$(1) \quad T_a \frac{d\varphi}{dt} = \mu + 1,5 z \varphi_h - z_0 e_s \varphi$$

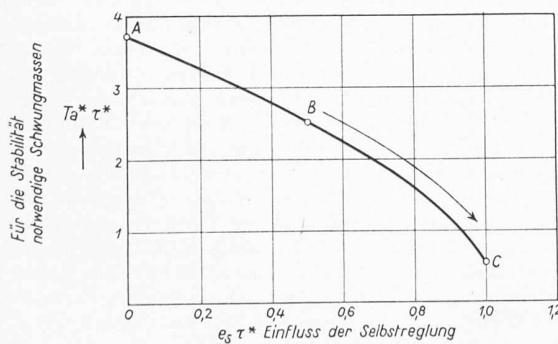
Anlaufzeit der Servomotor Druckstoss Selbstreglung
Schwungmassen

T_a = Zeitkonstante der mechanischen Trägheit (GD^2);
 φ = Drehzahlabweichung; φ_h = Druckabweichung (Druckstoss);
 μ = Servomotorhub; e_s = Selbstreglungskonstante; z = Wassermenge, z_0 = der Leistung entsprechender Belastungsfaktor.

4. Dass die Selbstreglung bei Teillasten (z_0 klein) schwächer wird, hindert nicht, dass die Selbstreglung bei allen Belastungen imstande ist, dem störenden Einfluss des Druckstosses auf die Stabilität wirksam zu begegnen, weil auch der Druckstoss bei kleinen Belastungen schwächer ist (z klein).

5. Bei der Weiterentwicklung der hydraulischen Anlagen muss man mit immer grösseren hydraulischen Trägheiten rechnen, weil öfters Druckleitungen vorkommen, die immer stärker von der Vertikalen abweichen. Dazu werden noch die Trägheiten der Schwungmassen kleiner, im Bestreben, das GD^2 zu senken. Beide Tendenzen verlangen, die Regelvorgänge mit immer grösserer Langsamkeit zu führen. Dadurch nimmt die Wirkung der Selbstreglung immer mehr zu, weil sie dem Produkt von Stellzeit τ^* und Selbstreglungskonstanten e_s proportional ist. Für die optimale Reglung [11] gilt ganz allgemein der einfache Zusammenhang Bild 3 mit dem Produkt $e_s \tau^*$ als Abszisse.

Bei reiner Selbstreglung würden im Netz ganz unzulässige Änderungen der Frequenz entstehen, wie wir sie praktisch in Störungsfällen kennen, wenn z. B. der Leistungsbedarf die Kapazität der voll belasteten Turbine übersteigt. Wenn



T_a^* = Anlaufzeit der Schwungmassen im Verhältnis zur Zeitkonstanten
 τ^* = Stellzeit des Turbinenreglers $\int T_f$ der Rohrleitung
 e_s = Konstante der Selbstreglung

Bild 3. Einfluss der Selbstreglung. Für optimale Reglung allgemeingültige Kurve der Stabilitätsbedingung zeigt, dass der Einfluss der Selbstreglung proportional zur Stellzeit τ^* zunimmt. Ohne Selbstreglung Punkt A ($e_s = 0$) erreicht man bei doppelter Stellzeit τ^* die gleiche Stabilität mit dem halben GD^2 , weil $T_a^* \tau^*$ unverändert bleibt. Mit Selbstreglung ($e_s > 0$) erreicht man mit einer noch weiter gehenden Senkung der Schwungmassen (T_a^*) die gleiche Stabilität. Bei gleicher Selbstreglungskonstanten e_s bleibt die Ordinate nicht unverändert, sondern man kommt bei doppelter Stellzeit z. B. vom Punkt B nach Punkt C mit der fünfmal kleineren Ordinate, das entspricht einem zehnmal kleineren T_a^* also GD^2 .

