Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 70 (1952)
Heft: 20

Artikel: Die optimale Regelung von Wasserturbinen
Autor: Stein, T.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-59605

70. Jahrgang
Nachdruck von Bild oder Text nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit genauer Quellenangabe gestattet
Der S. I. A. ist für den Inhalt des redaktionellen Teils seiner Vereinsorgane nicht verantwortlich
Nummer 20

Die optimale Reglung von Wasserturbinen

Von Dipl. Ing. T. STEIN, Schio

DK 621.24:621-53

1. Problemstellung

Im Bestreben, die Ergebnisse der Reglertheorie für die Praxis in einfacher Weise zu verwerten, wurden allgemeingültige Kurven zur Ermittlung der Stabilitätsbedingungen aufgestellt [10] *). Diese berücksichtigen die Verbesserung der Stabilität durch Selbstreglung und zeigen ausserdem, welche schwereren Bedingungen einzuhalten sind, wenn der Regelvorgang in einer bestimmten Zeit abklingen soll. Wenn man nun darüber hinaus noch zu ermitteln sucht, wie der Regler einzustellen ist, um den bestmöglichen Regelvorgang sicherzustellen [11], so bedeutet dies nicht eine weitergehende rechnerische Komplikation. Vielmehr ergibt sich schliesslich eine sehr einfache allgemeingültige Formel, die alle früher untersuchten Einflussgrössen mit berücksichtigt.

Die Bedingungen für den optimalen Regelvorgang [11] werden hier als Fortsetzung der früheren Untersuchungen [10] abgeleitet, soweit sie darin nicht bereits enthalten waren.

Um auch bei grosser Anlaufzeit der Wassermassen unter voller Wahrung der Stabilität die Schwungmassen und damit den Generatorpreis herabsetzen zu können, ist das wirksamste Mittel, den Regelvorgang in einem Masse zu verlangsamen, das durch die später definierte Stellzeit τ' gemessen wird. Die weitestgehende Senkung der Schwungmassen wird also bei d e r Reglerart möglich sein, bei der sich die Steigerung der verlangsamenden Stellzeit τ' am weitesten treiben lässt. Es wird zu untersuchen sein, wie sich hierin die beiden bekannten Systeme verhalten: der Kataraktregler und der Beschleunigungsregler.

Der optimale Regelvorgang wird folgendermassen definiert:

Das eindeutige Optimum des Regelvorganges von Wasserturbinen ist erreicht, wenn bei der kleinsten Selbstreglungskonstanten des Netzes die praktisch kürzeste Abklingzeit mit der kleinsten verlangsamenden Stellzeit τ' erreicht wird. Da eine weit getriebene Zunahme der Stellzeit beginnen kann, die Frequenzregulierung zu beeinträchtigen, gestattet die optimale Reglereinstellung, auch bei Herabsetzung der Schwungmassen eine möglichst gute Frequenzregulierung zu erreichen.

2. Kataraktregler und Beschleunigungsregler

Der Kataraktregler mit temporärer Rückführung wird zum «idealen» Kataraktregler, wenn man die ganze Verlangsamung des Regelvorganges in den Katarakt verlegt, dem der Hauptservomotor augenblicklich folgt [10]. Wie gezeigt wurde, kann man sich diesem Ziel, die ganze Stellzeit in den Katarakt zu verlegen und den Hauptservomotor mit der Stellzeit 0 arbeiten zu lassen, beliebig nähern, indem man sehr grosse Querschnitte für das Steuerventil des Hauptservomotors verwendet [10].

Der Beschleunigungsregler hat keinen verlangsamenden Katarakt. Die ganze Verlangsamung liegt deshalb von Natur aus im Hauptservomotor. Will man diesen auch bei kleinen Drehzahlausschlägen immer langsamer laufen lassen, um die Stellzeit zu erhöhen, so darf man nicht grosse Steuerquerschnitte verwenden wie beim Kataraktregler, sondern man muss zu immer kleineren Steuerquerschnitten übergehen. Damit wird aber dem toten Spiel, das notwendig ist, um die durch Reibung bedingte Unempfindlichkeit des Servomotors und der angetriebenen Zuflussteuerung der Turbine zu überwinden, eine immer grössere Drehzahländerung zugeordnet. Schliesslich reagiert der Servomotor auf die Drehzahländerungen überhaupt nicht mehr und bleibt indifferent in jeder Lage stehen. Schon ehe diese Grenze erreicht ist, vermindert aber der zunehmende Einfluss der Unempfindlichkeit die Stabilität, wirkt also dem beabsichtigten Zweck entgegen, durch höhere Stellzeit die Stabilität zu verbessern.

Beim Kataraktregler lässt sich die Stellzeit unbegrenzt steigern durch Erhöhung der temporären Statik mittels veränderter Zuordnung der Hubbewegungen von Drehzahlregler und Katarakt. So liess sich bei einem Leistungsregler [8] [9] versuchsweise eine temporäre Statik bis 500 % einstellen, ohne dass dies durch eine Unempfindlichkeit des Kataraktsystems behindert wurde. Bei anderen Versuchen mit Leistungsreglern wurde im Sinne der weitestgehenden Vereinfachung die auch dort für die Stabilität unentbehrliche Verlangsamung in die Vorsteuerung verlegt, was aber durch die hervortretende Unempfindlichkeit der Vorsteuerung zu keinem günstigen Ergebnis führte. Eine vollkommene Lösung wurde sofort erreicht, indem man einen Katarakt mit genügender temporärer Statik einführte, dem die Vorsteuerung durch reichliche Steuerquerschnitte augenblicklich folgte, wobei die Störwirkung ihrer Unempfindlichkeit verschwand.

Diese Erfahrungen erklären, wieso es mit dem Kataraktregler möglich war, bei einer vom Netz unabhängigen Wasserturbine, die eine Ofenanlage versorgte (reine Widerstandslast, keine Selbstreglung), die Stellzeit bis auf den ungewöhnlich hohen Wert von 9 Sekunden zu steigern, während bisher 2 Sekunden [5] als die äusserste Grenze galten. Es traten dabei Frequenzschwankungen von $\pm$ 0,5 Hz auf, was bei Ofenbetrieb an sich zulässig ist. Die Höhe der Frequenzschwankungen ist nicht auf eine hervortretende Unempfindlichkeit zurückzuführen, sondern auf die später besprochene Zunahme der Schwingungsamplituden bei wachsender Stellzeit. Beim Kataraktregler ist also eine die Schwungmassen herabsetzende Erhöhung der Stellzeit bis zu der Grenze möglich, die durch die Schwingungsgesetze gegeben ist ohne eine tieferliegende Begrenzung durch Einfluss der Unempfindlichkeit des Regelorganismus.

