Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 65 (1947)
Heft: 41

Artikel: Drehzahlregelung der Wasserturbinen
Autor: Stein, Th.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-55964

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: 27.12.2025

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

das Schaffen Hubers kennzeichnend war: durch und durch solid, geistreich, aber ohne Bluff, klar, eindeutig, zielbewusst und bei aller, auf dem Bewusstsein des eigenen Könnens ruhenden Sicherheit absolut bescheiden, sich als Diener eines grösseren wissend. Alle diese Züge verrät ganz deutlich auch die Denkmalanlage in Flüelen. Wir brauchen sie nur mit Denkmälern grosser Männer des 19. Jahrhunderts zu vergleichen, um zu sehen, wie stark hier der Personen-Kult zurückgegangen ist. Nicht auf der mit Pomp ins Zentrum gerückten, verehrungswürdigen Persönlichkeit — wie in jenen Werken — ruht hier der Akzent, sondern sozusagen auf ihrem eigentlichen, inneren Wesen, das durch seine Wirkungen zu den Zeitgenossen sprach und durch das Denkmal zur Nachwelt reden wird.

Trefflich zusammengefasst halten zwei Inschriften auf den Seitenfächen des Obelisken für all die Zehntausende junger und alter Touristen, die hier des Weges kommen, die Bedeutung Emil Hubers und seines Lebenswerks fest:

Auf der Seeseite:	Auf der Gotthardseite:
EMIL HUBER-STOCKAR	DIE ELEKTRIFIZIERUNG /
ENTWICKELTE UND	DIE WASSERKRAFT
ERPROBTE VON 1902—1909	UNSERER BERGE NUTZEND /
AUF DER VERSUCHSSTRECKE	MACHT DIE SCHWEIZER
SEEBACH - WETTINGEN	BAHNEN UNABHAENGIG
AUS EIGENER INITIATIVE	VON DER KOHLE /
DIE TECHNISCHEN	SIE IST EIN BEITRAG
GRUNDLAGEN DES	ZUR BEWAHRUNG
ELEKTRISCHEN BETRIEBES	UNSERER FREIHEIT /
DER SCHWEIZER BAHNEN /	MAENNER MIT TATKRAFT /
UEBERLEGEN UND	WEITBLICK UND HINGABE
MIT ZAEHER ENERGIE	HABEN SIE GESCHAFFEN /
PLANTE UND LEITETE ER	EMIL HUBER-STOCKAR
DIE ELEKTRIFIZIERUNG	WAR EINER DER ERSTEN
DER GOTTHARDLINIE UND	UNTER IHNEN / SEIN DIENST
ANDERER HAUPTSTRECKEN	AN UNSEREM LANDE
DER BUNDESBAHNEN /	SEI UNS BEISPIEL
SEIN NAME BLEIBT MIT	UND VERPFLICHTUNG
DIESEM GROSSEN WERK	
DER TECHNIK VERBUNDEN	

Im «SEV-Bulletin» vom 26. Juli d. J. wird einlässlich berichtet über die Entstehungsgeschichte des Denkmals, zu dem die Anregung noch von Altmeister Wyssling ausgegangen ist. Die Durchführung ist den gemeinsamen Anstrengungen des SEV und der SBB zu danken, vor allem den Kollegen Obering. A. Dudler (Zürich), Kreisdirektor C. Lucchini und Arch. A. Ramseyer (Luzern), A. Kleiner, A. Traber, A. Winiger und W. Bänninger. Eine grosse Zahl einschlägiger Dokumente ist im Denkstein eingemauert worden. Am 5. Juli d. J. hat seine Einweihung stattgefunden, an der nebst den offiziellen Persönlichkeiten auch eine schöne Anzahl ehemaliger Mitarbeiter Emil Hubers, sowie natürlich seine Familienangehörigen teilnahmen. Die trefflichen Festreden finden sich in der gleichen Nummer des SEV-Bulletin und belegen nocheinmal, warum uns Emil Huber-Stockar als Mensch und Ingenieur teuer ist und noch mancher Generation zum Vorbild dienen wird! W. J.

Drehzahlreglung der Wasserturbinen

Von Dipl. Ing. TH. STEIN, Escher Wyss A.-G., Zürich DK621.24—531.6

(Schluss von S. 547)

XI. Verschärfte Abklingbedingungen

Es ist wichtig festzustellen, wie weit man die Bedingungen für die Reglerkonstanten verschärfen muss, um nicht nur die Stabilitätsgrenze zu erreichen, sondern einen praktisch brauchbaren Regelvorgang zu erhalten.

Als Mass für die praktische Dauer eines Regelvorgangs hat der Verfasser die Abklingzeit $T_{1/10}$ eingeführt [3], [4], in der eine Belastungsänderung auf $^1/_{10}$ abgeklungen ist. Diese Zeit wurde für Reglergleichungen 2. Ordnung durch direkte Auflösung der Differentialgleichung berechnet. Für Gleichungen höherer Ordnung hat *Lüthy* [8] für die Bestimmung der Abklingbedingungen eine vektorielle Methode entwickelt.

In unserem Fall liegt eine lineare Differentialgleichung 3. Ordnung vor, deren charakteristische Gleichung durch Formel (47) dargestellt ist; sie lässt sich vereinfacht wie folgt schreiben:

$$w^3 + a w^2 + b w + c = 0 \tag{53}$$

Sie hat die Lösungen:

$$y = c_1 e^{w_1 t} + c_2 e^{w_2 t} + c_3 e^{w_3 t} \tag{54}$$

Praktisch werden immer gedämpfte Schwingungen auftreten, was der Fall ist, wenn von den drei Lösungen von w je zwei konjugiert komplex und nur die dritte reell ist.

$$w_1 = p_1 + q i \qquad w_2 = p_1 - q i \qquad w_3 = p_3$$

$$y = e^{p_1 t} (c_1 \cos \omega t + c_2 \sin \omega t) + c_3 e^{p_3 t} \tag{55}$$

Damit die Faktoren $e^{p_1 t}$ und $e^{p_3 t}$ in der Zeit $T_{1/10}$ auf den Wert $^1/_{10}$ abklingen, gilt [3], [4]

$$^1/_{10} = e^{-p T_{1/10}}; \quad T_{1/10} = \frac{ln\, ^1/_{10}}{p} = -\frac{ln\, 10}{p} = -\frac{2{,}3}{p} \tag{56}$$

Hierdurch ist bekannt, welche negative Grösse die Realteile p der Lösungen von w haben müssen, damit eine vorgeschriebene Abklingzeit eingehalten wird.

