

Regelungstechnische Messungen an Regeleinrichtungen von Wasserturbinen

Autor(en): **Etter, Siegbert / Lein, Günter**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **102 (1984)**

Heft 42

PDF erstellt am: **26.04.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-75548>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Regelungstechnische Messungen an Regeleinrichtungen von Wasserturbinen

Von Siegbert Etter und Günter Lein, Stuttgart

Obwohl regelungstechnische Untersuchungen an Regeleinrichtungen von Wasserturbinen nur einen verhältnismässig geringen Teil der bei Überprüfung oder Abnahme in Werkstatt und Anlage durchzuführenden Prüfungen ausmachen, kommt ihnen doch grosse Bedeutung zu. Sie erfassen die eigentliche und ursprüngliche Aufgabe der Regeleinrichtungen, die Regelung der Drehzahl, der Leistung und anderer Grössen. Alle anderen ebenso wichtigen Aufgaben dienen im wesentlichen zur Steuerung und Überwachung, sie werden insbesondere in grossen Anlagen der Regeleinrichtung zugewiesen. Als Beispiele seien das automatische Anfahren und Abstellen, Schnellschluss und Notschluss genannt.

Der vorliegende Aufsatz beschränkt sich auf die rein regelungstechnischen Funktionen, welche die Genauigkeit, das Zeitverhalten und die Stabilität der Maschine bestimmen.

Die verschiedenen Untersuchungsmöglichkeiten werden gegenübergestellt und aus der Sicht der Verfasser bewertet. Die Bewertung erfolgt auf Grund von mehreren Messungen und Berechnungen, die in den vergangenen zwei Jahren auf dem Prüffeld des Institutes für Hydraulische Strömungsmaschinen und in Wasserkraftanlagen durchgeführt wurden.

Messung der Unempfindlichkeit der Regeleinrichtung

Die Unempfindlichkeit der Regeleinrichtung ist insbesondere bei Spitzenkraftwerken eine wichtige Grösse. Sie erfasst die gesamte Regeleinrichtung vom Eingangssignal - z. B. die Maschinendrehzahl bei Drehzahlregelung - bis zum Stellglied.

Wenn keine Hinweise auf spezielle «Schwachpunkte», die beseitigt werden müssen, vorliegen, wird man zunächst eine globale Empfindlichkeitsmessung durchführen.

Besonders einfach ist diese bezüglich der Netzfrequenz als Eingangsgrösse im Verbundbetrieb. Abgesehen von eventuellen Polrad-schwingungen ist die Maschinendrehzahl proportional zur Netzfrequenz. Diese schwankt im europäischen Verbundnetz unter normalen Verhältnissen maximal bis zu $\pm (0,1 \div 0,2)$ Hz; das ergibt bei einem bleibenden P-Grad von 5% eine grösste Servomotorbewegung von $\pm (4 \div 8)$ %. Messbar sind mit modernen Präzisionsfrequenzmessern noch Schwankungen $\leq 0,001$ Hz. Von einer intakten Regeleinrichtung wird bezüglich der Netzfrequenz als Eingang eine Gesamtunempfindlichkeit von weniger als $2 \cdot 10^{-4}$, das entspricht bei 50 Hz einem Wert von 0,01 Hz, erwartet [1]. Mit Präzisionsfrequenzmessgeräten und Präzisionswegaufnehmern ist die Messung gut zu bewältigen. Wie aus [1] hervorgeht, schreibt man zweckmässigerweise mit Hilfe eines Koordinatenschreibers über eine längere Zeitspanne (10 ÷ 20 min) die Frequenz über der Bewegung des Regulierorganes (Leitschaukel, Düsenadel) auf. Man erhält im Diagramm ein schrägliegendes Band, dessen Neigung den bleibenden P-Grad und

dessen vertikale Breite die doppelte Unempfindlichkeit ergeben. Bild 1 zeigt ein Beispiel mit Auswertung. Die früher häufig gewählte parallele Aufzeichnung von Frequenz und Bewegung des Regulierorganes über der Zeit läßt nur eine relativ ungenaue Abschätzung der Unempfindlichkeit zu.