Für die weitere Behandlung werden die früher abgeleiteten [10] charakteristischen Gleichungen des Regelvorgangs für beide Reglerarten wiedergegeben für die kritischen Verhältnisse bei Vollast (Formelzeichen s. S. 288):

Kataraktregler (1)

$$0{,}5\,\delta_t T_i T_a T_l \cdot w^3 + (\delta_t T_i T_a + 0{,}5\, e_s \delta_t T_i T_l - T_i T_l)\, w^2 + (T_i + e_s \delta_t T_i - T_l)\, w + 1 = 0$$

Beschleunigungsregler (2)

$$0{,}5\,\delta T_s T_a T_l \cdot w^3 + (\delta T_s T_a + 0{,}5\, e_s \delta T_s T_l - T_{ac} T_l)\, w^2 + (T_{ac} + e_s \delta T_s - T_l)\, w + 1 = 0$$

Durch Vergleich stellt man fest, dass die charakteristischen Gleichungen und damit die Schwingungsgesetze für beide Reglerarten identisch sind unter folgenden Identitätsbedingungen

$$\delta_t T_i \equiv \delta T_s \tag{3}$$

$$T_i \equiv T_{ac} \tag{4}$$

Bezeichnet man in beiden Fällen

$$\tau' = \delta_t T_i \equiv \delta T_s = \text{Stellzeit} \tag{5}$$

so gilt der Satz:

Kataraktregler und Beschleunigungsregler folgen identischen Schwingungsgesetzen, wenn ihre Stellzeiten gleich sind und die Isodromzeit T_i so gross ist wie die Zeitkonstante T_{ac} des Beschleunigungsreglers.

Während für die Steigerung der Stellzeit des Servomotors beim Beschleunigungsregler durch zunehmenden Einfluss der Unempfindlichkeit Grenzen gesetzt sind, kann man beim Kataraktregler durch reichliche Steuerquerschnitte die Stellzeit des Servomotors unbegrenzt auf Werte heruntersetzen, die vernachlässigbar klein sind wie bei anderen Zwischenverstärkern im Reglerkreis, die man bei beiden Reglerarten in den obigen Gleichungen auch nicht berücksichtigt. Dies um so mehr, als diese Einflüsse in wirklich kritischen Fällen durch die dort zunehmende Verlangsamung des Regelvorganges immer stärker zurücktreten.

3. Erklärung der besonderen Schwierigkeit der Reglung von Wasserturbinen

Um den Einfluss der verlangsamenden Stellzeit τ' auf den Regelvorgang richtig zu beurteilen, ist es zweckmässig, der physikalischen Ursache auf den Grund zu gehen, worin die

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

Formelzeichen

n = Drehzahl in der Minute

T_a = Anlaufzeit der Maschine von Stillstand auf Vollast (N_e in PS) in s

$$T_a = \frac{GD^2 n^2}{0{,}27\,N_e} 10^{-6}$$

Grössenordnung 6 bis 3 s

T_l = Anlaufzeit der Wassermassen von Stillstand auf die Wassergeschwindigkeit bei Vollast in s

$$T_l = \frac{\Sigma L\, v_{max}}{g\, H_s}$$

L = Länge der Rohrleitung in m

v_{max} = Wassergeschwindigkeit bei Vollast in m/s

H_s = statischer Druck in mWS

Grössenordnung 0,5 bis 3 s

δ_t = relative Drehzahlabweichung zur Verstellung um Vollast bei blockiertem Katarakt

δ = relative Drehzahlabweichung zur Herstellung der maximalen Verstellgeschwindigkeit

T_s = Schliesszeit (Oeffnungszeit) um den Vollasthub bei maximaler Verstellgeschwindigkeit zu durchlaufen in s

T_i = Isodromzeit = Zeit zum Durchlaufen des Katarakthubes unter der konstant gedachten maximalen Kraft der Kataraktfedern in s

τ' = Stellzeit = $\delta T_s \equiv \delta_t T_i$ für Stabilität massgebende Zeitkonstante

T_{ac} = Beschleunigungszeit des Beschleunigungsreglers in s

$T_{1/10}$ = Abklingzeit des Drehzahlausschlages auf $1/10$, praktische Dauer des Regelvorganges, in s

e_s = Selbstreglungskonstante

$$\frac{\%\ \text{Leistungsänderung}}{\%\ \text{Drehzahländerung}} - 1$$

Grössenordnung 0 bis 5

Bei krummliniger Beziehung zwischen Servomotorhub und Leistung sind die Reglerkonstanten nach der Tangente an den Vollastpunkt zu korrigieren [10].

φ = relative Drehzahländerung

φ_{max} = maximaler relativer Drehzahlausschlag

λ = relative sprungweise Leistungsänderung bezogen auf Vollast

μ = relative Abweichung des Servomotorhubes

besondere Schwierigkeit bei der Drehzahlreglung von Wasserturbinen anderen Regelproblemen gegenüber besteht, ob es sich um Regler für Dampfturbinen, Verbrennmotoren, Flugzeugpropeller, Feuerungs- oder Heizungsanlagen handelt. Es ist bekannt, dass man zum Beispiel bei Dampfturbinen zur Verbesserung des Regelvorganges jede Senkung der Schwungmassen begrüsst, während umgekehrt bei Wasserturbinen das Regelproblem den Engpass für die Senkung der Schwungmassen bildet [10]. Einen Hinweis dafür, dass bei Wasserturbinen eine widerspruchsvolle Besonderheit vorliegt, gibt der Umstand, dass nur bei Wasserturbinen in den charakteristischen Gleichungen [1] [2] für den geschlossenen Reglerkreis negative Vorzeichen auftreten. Bei den entsprechenden Regelgleichungen für andere Regelprobleme [1] [7] [8] werden dagegen am Schluss immer alle Vorzeichen positiv, was man direkt als Kontrolle benützen kann, dass die Grundgleichungen der Glieder des Regelkreises richtig aufgestellt sind.

Dieses eigenartige Auftreten negativer Vorzeichen ist zu erklären. Um für eines der Glieder eines Reglerkreises das Vorzeichen umzukehren, genügt es, das Reglerglied verkehrt anzuschliessen, zum Beispiel, indem ein Regler, der bei zunehmendem Reglerhub das gesteuerte Organ schliessen sollte, um im richtigen Sinn zu wirken, es dagegen öffnet. Die negativen Zeichen deuten deshalb darauf hin, dass im Reglerkreis der Wasserturbine etwas in verkehrter Richtung wirkt. Dies im Gegensatz zu anderen Regelproblemen. Man kann ferner feststellen, dass die negativen Vorzeichen immer nur bei den Gliedern mit der Zeitkonstanten T_l für die Anlaufzeit der Wassermassen der Rohrleitung auftreten. Also muss sich die verzögernde Zeitkonstante der Wassermassen von allen anderen Zeitkonstanten unterscheiden, die die Regelvorgänge verzögern.

