

**Zeitschrift:** Schweizerische Bauzeitung  
**Herausgeber:** Verlags-AG der akademischen technischen Vereine  
**Band:** 88 (1970)  
**Heft:** 41

**Artikel:** Optimale Frequenzregelung von Wasserturbinen bei Trennung vom Verbundnetz  
**Autor:** Stein, T.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-84635>

### **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:** 14.01.2026

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

## Optimale Frequenzregelung von Wasserturbinen bei Trennung vom Verbundnetz

DK 621.24-585

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

### Zusammenfassung

Der international gültig gewordene IEC-Code für Regelversuche an Wasserturbinen [3] enthält im Appendix Angaben über Frequenzgangmessungen, deren hier behandelte Weiterentwicklung dazu dient, im Verbundbetrieb die Reglereinstellung für optimale Frequenzregelung im Inselbetrieb zu finden, den man – als neue Situation – nicht mehr nur für Versuchszwecke effektiv herstellen kann. Unentbehrlicher Ausgangspunkt sind Näherungsformeln für den unverzögerten Regler. Zur Berücksichtigung der Nichtlinearität genügt es, mit nur einer tiefen Erregungsamplitude von z.B.  $x_0 = 0,25\% = 0,125 \text{ Hz}$  zu messen. Als Einstellungskriterium für beste Frequenzregelung bei hinreichender Stabilität, ohne Dauerschwingungen, gilt die Zulassung von z.B.  $a_{1/10} \approx 4$  Halbschwingungen für das Abklingen auf 1/10 bei kleiner Erregungsamplitude (z.B.  $x_0 = 0,25\%$ ). Einfacher und anschaulicher als mit bisher verwendeten Ortskurven findet man diese Bedingung durch neue Näherungsformeln, die Prof. K.H. Fasol mit Frequenzkennlinien entwickelt hat.

### 1. Ursachen für ganz andere Reglereinstellungen bei Inselbetrieb

Beim steigenden Anteil thermischer Kraftwerke im europäischen Verbundnetz gewinnt die Fähigkeit flexibler Leistungsanpassung der Wasserkraftwerke zunehmende Bedeutung. Im Extremfall eines starken Ausfalls von Netzverbindungen müssen die Wasserkraftwerke das übrigbleibende Inselnetz mit hinreichend guter Frequenzhaltung versorgen können, damit für die Parallelschaltung zum Wiederaufbau des Verbundnetzes die hohe *Momentanreserve* [1] der Wasserkraftwerke möglichst schnell wieder verfügbar wird.

Ein für die hohen Stabilitätsansprüche im Inselbetrieb eingestellter Wasserturbinenregler ist für Verbundbetrieb völlig unbrauchbar, weil er im Verbundnetz die «Primärregelung» der Drehzahl viel zu langsam durchführen würde. Die U.C.P.T.E.<sup>1)</sup> geht so weit zu empfehlen, die temporäre Statik (P-Grad), durch Öffnen aller Ölbremse der nachgiebigen Rückführungen ganz auszuschalten. Wie nachgewiesen wurde, ergäbe sich dann bei reinen Wasserkraftnetzen eine Instabilität, die aber im kontinentalen Verbundnetz durch die stabilisierenden zusätzlichen Schwungmassen der thermischen Kraftwerke wegfällt, weil bei diesen kein destabilisierender Druckstoss wie bei Wasserturbinen auftritt [2].

Um festzustellen welche Reglereinstellungen im Inselbetrieb anzuwenden sind, sollen alle Einflüsse behandelt werden, durch die im Verbundbetrieb eine bessere Stabilität zustande kommt. Die aus der guten Erfahrung mit der Ausschaltung von Ölbremse der nachgiebigen Rückführung oft abgeleitete Vorstellung, das *grosse Verbundnetz an sich* würde durch seine grossen rotierenden Schwungmassen im Gegensatz zum *kleinen* Inselnetz die Stabilität erhöhen, ist nicht zutreffend.

Das Abklingverhalten wäre beim Verbundbetrieb das gleiche wie beim Inselbetrieb, wenn in allen Wasserkraftwerken gleich ungünstige Druckstoss- und Druckwellen-Bedingungen vorliegen würden, wenn alle Einheiten sich an der Frequenzregelung ohne auf Öffnungsbegrenzung eingestellte Regler

beteiligten und wenn keine thermischen Kraftwerke stabilisierend wirkten.

Ein rein hydraulisches Verbundnetz bringt zwar zusätzliche stabilisierende Schwungmassen gegenüber einem hydraulischen Inselnetz, aber bei gleichen hydraulischen Bedingungen in allen Kraftwerken wachsen im gleichen Verhältnis die destabilisierenden Wassermassen. Nur infolge des günstigeren *Durchschnittswertes* der destabilisierenden Wirkung von Druckstoss und (bei hohen Gefällen) von Druckwellen tritt eine Verbesserung der Stabilität im Verbundbetrieb ein, auf die man beim Inselbetrieb nicht rechnen kann [2]. Hiernach lassen sich im Verbundbetrieb die für ein Inselnetz gültigen Zusammenhänge prüfen, und zwar unter Bestimmung des Übertragungsverhaltens des Reglers und der *eigenen* geregelten Anlage (Regelstrecke). Dadurch erhält man im Gegensatz zum Verbundbetrieb durch Fortfall des besseren Durchschnittswertes der hydraulischen Verhältnisse, der fehlenden Unterstützung durch Wasserkraftregler mit Öffnungsbegrenzung und durch thermische Kraftwerke die Reglereinstellung im Inselbetrieb.

### 2. Reglereinstellung ohne Inselbetriebs-Versuche

Noch vor wenigen Jahren war es möglich, zur Erprobung der besten Reglereinstellung bei Trennung von Verbundnetz effektiv ein Inselnetz herzustellen, was aber heute bei den wachsenden Einheitsleistungen der Wasserkraftwerke und dem immer stärker vermaschten Verbundnetz praktisch ausscheidet. Für die Regelungstechnik ist *bei dieser neuen Situation die wichtigste Aufgabe, trotzdem Prüfungsmethoden zur optimalen Frequenzregelung bei Inselbetrieb zu finden.*

Ein Teil der Prüfungsmethoden, bei denen im neuen IEC-Code [3] für Wasserturbinen Inselbetriebsversuche vorgesehen sind, ist nicht mehr durchführbar. Dagegen enthält dieser Code im Appendix Angaben über Frequenzgangmessungen (harmonic response), die, für den Regler *im Verbundbetrieb gemessen* und für die neue Situation weiterentwickelt, Aufschlüsse über das Regelungsverhalten bei dem nicht realisierbaren Inselbetrieb geben können, weil sie die Abweichungen von verzögerungsfrei berechneten Regelungsvorgängen aufdecken.