Voraussetzung für die Gültigkeit der so ermittelten Unempfindlichkeit ist, dass bei den gebräuchlichen PI- oder PID-Reglern das Produkt aus Dämpfungszeitkonstante T_d (= Nachstellzeit) und vorübergehendem P-Grad b_t (= Reziprokwert der Verstärkung) klein ist; als Grenzwert kann für das europäische Verbundnetz ein Wert $b_t \cdot T_d \approx 0,2$ s angenommen werden. Auch alle sonstigen Verzögerungszeitkonstanten müssen entsprechend klein sein, was aber meist ohnehin zutrifft. Ist der Wert $b_t \cdot T_d$ grösser, so wird infolge der Verzögerung grössere Unempfindlichkeit vorge-tauscht; das schrägliegende Band wird breiter.

Messungen an einem Maschinensatz des Pumpspeicherwerkes Wehr der Schluchseewerk AG haben ergeben, dass für $b_t \cdot T_d = 0,1$ s die Unempfindlichkeit der Regeleinrichtung die Grössenordnung von $5 \cdot 10^{-5}$ hat, also weit unter dem in [1] empfohlenen Wert von $2 \cdot 10^{-4}$ liegt, Bild 2. Dies dürfte auf die meisten Regeleinrichtungen in modernen Spitzenwasserkraftwerken zutreffen. Bei $b_t \cdot T_d = 0,5$ s beträgt die scheinbare Unempfindlichkeit bereits ca. $1,5 \cdot 10^{-4}$.

Da im europäischen Verbundnetz die Frequenzschwankungen im allgemeinen relativ langsam erfolgen, kann bei der Frequenzmessung eine Integrationszeit von 2 s, wie sie bei dem am Institut verwendeten Periodendauermessgerät gewählt werden muss, um eine Auflösung

von 1/4000 Hz zu erreichen, ohne weiteres zulässig. Die in Bild 1 gezeigten Messungen erfolgten mit dieser Integrationszeit.

Hat man kein so ideales stochastisches Eingangssignal wie die Netzfrequenz zur Verfügung, muß man die Signale mit unterschiedlichen Amplituden künstlich erzeugen. Bei elektronischen Reglern und bei Verwendung von sehr genauen Funktionsgeneratoren ist dies kein grundsätzliches Problem. Der Regelkreis muß dabei u. U. aufgetrennt werden, was im Betrieb ein gewisses Risiko darstellt. Diese Signale müssen mehrfach wechselnd in beiden Richtungen aufgegeben werden, da das Stellorgan an beliebiger Stelle innerhalb des Unempfindlichkeitsbereiches stehen kann.

Das gleiche Vorgehen empfiehlt sich, wenn das Produkt $b_t \cdot T_d$ nicht klein genug eingestellt werden kann.

Erst wenn die globale Messung der Unempfindlichkeit zu hohe Werte ergibt, wird man die spezielle Ursache durch Überprüfung der einzelnen Bauteile ermitteln.

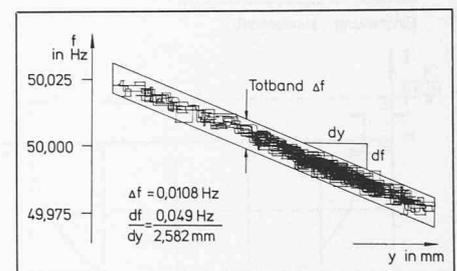
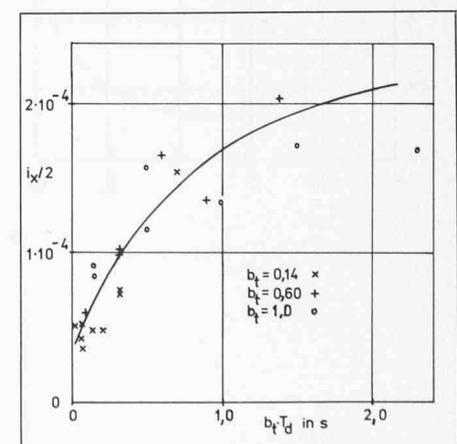


Bild 1. Aufzeichnung der Netzfrequenzschwankungen über der Bewegung des Stellgliedes, hier einer der vier Düsen einer Pelton-turbine

