

**Zeitschrift:** Schweizerische Bauzeitung  
**Herausgeber:** Verlags-AG der akademischen technischen Vereine  
**Band:** 85 (1967)  
**Heft:** 15

**Artikel:** Verbesserte Drehzahlregler für Kaplanturbinen  
**Autor:** Borel, L.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-69427>

#### **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:** 23.02.2026

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

## Verbesserter Drehzahlregler für Kaplanturbinen

DK 62-546:621.224.35

Von L. Borel, dipl.-Ing. EPUL, Professor an der Ecole Polytechnique de l'Université de Lausanne, Beratender Ingenieur der Ateliers de Constructions Mécaniques de Vevey

### 1. Einführung

Die Untersuchung des dynamischen Verhaltens eines mit einer *Kaplan-Turbine* ausgerüsteten hydraulischen Kraftwerkes ist insofern ziemlich komplex, als der Drehzahlregler eine zweifache Funktion zu erfüllen hat, indem er nicht nur auf die Stellung des Leitapparates wirkt, sondern auch auf die Schaufelstellung des Laufrades. Auf Grund der vorliegenden Untersuchung, die für die *Ateliers de Constructions Mécaniques de Vevey* durchgeführt wurde, war es möglich, dieses Verhalten abzuklären.

Bezüglich des hydraulischen Verhaltens der Turbine setzen die meisten Autoren voraus, dass es demjenigen einer einfachen Düse entspreche. Im folgenden wird das exakte hydraulische Verhalten der Kaplan-Turbine berücksichtigt, wie es sich aus der in unserer früheren Arbeit «Stabilité de réglage des installations hydroélectriques» [2] beschriebenen Methode ergibt.

In bezug auf die Steuerung des Laufrades wird im allgemeinen eine der beiden folgenden Annahmen getroffen:

- a) Die Beeinflussung des Laufrades durch die Regeleinrichtung sei unendlich langsam im Vergleich zu denjenigen des Leitapparates, d. h. es handle sich um eine *Regelung mit blockierter Laufradbeschaffelung*, was zur Annahme einer Propellerturbine führt.
- b) Die Beeinflussung des Laufrades durch die Regeleinrichtung sei unendlich schnell im Vergleich zu denjenigen des Leitapparates, d. h. es handle sich um eine *Regelung mit unmittelbarer Wirkung*, was zur Annahme führt, dass Leitapparat und Laufrad synchron verstellt werden, entsprechend dem durch den Zuordnungsstock Leitapparat – Laufrad gegebenen Gesetz (ideal Kaplan).

Im folgenden wird keine dieser Hypothesen benutzt, sondern von der tatsächlichen Steuerung des Laufrades ausgegangen, wie sie in ausgeführten Anlagen verwirklicht ist. Es wird das dynamische Verhalten der Anlage mit Hilfe eines Analogrechners untersucht, wobei drei verschiedene Betriebsweisen und drei verschiedene Regler betrachtet werden. Auf Grund dieser Untersuchungen wird ein *verbesserter Drehzahlregler* vorgeschlagen. Es wird dargelegt, dass dieser gestattet, die Drehzahlregelung unter Beibehaltung vernünftiger Regelparameter und Erfüllung der gegebenen Betriebsbedingungen zu verbessern.

### 2. Bezeichnungen

Im folgenden wird mit festen Bezugswerten gerechnet. Bezüglich der Symbole werden folgende Richtlinien eingehalten:

- Die festen Bezugswerte werden durch den Index <sub>0</sub> gekennzeichnet.
- Die für Dauerbetrieb geltenden Werte erhalten den Index <sub>x</sub>.
- Die bezogenen Werte werden mit \* bezeichnet.

Die hauptsächlich verwendeten Symbole sind:

<i>A</i>	Öffnung des Leitapparates
<i>B</i>	Öffnung des Laufrades
<i>E</i>	Turbinenleistung
<i>E<sub>λ</sub></i>	Netzbelastung
<i>H<sub>1</sub></i>	Anlaufzeit der Wassermasse in der Druckleitung
<i>M<sub>1</sub></i>	Anlaufzeit der gesamten Schwungmasse
<i>N</i>	Drehzahl der Gruppe
<i>N<sub>m</sub></i>	Hub der Drehzahlverstellvorrichtung
<i>R<sub>1a</sub></i>	Charakteristische Zeit der Wirkung Geschwindigkeitsmesser – Servomotor des Leitapparates
<i>R<sub>1b</sub></i>	Charakteristische Zeit der Wirkung Geschwindigkeitsmesser – Servomotor des Laufrades
<i>R<sub>3</sub></i>	Beschleunigungsfaktor

<i>R'₃a</i>	Charakteristische Zeit der Nachgiebigkeit des Dämpfungszyinders in der Rückführung der Leitapparatstellung
<i>R'₃b</i>	Charakteristische Zeit der Nachgiebigkeit des Dämpfungszyinders in der Rückführung der Laufradstellung
<i>U</i>	Spannung an den Generatorklemmen
<i>U<sub>m</sub></i>	Hub der Spannungsverstellvorrichtung
<i>V</i>	Volumenstrom in der Turbine
<i>e<sub>b</sub> = g H<sub>b</sub></i>	Brutto-Energie pro Masseneinheit
<i>h<sub>2</sub></i>	Druckverlust in der Druckleitung im Dauerbetrieb (dimensionslos)
<i>k = g H<sub>n</sub></i>	Netto-Energie pro Masseneinheit
<i>̂p</i>	Komplexer Operator
<i>r<sub>2a</sub></i>	Nichtlinearität in der Übertragung Servomotor – Leitapparat
<i>r<sub>2b</sub></i>	Nichtlinearität in der Übertragung Servomotor – Laufrad
<i>r<sub>4a</sub></i>	Statik: Hub des Leitapparat-Servomotors – Drehzahl
<i>r<sub>4b</sub></i>	Statik: Hub des Laufrad-Servomotors – Drehzahl
<i>r'<sub>4a</sub></i>	Vorübergehende Statik: Hub des Leitapparat-Servomotors – Drehzahl
<i>r'<sub>4b</sub></i>	Vorübergehende Statik: Hub des Laufrad-Servomotors – Drehzahl
<i>r<sub>5a</sub></i>	Zuordnungsparameter des Leitapparates
<i>r<sub>5b</sub></i>	Zuordnungsparameter des Laufrades
<i>r<sub>6a</sub></i>	Zuordnungskorrektur für Leitapparat
<i>r<sub>6b</sub></i>	Zuordnungskorrektur für Laufrad
<i>t<sub>1</sub></i>	Abhängigkeit des Durchflusses von der Netto-Energie
<i>t<sub>2a</sub></i>	Abhängigkeit des Durchflusses von der Öffnung des Leitapparates
<i>t<sub>2b</sub></i>	Abhängigkeit des Durchflusses von der Öffnung des Laufrades
<i>t<sub>5</sub></i>	Abhängigkeit der Antriebsleistung von der Netto-Energie
<i>t<sub>6a</sub></i>	Abhängigkeit der Antriebsleistung von der Öffnung des Leitapparates
<i>t<sub>6b</sub></i>	Abhängigkeit der Antriebsleistung von der Öffnung des Laufrades
<i>t<sub>7</sub></i>	Abhängigkeit des Durchflusses von der Drehzahl
<i>̂α</i>	Selbstregelungskoeffizient
<i>̂η</i>	Wirkungsgrad der Turbine
<i>̂z<sub>a</sub> = 1</i>	Direkte Steuerung des Leitapparates
<i>̂z<sub>b</sub> = 1</i>	Direkte Steuerung des Laufrades
<i>̂q</i>	Turbinendrehzahl-Koeffizient
<i>̂τ</i>	Turbinendurchfluss-Koeffizient

### 3. Allgemeine Gleichungen

Die allgemeinen Gleichungen des Systems lauten in Operator-Schreibweise:

Leitungsgleichung:

$$(1) \quad \Delta \dot{k}^* = \Delta \dot{e}_b^* - (2 h_2 + H_1 \dot{p}) \Delta \dot{V}^*$$

Durchflussgleichung der Turbine:

$$(2) \quad \Delta \dot{V}^* = t_7 \Delta \dot{N}^* + t_1 \Delta \dot{k}^* + t_{2a} \Delta \dot{A}^* + t_{2b} \Delta \dot{B}^*$$