Für die Stabilitätsgrenze ist die Abklingzeit $T_{1/10} = \infty$ und die Realteile $p = 0$. Ist irgend ein Realteil p positiv, so wird

$$e^{p t} > 1$$

die Schwingungen nehmen zu, die Reglung wird unstabil.

Ohne Auflösen der charakteristischen Gleichungen lassen sich nach *Hurwitz* [2] die Stabilitätsbedingungen bestimmen, d. h. die Bedingungen, die einzuhalten sind, damit keine Realteile $p > 0$ sind. Für die Gleichung (53) gelten als

$$\textit{Stabilitätsbedingungen} \begin{cases} a b > c \\ a > 0 \qquad b > 0 \qquad c > 0 \end{cases} \tag{57}$$

Nach *Salzmann*[1]) kann man aus diesen Stabilitätsbedingungen Abklingbedingungen ableiten, wenn man die Forderung stellt, dass die Realteile p der Lösungen nicht nur negativ also < 0 sein müssen, sondern dass sie einen festgesetzten Mindestwert einhalten. Es ist dann

Stabilitätsbedingung	Abklingbedingung
(57 a) $p < 0$	(57 b) $p < -\alpha$

Wir setzen für w

$$w = -\alpha + u \tag{58}$$

Wenn nun u die obigen Stabilitätsbedingungen (57) erfüllt, also seine Realteile $p < 0$ sind, so müssen die Realteile von w alle $< -\alpha$ sein, also die gewollte Abklingbedingung einhalten. Durch Einsetzen von Gleichung (58) in (53) erhält man für u

$$\begin{cases} u^3 + a' u^2 + b' u + c' = 0 \\ a' = a - 3\alpha \\ b' = b - 2 a \alpha + 3 \alpha^2 \\ c' = c - b \alpha + a \alpha^2 - \alpha^3 \end{cases} \tag{60}$$

Da u die Stabilitätsbedingungen (57) erfüllen muss, damit w die gewollte Abklingbedingung einhält, gilt für die Faktoren der charakteristischen Gleichung von u

$$a' b' > c'; \; a' > 0; \; b' > 0; \; c' > 0 \tag{61}$$

Da zur Einhaltung der Abklingzeit nach (57 b) $p < -\alpha$ sein soll, wird nach Gleichung (56)

$$T_{1/10} = -\frac{2{,}3}{p} = \frac{2{,}3}{\alpha}; \; \alpha = \frac{2{,}3}{T_{1/10}} \tag{62}$$

Durch Einsetzen von a', b', c' ergibt sich als

$$\begin{cases} \textit{Abklingbedingungen für charakteristische Gleichungen} \\ \textit{3. Grades} \\ a b - 2 \alpha a^2 + 8 \alpha^2 a - 2 \alpha b - 8 \alpha^3 - c > 0 \\ \text{oder} \\ a b > c + 2 \alpha [(a - 2 \alpha)^2 + b] \\ a > 3 \alpha \\ b > 2 a \alpha - 3 \alpha^2 \\ c > b \alpha - a \alpha^2 + \alpha^3 \\ \alpha = \dfrac{2{,}3}{T_{1/10}} \end{cases} \tag{63}$$

Die charakteristischen Gleichungen (45), (46) erhalten nach Einsetzen von $e_s = 0$ (keine Selbstreglung) und Division durch den Faktor von w^3 die Form:

[1]) Von Dr. *F. Salzmann*, Zürich, mündlich mitgeteilt.

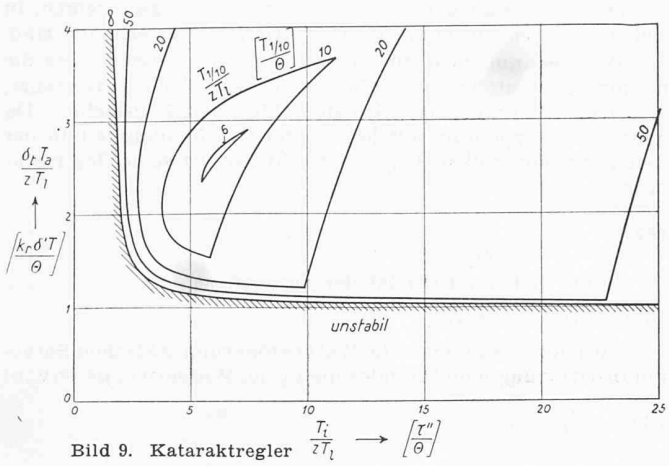

Bild 9. Kataraktregler

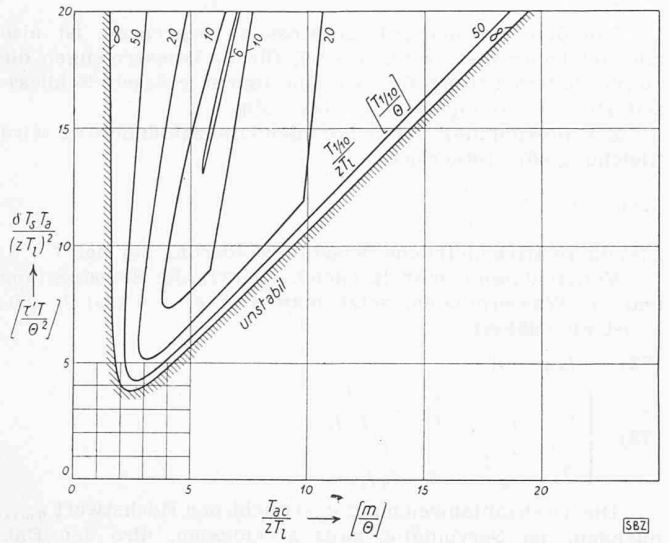

Bild 10. Beschleunigungsregler

Einfluss der Reglerkonstanten auf die Abklingzeit bei Selbstreglung $e_s = 0$. Die kleinste Abklingzeit $T_{1/10}$ ist etwa das Zehnfache der Anlaufzeit T_l der Wassermassen. Mit zunehmenden Reglerkonstanten δ_t und δT_s nimmt die Abklingzeit $T_{1/10}$ zunächst ab, um dann wieder grösser zu werden. Aus den Kurven lässt sich ferner die günstigste Zuordnung der Reglerkonstanten δ_t, T_i oder δT_s, T_{ac} bestimmen.

