

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 65 (1947)
Heft: 40

Artikel: Drehzahlregelung der Wasserturbinen
Autor: Stein, Th.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-55957>

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: 04.02.2026

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

Drehzahlreglung der Wasserturbinen

Von Dipl. Ing. TH. STEIN, Escher Wyss A.-G., Zürich DK 621.24—531.6
(Fortsetzung von S. 535)

VI. Rückführkatarakt

Bei dieser häufigsten Katarakt-Bauart, Bild 4, wird der Katarakt durch eine Rückführung angetrieben. Früher wurde die Rückführung immer von der tatsächlichen Bewegung des Hauptservomotors abgeleitet, heute oft, wie dargestellt, von einer Vorsteuerung, die praktisch ohne Zeitverzögerung arbeitet. Da hier auch die Verstellzeit des Hauptservomotors vernachlässigbar klein sein soll, kann man die ganze Verbindung zwischen Katarakt und Servomotor als festes Gestänge ansehen. Die Relativabweichungen des Kataraktzyinders entsprechen also denen des Servomotors, multipliziert mit dem Uebersetzungsverhältnis β , das Beschleunigungsgrad genannt wird.

Der Kataraktkolben drückt die Zug-Druckfeder um den Betrag Δx zusammen. Bezeichnet man mit x_{\max} den Katarakthub, so wird

$$(23) \quad \sigma = \frac{\Delta s}{x_{\max}} = \beta \mu; \quad (24) \quad \xi = \frac{\Delta x}{x_{\max}}$$

Wenn man der «maximalen» Federkraft, die beim Zusammendrücken um den Katarakthub x_{\max} entsteht, den Wert 1 gibt, so ist die effektive Federkraft $\xi = \frac{\Delta x}{x_{\max}}$. Die Zeit, die der Katarakt braucht, um unter dieser konstant gedachten Federkraft den Katarakthub zu durchlaufen, ist die Isodromzeit T_i . Die «maximale» Geschwindigkeit w_{\max} und die bei kleineren Abweichungen Δx auftretenden Geschwindigkeiten w sind

$$w_{\max} = \frac{x_{\max}}{T_i}; \quad w = \frac{\Delta x}{T_i} = \xi \frac{x_{\max}}{T_i}$$

Der Oeldurchfluss durch die Kataraktblende, der den Druckunterschied zu beiden Seiten des Kataraktkolbens erzeugt, ist dem Geschwindigkeitsunterschied w zwischen den Bewegungen von Δs und Δx proportional, also

$$\Delta s - \Delta x = w = \xi \frac{x_{\max}}{T_i}$$

$$\dot{\sigma} - \dot{\xi} = \beta \dot{\mu} - \dot{\xi} = \frac{\dot{\xi}}{T_i}$$

$$(25) \quad T_i \beta \dot{\mu} = T_i \dot{\xi} + \dot{\xi}$$

Hieraus lässt sich die Isodromzeit praktisch bestimmen, indem man mit festgeklemmter Rückführungsverbindung ($\beta = 0$) einen Ausschlag x_{\max} von Hand erzeugt.

Für $\beta = 0$ gilt

$$T_i \dot{\xi} + \dot{\xi} = 0$$

$$\dot{\xi} = -t/T_i$$

Zur Zeit $t = T_i$ ist

$$\xi = e^{-1} = 1/e = 37\%$$

Die Isodromzeit T_i ist also die Zeit, in der ein Kataraktausschlag auf 37 % seines Anfangswertes abgeklungen ist. Dabei kann man jeden beliebigen praktisch bequem einstellbaren Anfangswert zu Grunde legen. Man erhält immer den gleichen Wert von $T_i = x_{\max}/w_{\max}$, weil mit dem Ausschlag sich sowohl der Katarakthub x_{\max} als auch die Federspannung und mit ihr die Anfangsgeschwindigkeit w_{\max} proportional ändern.

Beim idealen Kataraktregler ohne Zeitverzögerungen, ausser im Katarakt selbst mit seiner Isodromzeit T_i , ist das Steuerventil praktisch immer in der Beharrungslage, also in der gezeichneten Mittelstellung. Dann ist aber praktisch immer

$$(26) \quad \eta = \xi$$

Der ideale Kataraktregler darf mit der Zeitverzögerung Null im Servomotor arbeiten. Die Steuerung durchläuft dadurch nicht etwa plötzlich den ganzen Servomotorhub, sondern es stellt sich augenblicklich die Federspannung des Katarakts ein, die der Drehzahlabweichung entspricht. Diese Federspannung steuert den Katarakt und den Servomotor

mit der langsamsten, der Isodromzeit entsprechenden Verstellgeschwindigkeit. Man kann also die Anstiegstendenz der Verstellgeschwindigkeit des Servomotors mit dem Hub des Steuerventils beliebig steigern (Bild 3).

Bezeichnet man mit Δy_{\max} den Pendelhub, der dem Katarakthub Δx_{\max} entspricht und mit δ die zugehörige Drehzahlabweichung (Dynamik), ferner mit φ die momentane Drehzahlabweichung, so ist

$$(27) \quad \eta = \frac{\Delta y}{y_{\max}} = -\frac{\varphi}{\delta}$$

Das Minuszeichen gibt an, dass bei sinkender Drehzahl (negativ) auf Oeffnen, also auf vergrösserte positive Servomotoröffnung gesteuert wird. Es stellt sich also augenblicklich die Federspannung des Katarakts ein, die der Drehzahlabweichung $\eta = -(\varphi/\delta)$ entspricht.

Bei der Drehzahlabweichung, die der «Dynamik» δ entspricht, wird also die Kataraktfeder um den maximalen Hub x_{\max} des Katarakts zusammengedrückt, wobei die maximale Federspannung die maximale Verstellgeschwindigkeit im Katarakt herstellt. Wie bei den nachfolgenden Reglern ohne Rückführung ist also auch hier die Dynamik die relative Drehzahlabweichung zur Herstellung der maximalen Verstellgeschwindigkeit. Der Ausdruck Dynamik wird (zur Unterscheidung von der Statik) eingeführt, weil sie den dynamischen Regelvorgang kennzeichnet, bei dem die Abweichungen vom Beharrungszustand abklingen.