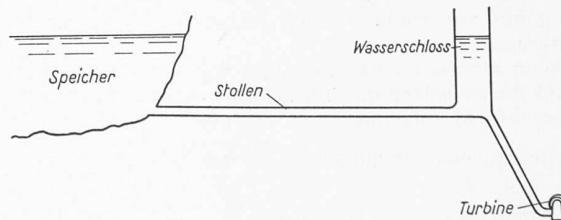


Bild 4. Hydraulische Selbstreglung beim Wasserschloss

a) Bei geschlossener Rohrleitung: immer stabil; Spiegelschwankungen kommen durch die Selbstreglung des Reibungswiderstandes im Stollen mit der Zeit von selbst zum Stillstand.

b) Bei Anschluss von Turbinen mit blockierter Reglung noch stabiler durch verstärkte Selbstreglung, da das Steigen des Wasserspiegels infolge von verstärktem Abfluss durch die Turbinen schneller zum Stillstand kommt.

c) Anschluss geregelter Turbinen wirkt der Selbstreglung (Fall a) stark entgegen, weil bei steigendem Wasserspiegel der Abfluss nicht stabilisierend verstärkt, sondern herabgesetzt wird, damit trotz höherem Gefälle die Turbinenleistung unverändert bleibt. Große Querschnitte des Wasserschlusses dienen dazu, die stabilisierende Selbstreglung des Druckabfalls im Stollen zu verstärken. Verlangsamte Reglung der Turbinen mildert ihren der Selbstreglung entgegenwirkenden Einfluss und sichert die Stabilität mit kleineren Querschnitten des Wasserschlusses.

d) Die Selbstreglung im Netz verbessert auch hier die Stabilität, und wenn man sie künstlich verstärkt, ist dadurch grundsätzlich die Stabilität bei weitgehender Senkung der Querschnitte des Wasserschlusses erreichbar.

auch die Selbstreglung die Turbinenreglung nicht ersetzen kann, wirken doch beide harmonisch zusammen, so dass die Selbstreglung imstande ist, bei der Stabilisierung der Turbinenreglung mitzuhelpfen.

E. Stabilität des Wasserschlosses

Auch beim Wasserschloss hat die Selbstreglung im Netz bei Aenderung der Frequenz einen gewissen stabilisierenden Einfluss [11] [12]. Hier muss man aber den Begriff der Selbstreglung vor allem auf das hydraulische System Stollen, Wasserschloss, Druckleitung erstrecken, was wir mit hydraulischer Selbstreglung bezeichnen.

Zunächst denken wir uns die Druckleitung geschlossen, Bild 4. Spiegelschwankungen im Wasserschloss kommen dann durch die Reibung im Stollen wie bei einem Pendel mit der Zeit durch Selbstreglung zum Stillstand. Gegenüber dem System Stollen-Wasserschloss stellt die Druckleitung mit der Turbine einen Appendix dar, der die Selbstreglung verstärken oder herabsetzen kann. Hängen wir eine Turbine mit blockierter Regulierung an, so wird die Selbstreglung so stark verbessert, dass man auch nach Anschluss der Turbine den Querschnitt des Wasserschlusses beliebig klein machen kann, ohne dass eine Unstabilität auftritt. Die blockierte Turbine verstärkt die Selbstreglung, weil bei steigendem Wasserspiegel mehr Wasser abfliesst, was der Steigerung des Wasserspiegels stabilisierend entgegenwirkt.

Regelt man die Turbine auf konstante Leistung, und zwar ohne jede Verzögerung, so wirkt dies der Selbstreglung stark entgegen. Statt im Sinne einer Stabilisierung bei steigendem Wasserspiegel den Abfluss zu verstärken, muss die Turbine schliessen, um nicht nur die Leistungssteigerung durch das Ansteigen des Gefälles auszugleichen, sondern darüber hinaus die Leistungssteigerung zu kompensieren, die durch die grössere Wassermenge bedingt wäre, die bei steigendem Gefälle und unveränderter Turbinenöffnung durchfliessen würde. Statt bei der Turbine mit blockierter Reglung die Selbstreglung zu verstärken, wird bei geregelter Turbine im Gegen teil ein zusätzlicher Druckstoss erzeugt, und die allein übrigbleibende schwache Selbstreglung infolge der Stollenreibung muss den gesamten verstärkten Druckstoss stabilisieren. Erst durch die Reaktion der Turbinenreglung, die im Sinne der Stabilität in verkehrter Richtung eingreift, entstehen Stabilitätsbedingungen, ohne die die Schwingungen nicht abklingen, sondern zunehmen würden.

Die starke Beeinträchtigung der Selbstreglung im Gegensatz zur blockierten Turbinenreglung erklärt physikalisch, wieso bei der Voraussetzung von Thoma (nach welcher die Turbine unendlich schnell auf konstante Leistung geregelt wird), die grossen Querschnitte des Wasserschlusses nach der Formel von Thoma notwendig wären.