$$
(64)\quad \begin{cases} \textit{Kataraktregler} \\ w^3 + \underbrace{\frac{2}{\delta_t T_a}\left(\frac{\delta_t T_a}{z T_l} - 1\right)}_{a} w^2 + \underbrace{\frac{2}{\delta_t T_i T_a}\left(\frac{T_i}{z T_l} - 1\right)}_{b} w - \\ - \underbrace{\frac{2}{z \delta_t T_i T_a T_l}}_{c} = 0 \end{cases}
$$

$$
(65)\quad \begin{cases} \textit{Beschleunigungsregler} \\ w^3 + \underbrace{\frac{2 z T_l}{\delta T_s T_a}\left(\frac{\delta T_s T_a}{(z T_l)^2} - \frac{T_{ac}}{z T_l}\right)}_{a} w^2 + \\ + \underbrace{\frac{2}{\delta T_s T_a}\left(\frac{T_{ac}}{z T_l} - 1\right)}_{b} w + \underbrace{\frac{2}{z \delta T_s T_a T_l}}_{c} = 0 \end{cases}
$$

Man setzt wiederum dimensionslose Verhältniswerte nach Tabelle 7 ein und führt in beiden Fällen ein:

$$
(66)\quad \alpha_0 = \alpha z T_l = \frac{2{,}3}{T_{1/10}} z T_l = \frac{2{,}3}{c_0}
$$

Tabelle 7. Verhältniswerte

	Katarakt-Regler	Beschleunigungs-Regler
Ordinate a_0	$\frac{\delta_t T_a}{z T_l}$	$\frac{\delta T_a T_s}{(z T_l)^2}$
Abszisse b_0	$\frac{T_i}{z T_l}$	$\frac{T_{ac}}{z T_l}$
Parameter c_0	$T_{1/10}/z T_l$	$T_{1/10}/z T_l$

Durch Einsetzen von a_0, b_0, c_0 und a, b, c in die Abklingbedingungen (63) lassen sich die allgemein gültigen Abklingbedingungen der Kurven Bild 9 und 10 aufstellen.

Man erkennt, dass es nur bei den Stabilitätsbedingungen ($T_{1/10}/z T_l = \infty$) zulässig ist, die Isodromzeit T_i bei stärkerer temporärer Statik δ_t immer kleiner zu machen. Daraus darf man *nicht den Fehlschluss ziehen, dass mit wachsender Temporärstatik der Regelvorgang unbegrenzt schneller abklingt.* Bei einer bestimmten Isodromzeit, z. B. $T_i/z T_l = 5$, sinkt die Abklingzeit $T_{1/10}/z T_l$ zunächst stark, um dann mit weiter steigender Statik wieder zuzunehmen. Dies wurde praktisch wiederholt beobachtet und hat zu einer Unsicherheit über das richtige Mass der einzuhaltenden Werte geführt, die sich durch die zahlenmässige Klarstellung mit Hilfe der vorliegenden Kurven beheben lässt. Beim Beschleunigungsregler findet mit zunehmender Schliesszeit T_s die gleiche Umkehr statt.

Man erkennt ferner, dass die Abklingzeit $T_{1/10}$ immer ein bedeutendes Vielfaches der Wasser-Anlaufzeit T_l sein muss und zwar bei beiden Reglerarten. Die verschiedenen Abklingbedingungen (63) grenzen das Feld einer bestimmten Abklingzeit $T_{1/10}/z T_l$ von allen Seiten derart ein, dass z. B. ein Wert von 5 überhaupt nicht mehr erreichbar ist. Es ist also *unmöglich, die Abklingzeit bei grösseren Wasseranlaufzeiten beliebig herunterzusetzen.* Da praktisch immer mit einem gewissen Spielraum zu rechnen ist, kann als brauchbare Regel gelten, dass die kürzeste Abklingzeit zehnmal grösser ist als die Wasseranlaufzeit.

Sowohl die Verschlechterung der Abklingzeit durch zu grosse Temporärstatik als auch die Unmöglichkeit, den Vorgang beliebig schnell abklingen zu lassen, erklären sich beide wohl folgendermassen:

Um die Druckstösse besser abklingen zu lassen, muss man langsamer regulieren (grosse Temporärstatik δ_t oder Schliesszeit T_s). Das verschleppt den Regelvorgang in zunehmendem Masse, bis sich durch diese Verschleppung die Abklingzeit wieder erhöht. Mathematisch ausgedrückt wird z. B. in Formel (55) p_1 stärker negativ, bedingt also ein schnelleres Abklingen, während p_3 schwächer negativ wird, was das Abklingen dieses Summanden hinauszögert, bis der Dämpfungsfaktor mit p_3 schlechter wird als der mit p_1.

Aus diesen Gründen ist es auch nicht gleichgültig, wie man die beiden Reglergrössen δ_t und T_i beim Kataraktregler sowie T_s und T_{ac} beim Beschleunigungsregler zuordnet. Die Kurven gestatten die *günstigste Zuordnung* zu bestimmen, um mit der geringsten Steigerung der Reglerkonstanten, also der kleinsten Verschleppung in das überhaupt erreichbare *beste Abklinggebiet* vorzudringen.