Alle diese anderen Zeitkonstanten haben das gemeinsame Merkmal, dass sie zwar eine Verzögerung im Reglerkreis bedingen, dass aber die Wirkung auf das nachfolgende Glied des Reglerkreises immer im richtigen Sinn erfolgt. Ein Servomotor mit langer Schliesszeit überträgt zwar erst mit der Zeit die Reglerwirkung auf das geregelte Organ, aber von vorneherein im richtigen Sinn. Eine grosse Schwungmasse reagiert erst mit der Zeit durch Drehzahländerung auf Aenderungen der Leistung, aber von Anfang an in dem im Reglerkreis vorgesehenen Sinn.

Nur die Wassermassen der Rohrleitung reagieren verkehrt. Wird bei steigender Drehzahl unter dem Einfluss des Drehzahlreglers das Zuflussorgan zur Turbine geschlossen, so bewirkt im ersten Augenblick die Wasserträgheit durch Druckstoss nicht nur eine Verzögerung, sondern eine Zunahme der Wassergeschwindigkeit im Zuflussorgan, wirkt also der dem Schliessvorgang entsprechenden Abnahme der Wassermenge entgegen. Durch die Anlaufzeit T_l des Wassers entsteht also nicht nur wie bei anderen Zeitkonstanten eine Verzögerung, sondern eine Wirkung in verkehrter Richtung.

Bevor von Stabilität die Rede sein kann, muss diese Störwirkung der Wassermassen mindestens auf Null kompensiert werden, das heisst es müssen wie für die charakteristischen Gleichungen anderer Regelvorgänge alle negativen Faktoren verschwinden. Hierfür muss in den Gleichungen (1) (2) zunächst für den Faktor von w im Grenzfall sein (Selbstreglungskonstante $e_s = 0$ angenommen):

(6) Kataraktregler $T_i = T_l$

(7) Beschleunigungsregler $T_{ac} = T_l$

Setzt man diesen Grenzwert in den Faktor von w^2 ein, so entsteht als Grundvoraussetzung für die Stabilität, d. h. für das Verschwinden der negativen Faktoren:

$$\text{(8)} \quad \text{Kataraktregler} \quad \frac{\delta_t T_i}{T_l} \frac{T_a}{T_l} + 0{,}5 \frac{\delta_t T_i}{T_l} e_s > 1$$

$$\text{(9)} \quad \text{Beschleunigungsregler} \quad \frac{\delta T_s}{T_l} \frac{T_a}{T_l} + 0{,}5 \frac{\delta T_s}{T_l} e_s > 1$$

Wenn man in beiden Fällen die Stellzeit τ' nach Gleichung (5) einsetzt, entsteht gemeinsam für beide Reglerarten als Bedingung für das Verschwinden der negativen Faktoren

$$\text{(10)} \quad \underbrace{\frac{\tau'}{T_l} \frac{T_a}{T_l}}_{\text{Schwungmasse}} + \underbrace{0{,}5 \frac{\tau'}{T_l} e_s}_{\text{Selbstreglung}} > 1$$

Ohne Selbstreglung ($e_s = 0$, reine Widerstands-Belastung) kann also bei gegebener Wasseranlaufzeit T_l eine Herabsetzung der Schwungmassen, also kleinere Anlaufzeit T_a, nur durch höhere Stellzeit τ' erreicht werden. Durch die verlangsamende Stellzeit τ' muss verhindert werden, dass die in verkehrter Richtung wirkende Trägheit der Wassermassen (Anlaufzeit T_l) so gross wird, dass sie durch den Energievorrat der Schwungmassen (T_a) nicht mehr kompensiert werden kann.

Aber auch die der Störwirkung der Wassermassen entgegenwirkende Selbstreglung wird umso stärker, je grösser die verlangsamende Stellzeit τ' ist, weil bei langsamen Regelvorgängen die Selbstreglung besser Zeit hat, sich auszuwirken [4]. Diese Grundregeln bleiben auch dann gültig, wenn man nicht nur verlangt, dass keine negativen Glieder auftreten, sondern die regelrechten Bedingungen für die Stabilitätsgrenze und auch für das Abklingen des Regelvorgangs in einer vorgeschriebenen Abklingzeit aufstellt [10]. So erklärt sich physikalisch die Bedeutung der Stellzeit τ' durch den in verkehrter Richtung wirkenden Störeinfluss der Wasserträgheit, der herabgesetzt wird, indem man den Regelvorgang durch die Stellzeit τ' verlangsamt. Während man den maximalen Druckstoss einfach durch die maximale Verstellgeschwindigkeit des Servomotors mit Hilfe von Blenden begrenzt, erfordert die Störwirkung der Wasserträgheit auf die Stabilität eine anders geartete Verlangsamung der Regelvorgänge, die durch die Stellzeit τ' gekennzeichnet wird.

4. Optimale Reglereinstellung

Es kommt nun darauf an, die optimale Reglereinstellung zu ermitteln, bei der die Stellzeit τ' ein Minimum wird, und zwar unter Berücksichtigung der Selbstreglung. Damit beseitigt man zugleich die Unsicherheit, die bisher darüber bestand,

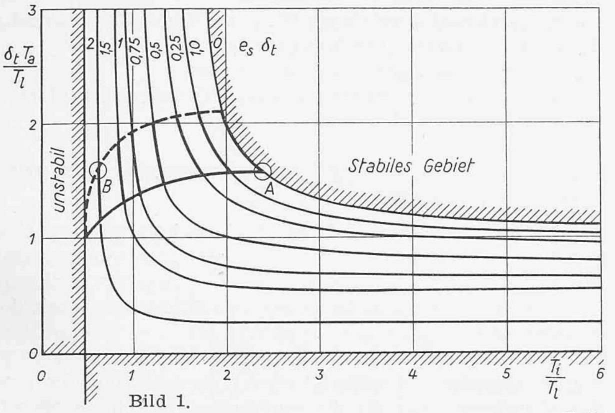

Bild 1.

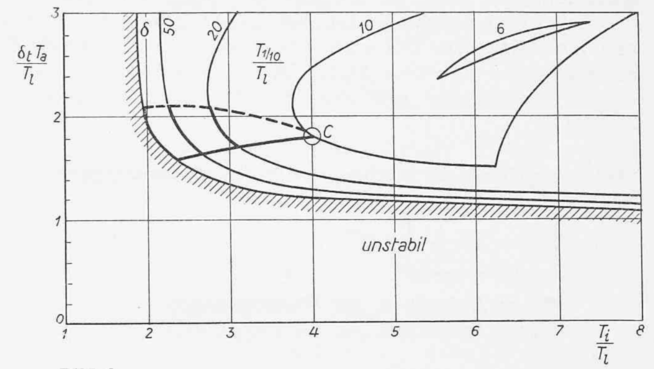

Bild 2.