Bild 2. Unempfindlichkeit $i_x/2$ in Abhängigkeit vom Produkt aus vorübergehendem P-Grad und Dämpfungszeit konstante, $b_t T_d$, gemessen im Pumpspeicherwerk Wehr der Schluchseewerk AG.

$$\text{Unempfindlichkeit} \frac{i_x}{2} = \frac{\Delta f}{2 \cdot 50 \text{ Hz}}$$

$$\text{bleibender P-Grad } b_p = \frac{df \cdot \text{Nennhub}}{dy \cdot 50 \text{ Hz}} \cdot 100\%$$



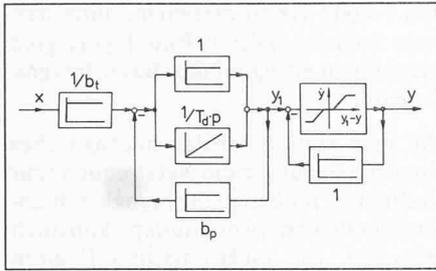


Bild 3. Signalflussplan eines idealisierten PI-Reglers mit bleibendem P-Grad und in Reihe geschaltetem, einfachem hydraulischen Verstärker.

Bild 4. Übertragungsfunktion, Frequenzgang, Ortskurve des Frequenzganges, Frequenzkennlinien einer Regeleinrichtung für die Einstellungen

- a,b Inselbetrieb oder Leerlauf
 $b_p = 0,04, b_t = 0,5, T_d = 5 \text{ s}, T = 0,2 \text{ s}$
- c,d Netzbetrieb
 $b_p = 0,04, b_t = 0,5, T_d = 0,5 \text{ s}, T = 0,2 \text{ s}$

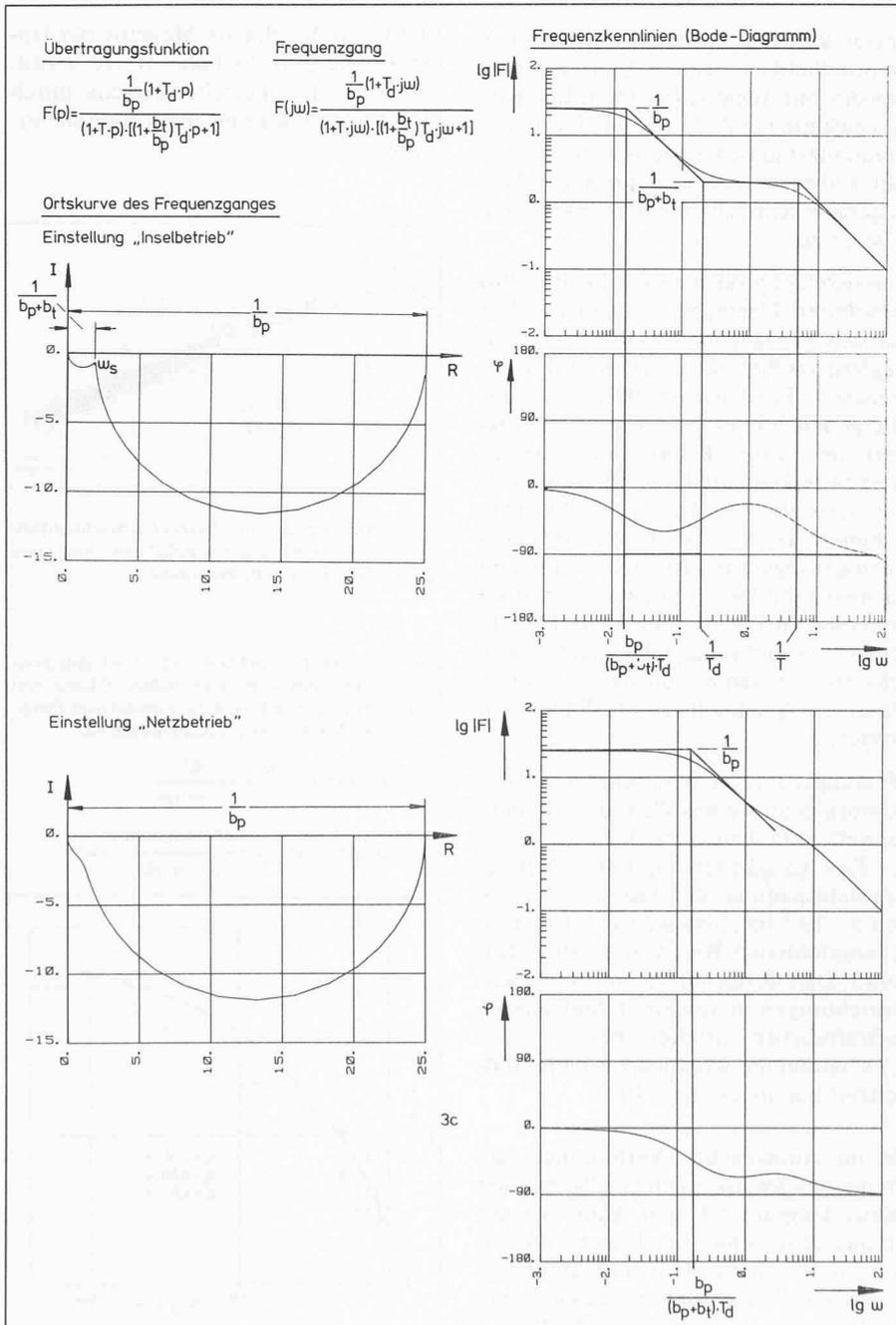
Messung der regelungstechnischen Kennwerte