Entscheidend wichtig ist, dass auch beim besten Abklingen und ohne Selbstreglung, der Anlaufzeit T_a der Schwungmassen keine absolute Bedeutung zukommt. Beim Kataraktregler kommt es auf das Produkt $\delta_t T_a$ an, beim Beschleunigungsregler auf $T_a T_s$. Wenn man also δ_t oder T_s im gleichen Mass zunehmen lässt, wie die Schwungmassen T_a kleiner werden, so erreicht man genau die gleichen Abklingbedingungen. *Auch die schärfsten Abklingbedingungen lassen sich also grundsätzlich mit beliebig kleinen Schwungmassen erreichen, wenn dadurch die Stellzeit $\tau' = \delta_t T_i \equiv \delta T_s$ nicht zu gross wird.*

Es ist hierzu notwendig, auf viel höhere Stellzeiten überzugehen, als sie bisher üblich waren. Während man bisher Stellzeiten von z. B. 3 s für die äusserst zulässige Grenze hielt, haben Versuche mit Wasserturbinen, die isoliert vom übrigen Netz über Drehstromgeneratoren elektrische Oefen praktisch ohne Selbstreglung zu versorgen hatten, ergeben, dass mit einer Frequenzhaltung, die für diesen Fall befriedigte, die Stellzeit auf ein Vielfaches gesteigert werden konnte. Es traten allerdings durch die längere Stellzeit Periodenabweichungen bis zu einigen Zehnteln auf, was für den Ofenbetrieb zulässig, aber für ein allgemeines Netz unerwünscht wäre. Im grossen Netz ist aber eine Selbstreglung vorhanden und die prozentualen Laständerungen sind kleiner und stetiger. Weitere Versuche werden Aufschluss darüber geben, wie weit für bestimmte Anforderungen an die Frequenzhaltung die Stellzeit gesteigert werden darf, ob andere

Tabelle 8. Verschärfung der Reglerbedingungen durch bestes Abklingen und Hilfe durch Selbstreglung bei extrem kleinen Schwungmassen

Annahmen: Wasseranlaufzeit $T_l = 3$ s, Anlaufzeit der Schwungmassen $T_a = 3$ s, Stellzeit $\tau' = \delta_t T_l \equiv \delta T_s$. Die Verschärfung, durch die man bestes Abklingen erreicht, macht nur einen Bruchteil (2/18) der Verbesserung durch Selbstreglung aus.

	Selbstreglungs-Konstante e_s	Stellzeit τ' s	Verhältnis-Wert
Bestes Abklingen ($T_{l/10} = 30$ s)	0	22	2
Stabilitätsgrenze ($T_{l/10} = \infty$)	0	11	
Stabilitätsgrenze ($T_{l/10} = \infty$)	5	0,6	18

Stellzeiten beim Uebergang vom isolierten zum allgemeinen Parallelbetrieb einzuhalten sind und wie sich die Selbstreglung aktivieren lässt.

Als Anhaltspunkt für das Ausmass, in dem die Stellzeit durch verschärfte Abklingbedingungen verlängert und durch Selbstreglung verkürzt wird, diene das extreme Beispiel, Tabelle 8, das nach den Kurven, Bilder 7 bis 10, bestimmt ist. In Netzen treten nach Tabelle 3 Selbstreglungskonstanten bis 5 auf und es ist grundsätzlich möglich, bedeutende Selbstreglungskonstanten bei Versorgung isolierter Verbraucher künstlich durch Spannungsreglung zu erzeugen. Die Tabelle 8 zeigt also an Hand der Verhältniswerte der Stellzeiten, dass die *Erschwerung durch die Forderung bester Abklingzeiten nur einen Bruchteil der Verbesserung durch Selbstreglung ausmacht.*

XII. Korrektur der Kurvenwerte

Die Kurvenwerte Bilder 7 bis 10 geben zahlenmässigen Aufschluss über den günstigen Einfluss der Selbstreglung und die Erschwerung durch verschärfte Abklingbedingungen. Diese Werte sind zu vergleichen mit den bereits bekannten für die Stabilitätsgrenze (Abklingzeit unendlich) ohne Selbstreglung. Man findet hierfür in Bild 8 und 10 in Uebereinstimmung mit *Alméras* [10] für den Optimumpunkt der Ordinate den Wert 3,74. Durch Berücksichtigung der hier vernachlässigten Kompressibilität des Wassers und der Elastizität der Rohrleitung findet *Gaden* [9], dass bei hohen Gefällen strengere Bedingungen einzuhalten sind. Er stellt ferner fest, dass bei Stabilitätsversuchen mit Kaplan-Turbinen, wo diese Einflüsse bedeutungslos sind, sich auch bei theoretisch fehlender Selbstreglung die Turbinen günstiger als berechnet verhalten. Eine Erklärung dafür wäre, dass selbst ein vollkommen exakter Spannungsregler nicht augenblicklich Konstanz der Spannung herstellt und dass in der Zwischenzeit Spannungsabweichungen selbstregelnd wirken.

Wenn auch die Abweichungen der experimentellen Werte von den errechneten und der Einfluss des Gefälles so gross sind, dass man sie durch Korrekturfaktoren berücksichtigen muss, so ist doch der in den Kurven zahlenmässig klargestellte Einfluss von Selbstreglung und Abklingzeit nach dem Beispiel Tabelle 8 um ein Vielfaches grösser.

Der grösste Teil der Streuung durch abweichende Selbstreglung und Abklingzeit, die bei bisherigen Statistiken über experimentell bestimmte Stabilitätswerte bestand, lässt sich dadurch beheben. Von einer Statistik der bei verschiedenen Gefällen festgestellten Korrekturfaktoren der Kurven Bilder 7 bis 10 ist deshalb eine wesentlich geringere Streuung zu erwarten.

XIII. Abschalt-Garantien

Man kann ohne Bedenken wesentlich grössere *Drehzahlausschläge beim Abschalten* zulassen als bisher. Es hat keinen Sinn, die Wasserturbinen so auszubilden, dass sie der Durchbrenndrehzahl standhalten und aus traditionellen Gründen diesen sicheren Bereich nicht stärker für den Abschaltvorgang auszunützen. Damit schafft man unnütz eine Schranke für die Herabsetzung der Schwungmassen. Wenn es gelingt, die Stabilität mit den kleinsten Schwungmassen zu erreichen, die konstruktiv zulässig sind, sollte diese Entwicklung nicht durch Abschaltgarantien verhindert werden, denen nur mit grösseren Schwungmassen genügt werden kann.

Die nachfolgenden vereinfachten Ableitungen zeigen, in welcher Grössenordnung die Garantiewerte zu erhöhen sind.