Durch Einsetzen von Gleichung (27) in Gleichung (25) und unter Beachtung von Gleichung (26) ergibt sich

$$(28) \quad T_i \beta \dot{\mu} + T_i \frac{\dot{\varphi}}{\delta} + \frac{\varphi}{\delta} = 0$$

Wenn man, wie üblich $\delta_t = \beta \delta$ als temporäre Statik bezeichnet, ergibt sich folgende

$$(29) \quad \begin{cases} \text{Steuergleichung beim Rückführkatarakt} \\ \delta_t T_i \dot{\mu} + T_i \dot{\varphi} + \varphi = 0 \end{cases}$$

VII. Reglerkatarakt ohne Rückführung

Man kann den Antrieb des Katarakts durch eine Rückführung weglassen und nach dem Vorbild der elektrischen Spannungsregler den Katarakt vom Regler selbst betätigen, wenn man einen Regler verwendet, der unabhängig von seiner Stellung die Drehzahlabweichungen misst (astatisch).

In Bild 5 ist hierfür schematisch ein Pendelregler angenommen, der nicht einer Feder, sondern einem Gewicht das Gleichgewicht hält. Bei diesem Regler bleibt bei Drehzahlabweichungen eine zu diesen proportionale Stellkraft auch dann erhalten, wenn der Regler eine andere Stellung eingenommen hat; ein Federregler dagegen übt keine Stellkraft mehr aus, wenn er sich so weit verstellt hat, dass er die Feder der Drehzahländerung entsprechend zusammendrückt.

Unabhängig von den Verstellhüben und nur proportional abhängig von der Drehzahlabweichung φ übt also der Regler durch die Feder auf den Katarakt eine Stellkraft aus, der der Kataraktkolben das Gleichgewicht hält.

Der Drehzahlabweichung δ (Dynamik), bei der die Feder um den maximalen Katarakthub x_{\max} zusammengedrückt wird, entspricht die maximale Verstellgeschwindigkeit w_{\max} des Kataraktkolbens. Bei dieser konstant gedachten Geschwindigkeit w_{\max} durchläuft der Kolben den Hub x_{\max} in der Isodromzeit T_i . Bei einer Drehzahlabweichung φ ist die Geschwindigkeit $w = w_{\max} \varphi/\delta$.

$$w_{\max} = \frac{x_{\max}}{T_i} \quad w = \Delta x = -\frac{\varphi}{\delta} \frac{x_{\max}}{T_i}$$

$$(30) \quad \frac{\Delta x}{x_{\max}} = \xi \quad \delta T_i \dot{\xi} = -\varphi$$

Das Minuszeichen gibt an, dass bei sinkender Drehzahl (negativ) der Regler auf Oeffnen steuert. In der (positiven) Oeffnungsrichtung wirkt die Steuerabweichung Δs , während die Kataraktabweichung Δx entgegenwirkt (negativ). Die Abweichung der Federlänge Δl ist also $\Delta l = \Delta s - \Delta x$ und im Verhältnis zum «maximalen» Federhub x_{\max}

$$(31) \quad \frac{\Delta l}{x_{\max}} = \frac{\Delta s - \Delta x}{x_{\max}} = \sigma - \xi$$

Da die Drehzahlabweichung δ den Federhub x_{\max} hervorruft, eine Abweichung φ den Hub Δl und der Regler bei sinkender Drehzahl (negativ) öffnet, ist anderseits

$$(32) \quad \frac{\Delta l}{x_{\max}} = -\frac{\varphi}{\delta} = \sigma - \xi$$

Von der Servomotorabweichung μ unterscheidet sich die Steueröffnung σ nur durch das Uebersetzungsverhältnis β , also

$$(33) \quad \sigma = \beta \mu$$

Durch Einsetzen wird, wenn man wiederum $\beta \delta$ als temporäre Statik δ_t bezeichnet

$$(34) \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{Steuergleichung beim Reglerkatarakt} \\ \delta_t T_i \dot{\mu} + T_i \dot{\varphi} + \varphi = 0 \end{array} \right.$$

Trotzdem der Katarakt ohne Rückführverbindung angenommen ist, entsteht genau die gleiche Steuergleichung wie beim Rückführkatarakt.

Versuche mit dem von Gantenbein und Hirt beschriebenen Regler [6], an dem die Rückführung ohne Beeinträchtigung der Stabilität ausser Betrieb gesetzt wurde, bestätigen die praktische Gültigkeit der abgeleiteten Beziehung.

VIII. Beschleunigungsregler

Ausser dem Drehzahlregler mit der relativen Reglerabweichung η_1 wirkt nach Bild 6 ein Beschleunigungsregler mit der Abweichung η_2 auf die gleiche Steuerung.

Bei der Drehzahlabweichung δ (Dynamik) soll der Drehzahlregler die maximale Verstellgeschwindigkeit des Servomotors herstellen; die relative Reglerabweichung ist dann $\eta_1 = 1$ und für kleinere Abweichungen φ gilt

$$(35) \quad \eta_1 = -\frac{\varphi}{\delta}$$

Das Minuszeichen besagt, dass die Steuerung mit sinkender Drehzahl öffnet.

Die gleiche maximale Verstellgeschwindigkeit des Servomotors soll durch die maximale Beschleunigung erzeugt werden, d. h. wenn die Drehzahl in der Beschleunigungszeit T_{ac} die Drehzahlzone δ durchläuft. Es ist dann

$$(36) \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{Relative maximale Beschleunigung} \\ \left(\frac{\Delta \omega}{\Delta t} \right)_{\max} / \omega = \frac{\Delta \omega_{\max}}{\omega} \frac{1}{T_{ac}} = \frac{\delta}{T_{ac}} \end{array} \right.$$

Für einen beliebigen Wert von ω und der relativen Abweichung $\varphi = d\omega/\omega$ gilt

$$(37) \quad \text{Beschleunigung } \frac{d(\Delta \omega)}{dt} / \omega = \frac{d}{dt} \frac{\Delta \omega}{\omega} = \dot{\varphi}$$

Die relative Reglerabweichung η_2 im Verhältnis zur maximalen ist also:

$$(38) \quad \eta_2 = -T_{ac} \frac{\dot{\varphi}}{\delta}$$

wobei das Minuszeichen wieder angibt, dass die Steuerung bei Verzögerung, also bei negativer Beschleunigung, öffnet.

Der Steuerhub σ entspricht der Summe beider Reglereinflüsse:

$$(39) \quad \sigma = \eta_1 + \eta_2 = -\frac{\varphi + T_{ac} \dot{\varphi}}{\delta}$$

Über die Vorsteuerung wird σ auf das Hauptsteuerventil übertragen. Der Drehzahlabweichung δ und dem Steuerhub $\sigma = 1$ ist die maximale Verstellgeschwindigkeit zugeordnet. Der Servomotor durchläuft dann in der Schliesszeit T_s seinen Vollasthub $m_{\max} = 1$

$$(40) \quad \dot{\mu}_{\max} = \frac{d}{dt} \frac{\Delta m}{m_{\max}} = \frac{m_{\max}}{T_s} \frac{1}{m_{\max}} = \frac{1}{T_s}$$

Die Verstellgeschwindigkeit wird der Steueröffnung σ proportional angenommen, also

$$(41) \quad \dot{\mu} = \frac{\sigma}{T_s}$$

Aus den Gleichungen (39) und (41) ergibt sich die

$$(42) \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{Steuergleichung beim Beschleunigungsregler} \\ \delta T_s \dot{\mu} + T_{ac} \dot{\varphi} + \varphi = 0 \end{array} \right.$$

IX. Identitätsbedingungen

Da die Gleichungen (22) der Massenbeschleunigung für alle Reglerarten gleich sind, ergeben sich schon aus den

Steuergleichungen allein die Identitätsbedingungen [9], [10], die einzuhalten sind, damit alle Reglerarten genau den gleichen Schwingungsgesetzen folgen.