Kataraktregler

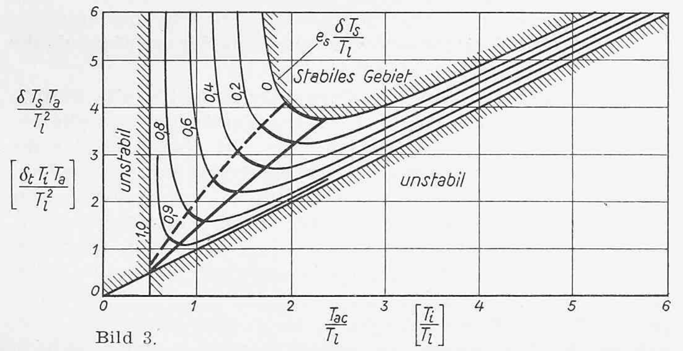

Bild 3.

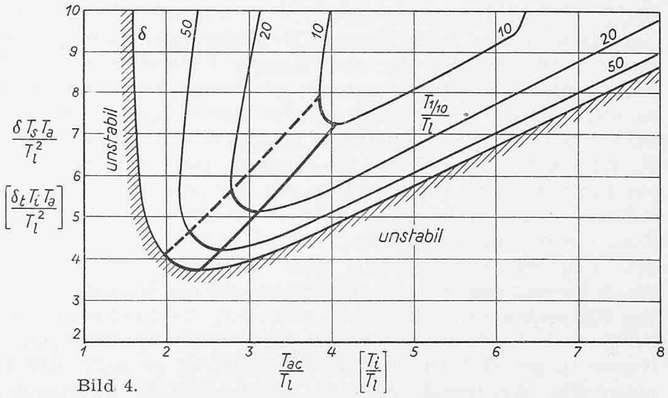

Bild 4.

Beschleunigungsregler

Einfluss der Selbstreglung an der Stabilitätsgrenze. Bilder 1 und 3. Unabhängig von der nicht zum voraus bekannten Selbstreglungskonstanten e_s kann man beim Kataraktregler immer die gleiche temporäre Statik δ_t beibehalten. Dagegen muss man beim Beschleunigungsregler für zunehmende Selbstreglungskonstante e_s sowohl die Stellzeit δT_s als auch die Beschleunigungszeit heruntersetzen, um in der Optimumzone zu bleiben.

Einfluss der Abklingzeit (Selbstreglung 0). Bilder 2 und 4. Gegenüber der Stabilitätsgrenze $T_{1/10} = \infty$ lässt sich die praktisch kürzeste Abklingzeit mit dem Parameter 10 schon mit mässiger Erhöhung der verlangsamenden Stellzeit τ' erreichen. Die Abklingzeit $T_{1/10}$ ist dann 10mal grösser als die Wasseranlaufzeit T_l. In der Optimumzone ist damit der optimale Regelvorgang erreicht.

Bilder 1 bis 4. Ermittlung der Optimumzonen aus den allgemein gültigen Stabilitätsbedingungen für den kritischen Fall der Vollast ergibt die Reglereinstellung, mit der auch bei kürzester praktischer Regeldauer trotz weitgehendster Senkung des GD^2 bestmögliche Frequenzreglung erreichbar ist.

e_s Selbstreglungskonstante, $T_{1/10}$ Abklingzeit auf $1/10$, T_a Anlaufzeit der Schwungmassen, T_l Anlaufzeit der Wassermassen, T_i Isodromzeit, T_{ac} Beschleunigungszeit, δ_t temporäre Statik, T_s Schliesszeit des Servomotors, δ entsprechende Drehzahlabweichung, $\tau' = \delta T_s \equiv \delta_t T_i$ Stellzeit.

welches die «richtige» Reglereinstellung ist. Da in der Nähe des Minimumpunktes bei fast allen Optimumproblemen der Verlauf sehr flach ist, gewinnt man als Bewegungsspielraum für die Praxis eine relativ breite Optimumzone [3], wenn man die Ueberschreitung des Minimumwertes um einen bestimmten Prozentsatz zulässt. Da es bei der Stellzeit nicht auf die letzten Prozente ankommt, wird hier als praktische Optimumzone das Gebiet bezeichnet, in dem die Stellzeit nicht mehr als 10 % über dem Minimumpunkt liegt. Aehnlich wurde seinerzeit [4] als praktische Abklingzeit die Zeit $T_{1/10}$ eingeführt, in der die ursprünglichen Ausschläge auf 10 % abgeklungen sind.

Die Optimumzone lässt sich aus den früher [10] ermittelten allgemeingültigen Stabilitätsbedingungen, Bilder 1 bis 4, ermitteln. Die Kurven auf den obern Bildern 1 und 3 gelten für die Stabilitätsgrenze und verschiedenes Mass der Selbstreglung, die Kurven auf den untern Bildern 2 und 4 für Selbstreglung null und verschiedene Abklingzeiten $T_{1/10}$. Die oberen beiden Bilder 1 und 2 gelten für Kataraktregler, die untern Bilder 3 und 4 für Beschleunigungsregler. Zwischen jedem der oberen Bilder besteht mit dem jeweils darunterliegenden die in den Identitätsbedingungen Gleichungen (3) und (4) niedergelegte Beziehung. Punkte und Linien der unteren Kurven lassen sich deshalb nach diesen Beziehungen auf die oberen Bilder übertragen.

Da beim Beschleunigungsregler (unten) die Stellzeit δT_s direkt als Faktor der Ordinatenwerte erscheint, stellen die Minimumpunkte der Kurvenscharen beim Beschleunigungsregler direkt die Optimumwerte dar, und die um 10 % höher liegenden Ordinatenwerte der betreffenden Kurve grenzen die Optimumzone ab. Durch Uebertragung dieser Werte auf die oberen Kurven nach den Identitätsbedingungen erhält man die Optimumwerte und Optimumzonen für den Kataraktregler.

Auf Grund der Identitätsbedingungen (3) (4) gelten die unteren Kurven auch für den Kataraktregler mit den in eckigen Klammern angegebenen Werten für Ordinate und Abszisse. Der Kataraktregler hat folglich die gleiche Optimumzone wie der Beschleunigungsregler, die sich auf die oberen Kurven übertragen lässt, indem man die Ordinaten durch T_i/T_l dividiert.