Zur Charakterisierung einer Regeleinrichtung und zur theoretischen Weiterverarbeitung eignen sich die Übertragungsfunktionen im Bildbereich, der Frequenzgang und dessen graphische Darstellung in Form von Frequenzkennlinien (Bode-Diagramm) besonders gut. Bild 3 zeigt für einen idealisierten PI-Drehzahlregler mit bleibendem P-Grad und einem in Reihe geschalteten hydraulischen Verstärker den Signalflussplan, wobei zu den Einzelblöcken jeweils die Übergangsfunktion und die Übertragungsfunktion angegeben sind. Eine Ausnahme bildet die Verstärkerstufe, die stets Nichtlinearitäten enthält; dazu gehören im wesentlichen die Begrenzung

der Stellgeschwindigkeiten und die Unempfindlichkeit (Überdeckung an den Steuerkanten, Leckverluste, Reibung...), die erfahrungsgemäss meist den überwiegenden Teil der Gesamtunempfindlichkeit der Regeleinrichtung ausmacht. Deshalb ist im entsprechenden Block des Bildes 3 die nichtlineare Kennlinie eingetragen. Die Differentialgleichung dieser Regeleinrichtung lautet bei vollständiger Linearisierung - also ohne Unempfindlichkeit und Stellgeschwindigkeitsbegrenzung - in einem Beharrungspunkt

$$b_t T T_d \ddot{y} + [b_p T + (b_p + b_t) \cdot T_d] \dot{y} + b_p y = T_d \dot{x} + x$$

wobei x die normierte Drehzahländerung und y die normierte Änderung des Servomotorhubes sind. Die Bilder 4a - d zeigen für diese Regeleinrichtung den rechnerisch ermittelten Zusammenhang zwischen Übertragungsfunktion $F(p)$ (Bildbereich mit Parameter p), Frequenzgang $F(j\omega)$ (Frequenzbereich mit Parameter $j\omega$), Ortskurve und Frequenzkennlinien des Frequenzganges und