Rückführ- oder
Kataraktregler $\delta_t T_i \dot{\mu} + T_i \dot{\varphi} + \varphi = 0$

Beschleunigungs-
regler $\delta T_s \dot{\mu} + T_{ac} \dot{\varphi} + \varphi = 0$

Identisch wenn (43) $\delta_t T_i \equiv \delta T_s$ und (44) $T_i \equiv T_{ac}$

Es ist nicht zulässig, den Katarakt als versteckten Beschleunigungsregler anzusehen, weil in den Steuergleichungen des Katarakts ebenso wie beim Beschleunigungsregler ausser der Drehzahlabweichung φ die Beschleunigung $\dot{\varphi}$ erscheint. Nicht die Beschleunigung ist das primäre und der Rückführkatarakt die sekundäre Abart, sondern beide stellen Mittel dar, die vom Regler gesteuerte Energiemenge, also den Steuereffekt auf den Regler zurückwirken zu lassen.

Die physikalischen Ursachen, warum ganz verschiedene Regler zu übereinstimmenden Regelvorgängen führen können, hat der Verfasser bei der Aufstellung der Grundgesetze für Regler in Dampfanlagen dargelegt [3]. Alle Regler haben die Aufgabe, Mengen zu steuern: mechanische oder elektrische Energiemenge, Wärmemenge, Wassermenge, Dampfmenge, Gasmenge, Kohlenmenge. Am leichtesten ist deshalb die Stabilität bei Mengenreglern herzustellen, bei denen die gesteuerte Menge selbst den Regler beeinflusst: Leistungsregler, Gasmengenregler. Die viel verbreiterteren Niveauregler (Drehzahlregler, Druckregler, Temperaturregler, Wasserstandregler, elektrische Spannungsregler) steuern auch Mengen, die aber der Regler gar nicht misst, sondern nur «verspätet» die Niveauänderung, die durch die Steuerung der Menge eintritt. Niveauregler können deshalb nur stabil regeln, wenn außerdem die Menge selbst die Steuerung beeinflusst. Der gleiche stabilisierende Effekt lässt sich aber durch die verschiedensten Arten der Mengenmessung erreichen, z. B.: durch eine Rückführung, die die gesteuerte Menge durch die Stellung des Servomotors misst, durch einen Beschleunigungsregler, einen Leistungsregler, durch Selbstreglung, durch einen Strömungs-Druckabfall in der Rohrleitung. Als allgemeine Ursache, warum verschiedene Reglerarten identischen Regelverlauf bewirken können, gilt also der Satz: *Die Steuerung von Mengen kann nur unter dem Einfluss der gesteuerten Mengen selbst stabil erfolgen. Verschiedene Methoden, die gesteuerte Menge auf die Steuerung zurückwirken zu lassen, können zu identischen Regelvorgängen führen.*

Gaden [9] fasst das Produkt $\tau' = \delta_t T_i \equiv \delta T_s$ zum Begriff «promptitude» zusammen. Um klarzustellen, dass diese Zeitkonstante τ' zunimmt, wenn man die Verstellbewegungen verlangsamt — sei es durch grössere Statiken δ_t , δ oder durch längere Zeiten T_i , T_s — wird die Zeitkonstante τ' hier *Stellzeit* genannt. Es gilt dann als Identitätsbedingung: *Kataraktregler und Beschleunigungsregler folgen identischen Bewegungsgesetzen, wenn die Isodromzeit T_i gleich gross ist, wie die Beschleunigungszeit T_{ac} und wenn beide Regler gleiche Stellzeit τ' haben. Die Anpassung an die ersetzwerten Stabilitätsverhältnisse ist also bei Einhaltung der Identitätsbedingungen von beiden Reglerarten genau gleich gut erreichbar.*

Beim Kataraktregler kann man die notwendige Verlangsamung, d. h. Erhöhung der Stellzeit durch die temporäre Statik δ_t und die Isodromzeit T_i erreichen, so dass es zulässig ist, beim idealen Kataraktregler ohne weitere Zeitverzögerung durch den Servomotor zu arbeiten. Dagegen muss man beim Beschleunigungsregler auch bei kleinsten Reglerabweichungen die Schliesszeit T_s als einzige verlangsamtende Variable stark heraussetzen, um Stabilität zu erreichen. Man darf also hier nicht wie beim Kataraktregler den Servomotor dem Regler ohne Zeitverzögerung folgen lassen.

Der Identität der Schwingungsgesetze beider Reglerarten widerspricht es nicht, dass Kataraktregler und Beschleunigungsregler auf plötzliche Belastungsänderungen anders ansprechen, weil im Augenblick der Störung für beide Reglerarten andere «Anfangsbedingungen» gelten. Dadurch werden die an sich identischen Schwingungssysteme anders erregt. Setzt man wiederum zur Vereinfachung Isodromregler voraus, so ist im Augenblick des Belastungsstosses vom früheren Beharrungszustand her die Solldrehzahl vorhanden. Der Drehzahlregler bleibt also zunächst in seiner Beharrungsstellung und spricht erst an, wenn die Drehzahl vom Beharrungswert

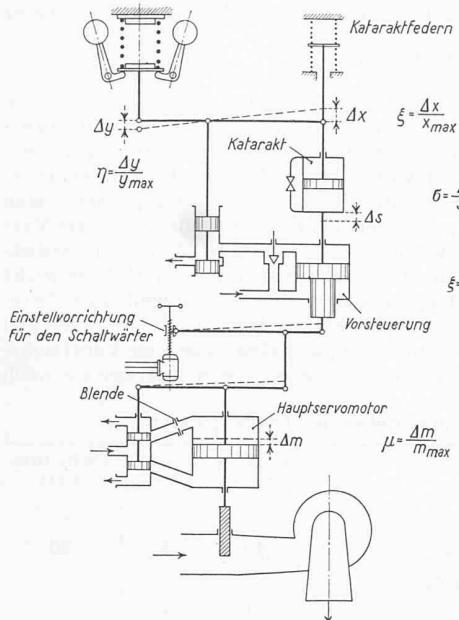


Bild 4. Drehzahlregler mit Rückführkatak. Die Vorsteuerung wirkt praktisch ohne Zeitverzögerung. Die Abweichung Δx des Kataraktkolbens ist also in jedem Augenblick so gross wie die Reglerabweichung Δy . Der Hauptservomotor kann der Vorsteuerung beliebig schnell folgen, da der Katarakt die zur Stabilität notwendige Verlangsamung der Regelung sichert. Der Schaltwärter kann ohne Verlangsamung durch den Katarakt direkt den schnellwirkenden Hauptservomotor verstetzen.