Man bleibt aber im Dunkeln über die notwendige Reglereinstellung, die bei Trennung vom Verbundnetz optimale Frequenzregelung sicherstellt, wenn man nicht diese im Verbundbetrieb durchführbaren Frequenzgangmessungen weiterentwickelt. In der Regeleinrichtung ist für die Verzögerungsglieder der Einfluss von Nichtlinearitäten zu erfassen und ein Kriterium dafür aufzustellen, wie weit man zugunsten einer besseren Frequenzhaltung im Inselbetrieb die Stabilitätsmarge senken darf, ohne dass Dauerschwingungen entstehen. Es wird sich zeigen, dass man hierfür sehr einfache Regeln für die Frequenzgangmessungen ableiten kann (Abschnitt 11).

### 3. Verzögerungsfrei berechnete Reglereinstellung

Für verzögerungsfrei berechnete Regler als Ausgangspunkt gelten bei Wasserturbinen einfache Näherungswerte für die Reglereinstellung, die gemäss Abschnitt 9 für *Vollast* berechnet, nur von den *Anlaufzeiten* der Wasserturbinen  $T_w$

<sup>1)</sup> Union pour la Coordination de la Production et du Transport de l'Electricité.

Tabelle 1.

Einstellung von Reglern mit nachgiebiger Rückführung		Beschleunigungs-Einfluss	
(1)	$b_t = 1,8 \frac{T_w}{T_a}$	$\frac{T_x}{T_n} = 1,8 \frac{T_w}{T_a}$	
(2)	$T_d = 4 T_w$	$T_n = 4 T_w$	

Bezeichnungen nach dem neuen IEC-Code [3].

Bei hohen Gefällen ist nach Abschnitt 9 die Wasseranlaufzeit  $T_w$  für Vollast mit dem Faktor  $k$  von Bild 4 zu multiplizieren.

und der Schwungmassen  $T_a$  abhängen [4], Tabelle 1. Dabei ist für nachgiebige Rückführung eine verzögerungsfrei reagierende Servomotorsteuerung vorausgesetzt, für den Beschleunigungs-Einfluss eine sprunghafte Beschleunigungsreaktion auf einen Drehzahlsprung. Bei beiden Reglerarten treten aber in Wirklichkeit [5] «Verzögerungsglieder» [6] auf, die in den Näherungsformeln nicht berücksichtigt sind.

Die von Hutarew [7] bei Wasserturbinen eingeführte Frequenzgangmessung gestattet, insbesondere für die Regleinrichtung unter linearisierten Voraussetzungen, die Übertragungsfunktion der Regleinrichtung unter Einschluss aller Verzögerungsglieder zu messen.

#### 4. Einfluss der Nichtlinearität

Unter Messung des Frequenzgangs mit mehr als einer Erregungsamplitude der Sinusschwingung am Reglereingang wurde das Prinzip der Beschreibungsfunktion angewendet [8, 9], um den Einfluss der Nichtlinearität in der Regleinrichtung aufzudecken. Dabei wurde von den Näherungsformeln für verzögerungsfrei berechnete Reglereinstellung ausgegangen.

Während nach einem Lastsprung der erste grössere Frequenzausschlag zunächst schnell abklingt, vollzieht sich das weitere Abklingen auf kleinere Frequenzabweichungen als z. B.  $x_0 = 0,25\% = 0,125$  Hz, die sich durch die kleine Erregungsamplitude von  $x_0 = 0,25\%$  bestimmen lassen, äusserst schleichend mit starker Tendenz zu Dauerschwingungen.

#### 5. Einstellkriterium für Inselbetrieb

Vom Sonderfall eines negativen Selbstregelungsfaktors, der nur entsteht, wenn eine schnellläufige Kaplanturbine ein Netz mit rein ohmscher Belastung versorgt [10], wird hier abgesehen. Bei Francis- und Freistrahlturbinen wird selbst bei ohmscher Belastung der Selbstregelungsfaktor nicht negativ. Für Kaplan-Turbinen kann man ohne ein Inselnetz herstellen zu müssen, das Regelungsverhalten für den Grenzfall rein ohmscher Belastung versuchsmässig prüfen, indem man den Turbinengenerator durch Wasserwiderstände belastet, also durch Stromverbraucher mit rein ohmschem elektrischem Widerstand.

Um sicher zu sein, dass im Inselbetrieb keine Dauerschwingungen entstehen, genügt es die Bedingung zu stellen, dass auch kleine Frequenzabweichungen von z. B.  $0,25\% = 0,125$  Hz mit einer Anzahl von nicht mehr als z. B. vier Halbschwingungen  $a_{1/10}$  auf  $1/10$ , also den verschwindend kleinen Betrag von  $0,0125$  Hz abklingen [11]. Dieses Abklingen der kleinsten Abweichungen der Frequenz vom Beharrungszustand ist völlig unabhängig von den grössten Frequenzausschlägen, die je nach dem Verlauf der Laständerungen im Inselnetz entstehen, gleichgültig ob sich diese Last sprunghafte oder kontinuierlich ändert.

Man kann im Verbundbetrieb durch Frequenzgang-Messung mit kleiner Erregungsamplitude von z. B.  $x_0 = 0,25\% = 0,125$  Hz durch Messungen feststellen, ob das Abklingen der kleinen Frequenzabweichungen mit z. B.  $a_{1/10} \approx 4$  Halbschwingungen vor sich geht. Dies ohne überhaupt den Lastverlauf im Inselnetz zu kennen. Damit lässt sich im Verbundbetrieb feststellen, wie im Inselnetz, das man effektiv nicht

herstellen kann, die kleinsten Frequenzabweichungen abklingen, ohne dass Dauerschwingungen entstehen. Die Feststellung im Verbundbetrieb von z. B.  $a_{1/10} \approx 4$  Halbschwingungen bei z. B.  $x_0 = 0,25\% = 0,125$  Hz Erregungsamplitude ist als hinreichende Stabilität bei Trennung vom Verbundnetz zu betrachten.