Wie bekannt wird zur Begrenzung des Druckstosses die maximale Verstellgeschwindigkeit durch Blenden begrenzt, also eine noch zulässige kleinste Schliesszeit T_s gesichert. Da dann der Servomotor mit konstanter Geschwindigkeit in der Zeit T_s um den vollen Hub $\mu = 1$ schliesst, ist seine Geschwindigkeit

$$(67) \qquad \dot{\mu} = -\frac{1}{T_s}$$

Nach Gleichung (8) ist der Druckstoss

$$(68) \qquad \varphi_h = -\dot{\mu}_h T_l$$

Vernachlässigt man die Zeitverzögerung zwischen Servomotorbewegung μ und Aenderung μ_h der Wassermenge, so wird

$$(69) \qquad \dot{\mu}_h \backsim \dot{\mu} = -\frac{1}{T_s}$$

$$(70) \qquad \textit{Maximaler Druckstoss } \varphi_{h\,\max} \backsim \frac{T_l}{T_s}$$

Um den maximalen Druckstoss zu begrenzen, ist also mit steigender Wasseranlaufzeit T_l für die Wassermengen, die durch die Rohrleitung fliessen, eine immer grössere Schliesszeit (bzw. Oeffnungszeit) T_s notwendig.

Zur Bestimmung der maximalen Drehzahländerung wird Gleichung (67) integriert:

$$(71) \qquad \mu = \lambda - \frac{t}{T_s}$$

λ ist die relative plötzliche Belastungsänderung zur Zeit $t = 0$.

Vernachlässigt man in Gleichung (22) die Selbstreglung und die Wassermassen, setzt man also $e_s = 0$ und $T_l = 0$, so ist angenähert

$$(72) \qquad T_a \dot{\varphi} \backsim \mu$$

$$(73) \qquad \begin{cases} \dot{\varphi} = \dfrac{\mu}{T_a} = \dfrac{\lambda}{T_a} - \dfrac{t}{T_a T_s} \\ \varphi = \dfrac{\lambda}{T_a} t - \dfrac{1}{2} \dfrac{t^2}{T_a T_s} \end{cases}$$

Die Drehzahlabweichung φ erreicht den Höchstwert $\varphi_{\max}$, nachdem der Servomotor ganz geschlossen, also den Entlastungsgrad λ durchlaufen hat. Dies geschieht nach Gleichung (71) in der Zeit t_1, in der $\mu = 0$ wird, also

$$(75) \qquad 0 = \lambda - \frac{t_1}{T_s} \qquad t_1 = \lambda T_s$$

In Gleichung (73) eingesetzt, wird

$$\varphi_{\max} = \frac{\lambda^2 T_s}{T_a} - \frac{1}{2} \frac{\lambda^2 T_s^2}{T_a T_s} = \frac{\lambda^2}{2} \frac{T_s}{T_a}$$

Für die kritische Vollastabschaltung $\lambda = 1$ ist

$$(76) \qquad \textit{Maximaler Drehzahlausschlag } \varphi_{\max} \backsim \frac{T_s}{2\,T_a}$$

Nur die Steuerung, die die durch die Rohrleitung fliessenden Wassermengen beeinflusst, muss langsam arbeiten, damit kein Druckstoss entsteht. Verwendet man bei Freistrahlturbinen Strahlablenker und bei Francisturbinen Druckregler, die einen Teil der Rohrleitungswassermenge von der Turbine fernhalten, so kann man ohne Einfluss auf den Druckstoss die Schliesszeit T_s der Turbine beliebig heruntersetzen. Hier steigt deshalb der Drehzahlausschlag $\varphi_{\max}$ nur durch kleiner werdende Schwungmassen (T_a), bei Kaplanturbinen und bei Francisturbinen ohne Druckregler, aber ausserdem durch die notwendige Verlängerung der Schliesszeit T_s bei grösserer Wasseranlaufzeit.

Um für Kaplanturbinen und Francisturbinen ohne Druckregler einen Ueberblick zu gewinnen, welche Abschaltgarantien zuzulassen sind, um trotz grosser Wasseranlaufzeiten T_l mit kleinen Schwungmassen auszukommen, wird T_s aus Gleichung (70) in (76) eingesetzt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass man T_s für die Uebertouren $\varphi_{\max}$ auf den Servomotorhub $m_{1/1}$, für den Druckstoss $\varphi_{h\,\max}$ auf m_0 zu beziehen hat (siehe Bild 2). Es wird dann

$$(77) \qquad \begin{cases} \textit{Maximaler Drehzahlausschlag für Kaplanturbinen und für Francisturbinen ohne Druckregler} \\ \varphi_{\max} = \dfrac{T_l}{2\,\varphi_{h\,\max}\,T_a} \dfrac{m_{1/1}}{m_0} \end{cases}$$

Als extremes Beispiel sei eine Kaplanturbine angenommen, bei der die Anlaufzeit T_a der Schwungmassen nicht grösser ist als die der Wassermassen (T_l), d. h. z. B. $T_a = T_l = 3$ s. Als maximaler Druckstoss werde $\varphi_{h\,max} = 35\,\%$ zugelassen. Der Vollasthub $m_{1/1}$ sei 75 % des ganzen Servomotorhubes m_0. Es ist dann nach Formel (77)

$$\varphi_{max} = \frac{T_l}{2\,\varphi_{h\,max}\,T_a}\,\frac{m_{1/1}}{m_0} = \frac{3 \cdot 0{,}75}{2 \cdot 0{,}35 \cdot 3} = 107\,\%$$

Da φ_{max} die Uebertouren darstellt, steigt die Drehzahl auf das 2,07 fache der normalen, was aber zulässig ist, da die Durchbrenndrehzahl solcher Turbinen oft viel höher liegt.

XIV. Eingriff des Schaltwärters

Die zunehmende *Verlängerung der Stellzeiten*, die bei grösseren Wasseranlaufzeiten nötig ist, *behindert bei den heutigen Reglern den Eingriff des Schaltwärters* in steigendem Mass.

Für das Parallelschalten, die Frequenzhaltung und die Lastverteilung sollte der Schaltwärter die Regler über die Verstellmotoren möglichst schnell und exakt nachstellen können. Mit wachsender Stellzeit wird aber dieser Eingriff immer langsamer und durch das Nachschleichen der Verstellbewegung des Servomotors unexakt. Selbst wenn man nur wenigen Maschinen des Netzes die Frequenzhaltung anvertraut, indem man sie mit kleinerer permanenter Statik als die übrigen Maschinen arbeiten lässt, erfordert doch der geordnete Parallelbetrieb, dass man praktisch nicht unter z. B. 2 % permanente Statik, also 1 ~, geht. Diese Maschinen müssen dann aber, um das ganze Netz auszuregeln, ihren vollen Leistungsbereich durchlaufen können. Ohne Eingriff des Schaltwärters würde dann das Frequenzband 1 ~ breit statt z. B. 0,1 ~, die man für gute Frequenzhalter anstrebt. *Die Güte der Frequenzhaltung hängt deshalb in hohem Mass davon ab, wie schnell und exakt die Maschine dem Eingriff des Schaltwärters folgt. Das kann der Erhöhung der Stellzeit eine weitere Schranke setzen, die es zu beseitigen gilt.*

Bei den heutigen Reglern fällt die Reaktion des Servomotors auf den Eingriff des Schaltwärters mit zunehmender Stellzeit des Reglers nur deshalb schlechter aus, weil die Verstellmotoren auf den Regler selbst verstellend einwirken. Die Verstellbewegung des Servomotors folgt deshalb dem Eingriff erst nach der durch die Stellzeit gekennzeichneten Verzögerung.