Betrachtet man zunächst die Kurve rechts oben für den Kataraktregler mit der Selbstreglungskonstanten 0, so erkennt man, dass man auch ohne Selbstreglung die praktisch kürzeste Abklingzeit $T_{1/10} : T_l = 10$ durch die Zone kurzer Stellzeit erreicht, wenn $\delta_t T_a : T_l = 1{,}8$ ist (Punkt C). Es wird hier immer der kritische Vollastfall zu Grunde gelegt. Es wäre aber sinnlos, zu versuchen, die Abklingzeit noch weiter abkürzen zu wollen, was mit starker Steigerung der Stellzeit theoretisch in einem ganz kleinen Feld mit dem Parameter 6 statt 10 möglich wäre. Man hat also mit dem eben festgesetzten Wert schon die Bedingungen gefunden, um mit der kleinsten verlangsamenden Stellzeit die praktisch kürzeste Abklingzeit bei Selbstreglung 0 zu erreichen. Der Parameter 10 bedeutet, dass die praktisch kürzeste Abklingzeit $T_{1/10}$ gegen die Anlaufzeit T_l der Wassermassen zehn Mal grösser ist. Also beträgt zum Beispiel bei $T_l = 1{,}5$ s die kürzeste Abklingzeit 15 s.

Aus den Optimumkurven links oben für die Stabilitätsgrenze bei Selbstreglung sieht man aber, dass hohe Selbstreglungskonstanten e_s zwar gestatten, durch Herabsetzung der Isodromzeit T_i die Stellzeit $\tau' = \delta_t T_i$ stark herabzusetzen. Der andere Faktor der Stellzeit, die temporäre Statik δ_t, kann aber unverändert bleiben, ohne dass man dadurch aus der Optimumzone herausfällt. Die Optimumkurven verlaufen bei zunehmender Selbstreglungskonstante e_s so flach, dass wenn man in Bild 1 vom Optimum Punkt A ausgehend δ_t

ganz konstant lässt, im Rahmen der praktisch vorkommenden Selbstreglungskonstanten zum Punkt B kommt und damit erst die Grenze der Optimumzone erreicht. *Die optimale Einstellung der temporären Statik bleibt folglich beim Kataraktregler unabhängig von der Selbstreglungskonstanten des Netzes*

(11) Optimale temporäre Statik des Kataraktreglers

$$\boxed{\delta_t = 1{,}8\,\frac{T_l}{T_a}}$$

T_l = Anlaufzeit der Wassermassen
T_a = Anlaufzeit der Schwungmassen

Dies ergibt als Vorteil des Kataraktreglers eine besonders einfache optimale Reglereinstellung. Es ist zu bedenken, dass die Selbstreglungskonstante e_s des Netzes nur schwer messbar, je nach der Belastungsart Veränderungen unterworfen und deshalb das Mass der zuverlässigen Unterstützung durch Selbstreglung nur durch mehrere praktische Einstellversuche zu ermitteln ist. Unabhängig hiervon lässt sich nach den zum voraus bekannten Zeitkonstanten T_l für die Wassermassen und T_a für die Schwungmassen die optimale temporäre Statik δ_t ein für allemal und unabhängig von der Isodromzeit T_i einstellen. Ohne mehr die Statik zu verändern, kann man dann ebenso unabhängig unter verschiedenen Netzverhältnissen, also bei verschiedenem Mass der Selbstreglung, allein durch vermehrtes Oeffnen oder Schliessen der Drosselöffnung des Katarakts versuchen, wie weit sich die Isodromzeit T_i herabsetzen lässt, wobei man bei dieser einfachen Einstellung immer in der Optimalzone bleibt. Dabei ist es nicht einmal notwendig, die jeweils erreichte Isodromzeit T_i zu messen.

So kehrt die Regeltechnik vom Einfachen auf dem Umweg über das durch verfeinerte Berechnung Komplizierte, zu praktisch leicht verwertbaren einfachen Resultaten zurück. Als Regel für das Mass der temporären Statik galt erst, dass δ_t sehr viel grösser sein müsse als $T_l : T_a$. Um zu bestimmen, wieviel grösser als 1 der Faktor sein sollte, waren dann recht umständliche mathematische Berechnungen nötig, weil man immer mehr Einflussgrössen des Reglers berücksichtigte und ferner nicht nur die Stabilitätsgrenze feststellte, sondern die Bedingungen für das Abklingen in einer bestimmten Zeit [10] sowie den helfenden Einfluss der Selbstreglung.

Die weitere Einführung des Begriffs der optimalen Einstellung führt nun unter Ausschaltung aller Berechnungen und Kurvenablesungen, aber unter Verwertung aller dieser Untersuchungsergebnisse zur einfachen Feststellung, dass der gesuchte Faktor eindeutig 1,8 ist.

Beim Beschleunigungsregler ist die optimale Einstellung schwieriger, weil hier keine der Reglergrössen unabhängig vom Grad der Selbstreglung konstant bleibt. Man kann nicht von vorneherein eine der Reglergrössenkonstanten festlegen und mit der anderen versuchsweise abtasten, welches der Betriebsfall mit der schwächsten Selbstreglung ist. Wie Bild 3 zeigt, muss man bei zunehmender Selbstreglungskonstanten e_s ausser der Stellzeit δT_s auch die Zeitkonstante T_{ac} des Beschleunigungsreglers heruntersetzen, um in der Optimumzone zu bleiben. Dies ist umständlich, weil man ausser der Einstellung von T_{ac} am Regler Massnahmen am Steuerorgan des Hauptservomotors treffen muss, um die Stellzeit herunterzusetzen [5].

Um die Bedingungen festzustellen, die beim Beschleunigungsregler einzuhalten sind, damit man in der optimalen Zone bleibt, kann man nun umgekehrt von dem für den Kataraktregler gefundenen Resultat ausgehen und es nach den Identitätsbedingungen (3) (4) auf den Beschleunigungsregler übertragen. Wir setzen

$$\delta_t = 1{,}8\,\frac{T_l}{T_a}\,; \quad \delta_t\,T_i \equiv \delta\,T_s = 1{,}8\,\frac{T_l}{T_a}\,T_i$$

und erhalten mit $T_i \equiv T_{ac}$ die Bedingung für den optimalen Verhältniswert der beiden Zeitkonstanten des Beschleunigungsreglers.

(12) $$\frac{\delta\,T_s}{T_{ac}} = 1{,}8\,\frac{T_l}{T_a}$$

δ = Drehzahlabweichung für max. Verstellgeschwindigkeit
T_s = Schliesszeit (Oeffnungszeit)
T_a = Anlaufzeit der Schwungmassen
T_{ac} = Beschleunigungszeit des Beschleunigungsreglers
T_l = Anlaufzeit der Wassermassen

5. Identische Frequenzregelung bei Kataraktregler und Beschleunigungsregler

Mit optimal eingestellten Reglern kommt man zwar bei gegebener Schwungmasse mit der kleinsten verlangsamenden Stellzeit τ' aus; es ist aber noch festzustellen, welchen Einfluss bei weiterer Herabsetzung der Schwungmassen die notwendige Steigerung der Stellzeit auf die Frequenzreglung hat und wie sich dabei Kataraktregler und Beschleunigungsregler verhalten. Hierfür ist streng zu unterscheiden zwischen den Vorgängen, für die die maximale Verstellgeschwindigkeit des Servomotors entscheidend ist, und den Vorgängen, die sich in der Zone kleinerer Verstellgeschwindigkeiten abspielen. Sowohl der maximale Druckstoss als auch die maximalen Uebertouren bei *grossen* Abschaltungen hängen nur von der konstanten maximalen Verstellgeschwindigkeit des Servomotors ab, die durch Blenden eingestellt wird.