Gleichung der rotierenden Massen:

$$(3) \quad (\alpha + M_1 \dot{p}) \Delta \dot{N}^* = \begin{cases} t_5 \Delta \dot{k}^* + t_{6a} \Delta \dot{A}^* \\ + t_{6b} \Delta \dot{B}^* - e_2 \Delta \dot{U}_m^* - \Delta \dot{E}_\lambda^* \end{cases}$$

Gleichungen des Drehzahlreglers:

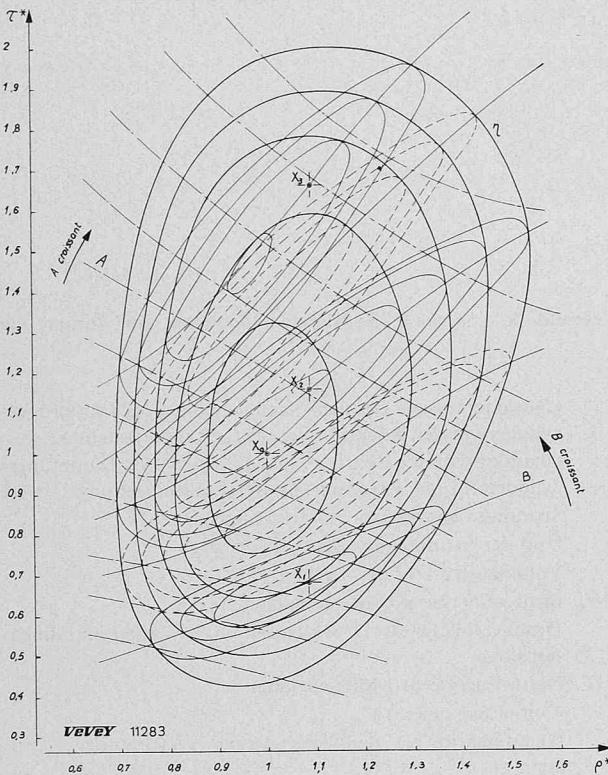


Bild 1. Hydraulische Funktionscharakteristiken einer Kaplan-Turbine

$$\begin{aligned}
 & \left[ \zeta_a \left( r_{4a} + r'_{4a} \frac{R'_{3a} \dot{p}}{1 + R'_{3a} \dot{p}} \right) + r_{5a} r_{6a} + R_{1a} \dot{p} \right] \frac{\Delta \dot{A}^*}{r_{2a}} + \\
 (4) \quad & + \left[ \zeta_a \left( r_{4b} + r'_{4b} \frac{R'_{3b} \dot{p}}{1 + R'_{3b} \dot{p}} \right) - r_{5b} r_{6a} \right] \frac{\Delta \dot{B}^*}{r_{2b}} = \\
 & = -\zeta_a [(1 + R_3 \dot{p}) \Delta \dot{N}^* - \Delta \dot{N}_m^*]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \left[ \zeta_b \left( r_{4b} + r'_{4b} \frac{R'_{3b} \dot{p}}{1 + R'_{3b} \dot{p}} \right) + r_{5b} r_{6b} + R_{1b} \dot{p} \right] \frac{\Delta \dot{B}^*}{r_{2b}} + \\
 (5) \quad & + \left[ \zeta_b \left( r_{4a} + r'_{4a} \frac{R'_{3a} \dot{p}}{1 + R'_{3a} \dot{p}} \right) - r_{5a} r_{6b} \right] \frac{\Delta \dot{A}^*}{r_{2a}} = \\
 & = -\zeta_b [(1 + R_3 \dot{p}) \Delta \dot{N}^* - \Delta \dot{N}_m^*]
 \end{aligned}$$

Die Bedeutung der benutzten Symbole findet sich in der oben angeführten Liste der Bezeichnungen [2], [4], [6].

Die Parameter  $t_1, t_{2a}, t_{2b}, t_{5a}, t_{6a}, t_{6b}$  und  $t_7$  lassen sich aus den *hydraulischen Funktions-Charakteristiken* der Kaplan-Turbine ableiten, insbesondere aus der in Bild 1 [4] wiedergegebenen.

Bezüglich des Drehzahlreglers ist die Feststellung wesentlich, dass die Öffnung  $A$  des Leitapparates und die Öffnung  $B$  des Laufrades Größen von gleicher Wichtigkeit sind. Dies steht im Gegensatz zu den Aussagen der Empirie und der Tradition, wonach – im Fall der zweifachen Regelung – der Öffnung des Leitapparates grössere Bedeutung beigemessen wurde. Wir sind der Auffassung, dass dies falsch ist und dass die *Stellung des Leitapparates und diejenige der Laufschaufern auf gleicher Ebene zu behandeln sind*.

In diesem Sinne empfehlen wir einen *verbesserten Drehzahlregler*. Dieser Regler, der in Bild 2 schematisch dargestellt ist, weist eine universellere Konzeption als die bisherigen Regler auf und hat folgende Eigenschaften:

- Die vom Geschwindigkeitsmesser, vom Beschleunigungsmesser und den Rückführungen herrührende Verstellung  $Y$  beeinflusst *gleichzeitig* die Steuerschieber der Servomotoren des Leitapparates und des Laufrades.
- Die vom Zuordnungsnocken herrührende Verstellung beeinflusst *gleichzeitig, aber mit entgegengesetzter Wirkung* die Steuerschieber des Leitapparates und des Laufrades.
- Die von den Rückführungen des Leitapparates und des Laufrades herrührenden Änderungen beeinflussen *gleichzeitig* die oben erwähnte Verstellung  $Y$ .

Ein solcher Regler ist in der Lage, das Verhalten einer Anlage zu verbessern, und zwar nicht nur bezüglich der *Stabilität*, sondern vor allem auch bezüglich der *Geschwindigkeit der Antwort* auf eine Änderung einer der freien Größen (Bruttogefälle oder Netzbelaistung  $\dot{E}_\lambda$ ). Auf Bild 2 sind die verschiedenen Funktionen auf mechanischem Wege verwirklicht. Es sei darauf hingewiesen, dass ein grosser Teil derselben heute mit elektronischen Mitteln realisiert wird.

Die Parameter  $\zeta_a$  und  $\zeta_b$  sind Koeffizienten, die nur die Werte 0 oder 1 annehmen können, und zwar  $\zeta = 0$ , wenn keine direkte Steuerung des entsprechenden Organs vorliegt (Leitapparat oder Laufrad), und  $\zeta = 1$ , wenn diese Steuerung vorhanden ist. Die Parameter  $r_{6a}$  und  $r_{6b}$  weisen folgende Werte auf:  $r_6 = 0$ , wenn bei Zuordnungsabweichungen keine Wirkung auf das entsprechende Organ (Leitapparat oder Laufrad) vorhanden ist, und  $r_6 \neq 0$ , wenn eine solche Wirkung vorliegt.

Es werden nun die folgenden drei Regler verglichen:

a) *Einfache Steuerung*

$$\zeta_a = 1 \quad \zeta_b = 0$$

$$r_{6a} = 0 \quad r_{6b} \neq 0$$

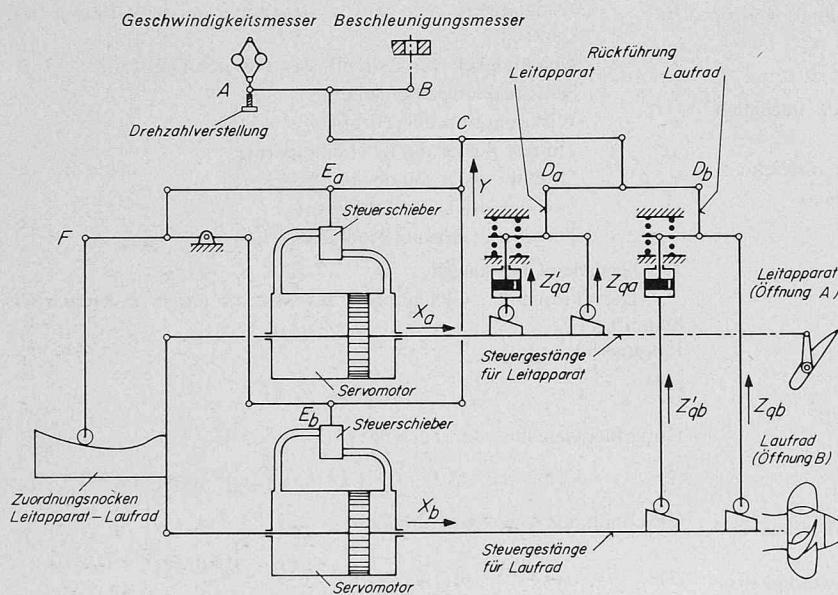


Bild 2. Schema eines verbesserten Geschwindigkeits-Beschleunigungsreglers mit nachgiebiger Rückführung für die Zweifachregelung einer Kaplan-Turbine