Da mit verstärkter Stabilisierung die Frequenzausschläge zunehmen, also die Frequenzhaltung sich verschlechtert, ergibt sich als Einstellkriterium für optimale Frequenzhaltung im Inselbetrieb, die im Verbundbetrieb wie angegeben messbare Bedingung für hinreichende Stabilität. Dieses Kriterium ist ganz unabhängig von den unbekannten Grössen der sprunghaften oder kontinuierlichen Leistungsänderungen bei Inselbetrieb. Durch das Einstell-Kriterium ist man sicher, die für den unbekannten tatsächlichen Lastverlauf überhaupt bestmögliche Frequenzhaltung unter Wegfall von Dauerschwingungen zu erreichen.

Nachdem gezeigt wurde ([8], Bild 7), dass die grossen Frequenzabweichungen zunächst schnell abklingen, obgleich mehrmals die Zone geringer Dämpfung bei kleinen Abweichungen durchlaufen wird, genügt die Messung mit kleinen Erregungsamplituden allein zur Sicherstellung bester Frequenzhaltung im Inselbetrieb. So notwendig es war, durch Versuche mit zwei verschiedenen Erregungsamplituden den Einfluss der Nichtlinearität grundsätzlich abzuklären, genügt es, nachdem dies geschehen ist, nur den kritischen Fall durch Messung mit kleiner Erregungsamplitude in Zukunft zu prüfen (Abschnitt 11).

#### 6. Näherungsmethoden zulässig

Ohne die Bedeutung zu verkennen, die der Ermittlung der Zahl von Halbschwingungen  $a_{1/10}$  zukommt, handelt es sich doch bei der Zulassung von vier Halbschwingungen nur um eine Zahl, durch deren Einhaltung sich Dauerschwingungen im Inselbetrieb sicher vermeiden lassen. Deshalb sind weitgehend vereinfachende Näherungen zulässig. So kann man sich für das Abklingverhalten auf die Berechnung mit einem Verzögerungsglied 1. Ordnung beschränken [11], wobei für die Abklingzeit  $T_{1/10}$  zum Abklingen auf  $1/10$  die einfache Berechnung gilt:

$$\frac{1}{10} = e^{-\delta \cdot T_{1/10}} \quad T_{1/10} = \frac{\ln 1/10}{-\delta} = \frac{2,3}{\delta}$$

$$(3) \quad T_{1/10} \approx \frac{2,3}{\delta} \text{ mit } \delta \text{ als Abkling-Zeitkonstante}$$

Wenn  $\omega_e$  die Eigenfrequenz der Regelkreisschwingung ist, so gilt für die Periode einer ganzen Schwingung  $T = 2\pi/\omega_e$  und für eine Halbschwingung der Frequenz, nach beiden Richtungen, die Zeit  $\pi/\omega_e$ . Für die Anzahl der Halbschwingungen  $a_{1/10}$  in der Zeit  $T_{1/10}$  gilt also

$$a_{1/10} = \frac{T_{1/10}}{\pi/\omega_e} \approx \frac{2,3}{\delta} \cdot \frac{\omega_e}{\pi}$$

$$(4) \quad a_{1/10} \approx 0,73 \frac{\omega_e}{\delta}$$

Der Wert der Abkling-Zeitkonstanten  $\delta$  wurde bisher mit Nyquist-Ortskurven bestimmt [6] [8]. Der anschauliche Abstand eines Lotes auf die Ortskurve  $F_0$  des aufgeschnittenen Regelkreises vom Nullpunkt des Gausschen Achsenkreuzes aus ist aber noch kein direktes Mass für  $\delta$ ; vielmehr muss erst der hierfür gültige Massstab der Frequenzteilung im Lotpunkt auf der Ortskurve ermittelt werden [6]. Auch dies ist eine Näherung, die mit zunehmender Dämpfung des Schwingungsvorganges schlechter wird.

## 7. Berechnung von Fasol nach Frequenzkennlinien

Ein anschauliches Bild des Abklingverhaltens unter Wegfall jeder Feststellung der Massstäbe von Frequenzteilungen ist bei Anwendung von Frequenzkennlinien [12] anstelle der Nyquist-Ortskurven möglich. Auf Anfrage des Verfassers<sup>2)</sup> hat Fasol, ausgehend von seiner Verallgemeinerung des Gesetzes von Bode [12], die nachfolgend erläuterten Näherungsbeziehungen für die Abkling-Zeitkonstante  $\delta$  gefunden. Man geht dabei vom Wert der Durchschnittsfrequenz  $\omega_{\alpha r}$  aus, den man direkt als Schnittpunkt der Amplitudenkennlinie  $A_0$  mit dem Amplitudenwert 1 ermittelt (Bild 1).

Auch bei der Bestimmung der Eigenfrequenz  $\omega_e$  aus Nyquist-Ortskurven setzen die aufgestellten Näherungsbeziehungen schwache Dämpfung voraus und sind als Näherung zu betrachten. Für die Näherung des von  $\delta$  und  $\omega_e$  abhängigen Dämpfungswinkels  $\beta$  ergibt sich nach Fasol

$$(5) \quad \beta = c \cdot 90^\circ = \arctg \frac{\delta}{\omega_e}, \text{ woraus}$$

$$(6) \quad \delta = \omega_e \operatorname{tg}(c \cdot 90^\circ)$$

Dabei gilt für  $c$  ([12] S. 90)

$$(7) \quad c = -\frac{180^\circ}{b} - 1$$

Aus Bild 1 ergibt sich mit  $a_0 = -180^\circ$   $b = 180^\circ - a$

$$(8) \quad c = \frac{a_0}{b} - 1 = \frac{a_0 - b}{b} = \frac{a}{b}$$

und nach Formel (4)

$$(9) \quad a_{1/10} \approx 0,73 \frac{\omega_e}{\delta} = 0,73 \frac{\omega_e}{\omega_e \operatorname{tg}(c \cdot 90^\circ)}$$

$$a_{1/10} \approx \frac{0,73}{\operatorname{tg}\left(\frac{a}{b} \cdot 90^\circ\right)}$$

Durch Simulierungsversuche auf dem Analogrechner hat Fasol für eine Regelstrecke bei acht verschiedenen, im Bereich der praktischen Möglichkeiten liegenden Parameterkombinationen festgestellt, dass die Formel (9) für die Praxis genau genug ist<sup>3)</sup>.