Es ist bekannt, dass im Gegensatz dazu für alle Stabilitätsprobleme die enge Zone kleinerer Verstellgeschwindigkeiten ausschlaggebend ist. Das gleiche gilt aber auch für die Frequenzreglung im normalen, störungsfreien Betrieb. Es handelt sich dabei entweder um sehr kleine, sprungweise, oder gar um vollkommen stetig verlaufende Belastungsänderungen. Die hiedurch ausgelösten Regelvorgänge bleiben in der Zone, in der die maximale Verstellgeschwindigkeit des Servomotors nicht erreicht ist. Das Verhalten in dieser Zone ist also massgebend für die Frequenzreglung. Beim Kataraktregler ist es richtig, die Verlangsamung ausschliesslich in den Katarakt zu verlegen, dem genau die gleiche Stellzeit $\tau' = \delta_t\,T_i$ zu geben ist, wie sie beim Hauptservomotor des Beschleunigungsreglers mit $\tau' = \delta\,T_s$ zu Grunde gelegt ist. Beim Kataraktregler folgt der Hauptservomotor den Bewegungen des Katarakts augenblicklich.

Bei dieser Identität von Stellzeiten $\tau' = \delta_t\,T_i \equiv \delta\,T_s$ und der Zeitkonstanten des Katarakts und des Beschleunigungsreglers $T_i \equiv T_{ac}$ und der Stellzeit 0 beim Servomotor des Katarakts gelten für die Geschwindigkeit des Servomotors folgende Gleichungen [10].

Verstellgeschwindigkeit des Servomotors

(13) Kataraktregler $$\dot{\mu} = -\frac{1}{\delta_t\,T_i}\,(\varphi + T_i\,\dot{\varphi})$$

(14) Beschleunigungsregler $$\dot{\mu} = -\frac{1}{\delta\,T_s}\,(\varphi + T_{ac}\,\dot{\varphi})$$

Verstell-geschwindigkeit — Dreh-zahl — Beschleu-nigung

Genau wie beim Beschleunigungsregler ist also immer, auch schon im ersten Augenblick des Belastungssprunges, eine zur Beschleunigung $\dot{\varphi}$ proportionale Verstellgeschwindigkeit vorhanden.

Bei diesen von Anfang an vollkommen identischen Bedingungen für die Frequenzreglung durch beide Reglerarten bleibt nur ein Widerspruch aufzuklären: Man setzte bei Einführung des Beschleunigungsreglers grosse Hoffnungen auf die zweifellos schnellere Reaktion [5] des Beschleunigungsimpulses gegenüber dem Drehzahlimpuls des Kataraktreglers. Dabei setzte man als selbstverständlich voraus, dass der schneller reagierende Impuls nur kleinere Frequenzausschläge aufkommen lässt als der langsam reagierende Drehzahlimpuls des Kataraktreglers. Man muss deshalb fragen, warum und wohin der Vorteil der schnelleren Reaktion verschwindet, so dass sich nicht nur für die Stabilität, sondern auch für die Frequenzreglung Identität ergibt.

Wie Bild 5 zeigt, sind beide Reglerarten hinsichtlich Laständerung und Drehzahländerung, die direkt nach dem Laststoss einsetzt, gleichen Bedingungen unterworfen. Der Beschleunigungsregler rechts reagiert schlagartig durch einen zur Beschleunigung proportionalen Reglerhub. Das bedeutet aber nicht eine ebenso sprungweise Bewegung des Servomotors, sondern nur, dass dieser sich sogleich mit einer zur sprungweisen Oeffnung proportionalen Verstellgeschwindigkeit in Bewegung setzt. Hier wird also die sprungweise

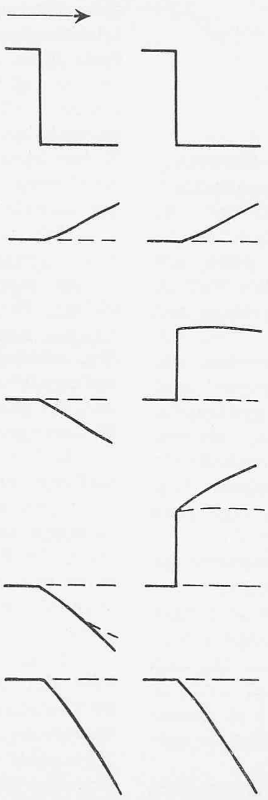

Bild 5. Erklärung der identischen Frequenzreglung für den Kataraktregler trotz schnellerer Reaktion des Beschleunigungsreglers.

Reglerbewegung des Beschleunigungsimpulses durch die Stellzeit des Servomotors verzögert, die zur Wahrung der Stabilität nötig ist. Anders beim Kataraktregler links. Hier folgt der Katarakt und seine Rückführung nur der Drehzahl. Die Drehzahl und damit der Rückführhub des Katarakts ändern sich nicht sprungweise. Es setzt aber mit einem Knick sofort ein zur Beschleunigung proportionaler Drehzahlanstieg ein, dem nicht nur die Rückführung folgt, sondern wie direkt gekuppelt auch der Servomotor. Die Umwandlung des Sprungs in der Belastung in einen Knick beim Hubverlauf des Servomotors, die sich beim Kataraktregler im Drehzahlverlauf manifestiert, vollzieht sich beim Beschleunigungsregler zwischen den Hüben von Steuerventil und Servomotor. Die Verstellbewegung des Servomotors kann dadurch beim Kataraktregler genau wie beim Beschleunigungsregler sofort mit einer zur Beschleunigung proportionalen Geschwindigkeit gemäss Gleichung (13) einsetzen. Die beim Beschleunigungsregler für die Stabilität notwendige Verzögerung zwischen Steuerventil und Servomotor kann beim Kataraktregler ganz wegfallen, weil bei ihm die stabilisierende Verlangsamung im Katarakt liegt. Beide Reglerarten lösen also gemäss Bild 5 und den Gleichungen (13) (14) genau die gleichen Verstellbewegungen des Servomotors aus und ergeben deshalb identische Frequenzreglung.