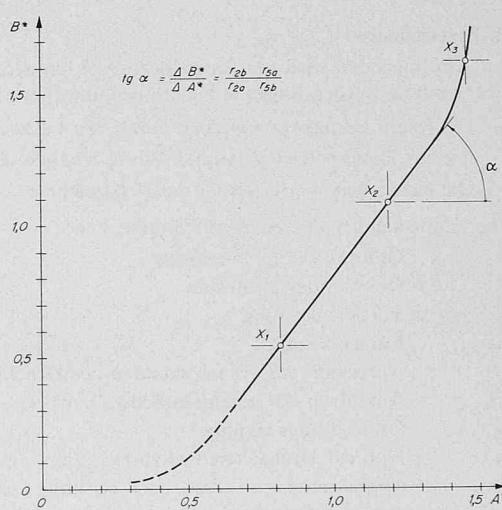


Bild 3. Zuordnungskurve der Leitapparat- und Laufradstellung einer Kaplan-Turbine

### b) Simultane Steuerung

$$z_a = 1 \quad z_b = 1$$

$$r_{6a} = 0 \quad r_{6b} \neq 0$$

### c) Verbesserter Regler

$$z_a = 1 \quad z_b = 1$$

$$r_{6a} \neq 0 \quad r_{6b} \neq 0$$

Unabhängig vom Reglertyp gilt für Dauerbetrieb die Beziehung:

$$(6) \quad \frac{\Delta B^*}{\Delta A^*} = \frac{r_{2b} r_{5a}}{r_{2a} r_{5b}} = \tan \alpha$$

welche den zwischen der Neigung des Zuordnungsnockens gemäss Bild 3 und den charakteristischen Reglerparametern bestehenden Zusammenhang ausdrückt.

### 4. Funktionsschema und Analogrechenschema

Die Aussagen der Gleichungen (1) bis (5) werden durch das Funktionsschema Bild 4 erläutert. Die Simulation des Problems auf dem Analogrechner erfordert die Umwandlung dieses Funktionsschemas in ein Simulationsschema, Bild 5. Darin bedeuten:

- die 15 Dreiecke die Summatoren
- die 6 Dreiecke mit anschliessendem Rechteck die Integriatoren
- die 30 Kreise die Potentiometer.

Die auf den Potentiometern angegebenen Werte entsprechen dabei den Anlageparametern.

### 5. Versuchsbedingungen

In Tabelle 1 sind die Zahlenwerte aller Anlageparametere zusammengestellt, mit Ausnahme der einstellbaren Reglerparametern, und zwar für die folgenden drei Betriebszustände:

$$1. \text{ Schwachlast} \quad \dot{E}^* = 0,515$$

$$2. \text{ Last bei maximalem Wirkungsgrad} \quad \dot{E}^* = 0,886$$

$$3. \text{ Maximallast} \quad \dot{E}^* = 1,205$$

Diese drei Betriebszustände sind in den Bildern 1 und 3 durch die Punkte  $X_1$ ,  $X_2$  und  $X_3$  gekennzeichnet.

In Tabelle 2 sind die Zahlenwerte der einstellbaren Reglerparametern aufgeführt, und zwar für folgende drei Reglerarten:

a) Einfache Steuerung

b) Simultane Steuerung

c) Verbesserter Regler.

Um den Vergleich dieser drei Reglertypen so einfach als möglich zu gestalten, wurde angenommen, dass bei allen die dauernde und vorübergehende Statik gleich Null sei. Diese Annahme scheint zulässig, weil einerseits der Einfluss dieser Statik auf die Stabilität der gesamten Anlage schwach ist, und weil er anderseits jedenfalls für alle drei Reglertypen gleich gross ist. Schliesslich zeigt sich der Charakter der Übergangsfunktion viel ausgeprägter, wenn die Beharrungs-Drehzahlabweichung  $\Delta N^*$  Null ist.

Die Parameter  $R_{1a}$ ,  $R_{1b}$ ,  $R_3$  und  $r_{6b}$  für die Regler a) und b) wurden so gewählt, dass sie so gut als möglich den zur Zeit beim Betrieb von Kaplanturbinen üblichen entsprechen. Diese Werte ergeben sich einerseits aus der Erfahrung und anderseits aus einer Anzahl von durch die Gesetze der Hydraulik und durch konstruktive Überlegungen gegebenen Bedingungen. Die Parameterwerte  $R_{1a}$ ,  $R_{1b}$ ,  $R_3$  und  $r_{6b}$  für den Regler c) wurden sowohl im Hinblick auf eine Verbesserung der Stabilitätsverhältnisse als auch auf eine schnellere Antwort des Systems gewählt.

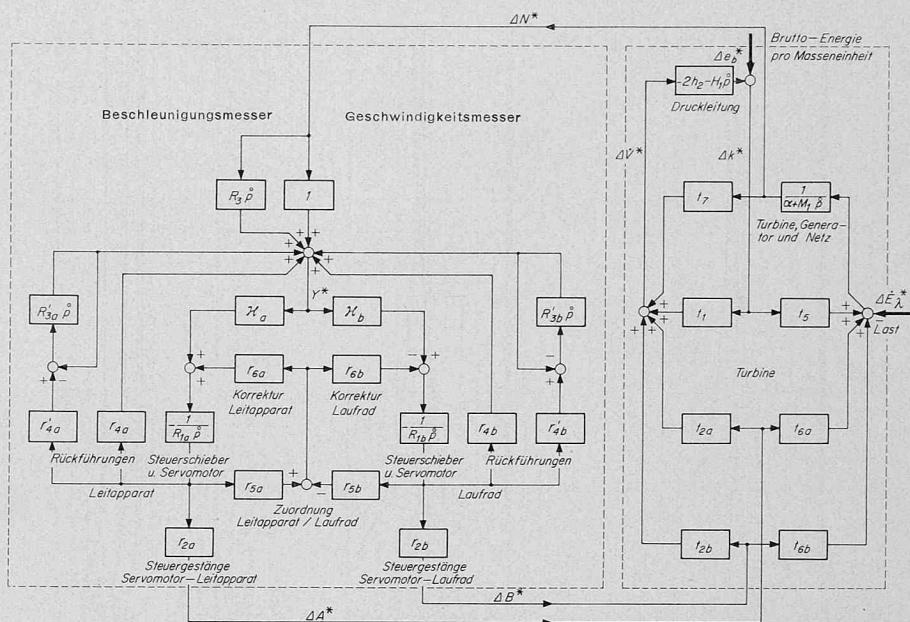


Bild 4. Funktionsschema einer hydroelektrischen Anlage mit Kaplan-Turbine und Regler gemäss Bild 2, im Einzelbetrieb