Wie Bild 1 zeigt, ist ohne jede Massstabberechnung, wie sie bei Nyquist-Ortskurven nötig ist, die für die Anzahl der Halbschwingungen  $a_{1/10}$  in Formel (9) bestimmende Stabilitätsmarge direkt durch das Streckenverhältnis  $a/b$  anschaulich erkennbar.

Bild 2 gilt für die Frequenzkennlinien  $A_0, \alpha_0$  des aufgeschnittenen Regelkreises, bei dem die Regler-Frequenzkennlinien  $A_R, \alpha_R$  nach den unverzögerten Näherungsformeln (1) und (2) den Frequenzkennlinien  $A_S, \alpha_S$  der geregelten Anlage (Regelstrecke) optimal zugeordnet sind. Um zu berücksichtigen, dass die Übertragungsfunktion des aufgeschnittenen Regelkreises [7]  $F_0 = F_R F_S$  ist, wird für die Phasenwinkel des Reglers  $\alpha_R$  mit  $\alpha_S$  addiert.

Man erhält aus dem Verlauf der Phasenwinkel  $\alpha_0$  des Regelkreises die Anzahl der Halbschwingungen  $a_{1/10}$  direkt durch

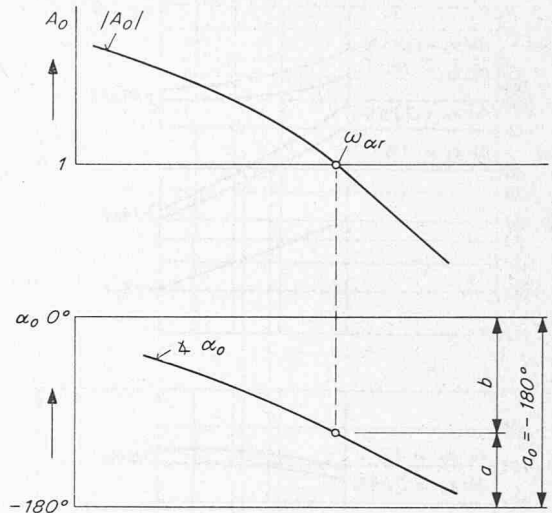


Bild 1. Von Fasol mit Frequenzkennlinien neu entwickelte Näherungsmethode zur Bestimmung der Anzahl  $a_{1/10}$  von Halbschwingungen (nach beiden Richtungen). Für eine Übertragungsfunktion  $F_0(i\omega)$  des Regelkreises ist  $A_0$  die Amplituden-Kennlinie und  $\alpha_0$  die Phasenkennlinie. Ohne die bei Ortskurven notwendige Massstabberechnung ist das Verhältnis der Strecken  $a/b$  ein direktes Mass der Stabilitätsmarge. Durchtrittsfrequenz  $\omega_{\alpha r}$  im Schnittpunkt von  $A_0$  mit dem Amplitudenwert 1.

das anschauliche Streckenverhältnis  $a/b$  bei verschiedenen Erregungsamplituden  $x_0$ , Tabelle 2.

Übereinstimmend mit der Ermittlung durch Ortskurven [8] ergibt sich, dass die Messung mit der bisher üblichen Eingangsamplitude  $x_0 = 1\%$  durch das Ergebnis von  $a_{1/10} = 4,2$  Halbschwingungen vortäuscht, es werde die befriedigende Bedingung von rund vier Halbschwingungen erfüllt. Das trifft aber nicht zu. Vielmehr muss man, um  $a_{1/10}$  von 29 auf 4 Halbschwingungen herunter zu setzen, unter Messung mit  $x_0 = 0,25\%$  die Einstellparameter des Reglers heraufsetzen, bis die Versuche rund  $a_{1/10} \approx 4$  Halbschwingungen ergeben. Nur wenn man bei dieser Messung für die stabilisierende Heraufsetzung der Einstellparameter des Reglers das *Mindestmass* einhält, das notwendig ist, um zur Vermeidung von Dauerschwingungen auf die Grössenordnung von vier Halbschwingungen zu kommen, sichert man die optimale Frequenzhaltung im Inselbetrieb mit *hinreichender Stabilität*.

## 8. Einstellformeln des unverzögerten Reglers unentbehrlich

In Bild 3 wird quantitativ anschaulich erkennbar, wieso bei einem für die Regelstrecke  $A_S, \alpha_S$  gemäss den Formeln (1) und (2) seiner unverzögerten Reaktion zu hoch eingestellten Regler der falsche Eindruck entsteht, dass sich eine Messung mit tiefen Erregungsamplituden erübrigt, weil die Messung mit der bisher üblichen zu hohen Erregungsamplitude von  $x_0 = 1\%$  zu keinem wesentlich anderen Ergebnis führt, dass also die Nichtlinearität praktisch ohne Einfluss ist.

Die erste, mit zwei verschiedenen Erregungsamplituden durchgeführte Frequenzgang-Messung [8] geschah unbemerkt nicht mit der nach Formel (1) für das Messprogramm festgesetzten und nachgeprüften optimalen temporären Statik  $b_t$ , sondern mit dem fast doppelt zu hohen, vertragsmässig einstellbaren Wert der temporären Statik  $b_t$ . Dies wurde erst später nach Abschluss der Versuche und Abtransport der Messapparatur festgestellt, so dass es nicht mehr möglich war, die Versuche über den Einfluss der Erregungsamplitude mit der richtigen Reglereinstellung zu wiederholen. Um trotzdem die vorliegenden Messergebnisse mit zwei Erregungsamplituden zum Nachweis des Einflusses der Nichtlinearität bei richtig eingestelltem Regler verwenden zu können, wurde die Übertragungsfunktion einer hypothetischen Regelstrecke  $F_S$  er-

<sup>2)</sup> Nicht veröffentlichte Angaben von K. H. Fasol, nach der brieflichen Mitteilung von 20. Februar 1970.

<sup>3)</sup> Briefliche Mitteilung vom 29. Juni 1970.