Es erklärt sich dadurch aber zugleich auch, wieso man die Querschnitte des Wasserschlusses zunehmend verkleinern kann [4] [8] [11] [12], je langsamer man die Reglung arbeiten lässt. Man nähert sich einfach den durch Selbstreglung auf alle Fälle stabilen Bedingungen der blockierten Regulierung.

Wenn man die Verlangsamung durch den Turbinenregler [8] und die Selbstreglung im Netz [11], [12] berücksichtigt, gilt vereinfacht folgende

Näherungsformel für die Stabilität des Wasserschlusses

$$(2) \quad 2h_g T_v + T_i + e_s \tau' > T_g$$

Selbsreglung Turbinen- Selbsreglung
des Druck- regler des Netzes

h_g = Druckabfall im Stollen (z. B. 0,5 %)

T_v = Zeithkonstante des Wasserschlusses (z.B. 200 s) $T_v = F_v H/Q$

F_v = Querschnitt in m^2 ; H = Gefälle in m; Q = Wassermenge in m^3/s

T_g = Zeithkonstante von Stollen + Druckleitung (2 bis 14 s)

T_i = Isodromzeit des Katarakts (lässt sich beliebig steigern)

= Zeithkonstante des Beschleunigungsreglers (max. 2 bis 5 s)

e_s = Selbstreglungskonstante des Netzes (0 bis 3)

τ' = Stellzeit der Turbinenreglung (0,5 bis 3 s). Stellzeiten bis zu 1 s haben keinen nachteiligen Einfluss auf die Frequenzhaltung.)

beim Kataraktregler $\tau' = \delta_t T_i$

δ_t = temporäre Statik; T_i = Isodromzeit

beim Beschleunigungsregler $\tau' = \delta T_s$

δ = relative Drehzahlabweichung zur Herstellung der maximalen Verstellgeschwindigkeit

T_s = Schliesszeit

Man erhält die Formel von Thoma, wenn man eine unendlich schnelle Reaktion des Turbinenreglers voraussetzt ($T_i = 0$ und $\tau' = 0$). Dass es dann so grosse Querschnitte der Wasserschlösser braucht, um dadurch eine Zeitkonstante von z. B. $T_v = 200$ s zu erreichen, erklärt sich durch die Schwäche der Selbstreglung des Druckabfalls, der bei z. B. $h_g = 0,5\%$ nur einen stabilisierenden Zeitwert $2h_g T_v$ von 2 s aufbringt, gegen die Zeitkonstante von z. B. $T_g = 2$ bis 14 s des Stollens. Da hingegen die Verlangsamung durch den Turbinenregler (T_i) und die Selbstreglung im Netz ($e_s \tau'$) von ähnlicher Grössenordnung ist wie die Zeitkonstante des Stollens, können sie die Stabilität stark verbessern. Der Kataraktregler ist hierin dem Beschleunigungsregler gegenüber grundsätzlich überlegen, da sich seine Zeitkonstante beliebig steigern lässt.

So konnte in einer Zentrale mit einem Wasserschloss, dessen Querschnitt siebenmal kleiner ist, als er nach der Formel von Thoma sein sollte, volle Stabilität erreicht werden, indem die Isodromzeit T_i auf über 20 s gesteigert wurde. Da das Wasserschloss in unmittelbarer Nähe der Turbine lag, konnte wegen der Kürze der Rohrleitung die temporäre Statik δ_t auf 4 % herabgesetzt werden. Dadurch blieb die verlangsamende Stellzeit $\tau' = \delta_t T_i = 0,04 \cdot 20 \text{ s} = 0,8 \text{ s}$ unter 1 s, wodurch sich trotz der langen Isodromzeit von 20 s eine gute Frequenzhaltung erreichen lässt.

Bei der Methode, die Selbstreglung zuerst für sich zu untersuchen und dann das Zusammenwirken mit der Turbinenreglung zu betrachten, ist zu berücksichtigen, dass die Selbstreglung für sich allein immer stabil ist. Erst im geschlossenen Kreis der Regulievorgänge können durch Resonanz Unstabilitäten entstehen. Dennoch erkennt man am andersartigen Zusammenwirken im Fall der Selbstreglung des Netzes und der hydraulischen Selbstreglung (Wasserschloss) mit der Turbinenreglung, dass die Selbstreglung des Netzes harmonisch mit der Turbinenreglung zusammenwirkt, während die hydraulische Selbstreglung durch die Reglung der Turbine auf konstante Leistung in hohem Mass beeinträchtigt wird.