abgewichen ist. Dagegen erzeugt eine plötzliche Belastungsänderung im gleichen Augenblick eine Beschleunigung, durch die der Beschleunigungsregler den Servomotor in Bewegung setzt. Beim idealen Kataraktregler kann man aber nach Tabelle 2 den Steuerhub und damit die Drehzahländerungen, die notwendig sind, um die maximale Verstellgeschwindigkeit des Servomotors auszulösen, grundsätzlich beliebig reduzieren. Schon bei der kleinsten, praktisch bedeutungslosen Drehzahländerung löst also der ideale Kataraktregler wie der Beschleunigungsregler die maximale Verstellgeschwindigkeit des Servomotors aus. In grossen Netzen verlaufen ferner die Belastungsänderungen nicht sprungweise, sondern stetig. Es sind dann keine plötzlichen Belastungsänderungen vorhanden, also auch keine sprungweisen Beschleunigungen, auf die der Beschleunigungsregler ansprechen würde.

Daraus geht hervor, dass sich nicht nur hinsichtlich Stabilität, sondern auch bei Belastungsänderungen der ideale Kataraktregler und der Beschleunigungsregler praktisch gleich verhalten.

X. Hilfe der Selbstreglung

Es ist festzustellen, in welchem Ausmass die Selbstreglung hilft, welche Faktoren ihren Einfluss steigern und durch welche Mittel sie sich dort künstlich einschalten lässt, wo sie von Natur aus fehlen würde.

Für beide Reglerarten stellen sowohl die Steuergleichungen (29), (34) und (42) als auch die Gleichungen der Massenbeschleunigung (22) Beziehungen zwischen Drehzahl φ und Servomotorstellung μ her. Durch Eliminieren von μ entstehen folgende Gleichungen:

	Kataraktregler	Beschleunigungsregler
$\ddot{\varphi}$	$w^3 c_0 \quad 0,5 z \delta_t T_a T_l$	$0,5 z \delta T_s T_a T_l$
$+ \dot{\varphi}$	$w^2 c_1 (\delta_t T_i T_a +$ $+ 0,5 z z_0 e_s \delta_t T_i T_l -$ $- z T_i T_l)$	$(\delta T_a T_s +$ $+ 0,5 z z_0 e_s \delta T_s T_l -$ $- z T_{ac} T_l)$
$+ \dot{\varphi}$	$w c_2 (T_i + z_0 e_s \delta_t T_i - z T_l)$	$(T_{ac} + z_0 e_s \delta T_s - z T_l)$
$+ \varphi$	$z^2 c_3 1$	1

Die tabellarische Aufstellung der Faktoren von φ , $\dot{\varphi}$, $\ddot{\varphi}$ und φ gestattet den unmittelbaren Vergleich der beiden Reg-

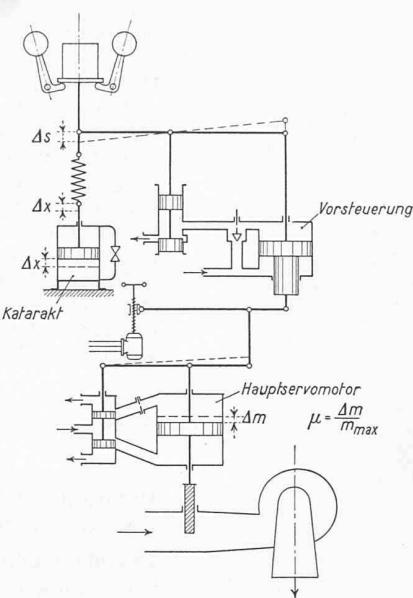


Bild 5. Reglerkatak ohne Rückführung. Ein astatischer Drehzahlregler, dessen Stellkraft bei Abweichung der Drehzahl unabhängig von seiner Stellung erhalten bleibt, gibt mit Katarakt ohne Rückführung genau den gleichen Regelverlauf wie der Regler Bild 4.

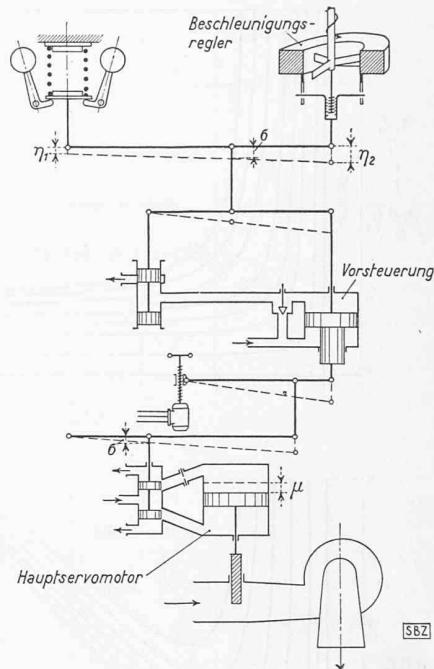


Bild 6. Beschleunigungsregler zur Ergänzung des Drehzahlreglers. Die Vorsteuerung folgt der Summe der Reglerhübe von Drehzahlregler und Beschleunigungsregler. Die zur Stabilität notwendige Verlangsamung des Regelvorganges geschieht, indem man die Verstellgeschwindigkeit des Hauptservomotors oder der Vorsteuerung herabsetzt.

ler und den Übergang zu den charakteristischen Gleichungen mit w^3 , w^2 , w , 1.

$$(47) \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{Nach Hurwitz [2] gilt für die charakteristische Gleichung } c_0 w^3 + c_1 w^2 + c_2 w + c_3 = 0 \\ \text{Stabilitätsbedingung } c_1 c_2 > c_0 c_3 \end{array} \right.$$

$$(49) \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{Kataraktregler} \\ (\delta_t T_i T_a + 0,5 z z_0 e_s \delta_t T_i T_l - z T_i T_l) \times \\ \times (T_i + z_0 e_s \delta_t T_i - z T_l) > 0,5 z \delta_t T_i T_a T_l \end{array} \right.$$

$$(50) \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{Beschleunigungsregler} \\ (\delta T_a T_s + 0,5 z z_0 e_s \delta T_s T_l - z T_{ac} T_l) \times \\ \times (T_{ac} + z_0 e_s \delta T_s - z T_l) > 0,5 z \delta T_s T_a T_l \end{array} \right.$$