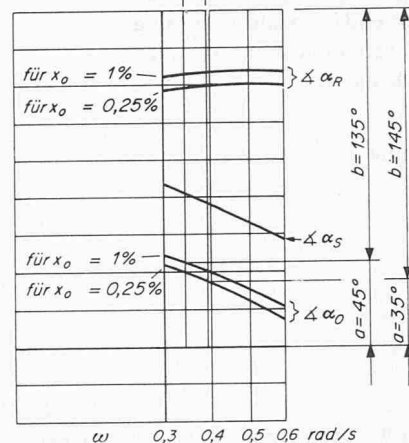
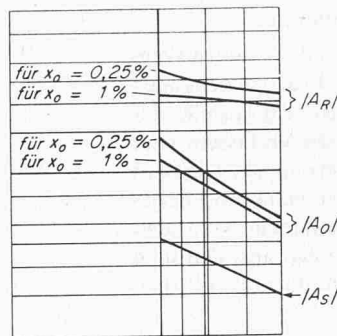
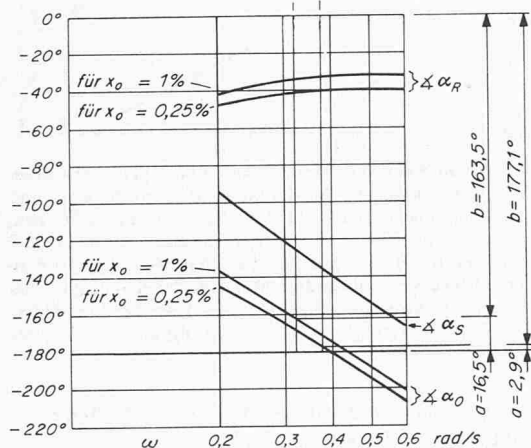
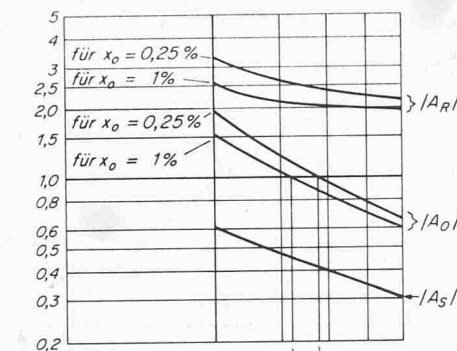


Bild 2 (links). Diagramm von Fasel für Einstellformeln des unverzögerten Reglers als Ausgangspunkt, ergibt für  $A_0$ ,  $\alpha_0$  nach Formel (9) bei Messung mit der kleinen Erregungsamplitude  $x_0 = 0,25\%$  die Notwendigkeit, wegen zu kleiner Stabilitätsmarge  $a/b$  den Versuch mit etwas höheren Einstellparametern zu wiederholen, um durch Begrenzung auf  $a_{1/10} \approx 4$  Halbschwingungen beste Frequenzhaltung ohne Dauerschwingungen zu erreichen. Die stark abweichenden Stabilitätsmargen  $a/b$  bei Messung mit den Erregungsamplituden von  $x_0 = 0,25\%$  und  $x = 1\%$  offenbaren hier den grossen Einfluss der Nichtlinearität.

Bild 3 (rechts). Diagramm von Fasel bei zu hoch eingestelltem Regler, der unter Näherung an aperiodisches Abklingen eine die Frequenzhaltung im Inselbetrieb stark verschlechternde zu hohe Stabilitätsmarge  $a/b$  aufweist. Das zeigt die Notwendigkeit, von Einstellformeln des unverzögerten Reglers auszugehen und erklärt durch den geringeren Unterschied der Anzahl von Halbschwingungen Formel (10) bei verschiedenen Erregungsamplituden  $x_0 = 0,25\%$  und  $1\%$  den Trugschluss, dass die Nichtlinearität bei optimal eingestelltem Regler bedeutungslos sei.

mittelt, die nach den Formeln (1) und (2) dem zu hohen Wert von  $b_t$  optimal zugeordnet ist [8]. Die Korrektur der Übertragungsfunktion des Regelkreises  $F_0 = F_R F_S$  erfolgte also durch Anpassung einer hypothetischen Regelstrecke  $F_S$  anstelle der nicht mehr durchführbaren Anpassung der Übertragungsfunktion  $F_R$  mit der optimalen, statt der maximal einstellbaren temporären Statik  $b_t$ .

Nach der gleichen Methode wird in Bild 3 zur Bestimmung der Frequenzkennlinien  $A_0$ ,  $\alpha_0$  des Regelkreises unter Beibehaltung der Frequenzkennlinien  $A_R$ ,  $\alpha_R$  des Reglers, der nach Formel (1) zu hohen vorübergehenden Statik  $b_t$ , durch Berechnung korrigierender hypothetischer Frequenzkennlinien  $A_S$ ,  $\alpha_S$  Rechnung getragen. Aus Bild 3 ergeben sich die Werte der Tabelle 3.

Bei der gegen die Einstellformel (1) zu hohen Statik wächst bei kleiner Erregungsamplitude  $x_0 = 0,25\%$  die Zahl der Halbschwingungen  $a_{1/10}$  nur von 1,2 auf 1,8 und bleibt unter dem zulässigen Grenzwert von  $a_{1/10} \approx 4$ , so dass der falsche Eindruck entsteht, man könne auf die Messung mit kleiner Erregungsamplitude verzichten.

Wenn man dagegen von den Einstellformeln (1) und (2) des unverzögerten Reglers ausgeht, entsteht nach Formel (9) anstelle des zulässigen Wertes von  $a_{1/10} \approx 4$  bei  $x_0 = 1\%$ , die ganz unzulässige Zahl von 29 Halbschwingungen, die nur durch die kleine Erregungsamplitude von  $x_0 = 0,25\%$  aufgedeckt wird.

Der mit kleiner Erregungsamplitude, z.B.  $x_0 = 0,25\%$ , gemessene Frequenzgang bei einer Reglereinstellung nach den Formeln (1) und (2) ist also der *unentbehrliche Ausgangspunkt*. Diese Einstellwerte sind nur in jenem Mindestmass herauf-

zusetzen, das nötig ist, damit nicht mehr als z.B.  $a_{1/10} \approx 4$  Halbschwingungen auftreten. So findet man unter Einschluss der in den Formeln nicht berücksichtigten Verzögerungsglieder und Nichtlinearitäten die *optimale* Reglereinstellung, die durch Fortfall von Dauerschwingungen mit *genügender Stabilität* kleinste Frequenzausschläge sicherstellt.

Für die geringe Dämpfung bei dieser optimalen Reglereinstellung ist die Formel (9) praktisch genau genug. Durch die starke Dämpfung bei der zu hoch eingestellten temporären Statik  $b_t$  ist die Genauigkeit der Formel (9) geringer, ergibt aber ein ähnliches Abklingverhalten, wie beim effektiven Versuch mit zu hoch eingestellter Statik  $b_t$  [8]. Man kann deshalb durch Vergleich der Phasenkenlinien  $\alpha_0$  der Bilder 2 und 3 annähernd erkennen, wieso bei der zu hoch eingestellten temporären Statik  $b_t$  in Bild 3 der (infolge von Nichtlinearität) bei verschiedenen Erregungsamplituden zwar bestehende Unterschied der Phasen  $\alpha_0$  nur geringen Einfluss hat.