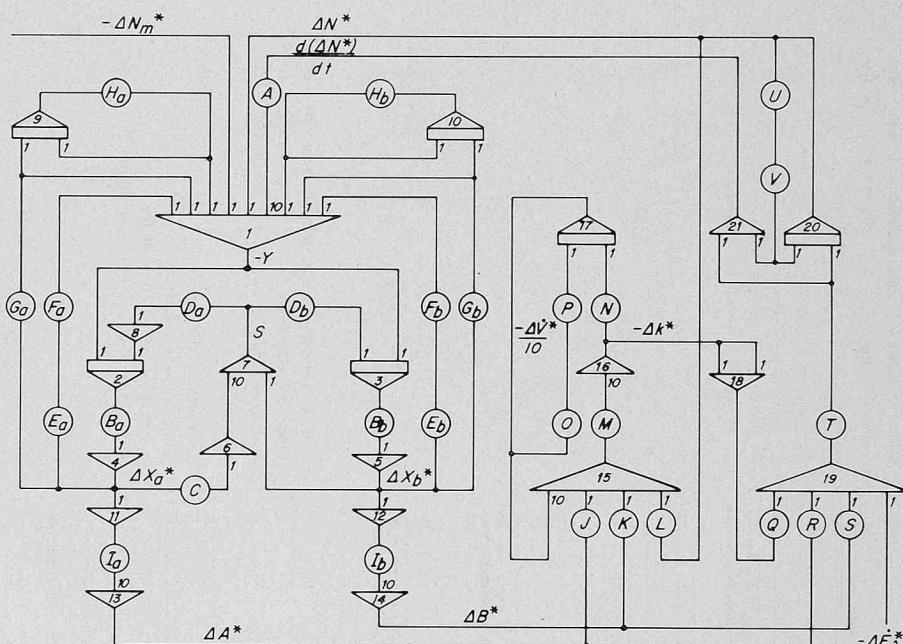
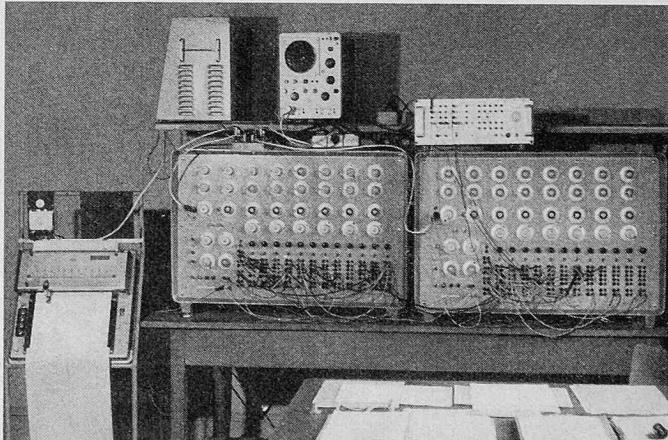


Bild 5. Simulationsschema zur Untersuchung der Anlage gemäss Bild 4 auf dem Analogrechner

Bild 6. Ansicht der beiden Analogrechner, Fabrikat Güttinger, Typ AR2, des Laboratoire d'Electronique de l'EPUL. Links der Potentiometerschreiber, auf dem Rechner rechts der Funktionsmultiplikator



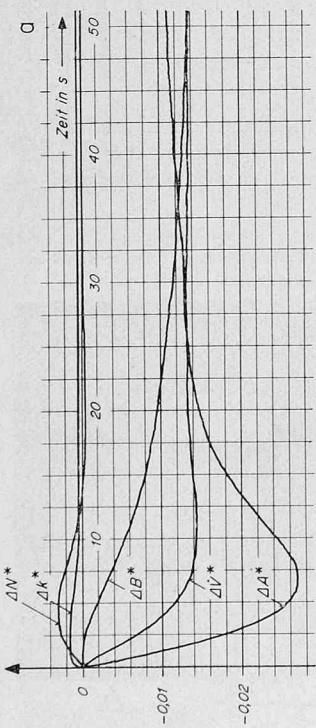


Bild 7 (links). Übergangsfunktionen nach einer Störung  $\Delta E_{\lambda}^* = 1\%$  im Fall des Betriebszustandes 1 (Schwachlast)

a Einfache Steuerung  
b Simultane Steuerung  
c Verbesserter Regler Vevey  
d Kurven von  $\Delta N^*$  für die Regler

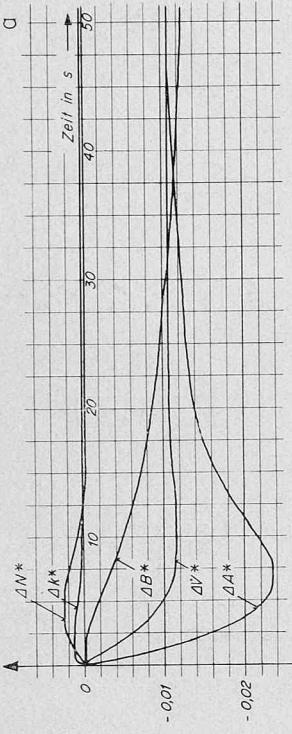
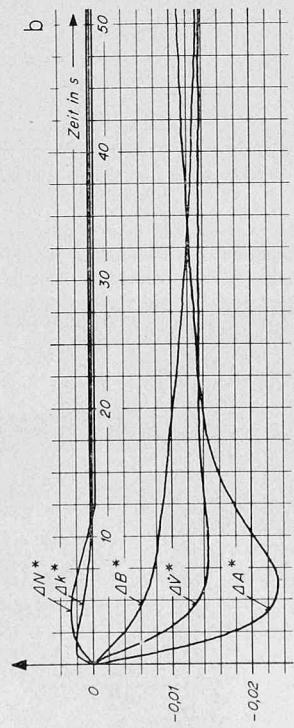


Bild 7 (rechts). Übergangsfunktionen nach einer Störung  $\Delta E_{\lambda}^* = 1\%$  im Fall des Betriebszustandes 1 (Schwachlast)

a Einfache Steuerung  
b Simultane Steuerung  
c Verbesserter Regler Vevey  
d Kurven von  $\Delta N^*$  für die Regler

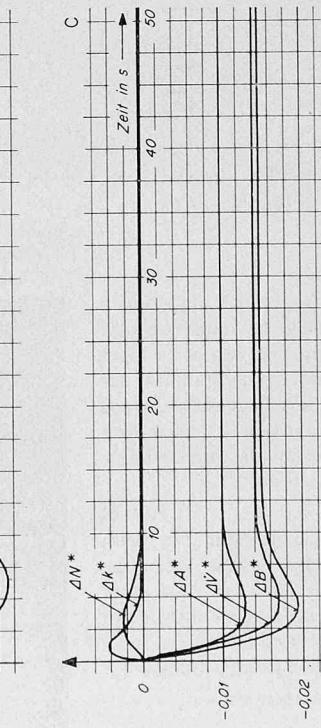


Bild 8 (links). Übergangsfunktionen nach einer Störung  $\Delta E_{\lambda}^* = 1\%$  im Fall des Betriebszustandes 2 (Last bei maximalem Wirkungsgrad)

a Einfache Steuerung  
b Simultane Steuerung  
c Verbesserter Regler Vevey  
d Kurven von  $\Delta N^*$  für die Regler

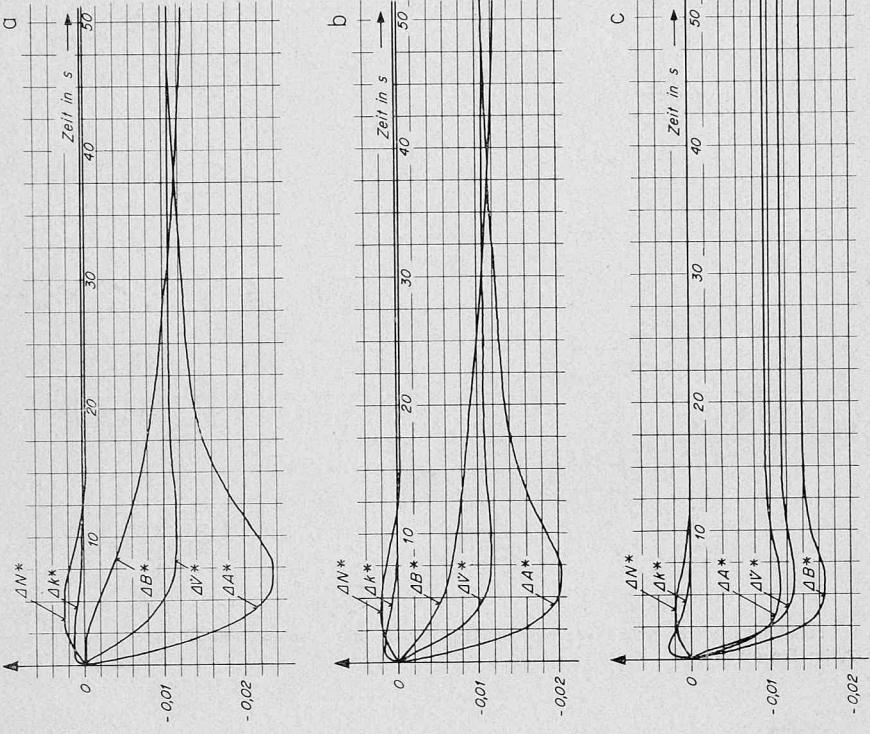
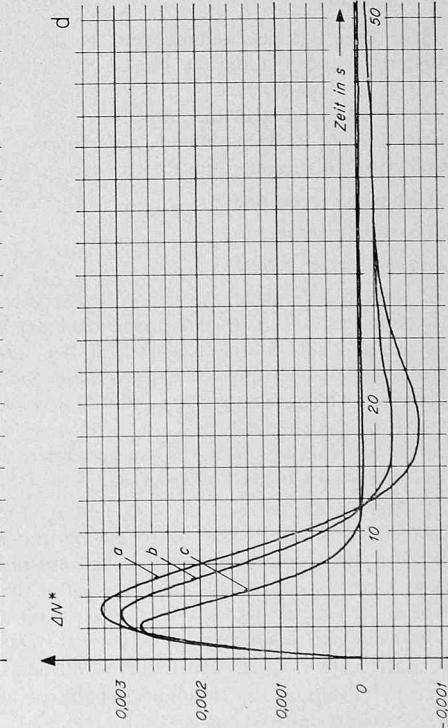