F. Parallelbetrieb mit grossem Netz

Man weiss aus Erfahrung, dass beim Parallelbetrieb mit einem grossen Netz im Gegensatz zum isolierten Betrieb die Stabilität viel besser ist. Um klar zu sehen, muss man sich Rechenschaft geben, dass das bessere Verhalten beim grossen Netz für die Stabilität der Turbinenreglung und für die des Wasserschlusses durch ganz andere Ursachen bedingt ist.

Beim isolierten Betrieb ist die Selbstreglung des Netzes null bei rein ohmscher Belastung und Reglung auf konstante Spannung, weil steigende Frequenz die ohmschen Verbraucher nicht durch Selbstreglung mehr Leistung aufnehmen lässt. Im grossen Netz sind dagegen immer motorische Verbraucher vorhanden, die bei steigender Frequenz mehr Leistung aufnehmen. Es ist also immer eine Selbstreglung vorhanden. Nur deshalb kann eine Turbinenreglung, die im isolierten Betrieb wegen fehlender Selbstreglung des Netzes unstabil ist, beim Uebergang zum Parallelbetrieb stabil werden.

Ganz anders beim Wasserschloss. Auch wenn im grossen Netz die Selbstreglung 0 wäre, würde die Unstabilität des Wasserschlusses bei beliebig kleinen Querschnitten verschwinden, wenn die Leistung des Netzes dreimal grösser ist als die Leistung der vom Wasserschloss versorgten Turbinen [8] [9]. Dies nur deshalb, weil die Turbinen des Netzes, die nicht an diesem Wasserschloss hängen, auf dessen Spiegelschwankungen nicht reagieren. Trotzdem hilft das ganze Netz bis auf die mit blockierter Reglung laufenden Turbinen mit, die vom Druckstoss der eigenen Zentrale provozierten Leistungsabweichungen auszugleichen. Auf die vom Wasserschloss gespeisten Turbinen entfällt deshalb nur ein Bruchteil der störenden Leistungsänderung, die beim isolierten Betrieb auftritt und die Selbstreglung behindert. Man nähert sich also bald den immer stabilen Bedingungen der reinen Selbstreglung blockierter Turbinen. Auch wenn die anderen Netzturbinen Wasserschlösser haben, hat dies keine Rückwirkungen, weil nur bei gleicher Schwingungsdauer Resonanz auftreten könnte, was praktisch ausscheidet.

G. Künstliche Selbstreglung

Bei isoliertem Betrieb kann es interessant sein, die Stabilität zu verbessern, indem man künstlich die Abhängigkeiten

herstellt oder verstärkt, die bei der Selbstreglung stabilisierend wirken.

Dass es sich beim isolierten Betrieb nur darum handelt, in einer einzigen Zentrale eine geringe Anzahl von Turbinengruppen auf diese Art zu beeinflussen und man beim Übergang zum Parallelbetrieb mit einem grossen Netz die Apparate, die hierzu notwendig sind, nicht braucht, würde die Einführung einer künstlichen Selbstreglung erleichtern. Eine Beeinflussung mehrerer parallel arbeitender Zentralen würde durch die dann notwendige Abstimmung der Apparate in weitauseinanderliegenden Zentralen erschwert. Beim Parallelbetrieb mehrerer Zentralen wird ausserdem durch Einwirkung auf die Erregung der Generatoren nicht nur, wie beabsichtigt, die Spannung, sondern die Blindlastverteilung beeinflusst, ferner durch Einwirkung auf die Turbinensteuerungen ausser der Frequenz auch die Wirklastverteilung zwischen den Zentralen.

Um zur Herabsetzung des GD^2 in einem isolierten Netz mit ohmscher Belastung die fehlende Selbstreglung herzustellen, kann man die geregelte Spannung in Abhängigkeit von der Frequenz verändern [5] [6]. Bei der höheren Frequenz bewirkt die durch die Frequenz-Spannungsstatik erhöhte Spannung durch Selbstreglung eine höhere Leistungsaufnahme des Netzes, was stabilisierend wirkt. Tatsächlich hat man mit Spannungsänderungen bis zu 6 % bezogen auf eine Frequenzänderung von 1 % in einem begrenzten Bereich gearbeitet [6].