| Formelzeichen | | |
|---------------|--|--------------------|
| b_p | bleibender P-Grad | [-] |
| b_t | vorübergehender P-Grad = Reziprokwert der Verstärkung | [-] |
| $F(p)$ | Übertragungsfunktion | [-] |
| $F(j\omega)$ | Frequenzgang | [-] |
| i_x | Totband | [-] |
| $i_x/2$ | Unempfindlichkeit | [-] |
| p | Parameter im Bildbereich | [s ⁻¹] |
| S | Ausgang des elektronischen Drehzahlreglers | [%] |
| S_1 | Ausgang des elektronischen Drehzahlreglers nach Einführung der Stellzeitbegrenzung | [%] |
| S_{xx} | Leistungsdichtespektrum der Autokorrelationsfunktion | [-] |
| S_{xy} | Leistungsdichtespektrum der Kreuzkorrelationsfunktion | [-] |
| t | Zeit | [s] |
| T | Verzögerungszeitkonstante | [s] |
| T_d | Dämpfungszeitkonstante = Nachstellzeit | [s] |
| x | Eingangsgröße der Regeleinrichtung | [-] |
| y | Ausgangsgröße der Regeleinrichtung | [-] |
| Y | Servomotorhub | [%] |
| $y_u(t)$ | Übergangsfunktion der Regeleinrichtung | [-] |
| ω | Parameter im Frequenzbereich | [s ⁻¹] |
| Φ_{xx} | Autokorrelationsfunktion bezüglich x | [-] |
| Φ_{xy} | Kreuzkorrelationsfunktion bezüglich x und y | [-] |

zwar für zwei charakteristische Einstellungen, «Inselbetrieb» bzw. «Leerlauf» und «Netzbetrieb».

Den Bildern 4a ÷ d ist auch zu entnehmen, wie die Reglerkennwerte aus den gemessenen Kurven angenähert bestimmt werden können. Bei den Frequenzkennlinien, Bilder 4b und 4d, erhält man durch Einzeichnen der Asymptoten und Bestimmung der Eckfrequenzen in deren Schnittpunkten eine erste Näherung für den Frequenzgang, die anhand der im Bild angegebenen Gleichung durch Korrektur der abgelesenen Werte leicht verbessert werden kann. Dieses Verfahren führt auch bei komplizierteren Frequenzkennlinien – z. B. denen eines PID-Reglers – zum Ziel, während in solchen Fällen eine Direktauswertung der Ortskurve kaum mehr möglich ist.

Das in den Bildern 4c und d dargestellte Beispiel zeigt auch, dass für die Einstellung «Netzbetrieb» nur das Produkt $b_t \cdot T_d$ ermittelt werden kann. In der Bildunterschrift sind die aus den Kurven direkt ermittelten Kennwerte angegeben.

Zur Ermittlung der regelungstechnisch wichtigen Kennwerte einschließlich der Verstärkerzeitkonstanten wird man also eine messtechnisch möglichst genaue Bestimmung der Frequenzkennlinien anstreben. Die messtechnische Ermittlung soll zudem rasch gehen und übersichtlich sein. Drei Methoden werden im folgenden diskutiert, wobei Nichtlinearitäten zunächst ausser acht gelassen oder nur gestreift werden:

- die Direktmessung des Frequenzganges,
- die Bestimmung des Frequenzganges mit Hilfe pseudostochastischer Signale,
- die Bestimmung der regelungstechnischen Kennwerte und des Frequenzganges aus der Übergangsfunktion.

Bei den Betrachtungen wird generell vorausgesetzt, dass während der Messdauer keine wesentliche Störung von aussen auf die Regeleinrichtung einwirkt.

Es sei vorweggenommen, dass die Verfasser der Messung der Übergangsfunktion den Vorzug geben, die deshalb auch etwas eingehender behandelt wird.

Direktmessung des Frequenzganges

[2, 3, 4]

Am Eingang der Regeleinrichtung werden in dem zu untersuchenden Betriebspunkt mit mehreren Kreisfrequenzen si-

nusförmige Signale eingepreßt. Die Antwort am Ausgang, z. B. eine Leitschaukelbewegung, wird gemessen. Das Verhältnis der normierten Amplituden, Ausgangs- zu Eingangsgrösse, und ihre Phasenverschiebung liefert für jeden Wert ω einen Punkt der Ortskurve bzw. der Frequenzkennlinien. Je nach Art des Reglers (elektronisch, mechanisch) und Betriebsart kann die Eingabe mit oder ohne Auftrennung des normalen Reglereinganges erfolgen. Elektronische Regler gestatten i. a. eine einfache Überlagerung zum normalen Eingangssignal, dessen natürliche Änderungen eine Gröszenordnung kleiner sein sollten, als das überlagerte Signal. Die Auswertung kann im einfachsten Fall von Hand an den Direktaufzeichnungen erfolgen, im Idealfall mit Hilfe eines Frequenzgang-Messplatzes [5].