Bild 8 (rechts): Übergangsfunktionen nach einer Störung  $\Delta E_{\lambda}^* = 1\%$  im Fall des Betriebszustandes 2 (Last bei maximalem Wirkungsgrad)

a Einfache Steuerung  
b Simultane Steuerung  
c Verbesserter Regler Vevey  
d Kurven von  $\Delta N^*$  für die Regler

Fälle des Betriebszustandes 3 (Maximallast)

Bild 9 (rechts unten S. 267). Übergangsfunktionen nach einer Störung  $\Delta E_{\lambda}^* = 1\%$  im Fall des Betriebszustandes 3 (Maximallast)

a Einfache Steuerung  
b Simultane Steuerung  
c Verbesserter Regler Vevey  
d Kurven von  $\Delta N^*$  für die Regler

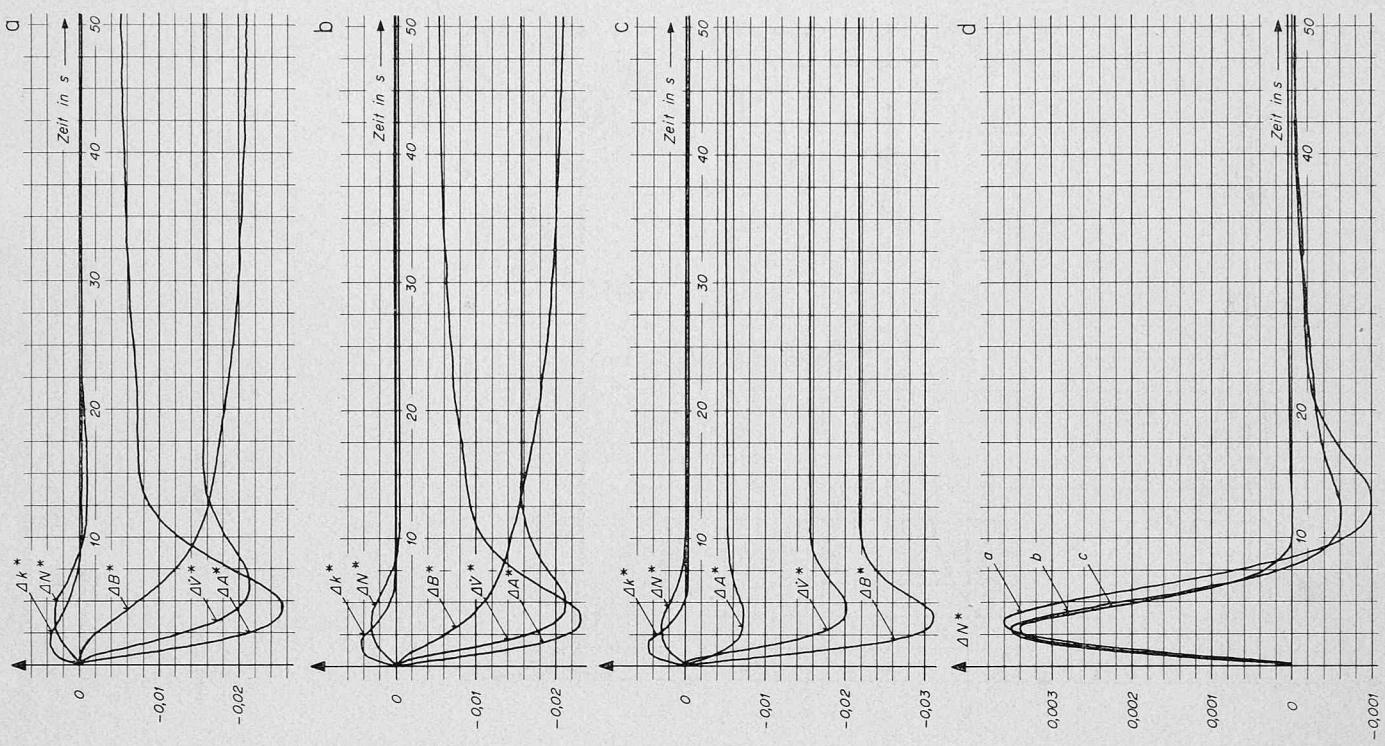


Tabelle 1

Parameter	1) Schwachlast	2) Last bei maximalem Wirkungsgrad	3) Maximallast	Einheiten
$H_1$	0,572	0,572	0,572	s
$M_1$	6,199	6,199	6,199	s
$h_2$	0,0065	0,0109	0,0155	—
$r_{2a}$	1	1	1	—
$r_{2b}$	1	1	1	—
$r_{5a}$	1,49	1,49	4,38	—
$r_{5b}$	1	1	1	—
$t_1$	0,229	0,383	0,524	—
$t_{2a}$	0,409	0,438	0,739	—
$t_{2b}$	0,483	0,594	0,507	—
$t_5$	0,868	1,450	1,924	—
$t_{6a}$	0,443	0,401	0,508	—
$t_{6b}$	0,393	0,396	0,361	—
$t_7$	0,242	0,417	0,646	—
$\alpha$	0,299	0,406	0,437	—

Tabelle 2

Parameter	a) Einfache Steuerung	b) Simultane Steuerung	c) Verbesserter Regler	Einheiten
$z_a$	1	1	1	—
$z_b$	0	1	1	—
$R_{1a}$	1	1	1	s
$R_{1b}$	0,2	0,2	1	s
$R_3$	5	5	4	s
$R'_{3a}$	0	0	0	s
$R'_{3b}$	0	0	0	s
$r_{4a}$	0	0	0	—
$r_{4b}$	0	0	0	—
$r'_{4a}$	0	0	0	—
$r'_{4b}$	0	0	0	—
$r_{6a}$	0	0	1	—
$r_{6b}$	0,1	0,1	1	—

Entsprechend der heute üblichen Praxis, wurden die Parameterwerte für den bezüglich Stabilität ungünstigsten Betriebszustand gewählt, d. h. für den Betriebszustand 3 (Maximallast). Diese Werte wurden dann auch für alle Versuche unter andern Betriebszuständen beibehalten.

Die in Betracht gezogenen Versuche lassen sich gruppieren in Versuche zur Bestimmung der Übergangsfunktion, in solche zur Bestimmung der Antwort auf eine anfängliche Zuordnungs-Störung und schliesslich Versuche zur Bestimmung der Antwort auf aleatorische Störungen.

#### A. Versuche zur Bestimmung der Übergangsfunktion

Bei diesen Versuchen wurde das System einer Schrittstörung in Form eines plötzlichen Abfalls  $\Delta \dot{E}_\lambda^*$  der Belastung des elektrischen Netzes unterworfen, um die Übergangsfunktion, d. h. den Verlauf der verschiedenen Anlagegrössen in Funktion der Zeit zu beobachten.

#### B. Versuche zur Bestimmung der Antwort auf eine anfängliche Zuordnungsstörung

Bei diesen Versuchen wird das System durch eine anfängliche Abweichung der Zuordnung von Leitapparat und Laufrad beeinflusst, in der Weise, dass – im Anfangspunkt – die Antriebsleistung  $\dot{E}^*$  der Widerstandsleistung  $\dot{E}_r^*$  gleich ist.

Diese Versuche sind deshalb von Interesse, weil solche Zuordnungsabweichungen im normalen Betrieb oft auftreten, vor allem beim Anfahren oder bei stärkeren Regeleingriffen.