Um mit kleineren Querschnitten der Wasserschlösser auszukommen, kann man die Turbinenregler mit geringerer Verstellgeschwindigkeit arbeiten lassen. Mit Rücksicht auf eine gute Regulierung der Frequenz [11] darf man aber dieses Mittel bei Wasserschlössern, die weit von der Turbine entfernt liegen, zur Stabilisierung nur begrenzt anwenden.

Auch für die Stabilisierung des Wasserschlusses kommt deshalb in Betracht, eine künstliche Selbstreglung im Netz zu erzeugen, indem man die geregelte Spannung oder Frequenz vom Effekt des Druckstosses abhängig macht. Man könnte dadurch theoretisch die Querschnitte der Wasserschlösser um 50 bis 100 % verkleinern [9]. Statt die Schwankungen des Wasserspiegels selbst als Mass des Druckstosses einwirken zu lassen, kann man ebenso gut von der Stellung des Servomotors ausgehen, um die Netzeistung zu beeinflussen [10], da der Servomotorhub unter dem Einfluss der Turbinenreglung den Änderungen des Wasserspiegels folgt.

Die künstliche Selbstreglung eröffnet beim Wasserschlüssel die Möglichkeit, unter Einhaltung der optimalen Turbinenreglung [11] mit kleineren Querschnitten der Wasserschlösser auszukommen. Wo man aber das Wasserschlüssel in unmittelbarer Nähe der Turbine anordnen kann, z. B. bei Kaplan-Turbinen oder in Kavernen-Zentralen, wird es möglich sein, durch Verlangsamung der Turbinenreglung (grosses T_i) allein, also ohne künstliche Selbstreglung, den Querschnitt des Wasserschlusses viel kleiner zu halten, als es nach der Formel von Thoma nötig wäre. Bei kurzen Druckleitungen kommt man mit so kleinen temporären Statiken δ_t aus [5], dass die Stellzeit $\tau' = \delta_t T_i$ auch bei grosser Isodromzeit T_i noch klein bleibt, wodurch eine gute Frequenzhaltung sichergestellt ist [11].

*

Man ist bestrebt, die Regelung der Wasserturbinen so auszubilden, dass man durch kleineres GD^2 und engere Wasserschlösser die Baukosten der Wasserkraftanlagen herabsetzen kann, und zwar unter bestmöglicher Konstanthaltung von Frequenz und Spannung. Man kommt dabei zu einem einfachen Verständnis der verschiedenen Massnahmen, die dies ermöglichen, wenn man sich nicht darauf beschränkt, die mathematischen Beziehungen der Selbstreglung in die Berechnung einzubeziehen, sondern vom physikalischen Naturgesetz der Selbstreglung ausgeht und dessen Einfluss auf die Stabilisierung der durch den Druckstoss verursachten Störungen physikalisch erklärt.

Literaturverzeichnis:

- [1] Stein: Selbstreglung, ein neues Gesetz der Regeltechnik. «Zeitschrift VDI» 1928, Nr. 6.
- [2] Stein: Systematik der Reglerarten, «Escher Wyss Mitteilungen» 1940, S. 56.
- [3] Stein: Drehzahlreglung von Flugzeugtriebwerken, SBZ Bd. 127, S. 295*, 309*, 323*(Juni 1946).
- [4] Scimemi: Sulla validità della regola di Thoma per le vasche di oscillazione degli impianti idroelettrici, «L'Energia Elettrica» 1947, S. 337—341.
- [5] Stein: Drehzahlreglung der Wasserturbinen, SBZ 1947, Nr. 39, 40, 41.
- [6] Keller: Die Beherrschung der stabilen Drehzahlreglung bei frequenzabhängiger Last, «Bulletin Brown Boveri» 1947.
- [7] Stein: L'influence de l'autorégulation et du temps d'amortissement sur le PD² des groupes hydroélectriques, «Bulletin de la Société Française des Electriciens» 1948, Nr. 78.
- [8] Evangelisti: Pozzi piezometrici e stabilità di regolazione, «L'Energia Elettrica» 1950, Nr. 5 und 6.
- [9] Cuénod et Gardel: Stabilisation des oscillations du plan d'eau des chambres d'équilibre, «Bulletin technique de la Suisse Romande» 1950, Nr. 16.
- [10] Gaden et Borel: Influence de la loi de variation de la puissance sur la condition de stabilité de Thoma, «Bulletin technique de la Suisse Romande» 1951, Nr. 9.
- [11] Stein: L'optimum nella regolazione delle turbine idrauliche, «L'Energia Elettrica» 1951, Nr. 4. — Die optimale Regelung von Wasserturbinen, SBZ 1952, Nr. 20.
- [12] Ghetti: Ricerche sperimentali sulla stabilità di regolazione dei gruppi idroelettrici con derivazione in pressione e pozzo piezometrico, «L'Energia Elettrica», I. Teil 1947, S. 542—551, II. Teil 1951, S. 619—637.