Hauptvorteil der Methode ist, dass sich bei genügend vielen Messpunkten die Frequenzlinien sauber bestimmen lassen. Bei Vorhandensein von einflussreichen Nichtlinearitäten muss u. U. mit mehreren Amplituden der Eingangsgrösse gemessen werden.

Folgende *Nachteile* sind zu nennen:

- Die Messungen sind insbesondere bei kleinen ω -Werten sehr zeitaufwendig (z. B. entspricht $\omega = 0,05 \text{ s}^{-1}$ einer Schwingungszeit von rund 126 s, wobei mit Rücksicht auf eine einwandfreie Auswertung wenigstens 2 bis 3 Schwingungen aufgenommen werden sollten) (Diesen Nachteil umgehen Fasol und Mitarbeiter, [6], dadurch, dass jeweils mehrere Frequenzen überlagert werden; die Analyse der Ausgangsgrösse liefert dann auch gleichzeitig mehrere Punkte des Frequenzganges. Der Zeitaufwand reduziert sich beträchtlich);
- der bleibende P-Grad ist nur mit sehr kleinen Werten ($\omega < 0,05 \text{ s}^{-1}$) zu bestimmen;
- bei langen Rohrleitungen und komplizierten Wasserführungen (Anlagen mit Wasserschloss) können Druckschwankungen im System entstehen, die unzulässig sind [7, 8];
- bei grossen Amplituden kann es in Anlagen mit knapp ausgelegten Druckspeichern zu raschem Absinken des Öldruckes kommen, so dass die Messungen unterbrochen werden müssen.

Bestimmung der Frequenzkennlinien mit Hilfe pseudostochastischer Signale

Die Methode wurde von K. H. Fasol und Mitarbeitern [9, 10, 11] insbesondere für

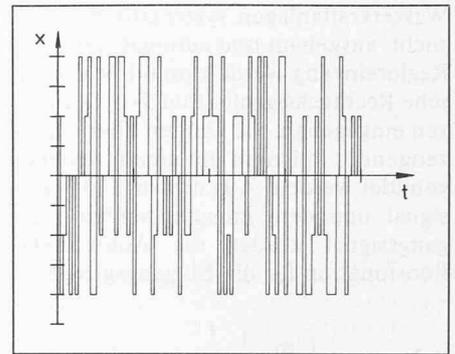
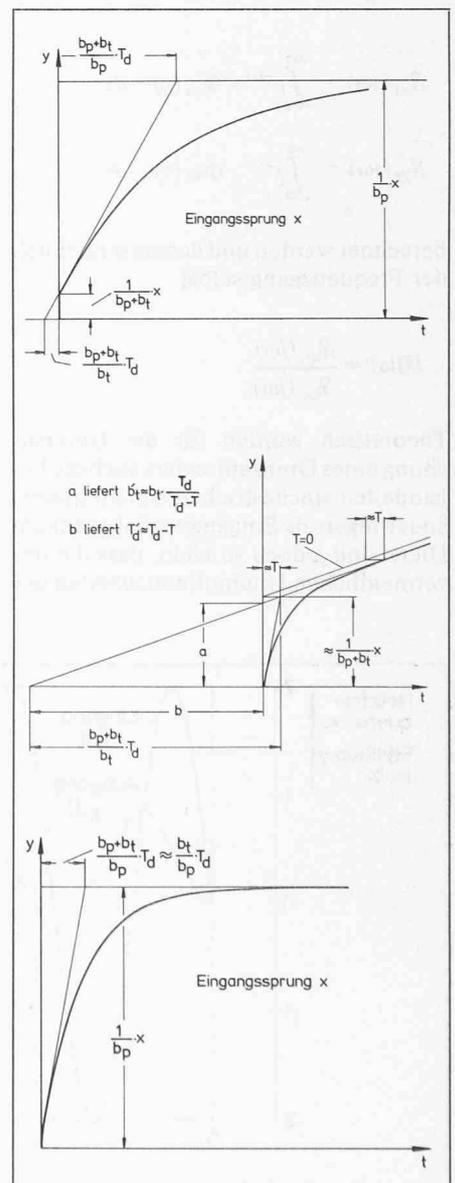


Bild 5. 5-wertiges pseudostochastisches Eingangssignal.