So notwendig es ist, bei erschwerten Bedingungen den automatischen Regler mit langer Stellzeit einwirken zu lassen, damit der Reglerkreislauf nicht unstabil wird, fällt diese Bedingung für den Handeingriff vollständig weg. Die automatische Steuerung durch den Drehzahlregler stellt einen geschlossenen Schwingungskreis dar: Drehzahlregler-Servomotor - Aenderung der Wassermenge - Beschleunigung der Schwungmasse - Drehzahländerung - Drehzahlregler, der wieder auf den Ausgangspunkt zurückführt. Hier gilt das Schwingungsgesetz, dass der Regler auf den Servomotor nur verlangsamt einwirken darf, weil sonst die Wassermassen durch Druckstoss zu einem Ueberregeln führen. Beim Handeingriff wirkt dagegen der Endeffekt, die Drehzahländerung, nicht auf die willkürlich von Hand veränderte Einstellgrösse zurück. Die Handverstellung bedingt also, ähnlich wie eine äussere Laständerung im Netz, nur ein Anschwingen des Drehzahlreglerkreises. Die Stabilität eines Reglerkreises wird aber durch die Heftigkeit dieses Anschwingens nicht beeinflusst. Man kann also den Regler mit der für die Stabilität notwendigen langsamen Verstellgeschwindigkeit den Servomotor betätigen lassen und trotzdem *die Handeingriffe ohne Beeinträchtigung dieser Stabilität unter Wegfall jeder Verschleppung zwischen Verstellmotor und Servomotor durchführen.*

Besonders einfach ist dies nach Bild 4 und 5 beim Kataraktregler erreichbar, weil bei den heutigen Bauarten der Servomotor praktisch ohne Verzögerung den Bewegungen des Hauptsteuerschiebers folgt. Es genügt also, den Handeingriff direkt auf den Hauptsteuerschieber wirken zu lassen.

Beim Beschleunigungsregler arbeitet der Hauptservomotor langsam, um dadurch die notwendige Stellzeit für den automatischen Regelvorgang zu erreichen. Statt dessen kann man den Servomotor so schnell wie beim Kataraktregler betätigen und nach Bild 6 den Handeingriff auf den Hauptsteuerschieber einwirken lassen, wenn die zur Stabilität notwendige Verzögerung des automatischen Regelvorgangs in die Vorsteuerung verlegt wird. Diese Methode wurde bei Leistungsreglern erprobt. Hier war es notwendig, durch besonders grosse Stellzeiten nicht nur dem Druckstoss, sondern auch der Unempfindlichkeit entgegenzuwirken, was durch eine Vorsteuerung mit grosser Stellzeit erreicht wurde.

XV. Zusammenfassung

Je grösser die Anlaufzeit T_l der Wassermassen ist, umso verspäteter folgt die Aenderung der Wassermenge und der Turbinenleistung den Verstellbewegungen des Servomotors. Wenn dazu noch durch die Fortschritte der Schnelläufigkeit die Schwungmassen (T_a) kleiner werden, folgt die Drehzahländerung umgekehrt immer schneller der Leistungsänderung. Ein Ueberregeln lässt sich dann nur so vermeiden, dass man durch grössere Stellzeiten τ' die Drehzahl nur langsam auf den Servomotor einwirken lässt. Das ist der einfache physikalische Inhalt der Stabilitätsbedingungen.

Es sind Wege zu suchen, um nicht aus Stabilitätsgründen auf die erreichbare Senkung der Schwungmassen verzichten zu müssen. Es genügt dabei nicht, wenn die Maschine nur im Parallelbetrieb mit dem allgemeinen Netz stabil ist und es ist nicht geboten, sich auf die Stabilitätsreserve der älteren parallellaufenden Maschinen zu verlassen.

Für die Ueberwindung der Schranken, die die Regelvorgänge der weiteren Senkung des Maschinengewichtes der Wasserturbinen entgegensetzen, ergibt sich aus den Untersuchungen folgendes:

1. Mit der mathematischen Methode lassen sich allgemeingültige dimensionslose Kurven aufstellen, die zahlenmässigen Aufschluss darüber geben, wie stark die Selbstreglung den Regelvorgang unterstützt und in welchem Mass die Reglung durch die Forderung nach Abklingen in einer bestimmten Zeit erschwert wird. Die dimensionslosen Grössen zeigen, auf welche Verhältniswerte es allein ankommt, um die Regler den stark abweichenden Bedingungen des Einzelfalles in der Praxis anzupassen.

2. Die Selbstreglung durch Drehzahländerung ist viel wirksamer als bei Dampfturbinen, weil man beim Katarakt-Regler temporär mit viel grösserer Drehzahlstatik arbeitet und beim Beschleunigungsregler mit bedeutend langsameren Verstellbewegungen als bei Dampfturbinen. Ferner wächst die Selbstreglung genau wie der Druckstoss, dem sie entgegenzuwirken hat, proportional mit der Belastung. Die Selbstreglung ist also bei allen Belastungen gleich wirksam und bei reichlichen Selbstreglungskonstanten und hoher Belastung so stark, dass es aus Stabilitätsgründen zulässig wäre, ganz ohne Schwungmassen auszukommen (Vollstabilität).