Statt der gesuchten Reglereinstellung für kleinste Frequenzausschläge bei genügender Stabilität entsteht bei zu hoch eingestellter Statik  $b_t$  eine die Frequenzhaltung stark verschlechternde, viel zu hohe Stabilitätsmarge, die in Bild 3 aus den Streckenverhältnissen  $a/b$  direkt erkennbar ist. Zwar entsteht infolge von Nichtlinearität bei verschiedenen Erregungsamplituden  $x_0 = 1\%$  und  $0,25\%$  ein absoluter Unterschied des Phasenwinkels  $\alpha_0$ , der aber im Verhältnis zu den schon hohen Stabilitätsmargen  $a/b$ , im Gegensatz zu Bild 2, nur geringen Einfluss hat. – Die gesuchte optimale Reglereinstellung findet man nur, wenn man nach Bild 2 von den Einstellungen des unverzögerten Reglers nach den Formeln (1) und (2) ausgeht.

Tabelle 2.

	$a$	$b = 180^\circ - a$	$a_{1/10}^4$
$x_0 = 1\%$	$16,5^\circ$	$163,5^\circ$	4,2
(10) $x_0 = 0,25\%$	$2,9^\circ$	$177,1^\circ$	29

4) nach Gl. (9)

Tabelle 3.

	$a$	$b = 180^\circ - a$	$a_{1/10}^4$
$x_0 = 1\%$	$46^\circ$	$134^\circ$	1,2
(10) $x_0 = 0,25\%$	$35^\circ$	$145^\circ$	1,8

## 9. Elastizitäts-Einfluss bei Vollast

Für den bei grossen Gefällen und langen Rohrleitungen auftretenden Einfluss der Elastizität von Wasser und Rohrwand auf die Stabilität ist streng zu unterscheiden zwischen dem Elastizitäts-Einfluss bei Vollast und bei Teillasten. Der entstabilisierende *Druckstoss* nimmt bei Teillasten ab. Bei seinem Einfluss auf die Reglereinstellung ist also nur der kritische Fall der Vollast zu berücksichtigen. Für die Bedingung hoher Belastung hat *Gaden* den Elastizitäts-Einfluss zunächst an der Stabilitätsgrenze unter Verwendung des Koeffizienten  $\varrho$  von *Allievi* ermittelt und festgestellt, dass für die praktisch in Betracht kommenden Dämpfungsgrade des Regelvorgangs nur wenig abweichende Bedingungen gelten [13].

Die Korrekturfaktoren  $f$  für den Einfluss der Elastizität in Abhängigkeit des Allievi-Koeffizienten  $\varrho$  gelten für die Reaktionszeit (promptitude) [13], die beim Regler mit nachgiebiger Rückführung den Wert  $b_t T_a$  hat [4]. Die notwendige Erhöhung der Reaktionszeit  $b_t T_a$  um den Faktor  $f$  erreicht man einfach, indem man für beide Formeln (1) und (2) den Wert von  $T_w$  mit dem Faktor  $k = \sqrt{f}$  nach Bild 4 multipliziert. So entsteht für das Produkt  $b_t T_a$  die richtige Erhöhung um den Faktor  $k^2 = f$ .

Nur scheinbar genügt es beim Regler mit Beschleunigungs-Einfluss, einfach die geforderte veränderte «promptitude»  $T_x$  direkt einzustellen. Dadurch verändert sich ausserdem unzulässig die proportionale P-Wirkung nach Formel (1), die ja gleich bleiben soll, da nur  $T_x$  zu verändern ist. Nach den Regeln der Identität beider Abarten «unverzögerter» PI-Regler [4] erhält man die notwendige Änderung für die Formeln (1) und (2) beim Beschleunigungs-Einfluss genau so durch Multiplikation von  $T_w$  mit dem Faktor  $k$  nach Bild 4, um bei beiden Reglerarten dem Elastizitäts-Einfluss bei Vollast Rechnung zu tragen.

## 10. Elastizitäts-Einfluss bei Teillast

Umgekehrt nimmt der destabilisierende Einfluss der elastischen *Druckwellen* bei Teillast zu. Der kritische Fall ist hier die tiefste Last, also der Leerlauf. Der Umstand, dass es heute bei grösseren Wasserkraftwerken nicht mehr möglich ist, ein Inselnetz für Versuchszwecke herzustellen, ist für diesen rechnerisch schwer erfassbaren Einfluss auf die Stabilität [5] [7] bedeutungslos. Da man durch Abschalten der Einheit vom Netz den kritischen Fall des Leerlaufbetriebes herstellen kann, lässt sich die Stabilität im Leerlauf versuchsmässig ermitteln und gegebenenfalls durch veränderte Reglereinstellung sicherstellen. Man hat so die Gewissheit, dass damit auch bei allen höheren Lasten für Stabilität gesorgt ist, da der destabilisierende Einfluss der elastischen Druckwellen bei höherer Last abnimmt.

Wenn es zur Vermeidung von Dauerschwingungen im Leerlaufversuch genügt, den Reglerparameter nach Formel (2) zu verändern, kann dies beim Regler mit nachgiebiger Rückführung einfach durch veränderte Einstellung der Zeitkonstanten  $T_a$  geschehen, ohne dadurch den Parameter  $b_t$  der Formel (1) zu beeinflussen. Dagegen wird beim Regler mit Beschleunigungs-Einfluss durch Verstellung des Parameters  $T_n$  in Formel (2) zugleich der Parameter von  $T_x/T_n$  in Formel (1) verändert, was zu korrigieren wäre. Eine solche Korrektur entfällt für die hier behandelten proportional-integral wirkenden PI-Regler, wenn man die Kombination des Beschleunigungs-Einflusses mit einem parallel geschalteten Integrator verwendet, statt der bisher üblichen Reihenschaltung des Beschleunigungs-Einflusses mit dem integrierend wirkenden Stellantrieb (Servomotor) [14].