#### C. Versuche zur Bestimmung der Antwort auf aleatorische Störungen

Bei diesen Versuchen wird das System einer aleatorischen Störung  $\Delta \dot{E}_\lambda^*$  der elektrischen Netzbelaistung unterworfen, um die aleatorische Antwort der verschiedenen Anlagegrössen zu beobachten.

Die Untersuchungen wurden mit Hilfe von zwei Analogrechnern, Bild 6, durchgeführt. Es handelt sich um Analogcomputer Fabrikat Göttinger, Typ A2, die im Besitz des Laboratoire d'Electronique der Ecole Polytechnique de l'Université de Lausanne sind. Die aleatorischen Störungen von  $\dot{E}^*$  wurden mittels eines durch das Laboratoire Electronique der EPUL entwickelten Rauschgenerators erzeugt.

#### 5. Versuchsergebnisse

##### A. Versuche zur Bestimmung der Übergangsfunktionen

Die Bilder 7, 8 und 9 geben die Schreibstreifen der erhaltenen Übergangsfunktionen wieder. Darin zeigen jeweils die drei ersten Kurven die Übergangsfunktionen der Abweichungen der Drehzahl  $\Delta N^*$ , der Leitapparat-Stellung  $\Delta A^*$ , der Laufschaufln-Stellung  $\Delta B^*$ , der Netto-Energie  $\Delta k^*$  (Netto-Gefälle) und des Durchflusses  $\Delta \dot{V}^*$  nach einer Schrittstörung von 1%, d. h. nach einem plötzlichen Abfall der Belastung des elektrischen Netzes entsprechend  $\Delta \dot{E}_\lambda^* = -0,01$ .

Auf den Bildern 10, 11  
und 12 bedeuten:

- a Einfache Steuerung
- b Simultane Steuerung
- c Verbesserter Regler  
Vevay

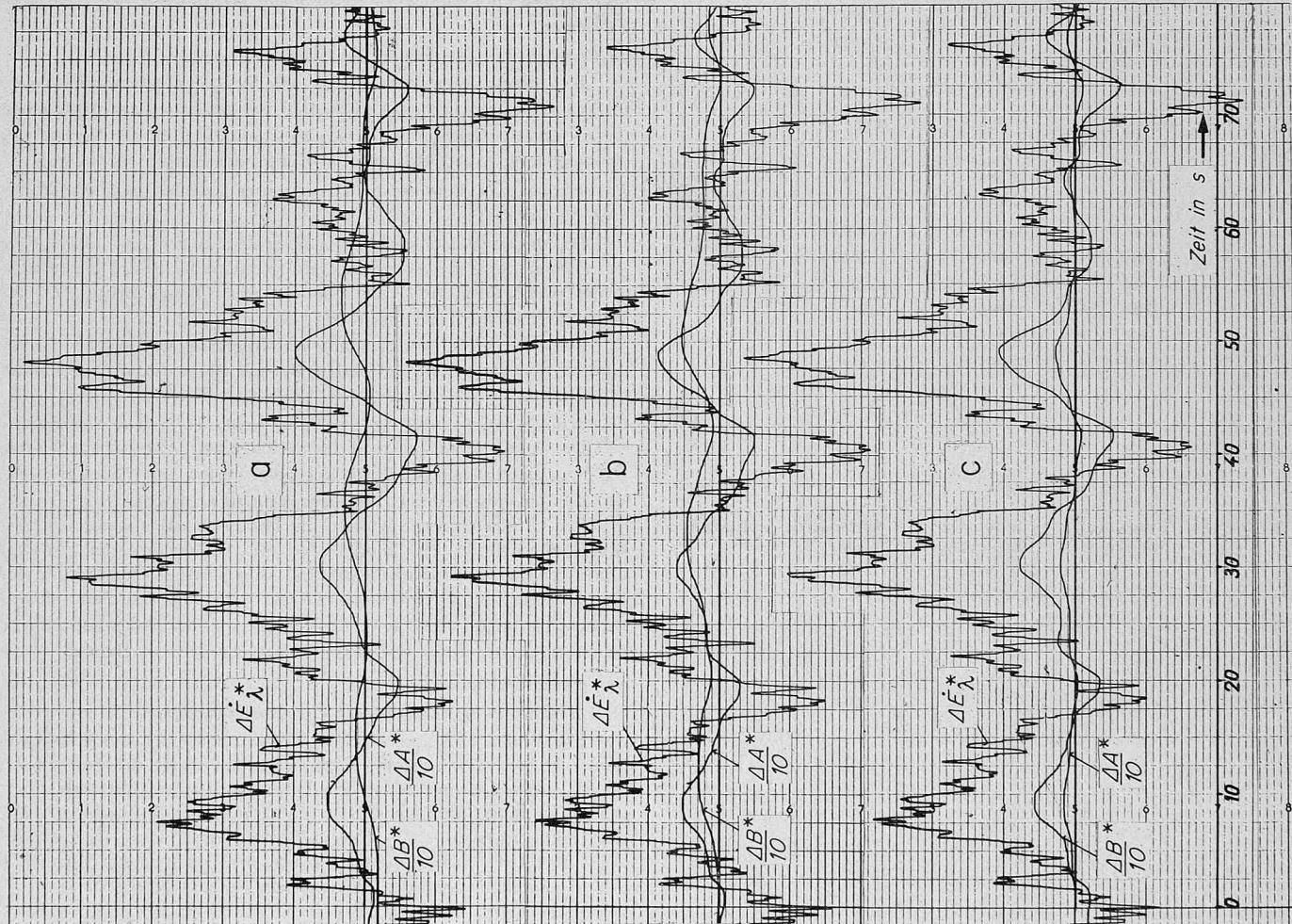


Bild 10. Antwortkurven bei anfänglicher Zuordnungsabweichung der Stellungen von Leitapparat und Laufred, im Fall des Betriebszustandes 3 (Maximallast)

Bild 11 (links). Antwortkurven für Abweichungen der Leitapparatsstellung  $\Delta A^*$  und der Laufschaukelstellung  $\Delta B^*$  nach aleatorischer Störung  $\Delta E_\lambda^*$  der elektrischen Netzelastung, bei Betriebszustand 3 (Maximallast)

Bild 12 (links unten, S. 269). Antwortkurven für Abweichungen der Drehzahl  $\Delta N^*$  nach aleatorischer Störung  $\Delta E^*$  der elektrischen Netzelastung, bei Betriebszustand 3 (Maximallast)

Diese drei Schreibstreifen sind wie folgt unterteilt:

- erste Kurvenschar: Reglertyp a) Einfache Steuerung
- zweite Kurvenschar: Reglertyp b) Simultane Steuerung
- dritte Kurvenschar: Reglertyp c) Verbesserter Regler.

Die vierte Kurvenschar zeigt in grösserem Maßstab die Übergangsfunktion der Drehzahlabweichung  $\Delta N^*$  für die betrachteten drei Reglertypen.

Die Prüfung dieser Ergebnisse führt zu folgenden Feststellungen:

1. Unabhängig vom Reglertyp erhöht sich die Stabilität der Regelung der gesamten Anlage bei sinkender Last, was mit den Beobachtungen in ausgeführten Anlagen gut übereinstimmt.
2. Unabhängig von der Belastung wird die Stabilität der Regelung der gesamten Anlage besser, wenn vom Regler a) auf Regler b) übergegangen wird, und sie verbessert sich weiter bei Übergang vom Regler b) auf den Regler c).

Im einzelnen können noch folgende Aussagen gemacht werden:

- Die Antwort der Drehzahlabweichung  $\Delta N^*$  überschwingt weniger bei Anwendung des Reglers c) als mit den Reglern a) und b).
- Die Antwort der Drehzahlabweichung  $\Delta N^*$  ist mit dem Regler c) praktisch aperiodisch, während sie für die Regler a) und b) oszillierenden Charakter hat.
- Die Antwort der Abweichung der Leitapparat-Stellung  $\Delta A^*$  zeigt ein viel schwächeres Überschwingen beim Regler c) als mit den Reglern a) und b).
- Die Antwort der Abweichung der Laufschaukel-Stellung  $\Delta B^*$  zeigt ein deutliches Überschwingen mit dem Regler c), während dies für die Regler a) und b) nicht zutrifft.
- Im transitorischen Betrieb bleiben bei Anwendung des Reglers c) die Stellungen von Leitapparat und Laufschaukel praktisch zugeordnet, während bei den Reglern a) und b) sehr wesentliche Abweichungen von dieser Zuordnung auftreten.
- Mit dem Regler c) wird der neue Beharrungswert nach 10 bis 15 s erreicht, während dies bei den Reglern a) und b) auch nach 50 s noch nicht der Fall ist.