3. Die Abklingzeit lässt sich nicht beliebig verkürzen, sie ist praktisch mindestens rd. zehnmal länger als die Wasseranlaufzeit. Reichliche Selbstreglung hilft in viel höherem Mass als das Vordringen von der Stabilitätsgrenze bis zur kürzesten Abklingzeit den Regelvorgang erschwert. Grössere temporäre Statiken beim Kataraktregler und längere Schliesszeiten beim Beschleunigungsregler verbessern den Regelvorgang nicht unbegrenzt, vielmehr findet eine Umkehr zu wieder längeren Abklingzeiten statt. Auch für die Zuordnung von Reglerkonstanten des gleichen Reglers untereinander (δ_t, T_i, T_s, T_{ac}) gibt es günstigste Werte, die sich durch die Kurven bestimmen lassen.

4. Beim Kataraktregler gestattet die Verzögerung durch den Katarakt, den Hauptservomotor seinem Steuerventil beliebig schnell folgen zu lassen. Das hindert nicht, den Druckstoss durch Begrenzung der grössten Verstellgeschwindigkeit mit Hilfe einer Blende zu begrenzen. Durch grössere Steuerventile und kleinere Blenden hat sich der Uebergang zum «idealen» Kataraktregler vollzogen, der schon bei kleinsten Steuerhüben die maximale Verstellgeschwindigkeit herstellt. Beim astatischen Kataraktregler braucht man den Katarakt nicht durch eine Rückführung zu betätigen. Beim Beschleunigungsregler muss die notwendige Zeitverzögerung zwischen dem Regler und dem Servomotor wirksam sein.

5. Bei gleichen Stellzeiten $\tau' = \delta_t\,T_i \equiv \delta\,T_s$ verhalten sich Kataraktregler und Beschleunigungsregler hinsichtlich Stabilität und Abklingen identisch. Bei beiden Reglerarten gilt, dass sich auch bei grossen Wasseranlaufzeiten T_l eine Stabilität mit beliebig kleinen Schwungmassen (T_a) erreichen lässt, wenn die Stellzeiten für eine gute Frequenzhaltung nicht zu gross werden.

6. Lange Stellzeiten verschlechtern bei den heutigen Reglern die Frequenzhaltung zusätzlich, indem sie in steigendem Mass den Eingriff des Schaltwärters behindern. Diese Schranke für die Steigerung der Stellzeiten lässt sich beseitigen, indem man durch den Verstellmotor direkt das Steuerventil eines schnellwirkenden Servomotors betätigt. Beim Beschleunigungsregler ist hierzu die notwendige Verzögerung zwischen Regler und Servomotor in eine Vorsteuerung zu verlegen.

7. Zur Reduktion der Schwungmassen sind höhere Garantiewerte für die Drehzahlabweichungen beim Abschalten zuzulassen.

8. Grosse Stellzeiten, die gestatten, mit kleinen Schwungmassen auszukommen, verschlechtern die Frequenzhaltung. Im grossen Netz wird meist genügend Selbstreglung vorhanden sein, um mit den konstruktiv notwendigen Schwungmassen der Stabilität sowohl wie der Frequenzhaltung durch mässige Stellzeiten zu genügen. Isolierte Netze mit reiner Widerstandlast erfordern die längsten Stellzeiten, wenn man die Spannung konstant hält. Die Ansprüche an die Frequenzhaltung sind aber gering. Da es sich um wenige Maschinen handelt, ist es aussichtsreich, durch übereinstimmende Spannungsreglung aller Maschinen nach einem Spannungs-Drehzahlgesetz die Selbstreglung künstlich zu aktivieren, ohne dass eine bestimmte Spannungszone nach oben oder unten überschritten wird. Für Fälle, in denen die Maschinen zeitweise isoliert und zeitweise auf das allgemeine Netz arbeiten, kann es zweckmässig sein, mit verschiedenen Stellzeiten zu arbeiten, die sich leicht umschalten lassen.

Unter Anwendung aller dieser Mittel wird durch Versuche festzustellen sein, wie weit sich bei verschiedenen Belastungsarten und Netzbedingungen Stabilität mit hinreichend guter Frequenzhaltung vereinbaren lässt, ohne dass es notwendig wird, zusätzliche, konstruktiv nicht notwendige Schwungmassen zu verwenden.

MITTEILUNGEN

Pfeilerkraftwerke gestern und heute. Zu dem auf S. 374* lfd. Jgs. (No. 27 vom 5. Juli) erschienenen Aufsatz sind von der Alpen-Elektrowerke A.-G., Wien, einige Mitteilungen eingetroffen, die als Ergänzung und teilweise als Berichtigung des erwähnten Artikels von Interesse sein dürften. Die Alpen-Elektrowerke A.-G. hat in den letzten Jahren, in der Reihenfolge der Flussrichtung nach betrachtet, folgende vier Draukraftwerke gebaut: Schwabeck, Leistung 60000 kW, Lavamünd, 22000 kW, Unterdrauburg, 22000 kW, Marburg 50000 kW. Abgesehen von der erstgenannten Anlage handelt es sich um «Pfeilerkraftwerke». Lavamünd liefert Energie seit April 1944, Unterdrauburg seit dem Herbst 1943. Bei beiden Werken fehlt jedoch noch die dritte Maschinengruppe. Das Kraftwerk Marburg steht noch nicht im Betrieb. Seit der Durchführung der Grenzregulierung im Jahre 1945 liegen die beiden Kraftwerke Schwabeck und Lavamünd auf österreichischem, die Werke Unterdrauburg (Dravograd) und Marburg (Maribor) auf jugoslavischem Boden. E. Stambach

Stadtplanung in Zlin (Tschechoslowakei). Die überraschende Entwicklung der mährischen Ortschaft Zlin — im letzten Jahrhundert noch ein beschauliches Kleinstädtchen, heute ein bedeutendes Industriezentrum — ist in der Augustnummer von «Architectural Record» eindrucksvoll dargestellt. Es ist ein Musterbeispiel für ein Stadtwachstum nach Plan, und zwar sowohl bezüglich Industrie- wie Wohnbezirken. Alle Bauten sind weitgehend standardisiert und wirken deshalb wohl stellenweise etwas monoton, sind aber dafür hygienisch und billig

Volkshochschule des Kantons Zürich. Die Vorlesungen beginnen am 20. Oktober. Wir weisen auf folgende Titel hin: Weltbild der modernen Physik, Formprobleme der Plastik, Graphische Künste, Renaissance-Kunst, Bundesverfassung der Schweiz, Zivilgesetzbuch, Wirtschaftswissenschaft, Luftverkehr. Alles Nähere ist zu erfahren durch das Sekretariat, Münsterhof 20, Zürich; Tel. 23 50 73.