Der Widerspruch, dass der schneller reagierende Beschleunigungsregler die Frequenz nicht besser regelt als der langsamer reagierende Kataraktregler, erklärt sich einfach so, dass der Beschleunigungsregler seinen Vorsprung verliert, weil man hier in den Servomotor eine stabilisierende Verlangsamung einlegen muss. Umgekehrt holt der Kataraktregler seine verzögerte Reaktion dadurch wieder ein, dass sein Servomotor dem Katarakt augenblicklich folgt. Könnte, wie z. B. bei Dampfturbinen, ohne Rücksicht auf Wassermassen der Servomotor auch beim Beschleunigungsregler dem Steuerorgan beliebig schnell folgen, so liesse sich seine schnellere Reaktion für eine Verbesserung der Frequenzreglung ausnützen.

Durch den Nachweis, dass beide Reglerarten den gleichen Anfangsbedingungen unterworfen sind, ergibt sich die identische Reaktion des Servomotors auf Belastungsänderungen. Da in diesem Teil des Reglerkreises Drehzahl — Servomotorbewegung keine Unterschiede bestehen, müssen die nachfolgenden ohnehin übereinstimmenden Vorgänge: Aenderung der Wassermenge, der Leistung, der Drehzahl auch gleich verlaufen. Das ist die Erklärung für die Gesetzmässigkeit der Schwingungstheorie, dass der ganze Schwingungsverlauf, also auch die Maximalausschläge, identisch sind, wenn wie nachgewiesen Identität nicht nur für die charakteristischen Gleichungen, sondern auch für die Anfangsbedingungen vorliegt. Auch wenn die charakteristischen Gleichungen übereinstimmen, die Anfangsbedingungen dagegen abweichen würden, wäre der Verlauf der Frequenzreglung verschieden. Mit der theoretischen Untersuchung stimmt die Tatsache überein, dass mit dem Kataraktregler eine bisher unübertroffene Frequenzreglung erreicht wird.

6. Einfluss der Schwungmassen auf die Frequenzreglung

Um den Einfluss herabgesetzter Schwungmassen auf die Frequenzreglung abzuschätzen, gehen wir von den Stabilitätskurven, Bilder 1 bis 4, aus. Damit man den Minimumpunkt des Beschleunigungsreglers in Bild 4 auch bei kleiner Schwungmasse (T_a) einhält, muss die Ordinate unverändert bleiben. Dies geschieht, indem die kleinere Schwungmasse (T_a) durch die grössere Stellzeit ($\tau' = T_s$) kompensiert wird, wobei ihr Produkt $\tau' T_a$ sich nicht verändert, das Produkt also eine Konstante ist. Bezeichnet man diese Konstante mit c^2, *so gilt:*

(15) $\tau' T_a = c^2 \quad T_a = c^2 : \tau'$

Aus Identitätsgründen gilt für den Kataraktregler genau das gleiche, wobei hier $\tau' T_a = \delta_t T_i$ ist.

Für den ungedämpften grössten Schwingungsausschlag wurden früher [1] unter vereinfachten Voraussetzungen Näherungswerte bei sprungweiser und gleichförmiger Belastungsänderung abgeleitet. Sie gelten für die hier massgebende schmale Regulierzone, in der der Servomotor seine maximale Verstellgeschwindigkeit nicht erreicht. Dabei zeigt sich, dass bei sprungweiser Belastungsänderung die Anlaufzeit T_a im Nenner auftritt. Aus der Gleichung (15) ergibt sich der ungedämpfte maximale Ausschlag

(16) $$\frac{\varphi_{\max}}{\lambda} \sim \sqrt{\frac{\delta T_s}{T_a}} = \sqrt{\frac{\tau'}{T_a}} = \sqrt{\frac{\tau'^2}{c^2}} = \frac{\tau'}{c}$$

bei kleinen sprungweisen Belastungsänderungen

(17) $$\varphi_{\max} \sim \frac{\delta T_s}{T_0} = \frac{\tau'}{T_0}$$

bei gleichförmig linearer Belastungsänderung

Bei der gleichförmigen Belastungsänderung Gleichung (17) ist vorausgesetzt, dass der zeitliche Leistungsverbrauch der Zentrale zunächst konstant, also horizontal, ist und mit einem Knick in eine geneigte Gerade übergeht. T_0 wäre die Zeit, die bei einer derartigen Neigung notwendig wäre, um den ganzen Leistungsbereich der Zentrale von 0 bis Vollast zu durchlaufen. Aber auch bei einem Leistungsdiagramm mit vollkommen kontinuierlicher Verbrauchsänderung wird ein Ausschlag erzeugt, der zur Stellzeit τ' und ausserdem zur «Beschleunigung» der Verbrauchsänderung proportional ist [1]. Da also bei allen diesen Formeln der ungedämpfte Ausschlag proportional zur Stellzeit τ' zunimmt, steigen diese Ausschläge proportional zur Stellzeit, ganz unabhängig davon, wie sich das Leistungsdiagramm aus kleinen Leistungssprüngen, aus linear geneigten Teilen und aus ganz kontinuierlichen Uebergängen zusammensetzt.

Mit zunehmender Stellzeit bei gesenkter Schwungmasse wird aber auch die Dämpfung vom Zeitpunkt der Belastungsänderung bis zum Auftreten des ersten Frequenzausschlages schwächer, so dass die maximalen Frequenzzuschläge etwas stärker zunehmen als proportional mit der Stellzeit. Da sich dieser Einfluss nicht auf eine allgemeine Formel bringen lässt und nachgerechnete Beispiele ergeben, dass er in diesen Fällen nicht gross genug ist, um die Grössenordnung zu verändern, sei dies vernachlässigt.

Wenn man ausser der Anlaufzeit der Schwungmassen (T_a) auch diejenige der Wassermassen (T_l) ändert und dabei immer im Optimumpunkt mit der Ordinate y_{opt} bleibt, so gilt:

$$\frac{\tau' T_a}{T_l^2} = y_{\text{opt}} = \text{const}$$

(18) $$\frac{\varphi_{\max}}{\lambda} \sim \sqrt{\frac{\tau'}{T_a}} = \sqrt{y_{\text{opt}} \frac{T_l^2}{T_a^2}} = \text{const} \times \frac{T_l}{T_a}$$

Im Optimumpunkt sind demnach sowohl die Frequenzausschläge als auch die Einstellgrössen des Reglers vom Verhältnis $T_l : T_a$ abhängig.

Für den Einfluss der Schwungmassen (GD^2) auf die Frequenzhaltung gilt also:

Um bei Herabsetzung der Schwungmassen den optimalen Regelvorgang aufrecht zu erhalten, ist die Stellzeit $\tau' = \delta_t T_i \equiv \delta T_s$ im umgekehrten Verhältnis zu erhöhen, und die Frequenzausschläge steigen angenähert proportional mit der Stellzeit.