#### B. Versuche zur Bestimmung der Antwort auf eine anfängliche Zuordnungsstörung

Bild 10 zeigt die Antwortkurven auf eine anfängliche Zuordnungsstörung, wie sie bei der Durchführung der Versuche erhalten wurden. Dort zeigen die drei Schreibstreifen die Antworten der Abweichungen der Drehzahl  $\Delta N^*$ , der Leitapparatstellung  $\Delta A^*$  und der Laufschaukelstellung  $\Delta B^*$  auf eine anfängliche Zuordnungsstörung, welche charakterisiert ist durch

$$\Delta A^* = 0,014 \quad \text{und} \quad \Delta B^* = -0,020 ,$$

und zwar für den Betriebszustand 3 (Maximallast) und für die drei betrachteten Regler a), b) und c).

Die Prüfung dieser Resultate führt zu folgenden Feststellungen:

- Im transitorischen Betrieb werden bei Anwendung des Reglers c) Leitapparat und Laufrad sehr rasch so verstellt, dass die Zuordnung der Stellungen in kurzer Zeit praktisch erreicht wird, während mit den Reglern a) und b) wesentliche Abweichungen über längere Dauer auftreten.
- Der Beharrungszustand der Zuordnung wird mit dem Regler c) in etwa 13 s erreicht, während dies mit den Reglern a) und b) nach 40 s noch nicht der Fall ist.

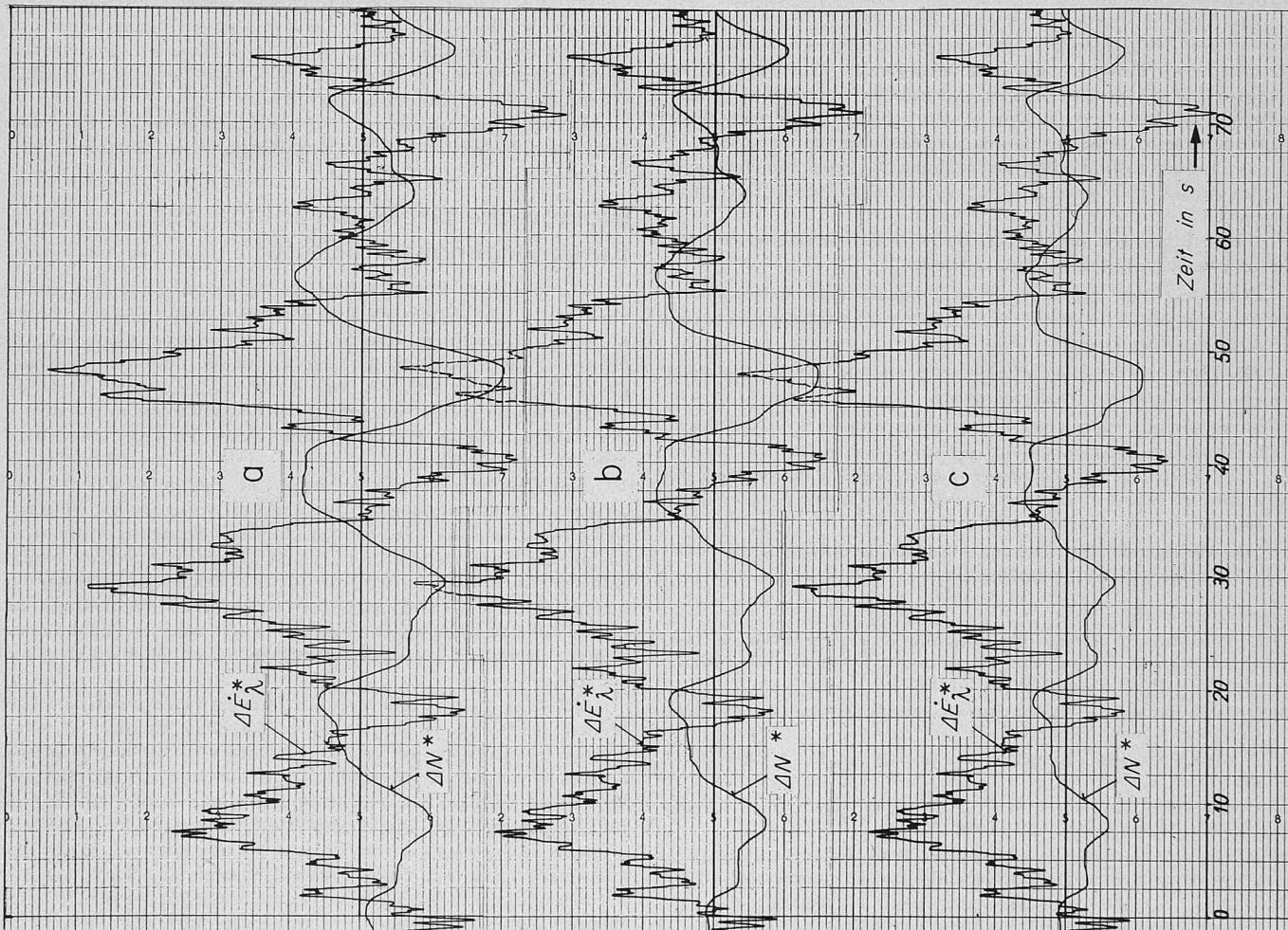
#### C. Versuche zur Ermittlung der Antwort auf aleatorische Störungen

Die Bilder 11 und 12 zeigen einen Ausschnitt des während der Versuche erhaltenen Schreibstreifens der aleatorischen Antworten.

Es handelt sich um Antworten auf aleatorische Störungen von derjenigen Art, wie sie in bestehenden Netzen beobachtet wurden [3]. Es war in der Tat möglich, zu beweisen, dass die spektrale Energie-Intensität der Laständerungen  $\Delta \dot{E}_\lambda^*$  sich in Funktion der Frequenz  $\nu$  durch die Beziehung ausdrücken liess:

$$(7) \quad A_e = \frac{1,6 \cdot 10^{-6}}{(0,024)^2 + \nu^2} \quad (\text{in Sekunden})$$

Eine einem weißen Rauschen entsprechende Störfunktion konnte mittels eines Rauschgenerators erzeugt und auf Magnetband aufgenommen werden. Es war dann möglich, den Ausgang aus diesem Band



passend zu verstärken und in den Rechner einzugeben, in der Weise, dass eine aleatorische Funktion, wie oben definiert, erhalten wurde. Diese Funktion simuliert also die Laständerungen  $\Delta E_\lambda^*$ , wie sie in Wirklichkeit vorkommen, d. h. entsprechend dem durch die Abnehmer des Netzes gegebenen Verhalten. Sie weist die Form einer zackigen Kurve auf, wie dies aus den Bildern 11 und 12 hervorgeht.

Die Bilder 11 und 12 zeigen weiter die *aleatorischen Antworten* der Abweichungen der Drehzahl  $\Delta N^*$ , der Leitapparatstellung  $\Delta A^*$  und der Laufschauflinstellung  $\Delta B^*$  unter der Wirkung der oben erwähnten *aleatorischen Störung* und zwar wieder für den Betriebszustand 3 (Maximallast) und die drei betrachteten Reglertypen a), b) und c).

Eine Prüfung von Bild 12 zeigt, dass die *Schwankungen der Drehzahlabweichungen  $\Delta N^*$  bei Verwendung des Reglers b)* weniger gross sind als mit Regler a) und noch kleiner werden, wenn der Regler c) anstelle von b) benutzt wird. Bei der Beurteilung von Bild 11 sei daran erinnert, dass bei perfekter Zuordnung mit Rücksicht auf Gl. (6) die Kurven  $\Delta A^*$  und  $\Delta B^*$  *affin* wären in bezug auf die Horizontalaxe. Im Fall des Betriebszustandes 3 (Maximallast) würde somit immer gelten:

$$\Delta B^* = 4,38 \Delta A^*$$

was bedeutet, dass die Ordinaten der Kurve  $\Delta B^*$  bis auf den Faktor 4,38 denjenigen der Kurve  $\Delta A^*$  gleich sind und insbesondere, dass die Kurven  $\Delta A^*$  und  $\Delta B^*$  sich auf der horizontalen Axe schneiden würden.