Persönliches. Montag, den 13. Okt. feiert Prof. Dr. F. Hess seinen 60. Geburtstag. Dem von allen seinen Schülern um seines persönlichen Einsatzes willen hochgeschätzten Architektur-Dozenten der E.T.H., der von Modeströmungen unbeirrt seinen Weg gegangen ist, gilt auch unser Glückwunsch!

Eidg. Technische Hochschule. Als Privatdozenten haben sich auf den Beginn des Wintersemesters 1947/48 habilitiert: Ing. Eduard Gerecke von Zürich für Elektrische Stromrichter, Dr. Otto Gübeli von Goldingen (St. Gallen) für Wasseranalyse und Ing. Dr. Nikolaus Rott von Budapest (Ungarn) für theoretische Aerodynamik.

NEKROLOGE

† Prof. Dr. Max Planck ist am 4. Oktober 1947 im hohen Alter von 89 Jahren in Göttingen gestorben. Sein Wirken auf dem Gebiet der Thermodynamik und der Wärmestrahlung stellten damals einen der bedeutendsten Wendepunkte in der Geschichte der Physik dar. Ein Nachruf folgt.

WETTBEWERBE

Gesellschaftshaus der Drei E. Gesellschaften Kleinbasels und Hotel am Obern Rheinweg (Bd. 128, S. 261). In einem Wettbewerb entschied das Preisgericht unter 38 rechtzeitig eingegangenen Entwürfen wie folgt:

1. Preis (6000 Fr.) Arbeitsgemeinschaft F. Rickenbacher u. P. Tittel, Architekten
2. Preis (5000 Fr.) Tibère Vadi, Architekt, Zürich
3. Preis (3200 Fr.) Burckhardt, Wenk & Co.
4. Preis (3000 Fr.) Bercher & Zimmer u. K. Weber, Architekten
5. Preis (2800 Fr.) F. Vischer u. G. Weber, Architekten

Ankäufe: 4000 Fr. Bräuning, Leu, Dürig, Architekten; 2000 Fr. G. Panozzo, Arch.; je 1000 Fr. Groeflin & Muralda, Architekten, A. Gürtler, Architekt, Leo Cron, Architekt, J. Ungricht, Architekt, Zürich.

Fachleute im Preisgericht: R.-R. Dr. F. Ebi, Dr. h. c. G. Bohni, die Architekten W. Kehlstadt, A. Hoechel, O. Jauch, M. Kopp, P. Trüdinger. Die Ausstellung der Entwürfe findet in der Basler Halle der Schweizer Mustermesse in Basel statt vom Montag, den 6. Okt. bis Sonntag, den 19. Okt. 1947; Oeffnungszeiten täglich 10 bis 12 und 14 bis 18 h.

Gemeindehaus und Schulhauserweiterung in Plan les Ouates, Kt. Genf. Im Preisgericht dieses Wettbewerbs, zu dem sechs Entwürfe eingereicht worden sind, sassen als Fachleute die Architekten A. Bordigoni, H. Lesemann, E. Martin, Kantonsbaumeister G. Lacôte und als Ersatzmann Stadtplanchef Ing. A. Bodmer. Das Urteil lautet:

1. Preis (1200 Fr.) P. Braillard, Genf
2. Preis (800 Fr.) J. Riedlinger, Collonge-Bellerive
3. Preis (400 Fr.) J.-J. Mégevand, Genf

Ausserdem erhielt jeder Teilnehmer 600 Fr. Entschädigung.

Für den Textteil verantwortliche Redaktion:
Dipl. Ing. W. JEGHER, Dipl. Masch.-Ing. A. OSTERTAG
Zürich, Dianastr. 5. Tel. 23 45 07

VORTRAGSKALENDER

11. Okt. (Samstag). Schweiz. Vereinigung für Gesundheitstechnik. 14.15 h im Casino, Stadthausstr. 119 in Winterthur. Generalversammlung, anschliessend Vortrag von Dr. *W. Sulzer*, eidg. Fabrikinspektor: «Arbeitshygiene, eine soziale und wirtschaftliche Notwendigkeit».

12. Okt. (Sonntag). Schweiz. Vereinigung für Gesundheitstechnik. 8.15 h im Casino Winterthur, Dr. *H. Jaeckli*, Geologe, Zürich: «Temperaturen von Quellen und Grundwasser und ihre geologische und hygienische Interpretation», anschliessend Dir. *Ch. Herter*, Montreux: «Les mesures d'hygiène indispensables à envisager pour le moins dans un service de distribution d'eau potable de peu d'importance».

15. Okt. (Mittwoch). Basler Ing. und Arch.-Verein. 20.30 h im Rest. Kunsthalle, I. Stock. Dr. *A. v. Salis*, Bern: «Amerikanische Bahnhofbauten und ihre Zusammenhänge».

18. Okt. (Samstag). Schweiz. Elektrotechn. Verein. 9.30 h Salle des Conférences, 2, Av. de la gare, Neuenburg. 11. Hochfrequenztagung. *W. Klein*, Ing. bei der Gen.-Direktion der PTT, Bern: «Systeme der Ultrakurzwellen-Mehrkanal-Telephonie». Dr. *F. Staub*, Institut für Hochfrequenztechnik an der E.T.H., Zürich: «Bedeutung und Anwendung von Frequenzweichen bei Ultrakurzwellen-Mehrkanal-Systemen». *G. Guanella*, Ing. bei Brown Boveri & Cie. A.-G., Baden: «Entwicklungen der Firma Brown Boveri auf dem Gebiete der Ultrakurzwellen-Mehrkanal-Uebertragungen».

18. Okt. (Samstag). Nordostschweiz. Verband Schiffahrt Rhein-Bodensee, St. Gallen. 11.15 h Generalversammlung im Rathaussaal in Frauenfeld, anschliessend Vortrag: Dir. *C. Blattner*, Aluminiumwerke A.-G., Rorschach: «Wirtschaftliche Gesichtspunkte zur Rhein-Bodensee-Schiffahrt». 14.15 h Strombaudirektor Dr. e. h. *Konz*, Stuttgart: «Neues Projekt für einen Schiffahrtskanal vom Bodensee zur Donau».