Ortsplanungskurs in Schaffhausen DK 374.5:711.4

Am 29. Januar 1953 führte die Regionalplanungsgruppe Nordostschweiz gemeinsam mit der Strassen- und Wasserbauinspektion des Kantons Schaffhausen eine instruktive Orientierungstagung für Gemeindefunktionäre durch, die von mehr als hundert Gemeinderäten und Beamten aus dem ganzen Stande besucht wurde. Thema waren die «Bebauungspläne und Bauordnungen», ein Problem, das, wie die rege Beteiligung bewies, offenbar auch an der Nordmark unseres Landes wachsendem Interesse begegnet. Erfreulicherweise hatte die kantonale Baudirektion von Schaffhausen das Patronat übernommen. Deren Vorsteher, Regierungsrat Ernst Lieb, hielt nicht nur die Begrüßungsrede, sondern er belebte den Kurs durch anregende Diskussionsbeiträge, die erkennen liessen, dass er und sein Amt Orts- und Regionalplanung als ernst zu nehmende Aufgabe betrachten und nach Möglichkeit zu fördern versuchen. Dieses Streben dokumentierte sich nicht zuletzt darin, dass allen Teilnehmern von der Regierung ein währschaftes Mittagessen im «Landhaus» angeboten wurde, bei dem das Tagungsthema denn auch im Gespräch von Mann zu Mann vielfach vertieft Fundierung erfuhr.

Den eigentlichen Kurs leitete das Referat von Architekt Hans Marti aus Zürich «Ziel und Zweck der Ortsplanung» ein; es umriss in prägnanter Kürze das entscheidende Anliegen und vermochte umso überzeugender für die Notwendigkeit räumlicher Ordnung einzunehmen, als der Redner seine Argumentation auf eigene vielfältige konkrete Tätigkeit aufbauen konnte. Kantoningenieur Jakob Bernath, dem die Tagung als Mitorganisator Wesentliches ihres Gelingens verdankte, legte anschliessend die «rechtlichen Planungsgrundlagen im Kanton Schaffhausen» dar. Ihren Kern bildet die fortschrittliche Baugesetzgebung, die den schaffhauserischen Gemeinden die Möglichkeit der Aufstellung von Bauordnungen, von Bebauungs- und Quartierplänen als wichtiges Rechtsmittel bietet. Dem Staat als solchem ist deren Schutz und faktische Durchsetzung anvertraut. Dass auch im Stande Schaffhausen die Dringlichkeit planlicher Massnahmen besteht, belegte Ingenieur Bernath in seinem Vortrage «Aktuelle kantonale Planungsprobleme». Von den in seinem Kanton nicht minder als andernorts brennenden Phänomenen der Landflucht und Verstädtung ausgehend, verstand er vor allem, das Verständnis für die mannigfachen Aufgaben im Sektor Verkehr zu wecken und zu zeigen, dass hierin vom Kanton bereits verschiedenes geleistet worden ist, aber ebensoviel noch zu tun bleibt.

Diesen grundsätzlichen Vorträgen folgten Vorführungen instruktiver Planungsbeispiele, für die sich der Leiter des Regionalplanungsbüro des Kantons Zürich, Architekt Max Werner, ein gebürtiger Schaffhauser, zur Verfügung gestellt hatte. Aus dem reichen Fundus seiner zehnjährigen Planer-Erfahrung im Nachbarkanton wusste er nicht nur bemerkenswerte Muster von Orts- und Regionalplanungen, vornehmlich aus dem Grenzgebiet der beiden Kantone, eindrücklich zu machen; seine Ausführungen wirkten überdies als Impuls zur unmittelbaren Inangriffnahme von Planungen, sie bauten auf einem reichhaltigen und instruktiven Planmaterial auf und fanden besonders nachhaltiges Interesse.