Die mathematische Methode, die hier angewendet wird, hat den Vorteil, dass nicht für jeden Einzelfall die Grundlagen für vektorielle Diagramme aufzustellen sind. Vielmehr gelingt es durch Einführen geeigneter Verhältniszahlen auch für die Zeitkonstanten, dimensionslose allgemein gültige Stabilitäts-Kurven aufzustellen. Als solche Verhältniszahlen werden die Ausdrücke nach Tabelle 4 eingeführt. Aus ihnen er-

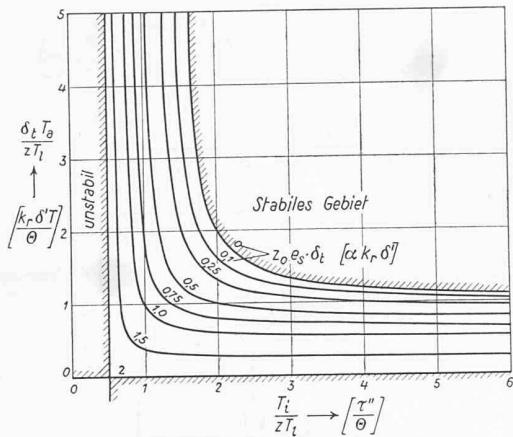
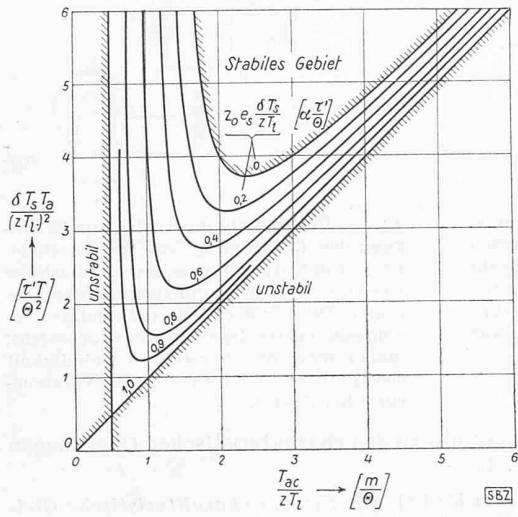
Tabelle 4. Verhältniszahlen

	Kataraktregler	Beschleunigungsregler
Ordinate a . .	$\frac{\delta_t T_a}{z T_l}$	$\frac{\delta T_s T_a}{(z T_l)^2}$
Abzisse b . .	$\frac{T_i}{z T_l}$	$\frac{T_{ac}}{z T_l}$
Parameter c . .	$z_0 e_s \delta_t$ (Selbstreglung)	$z_0 e_s \frac{\delta T_s}{z T_l}$

kennt man zugleich, auf welche Verhältniszahlen es allein ankommt, um die Stabilitätsbedingungen einzuhalten. Ihre Einführung in Gleichungen (49) und (50) ergibt die folgenden Beziehungen:

$$(51) \quad \text{Kataraktregler } b > \frac{0,5 a}{a + 0,5 c - 1} + 1$$

$$(52) \quad \text{Beschleunigungsregler } a > \frac{b - 0,5 c}{1 - \frac{0,5 c}{b + c - 1}}$$

Bild 7.
KataraktreglerBild 8.
Beschleunigungsregler**Verbesserung der Stabilitätsgrenze durch Selbstreglung**

Bei steigender Selbstreglungskonstante e_s erreicht man die Stabilitätsgrenze mit kleineren Schwungmassen. Die Reglergrössen δ_t , δT_s , die ohne Selbstreglung ($e_s = 0$) die Schwungmassen (T_a) herabzusetzen gestatten, steigern zugleich die Wirkung der Selbstreglung in einem Mass, dass es beim Selbstreglungsparameter 2 bei Kataraktreglern und 1 bei Beschleunigungsreglern aus Stabilitätsgründen zulässig wäre, die Schwungmassen beliebig herunterzusetzen (Vollstabilität).

e_s = Selbstreglungskonstante [α]	δ = Dynamik $\Delta n/n$
z_0 = Belastungsgrad bezogen auf Leistung	T_s = Schliesszeit in s
z = Belastungsgrad bezogen auf Wassermenge	$\tau' = \delta T_s$ = Stellzeit in s [τ']
T_a = Anlaufzeit der Schwungmassen in s	δ_t = temporäre Statik [$k_r \delta'$]
T_l = Anlaufzeit der Wassermassen in s	T_i = Isodromzeit in s [t'']
	T_{ac} = Beschleunigungszeit in s [m]
	$[T]$ [θ]

Die Kurven Bild 7 und 8, die mit Gleichungen (51) und (52) berechnet wurden, lassen zunächst erkennen, dass bei den Werten für Abszissen und Ordinaten das Produkt $z T_l$ im Nenner steht. Die im Zähler stehenden Reglerkonstanten können also bei Teillast ($z < 1$) auch kleiner sein. Die Stabilität ist also bei Vollast kritisch und sie verbessert sich bei Teillast. Es ist deshalb zulässig, die Reglerkonstanten δ_t , T_i , T_s , T_{ac} bei Teillasten kleiner werden zu lassen, wenn es zweckmäßig erscheint.

Beim Abschalten ist nur mit der kleinen Leerlaufwassermenge zu rechnen, also ist $z \ll 1$. Deshalb ist die Stabilität bei der abgeschalteten Turbine leicht herzustellen. Der Selbstreglungsparameter zeigt, dass sich in erster Linie die Stabilität mit wachsender Selbstreglungskonstante e_s verbessert. Bei Netzen mit starker Selbstreglung konnte man sich deshalb trotz ungünstigerem Verhältnis T_a/T_l behelfen, weil beim Parallelbetrieb die Selbstreglung dem Regler zu Hilfe kam und vor dem Parallelschalten und nach dem Abschalten die günstigeren Leerlaufbedingungen vorlagen. Schwierig werden die Stabilitätsbedingungen aber, wenn man auch bei Vollast ein Netz mit schwacher Selbstreglung zu versorgen hat.