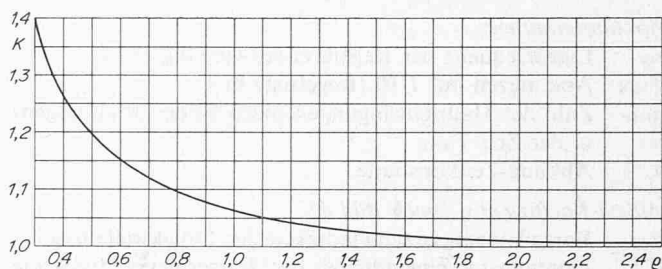


Bild 4. Bei hohen Gefällen ist für Vollast der Wert der Wasseranlaufzeit  $T_w$  in den Einstellformeln (1) und (2) (Tabelle 1) mit dem Faktor  $k$  zu multiplizieren, der abhängig ist vom Allievi-Koeffizienten  $\varrho = aC/2gH$ .

## 11. Praktisches Vorgehen

Um den Regler aufgrund der im Verbundbetrieb durchgeführten Messungen optimal für Inselbetrieb bei Trennung vom Verbundnetz einzustellen, ist folgendermassen vorzugehen:

- 11.1 Näherungsweise Bestimmung der Reglereinstellung für unverzögert reagierenden Regler nach den Formeln (1) und (2) für Anlaufzeiten  $T_a$  und  $T_w$  bei Vollast, wobei für hohe Gefälle  $T_w$  mit dem Faktor  $k$  von Bild 4 zu multiplizieren ist.
- 11.2 Bestimmung der Frequenzkennlinien  $A_R, \alpha_R$  des Reglers mit nur einer tiefen Erregungsamplitude von z.B.  $x_0 = 0,25\% = 0,125 \text{ Hz}$ .
- 11.3 Berechnung [7] des Frequenzgangs  $F_S$  der eigenen, geregelten Anlage (Regelstrecke) bei Vollast und Bestimmung der Frequenzkennlinien  $A_S, \alpha_S$ .
- 11.4 Bestimmung der Frequenzkennlinien  $A_0, \alpha_0$  des aufgeschnittenen Regelkreises (Bild 2) aus 11.2 und 11.3.
- 11.5 Bestimmung der Anzahl von Halbschwingungen (nach beiden Richtungen)  $a_{1/10}$  nach Formel (9).
- 11.6 Falls mehr als z.B.  $a_{1/10} \approx 4$  Halbschwingungen auftreten, Erhöhung der Reglerparameter in dem Mindestmass, das notwendig ist, um  $a_{1/10}$  auf diesen Wert zu senken.
- 11.7 Leerlaufversuch. Falls notwendig, weitere minimal erforderliche Steigerung der Regler-Parameter.

## Formelzeichen und Definitionen

unter Anpassung an den neuen IEC-Code [3]

*Abweichungen, bezogen auf Nennwert*

$x_0$  Erregungsamplitude der aufgedrückten Sinusschwingung

$b_t$  temporäre Statik (P-Grad)

*Reglerzeitkonstanten in s*

$T_a$  Zeitkonstante der nachgiebigen Rückführung (Nachstellzeit)

$T_x$  «promptitude» (Reaktionszeit)

$T_n$  Zeitkonstante des Beschleunigungs-Einflusses (Vorhaltzeit)

*Regelstrecke (geregelte Anlage)*

$T_a$  Anlaufzeit der Schwungmassen (Last-Schwungmassen vernachlässigt)

$T_w$  Anlaufzeit der Wassermassen

*Frequenzkennlinien*

$A$  Amplituden-Kennlinie (Absolutbeträge)

$\alpha$  Phasen-Kennlinie (Phasenwinkel)

$A_R, \alpha_R$  für Regler (Regeleinrichtung)

$A_S, \alpha_S$  für Regel-Strecke (geregelte Anlage)

$A_0, \alpha_0$  für Regelkreis (aufgeschnitten)

$\omega_{\alpha r}$  Durchtrittsfrequenz im Schnittpunkt von  $A_0$  mit dem Amplitudenwert 1

### Abklingverhalten

- $\omega_e$  Eigenfrequenz der Regelkreisschwingung rad/s  
 $T_{1/10}$  Abklingzeit auf 1/10 (Regelzeit) in s  
 $a_{1/10}$  Zahl der Halbschwingungen (nach beiden Richtungen) in der Zeit  $T_{1/10}$   
 $\delta$  Abkling-Zeitkonstante

### Allievi-Koeffizient $q$ (nach Bild 4)

- $a$  Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Druckwelle m/s  
 $C$  Durchflussgeschwindigkeit der Wassermenge durch die Rohrleitung m/s  
 $H$  Gefälle m  
 $g$  Erdbeschleunigung m/s<sup>2</sup>

### Literaturverzeichnis

- [1] Stühlen, H.: Die Bedeutung der Momentanreserve für den Betrieb von modernen Versorgungsnetzen und die Möglichkeit zu ihrer Bereitstellung. «Elektrizitätswirtschaft» 66 (1967) H. 6, S. 130–135.
- [2] Stein, T.: Stabilitätsgrenzen und Optimalregelung der Wasserkraft im Verbundnetz «Regelungstechnik» 10 (1962) H. 4, S. 151–157.
- [3] IEC (International Electrotechnical Commission): International code for testing of speed governing systems for hydraulic turbines. Publication 308. First edition 1970.
- [4] Stein, T.: Die optimale Regelung von Wasserturbinen. «Schweiz. Bauzeitung» 70 (1952) Nr. 20, S. 207–292.
- [5] Quazza, G., Saccomanno, F.: Considerazioni sul proporzionamento dei regolatori di frequenza per turbine idrauliche in relazione alle caratteristiche della rete. Riunione Annuale AEI (Associazione Elettrotecnica Italiana), Ancona, 1960, Memoria n. 160.
- [6] Oppelt, W.: Kleines Handbuch technischer Regelvorgänge. Weinheim/Bergstrasse 1964, Verlag Chemie.
- [7] Hutarew, G.: Regelungstechnik. Springer-Verlag 1969.
- [8] Stein, T.: Stabilitätsprüfung in grossen Wasserkraftwerken. «Schweiz. Bauzeitung» 86 (1968), H. 40, S. 703–707.
- [9] Fasol, K.H.: Bemerkung zur Stabilitätsprüfung in Wasserkraftwerken. «Schweiz. Bauzeitung» 88 (1970), H. 16, S. 363–364.
- [10] Stein, T.: Reglereinstellung von Kaplan-Turbinen bei rein ohmscher Belastung. «Neue Technik» 11 (1969), Nr. A2, S. 95–100.
- [11] Stein, T.: Systematik der Reglerarten. «Escher Wyss Mitt.» 19 (1940), S. 59–64.
- [12] Fasol, K.H.: Die Frequenzkennlinien. Springer-Verlag 1968.
- [13] Gaden, D., Neeser, P.: Influence de certaines caractéristiques intervenant dans la condition de stabilité. «La Houille Blanche» n. 3, mai-juin 1948.
- [14] Stein, T.: Integrator für PID-Regelung von Wasserturbinen. «Schweiz. Bauzeitung» 88 (1970), H. 16, S. 359–362.