Bild 11 zeigt, dass mit den Reglern a) und b) die Zuordnung von Leitapparat und Laufgrad ständig gestört ist, während sie mit dem Regler c) praktisch aufrechterhalten bleibt.

Diese letzte Feststellung ist außerordentlich wichtig, denn jede Zuordnungsabweichung führt unmittelbar zu einem Wirkungsgradabfall der Turbine. Dies ergibt einen entsprechenden finanziellen Verlust, der, in Anbetracht des andauernden Charakters des Phänomens, sehr bedeutend sein kann.

## 6. Schlussfolgerungen

Im vorliegenden Aufsatz werden die Ergebnisse von Untersuchungen betreffend das dynamische Verhalten eines mit einer Kaplan-turbine ausgerüsteten Werkes dargelegt. Es wird dabei ein verbesselter Drehzahlregler vorgeschlagen, dessen Konzeption universeller ist als diejenigen der bisherigen Regler. Es wird das Gleichungssystem gegeben, welches das dynamische Verhalten der ganzen Anlage ausdrückt, das diesem System entsprechende detaillierte Funktionsschema sowie das daraus abgeleitete Simulationsschema.

Nach einer ausführlichen Beschreibung der Versuchsbedingungen werden die mit Hilfe von Analogrechnern erzielten Versuchsergebnisse angegeben.

Diese Ergebnisse zeigen, dass der von uns vorgeschlagene verbesserte Regler folgende Vorteile aufweist:

- Er bewirkt nicht nur eine stabilere, sondern auch eine schnellere Regelung, als sie bisher mit der einfachen oder simultanen Steuerung erreicht werden konnte.
- Er sichert im Falle einer allfälligen Abweichung von der Zuordnung eine viel promptere Wiederzuordnung.
- Er sichert gegenüber einer aleatorischen Störung der Last sowohl eine bessere Frequenzhaltung als auch ein wesentlich besseres Aufrechterhalten der Zuordnung Leitapparat – Laufschaufl, was anderseits bestimmt eine sehr beträchtliche finanzielle Einsparung bedeutet.

Die vorliegende Untersuchung wurde für die *Ateliers de Constructions Mécaniques de Vevey* durchgeführt.

## Literaturverzeichnis

- [1] G. Ransford et J. Rottner. L'optimisation du réglage de vitesse d'une turbine Kaplan, compte tenu de la forme de la colline et de l'autoréglage. «La Houille Blanche» No 6-1959.
- [2] L. Borel. Stabilité de réglage des installations hydroélectriques. Payot Lausanne – Dunod Paris 1960.
- [3] D. Gaden. Nouveaux résultats d'essais. «Bulletin de l'A.S.E.». No 2, 1963.
- [4] L. Borel et J. Berberides. Stabilité de réglage des turbines Kaplan. «Bulletin Technique VEVEY» 1963/1964.
- [5] B. Favez, M. Lericque et M. Roquesfort. L'optimisation du réglage de vitesse des groupes hydroélectriques. «La Houille Blanche» No 1, 1964.
- [6] L. Borel et J. Berberides. Simulation d'une installation hydraulique équipée d'une turbine Kaplan. «Bulletin Technique VEVEY» 1965.

## Ein Forschungs- und Bestrahlungszentrum in der Schweiz

DK 061.62:621.039

Die Inrescor, Internationale Forschungs-Gesellschaft AG, in Schwerzenbach/Zürich, eine Tochtergesellschaft der Heberlein-Gruppe, teilt mit, dass sich die Oerlikon-Bührle Holding AG als Aktionärin an der Inrescor AG beteiligt hat. Diese Partnerschaft wurde geschlossen, nachdem sich schon seit einigen Jahren auf beiden Seiten auf dem Gebiete der Isotopenanwendung zum Teil parallele Entwicklungstendenzen abzeichneten. Im Zuge dieses Zusammenschlusses wird die Nuklearabteilung der Werkzeugmaschinenfabrik Oerlikon, Bührle & Co., ab 1. März 1967 in die Inrescor AG integriert.

Die Zielsetzung der Inrescor AG erhält damit in Ergänzung zur traditionellen Kontraktforschung auf dem Textil-, Kunststoff- und Strahlengebiet einen weiteren Schwerpunkt in der Anwendung von Isotopen auf dem Gebiete der Messtechnik. Diese umfasst im besonderen die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung mittels Gamma- und Röntgenstrahlen, die Entwicklung radiometrischer Messverfahren, sowie Traceruntersuchungen und Analysen durch Neutronenaktivierung.

Die bereits bestehende Forschungsabteilung der Inrescor AG für Strahlungchemie wird sich neben den Arbeiten zur strahlungsinduzierten Modifikation textiler Materialien und polymerer Produkte wie Folien, Lacke, Elastomere usw. vermehrt den Problemen des Einsatzes der Strahlentechnologie auf dem Lebensmittelbereich zuwenden. Durch den Einsatz ionisierender Strahlen sollen neue Wege zur Frischhaltung, Lagerhaltung, Pasteurisation und Sterilisation von Nahrungsmitteln eröffnet werden. Dazu gehört auch die Entwicklung der für diese Bestrahlungsverfahren geeigneten Verpackungsmaterialien. In das künftige Programm soll auch die Strahlensterilisation medizinischer Artikel wie Wegferspritzen, Catgut, Watte, Verbandsstoffmaterial usw. aufgenommen werden. Ein besonderes Forschungsziel liegt in der Einführung strahlenchemischer Methoden für spezielle chemische Synthesen. In Erweiterung der bestehenden Forschungsanlagen wird die Inrescor AG ein auf privatwirtschaftlicher Basis betriebenes Bestrahlungszentrum in Schwerzenbach zur Durchführung kommerzieller Bestrahlungsprozesse aufbauen. Diese Grossanlage soll im Laufe des Jahres 1968 dem Betriebe übergeben werden und für Aufträge der Wirtschaft und des Bundes zur Verfügung stehen. Mit diesem ersten Bestrahlungszentrum in der Schweiz wird der entscheidende Schritt getan, um auch unserem Lande die grossen Möglichkeiten der Strahlennutzung zu erschliessen.

Dem Verwaltungsrat der Inrescor AG gehören an: Dr. Georg Heberlein, Präsident; Dr. Dietrich Bührle, Kurt Strässler, Henry Wasmer.

## Biologische Grosskläranlage der Emschergenossenschaft

DK 628.33:628.35

Die dringende Notwendigkeit, den Rhein vor weiteren Verunreinigungen, welche auf natürlichem Wege nicht mehr abgebaut werden können, zu bewahren, veranlasste die Emschergenossenschaft, die für die Abwasserreinigung der Emscher von Dortmund bis Duisburg/Oberhausen verantwortlich ist, eine Kläranlage zu erstellen, in der das gesamte Wasser dieses Nebenflusses gereinigt werden wird, bevor es dem Rhein zufliest. Die Kosten für dieses Vorhaben werden rd. 150 Mio DM betragen.

Das endgültige Projekt der bereits im Bau befindlichen Anlage an der Emschermündung ist das Ergebnis mehrjähriger Versuche, welche in erster Linie dazu dienten, die beste Reinigungsmethode für das in der Zusammensetzung äußerst vielseitige Abwasser herauszufinden. Im Endausbau wird sie aus drei Teilen bestehen, nämlich der mechanischen Vorreinigung, der biologischen Nachklärung und der Schlammbehandlung. Die Festlegung der einzelnen Bauabschnitte erfolgte ebenfalls so, dass die genannten Stufen geschlossen erstellt werden.

Ein 45 m breites Wehr leitet das Emscherwasser durch eine 14 m breite und 1,90 m hohe Klappe in drei Durchflussoffnungen. Von hier gelangt es, nachdem die groben Festkörper durch Rechenanlagen ausgesiebt wurden, in die Sandfangsanlage, welche aus drei Gruppen mit je vier Einzelbecken besteht. Anschliessend werden in der Vorreinigungsanlage die absetzbaren Stoffe ausgeschieden. Diese ist ebenfalls in drei Gruppen mit je sechs Becken unterteilt, welche eine Gesamtoberfläche von 53000 m<sup>2</sup> und eine mittlere Tiefe von 3 m aufweisen. In der Versuchsanlage konnte festgestellt werden, dass das Pumpen des Emscherwassers vor der ersten Stufe die Wirkung der