Die Schwungmassen (Ordinate mit Anlaufzeit T_a als Faktor) können nach den Kurven umso kleiner sein, je grösser der Parameter der Selbstreglung ist. Ausser der Selbst-

reglungskonstanten e_s (und dem Belastungsfaktor z) sind folgende Grössen entscheidend:

$$\text{Kataraktregler} \quad \text{Beschleunigungsregler}$$

$$\text{Selbstreglung wächst mit } \delta_t, \frac{T_i}{T_l} \quad \frac{\delta T_s}{T_l}$$

Das erklärt, warum die Selbstreglung bei Wasserturbinen viel wirksamer ist als bei Dampfturbinen. Beim Kataraktregler wirkt eine grosse temporäre Statik an Stelle der kleinen permanenten der Dampfturbine. Die durch Drehzahländerung bedingte Selbstreglung ist also einfacher grösser, weil man temporär mit grösseren Statiken arbeitet. Wie der Verfasser früher nachgewiesen hat [4], [5], ist ferner die Selbstreglung umso wirksamer, je langsamer man regelt. Dies wirkt sich beim Kataraktregler durch die Stellzeiten $\tau' = \delta T_s$, die viel grösser sind als bei Dampfturbinen. Beispielsweise Vergleichswerte zeigt Tabelle 5. Ausserdem ist die Selbstreglung nach

Tabelle 5. Vergleich massgebender Reglergrössen

	Wasser-turbinen	Dampf-turbinen	Verhältnis-wert
Kataraktregler			
Maximale Statik %	40	2	20
Beschleunigungsregler			
Dynamik δ %	1	1	
Schlusszeit T_s s	20	1	
Stellzeit δT_s s	0,2	0,01	20

Formel (19) bei Wasserturbinen deshalb besonders wirksam, weil ihre Wirkung wie der Druckstoss mit dem Belastungsgrad z zunimmt. Dadurch tritt die bei Dampfturbinen vernachlässigbar kleine Wirkung der Selbstreglung bei der Wasserturbine entscheidend hervor. Ohne Selbstreglung ($e_s = 0$) ist nach den Kurven das einzige Mittel, bei gegebener Anlaufzeit T_a die Stabilität zu verbessern, eine Erhöhung der temporären Statik δ_t (Katarakt) und der Stellzeit δT_s (Beschleunigungsregler). Das gleiche Mittel macht aber zugleich die Selbstreglung wirksamer.

Dies geht so weit, dass es bei reichlicher Selbstreglung ($e_s > 4$) und hoher Last möglich ist, die Stabilitätsgrenze auch ohne Inanspruchnahme der Schwungmassen zu erreichen. Hierfür wurde bei Leistungsreglern [11] der Begriff der *Vollstabilität* eingeführt. Die Bedingungen der Vollstabilität, Tabelle 6, ergeben sich aus den Kurven, Bild 7 und 8.

Die Erklärung der merkwürdigen Feststellung, dass es bei reichlicher Selbstreglung und hoher Belastung grundsätzlich zulässig wäre, ohne Unstabilität und mit gut beherrschbaren Reglerkonstanten die Schwungmassen auf Null zu senken, ergibt sich aus Formel (21). Bei starker Selbstreglung wird nicht nur der Druckstoss kompensiert, sondern darüber hinaus die Schwungmasse T_a so wirksam unterstützt, dass sie nicht mehr erforderlich ist, um die Stabilität sicherzustellen.

Man soll daraus nicht etwa schlussen, dass man praktisch die Schwungmassen ganz beliebig herabsetzen darf. Man kommt bald an eine Grenze, wo ganz unzulässige Uebertouren entstehen würden. Dagegen ist die Folgerung berechtigt, dass es aussichtsreich ist, in kritischen Fällen die Selbstreglung zu aktivieren, wenn sie von Natur aus nicht vorhanden ist.

Nach Tabelle 3 ist die Selbstreglungskonstante $e_s = 0$ bei reiner Widerstandsbelastung mit Spannungsregler. Dies gilt für augenblicklich wirkende Spannungsregler. Wo die Erregermaschine mit dem Generator gekuppelt ist, ändert sich die Spannung stark mit der Drehzahl. Da es für die Stabilität nur auf die Zone kleiner Abweichungen vom Beharrungswert ankommt, kann man in einem begrenzten Spannungsbereich diese natürliche Abhängigkeit zwischen Drehzahl und Spannung ausnutzen oder sie in anderen Fällen künstlich herstellen, wobei der Spannungsregler die Spannung unabhängig von der Drehzahl konstant hält, wenn der Bereich nach oben oder unten überschritten wird. Durch eine Verlangsamung der Funktion des Spannungsreglers innerhalb der zulässigen Zone lässt sich eine «temporäre» Spannungsstatistik schaffen. Dabei müssen allerdings alle Netzmassen nach annähernd dem gleichen Spannungs-Drehzahl-Gesetz geregelt werden, weil sich sonst durch die Spannungsreglung nur die Blindleistungen zwischen den Maschinen verschieben.

Tabelle 6. Stabilität bei Senkung der Schwungmassen auf Null für Vollast ($z_0 = 1$)

	Katarakt-Regler	Beschleunigungs-Regler
Grenze der Vollstabilität nach Bild 7 und 8 . . .	$e_s \delta_t > 2$	$e_s \frac{\delta T_s}{T_l} > 1$
Stabilitätsbedingung bei reichlicher Selbstregelung, also $e_s > 4$	$\delta_t < 50\%$	$\frac{\delta T_s}{T_l} < 0,25$

In den grösseren Netzen ist im allgemeinen eine genügende Selbstregelung vorhanden und meist haben nur isolierte Netze mit wenigen Betriebsmaschinen reine Widerstandsbelastung. Bei wenigen Maschinen ist es aber leicht möglich, alle Spannungsregler nach annähernd dem gleichen Spannungs-Drehzahl-Gesetz arbeiten zu lassen.

Auch wo man für den isolierten Netzbetrieb eine künstliche Selbstregelung einführt, werden die Selbstregelungskonstanten oft kleiner bleiben als beim Parallelbetrieb mit einem grossen Netz. Die Ordinaten der Kurven in Bild 7 und 8 zeigen, dass dann andere Mindestwerte der Anlaufzeit T_a notwendig sind. Deshalb kann es zur Senkung der notwendigen Schwungmassen zweckmässig sein, die Regler so auszubilden, dass

sich ihre Reglerkonstanten (δ_t , T_i oder T_s , T_{ac}) beim Uebergang vom isolierten Betrieb zum Netzbetrieb leicht umstellen lassen.