Ergebnisse

1. Mit der optimalen Reglereinstellung wird sichergestellt, dass man die kürzeste praktisch realisierbare Abklingzeit auch unter den Betriebsbedingungen, bei denen die Selbstreglung des Netzes am schwächsten ist, mit der geringsten Steigerung der verlangsamenden Stellzeit τ' des Regelvorgangs erreicht. Das ergibt hinsichtlich Frequenzreglung den besten Regelvorgang und beseitigt die Unsicherheit über die zweckmässigste Einstellung der verschiedenen Reglergrössen.

2. Um bei gleich guter Abklingzeit zur Verbilligung der Generatoren die Schwungmassen (GD^2) senken zu können, muss man die verlangsamende Stellzeit τ' im umgekehrten Verhältnis steigern; und die Frequenzamplituden nehmen beim automatischen Regelvorgang angenähert proportional zur Stellzeit τ' zu. Die optimale Reglereinstellung gestattet also, die Senkung des GD^2 mit der günstigsten Frequenzreglung zu erreichen.

3. Die praktisch beste Abklingzeit $T_{1/10}$, in der die ursprünglichen Ausschläge auf $1/10$ abgeklungen sind, ist zehnmal grösser als die Anlaufzeit T_l der Wassermassen.

4. Beim Kataraktregler ist vorteilhaft, dass es für eine der Reglergrössen, die temporäre Statik, eine eindeutige optimale Einstellung gibt. Diese ist aus den zum voraus bekannten Zeitkonstanten für Wassermassen und Schwungmassen durch eine einfache Formel (11) bestimmbar, und man kann sie unabhängig vom Grad der Selbstreglung beibehalten. Das ist vorteilhaft, weil die Selbstreglung nicht zum voraus bekannt, schwer messbar und je nach den Betriebsbedingungen des Netzes verschieden ist. Ebenso einfach lässt sich dann bei verschiedenen Betriebsbedingungen die schwächste Selbstreglung feststellen, indem man, ohne die Einstellung der temporären Statik zu berühren, nur durch vermehrtes Oeffnen oder Schliessen der Drosselöffnung des Kataraktes die jeweils kürzeste Isodromzeit für schnelles Abklingen einstellt, wodurch man die optimale Einstellung bei schwächster Selbstreglung findet.

Beim Beschleunigungsregler kann man keine der beiden Reglergrössen unabhängig vom Selbstreglungsgrad konstant halten, sondern man muss, um optimale Bedingungen herzustellen, bei stärkerer Selbstreglung beide im gleichen Verhältnis nach Gleichung (12) heruntersetzen. Es ist also bei den wiederholten Versuchen unter verschiedenen Betriebsbedingungen die Zeitkonstante am Beschleunigungsregler und die Stellzeit zu verändern, was jedesmal Massnahmen am Steuerorgan des Servomotors erfordert.

5. Die Einführung des Begriffs der optimalen Reglereinstellung ermöglicht unter Berücksichtigung von Selbstreglung und Abklingzeit, ohne Aufstellung von Differentialgleichungen und ohne Kurvenablesungen mit einfachsten Formeln die Einstellwerte zu finden, die nicht als rohe Annäherung mit zahlreichen Vernachlässigungen, sondern als Endergebnis aller dieser Untersuchungen den besten Regelvorgang sicherstellen.

6. Hinsichtlich kurzem Abklingen (gute Stabilität) verhält sich der moderne Kataraktregler identisch wie der Beschleunigungsregler, wobei die verlangsamende Stellzeit des Regelvorgangs beim Kataraktregler praktisch ganz in den Katarakt verlegt wird, beim Beschleunigungsregler ganz in den Servomotor. Nur auf dieser Grundlage richtig konstruierte Regler beider Systeme geben einen gültigen Vergleich.

7. Der Kataraktregler ermöglicht heute eine weitergehende Senkung des GD^2 als der Beschleunigungsregler, weil sich die Stellzeit des Katarakts unbegrenzt steigern lässt, während der notwendigen Steigerung der Stellzeit des Servomotors beim Beschleunigungsregler durch den Einfluss der Unempfindlichkeit Grenzen gesetzt sind.

8. Die Notwendigkeit, die Stellzeit immer mehr zu steigern, um das GD^2 herabsetzen zu können, erklärt sich daraus, dass die Trägheit der Wassermassen nicht nur eine Verzögerung erzeugt, wie sie auch bei anderen Regelproblemen auftritt, sondern geradezu eine Reaktion in verkehrter Richtung, wie bei einem in falschem Wirkungssinn eingeschalteten Regelglied. Durch hohe Stellzeiten muss die verkehrte Reaktion der Wassermassen so verlangsamt werden, dass sie sich auch bei herabgesetztem GD^2 durch Schwungmassen und Selbstreglung kompensieren lässt.

9. Die Grenzen für die Senkung der Schwungmassen sind durch den Einfluss steigender Stellzeit auf die hiermit angenähert proportional zunehmenden Frequenzausschläge des automatischen Regulierbetriebes gesetzt. Kataraktregler und Beschleunigungsregler ergeben identische Frequenzreglung. Die als Vorteil geltende schnellere Reaktion des Beschleunigungsreglers geht dadurch wieder verloren, dass sein Servomotor zur Wahrung der Stabilität dem Steuerventil nur langsam folgen darf. Der langsamer, nicht sprungweise reagierende Katarakt holt die Verspätung wieder ein, weil sein Servomotor dem Katarakt augenblicklich folgt.

Literaturnachweis:

[1] *Stein:* Regelung und Ausgleich in Dampfanlagen, Springer 1926.
[2] *Stein:* Selbstreglung, ein neues Gesetz der Regeltechnik. «Z. VDI» 1928, Nr. 6
[3] *Stein:* Energiewirtschaft. Springer 1935.
[4] *Stein:* Systematik der Reglerarten. «Escher Wyss Mitteilungen» 1940, S. 56.
[5] *Gaden:* Considérations sur le problème de la stabilité. Lausanne 1945.
[6] *Alméras:* Influence de l'inertie d'eau sur la stabilité d'un groupe hydro-électrique. «La Houille Blanche» 1946.
[7] *Stein:* Drehzahlreglung von Flugzeug-Triebwerken. SBZ Bd. 127, S. 295*, 309*, 323* (Juni 1946).
[8] *Stein:* Vereinfachte Primärreglung der Uebergabeleistung. «Bulletin des SEV» 1946, Nr. 3.
[9] *Hirt und Seeberger:* Der Escher Wyss-Leistungsregler. «Bulletin des SEV» 1948, Nr. 22.
[10] *Stein:* Drehzahlreglung der Wasserturbinen. SBZ 1947, Nr. 39, 40, 41.
[11] *Stein:* L'optimum nella regolazione delle turbine idrauliche. «L'Energia Elettrica» 1951, Nr. 4.