Adresse des Verfassers: T. Stein, dipl. Ing. ETH, I-36100 Vincenzo, Via Mantovani 36.

## 75 Jahre Ed. Cuénod, Genf

DK 061.5:338.934:624:69

Anfangs Juni feierte die Bauunternehmung Ed. Cuénod S. A. in Genf das Jubiläum ihres 75jährigen Bestehens. Sie ist heute eine der wichtigsten Firmen ihrer Branche auf dem Platz Genf mit gesamthaft etwa 700 Beschäftigten. Eduard Cuénod, ihr Gründer, durfte bis zum Ausbruch des Ersten Weltkrieges eine glänzende und rasche Entwicklung seiner Firma erleben. Dann allerdings brach die Bautätigkeit zusammen und erholte sich bis nach den Krisen Jahren nur sehr langsam. Trotzdem gelang es dem Gründer und seinen Söhnen immer wieder, sich über Wasser zu halten. Auch der Zweite Weltkrieg brachte wesentliche Geschäftseinbussen, wonach allerdings eine Periode der stürmischen Weiterentwicklung folgte, die bis heute angehalten hat. Dass dies nicht von ungefähr eintrat, ist dem dynamischen Geiste der Familie Cuénod zu verdanken. Man suchte nach neuen Wegen und Methoden und scheute sich nicht, ausgefahrene Gleise rechtzeitig zu verlassen. Die Firma begann sich auch als Generalunternehmung zu betätigen und setzte sich erfolgreich mit den Problemen der Vorfabrikation und Programmierung im Bauwesen auseinander.

Als reines Familienunternehmen verfolgte sie nie eine Politik der Ausweitung durch Fusion und übernahm nur äusserst selten Aufträge im Akkord.

Trotz ihrer komplizierten Personalstruktur (60 % Saison-, 20 % Fremdarbeiter und 15 % Grenzgänger) führte die Firma Cuénod im Jahre 1948 als Fürsorgeeinrichtung für Angestellte und Poliere die Gruppenversicherung ein, aufnete einen Hilfsfonds und stellte eine Sozialfürsorgerin ein. Nicht unerwähnt seien auch die gut ausgestatteten Unterkünfte für ihre Fremdarbeiter in Schlafbaracken, gemieteten Wohnungen und firmeneigenen Häusern für Verheiratete. Der Umsatz von 22 Mio Fr. im letzten Jahr beweist die Leistungsfähigkeit der Jubilarin. Wir wünschen ihr für die Zukunft weiterhin ihren regen Unternehmungsgeist und guten Erfolg!

Red.

## Einführungskurs für Hochbauzeichnerlehrlinge im Kanton Zürich

DK 331.861:69

Gestützt auf Art. 6 des Bundesgesetzes über die Berufsbildung besteht die Möglichkeit, in jenen Berufen, wo die betrieblichen Verhältnisse es rechtfertigen, Einführungs- und Grundschulungskurse für Lehrlinge und Lehrtöchter zu organisieren. Im Sinne von Art. 24 des zitierten Bundesgesetzes ist die Organisation des beruflichen Unterrichts und die Genehmigung solcher Kurse, zusammen mit dem Bundesamt, wohl Sache der Kantone, die Durchführung der Kurse dagegen wird vornehmlich den Berufsverbänden vorbehalten.

Am 1. September 1970 hat das Amt für Berufsbildung und die Prüfungskommission für baugewerbliche Zeichnerberufe, in Verbindung mit dem Bund Schweizerischer Architekten, Sektion Zürich und Winterthur, dem Zürcher Ingenieur- und Architekten-Verein, dem Verband Freier Schweizer Architekten und dem Schweizerischen Technischen-Verband nunmehr die verantwortlichen Organe für die Durchführung von Informations- und Einführungskursen für die Hochbauzeichnerlehrlinge wie folgt bestellt:

### Aufsichtskommission

Vertreter der Berufsverbände: Hans Spitznagel SIA, Sektion Zürich, Oskar Bitterli, BSA, Emil Rütli, FSAI, Erwin Noser, SIA, Sektion Winterthur, Georges Wyss, STV.

Vertreter des kantonalen Amtes für Berufsbildung: Jakob Jaggi, Adjunkt.

Vertreter der Berufsschulen: Fritz Zbinden, Vorsteher der baugewerblichen Abteilung der Gewerbeschule Zürich.

Vertreter der Lehrlinge: Fritz Kurt, Obmann.

### Kurskommission

Vertreter der Berufsverbände: Alfred Trachsel, Architekt SIA, Johann Ziltener, Architekt, Alois Keller, Architekt.

Vertreter der Berufsschulen: Emil Beyer, Vorsteher-Stellvertreter der baugewerblichen Abteilung der Gewerbeschule Zürich.

Sekretariat: Otto Frey, Berufsinspektor, Lehenstrasse 42, 8037 Zürich.

### Aufgabe der Einführungskurse

Die vorgesehenen dreitägigen Kurse sollen alljährlich die Lehrlinge und Lehrtöchter über den Aufgabenbereich des Bauzeichnerberufes informieren. Die im einschlägigen Ausbildungs- und Prüfungsreglement festgelegten Ausbildungsziele lassen sich mit dieser zusätzlichen Schulung besser überblicken. Auch dient sie einer periodischen Selbstkontrolle. Die Lehrlinge und Lehrtöchter haben an diesen Einführungskursen Gelegenheit, eine ihrer Ausbildungszeit angemessene Arbeit auszuführen und im Vergleich mit Beispielen selber zu beurteilen. Damit das Fehlen von Begabung nicht erst nach vier Jahren erkannt wird, bilden die vorgesehenen Kurse ein wertvolles Mittel zur weiteren Abklärung von Berufsneigung und -eignung. Das vorliegende Kursprogramm kann immer wieder den veränderten Bedürfnissen angepasst werden.