Auf den anderen Gebieten der Regeltechnik ist die Hilfe der Selbstregelung weniger zuverlässig als bei Wasserturbinen. Bei Dampfturbinen mit ihrer geringen, meist nur permanenten Statik ist die Selbstregelung vernachlässigbar klein [4]. Bei Dampfdruckreglern ist sie viel wirksamer, versagt aber bei Teillasten [4]. Führt man bei Dampfdruckreglern für die Stabilität bei Teillasten eine Rückführung ein, so kann man nur entweder durch hohe Verstellgeschwindigkeit die Rückführung oder durch langsames Verstellen die Selbstregelung stärken, was aber wieder die Rückführung unwirksam macht [5]. Beim Flugzeugpropeller [12] ist die Selbstregelung sehr stark und sie versagt deshalb nicht bei Teillast, weil unabhängig von der Belastung eine aerodynamische Selbstregelung vorhanden ist. Trotzdem wird durch die Tendenz zu höheren Verstellgeschwindigkeiten die Selbstregelung unzuverlässig. Bei Wasserturbinen hat die Selbstregelung nicht eine Rückführung entbehrlich zu machen, sondern sie soll die Wirkung der Wassermassen kompensieren. Hier versagt die Selbstregelung bei Teillast nicht, weil die Wirkung der Wassermassen auch bei Teillast schwächer wird und weil die Tendenz zu langsameren Reguliervorgängen, die auch ohne Selbstregelung die Stabilität verbessert, zugleich die Selbstregelung stärkt.

(Schluss folgt)

Wettbewerb für ein Lehrgebäude der EMPA und der E.T.H. und Erweiterungsbauten der E.T.H. in Zürich (Wettbewerb A)

DK 06.063 : 727.3(494)

Bekanntlich hat das ständig anwachsende Raumbedürfnis der EMPA (Eidg. Material-Prüfungs-Anstalt) dazu geführt, deren Betrieb in Zukunft aufzuteilen in

- A: Lehr- und Forschungsräume einerseits, und
- B: Eigentliche laufende Materialprüfung anderseits.

Mit Rücksicht auf den industriellen Charakter, den der Betrieb B in gewissem Mass aufweist, soll er nach Schlieren verlegt werden, so dass für die Bauten A auf dem heutigen EMPA-Areal genügend Raum bleibt. Ausserdem können dann auf diesem Areal zugleich noch Raumbedürfnisse verschiedener Abteilungen und Institute der E.T.H. erfüllt werden. Für jede der beiden Aufgaben hat die Eidg. Baudirektion gleichzeitig je einen Wettbewerb ausgeschrieben, wobei eine Architekturfirma nach ihrer freien Wahl nur am einen oder am andern sich beteiligen durfte — eine von der Architektenforschung dankbar anerkannte Massnahme zur Verminderung der Leerlaufarbeit im Wettbewerbewesen!

Auf Grund dieses Gesamtplans hat man für den Wettbewerb A, an dem sich 42 Firmen beteiligten, folgendes Raumprogramm aufgestellt, an dem unsere Leser nicht nur architektonisch, sondern auch sachlich Interesse nehmen werden:

EMPA, Direktion	110 m ²
EMPA, Hauptabteilung A (Baumaterialien, Bindemittel, Beton und Eisenbeton inkl. Maschinensaal von 140 m ² , Metalle, Holz inkl. Maschinensaal von 210 m ² , Metallographie) . .	930 m ²
EMPA, Hauptabteilung B (Verbrennung, Wärmetechnik, Kälte, Gase, organ. Bindemittel, Isolierstoffe, Kunststoffe, Farben, chemisches Laboratorium)	710 m ²
E.T.H., Abt. II (Laboratorium für Baustatik, Massivbau, Stahlbau, Strassenbau, Photoelastizität, inkl. drei Hallen zu 110 und eine zu 160 m ²)	835 m ²
E.T.H., Abt. III (Werkzeugmaschinenlabor 220 m ² , Hüttenmännisches Labor 300 m ² , Leichtmetalllabor 100 m ² , kleines Laboratorium usw.)	890 m ²
Institut für Geophysik	335 m ²
Flugzeugstatik und Flugzeugbau	350 m ²
Hygienisches Institut	490 m ²
Forstliches Versuchswesen	1500 m ²
Ferner für EMPA und E.T.H. gemeinsam: Grosser Hörsaal (200 Plätze), kleiner Hörsaal (45 Plätze) mit Vorbereitungs- und Sammlungsräumen usw.	490 m ²
Total	6640 m ²

Alle oben aufgeführten Räume mussten zwischen Leonhardstrasse, Tannenstrasse und Clausiusstrasse untergebracht werden, wobei auch eine Ueberbauung der letztgenannten auf Gebäudetiefe zugelassen war (mit Durchfahrt von 4,5 m Höhe für den Strassenverkehr). Alle genannten Bauteile bilden zusammen die erste Etappe, die ohne grosse Änderungen Teil einer späteren Gesamtüberbauung bilden soll. Das Naturwissenschaftliche Institut war beizubehalten, hingegen durfte das Studentenheim in einer späteren Etappe verlegt werden.

Ausser den bisher genannten Bauten gehört aber zum Bauprogramm der E.T.H. auch die Erweiterung des *Maschinen-Laboratoriums* zwischen Clausiusstrasse, Tannenstrasse und Sonneggstrasse. Für Hör- und Zeichensäle, Sammlungen, Konferenzzimmer, Bureaux und Laboratorien werden etwa 3300 m² benötigt. Die Organisation dieser Räume (mit Ausnahme einiger untergeordneter Teile) war im Wettbewerb noch nicht verlangt, da sie zur späteren Bauetappe gehören.

In der architektonischen Gestaltung musste der Bedeutung der Gebäude Rechnung getragen werden.

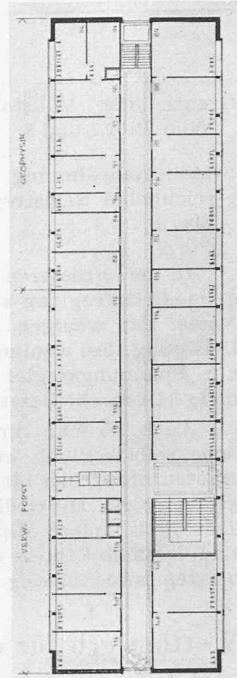
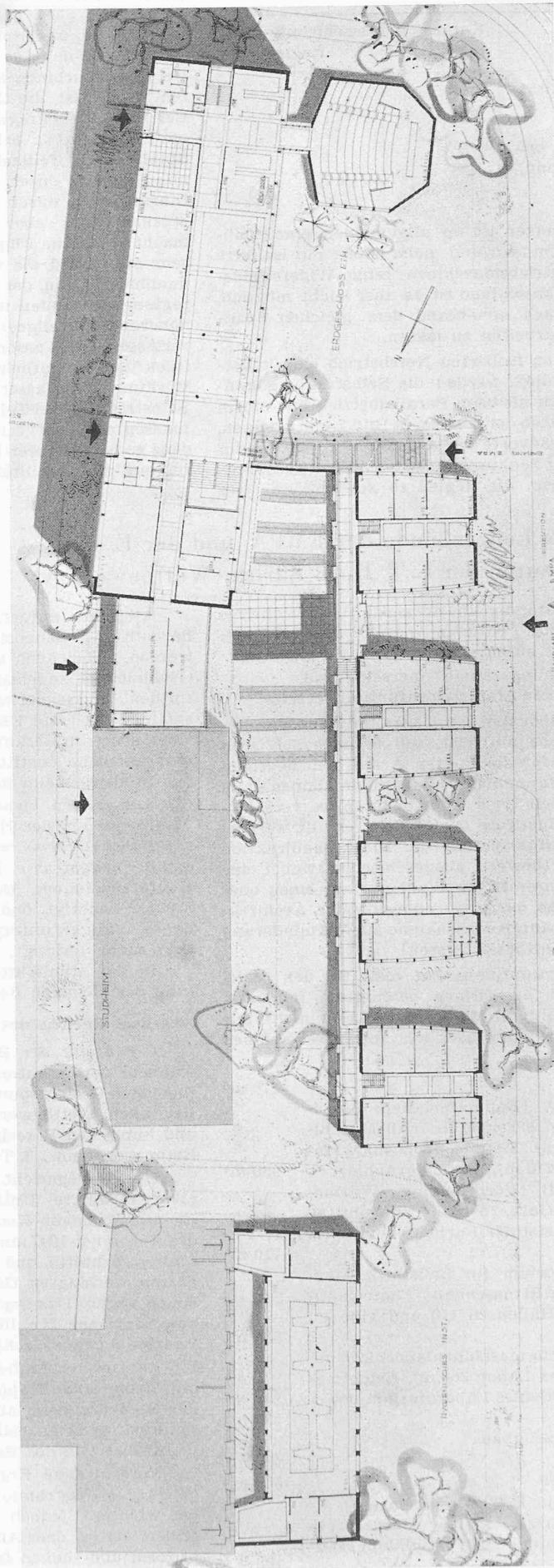
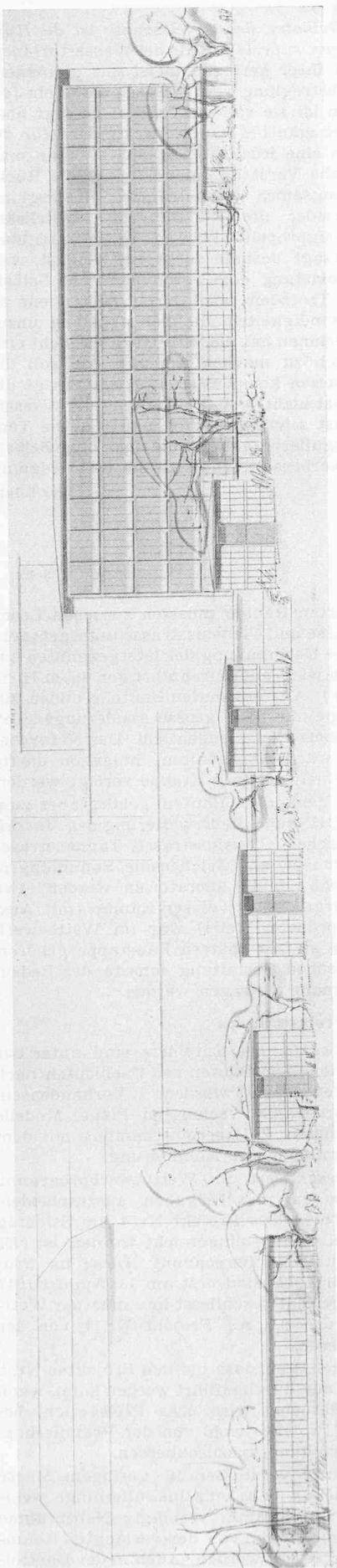
Aus dem Bericht des Preisgerichtes

I. Prüfung der Entwürfe. Die Entwürfe sind unter der Aufsicht der Direktion der Eidg. Bauten von Fachleuten nach folgenden Gesichtspunkten geprüft worden: 1. Vorhandensein der nach Wettbewerbprogramm verlangten Pläne, Modelle und kubischen Berechnungen; 2. Uebereinstimmung mit dem Raumprogramm; 3. Termingemäss Einlieferung.

Das Preisgericht beschliesst, im Wettbewerbprogramm nicht verlangte Unterlagen und Beigaben auszuscheiden. Es nimmt davon Kenntnis, dass Projekt Nr. 4 am Stichtag des 4. August 1947 unvollständig eingereicht worden ist. Es fehlten Schnitte und kubische Berechnung. Diese im Programm verlangten Unterlagen sind erst am 11. August 1947 eingegangen. Das Preisgericht beschliesst im Sinne der Wettbewerbsnormen Nr. 101 des S.I.A., Projekt Nr. 4 von der Beurteilung auszuschliessen.

Es wird ferner festgehalten, dass bei den Projekten Nr. 8 und 33 die erste Etappe nur durchgeführt werden kann, wenn das Studentenheim abgebrochen wird. Das Preisgericht beschliesst, es seien beide Projekte wohl von der Prämierung, nicht aber von der Beurteilung auszuschliessen.

Verschiedene Entwürfe verstossen in geringem Masse gegen das Programm, sei es, dass einzelne, allerdings weniger wichtige, jedoch im Programm verlangte Nebenräume fehlen, sei es, dass Abweichungen von den verlangten Raumgrössen und -höhen festgestellt werden. Auch in der Darstellungsweise weichen verschiedene Projektverfasser von den im Interesse einer möglichst guten Lesbarkeit der Pläne



aufgestellten Programm vorschriften ab. Das Preisgericht erachtet diese Verstöße als nicht so schwerwiegender, dass die Entwürfe nicht zur Beurteilung zugelassen werden könnten oder von der Prämiierung ausgeschlossen werden müssten. Hingegen wird das Preisgericht diese Verstöße bei der Bewertung der Entwürfe in Berücksichtigung ziehen.

II. Beurteilung der Entwürfe. Die für die Beurteilung verbleibenden 41 Entwürfe werden vom Preisgericht in einem ersten freien Rundgang besichtigt. Darauf begibt sich das Preisgericht auf das aussersehene Baugelände und nimmt Einblick in die Einrichtungen der EMPA und des Studentenheims.

Nach dem Augenschein schreitet das Preisgericht zu den einzelnen Rundgängen. Im ersten Rundgang werden fünf Projekte ausgeschie-

1. Preis (6000 Fr.) Entwurf Nr. 14. Verfasser: MAX ZIEGLER und