Bild 6. Übergangsfunktion eines idealisierten PI-Reglers mit bleibendem P-Grad

- a Einstellung Inselbetrieb, ohne Verstärker
- b Einstellung Inselbetrieb mit nachgeschaltetem hydraulischen Verstärker, Zeitkonstante T (Anfangsbereich)
- c Einstellung Netzbetrieb mit hydraulischem Verstärker (mit kleiner Zeitkonstante T_d , Gröszenordnung wie T)



Wasserkraftanlagen systematisch untersucht, ausgebaut und automatisiert. Am Reglereingang werden pseudostochastische Rechtecksignale (Bild 5) in Sequenzen eingegeben. Sie können über ein erzeugendes Polynom mit einem Rechner gebildet werden. Aus diesem Eingangssignal und dem entsprechenden Ausgangssignal werden die Autokorrelationsfunktion für die Eingangsgröße

$$\Phi_{xx}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t) \cdot x(t + \tau) \cdot dt$$

und die Kreuzkorrelationsfunktion der Eingangsgröße x und der Ausgangsgröße y

$$\Phi_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t) \cdot y(t + \tau) \cdot dt$$

numerisch durch Diskretisierung berechnet. τ ist die variable Zeitverschiebung. Aus Φ_{xx} und Φ_{xy} können die Leistungsdichtespektren im Frequenzbereich

$$S_{xx}(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-j\omega\tau} \cdot \Phi_{xx}(\tau) \cdot d\tau$$

$$S_{xy}(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-j\omega\tau} \cdot \Phi_{xy}(\tau) \cdot d\tau$$

berechnet werden und daraus schließlich der Frequenzgang selbst

$$F(j\omega) = \frac{S_{xy}(j\omega)}{S_{xx}(j\omega)}$$

Theoretisch würden für die Untersuchung eines Drehzahlreglers auch die behandelten stochastischen Netzfrequenzänderungen als Eingangssignal genügen. Diese sind jedoch so klein, dass die unvermeidlichen Unempfindlichkeiten der

Regelung grossen Einfluss haben und diese Art der Auswertung erschweren oder gar unmöglich machen.

Vorteile der Methode sind

- der geringe Zeitaufwand für die Messung und
- der relativ geringe Aufwand für die Auswertung.

Als Nachteile dürften zu nennen sein

- die erforderliche Anpassung der Sequenzlänge und der Länge der Rechteckimpulse an die Zeitkonstanten der Regeleinrichtung,
- die grossen Schwierigkeiten, die sich bei Vorhandensein von Nichtlinearitäten ergeben,
- die relativ komplizierte Theorie, die praktisch nur von einem Regelungsfachmann nachvollzogen werden kann.

Die Methode eignet sich nach Ansicht der Verfasser auf Grund eigener Erfahrungen gut für Messungen auf dem Prüffeld, kann aber in Kraftwerken unvorhersehbare Schwierigkeiten bringen.

Bestimmung der Reglerkennwerte und der Frequenzkennlinien aus der Übergangsfunktion

Die *Übergangsfunktion* ist definiert als Antwort der Ausgangsgröße y - hier die Bewegung des Stellgliedes, also z. B. der Leitschaufeln - auf einen Sprung der Eingangsgröße x , hier der Frequenz oder der Leistung. Beim idealen PI-Regler ohne Verzögerung ergibt sich ein Verlauf entsprechend Bild 6a, aus dem der bleibende P-Grad b_p , der vorübergehende P-Grad b_i und die Nachstellzeit (= Integrationszeit) T_d direkt abgelesen werden können. Mit einem idealen Verzö-

Literaturhinweise

- [1] VDI/VDE Richtlinie 3510
- [2] Hutarew, G.: «Tests on Turbine Governing Systems». Water Power 15 (1963) H. 4/5/6
- [3] Lein, G., Parzany, K.: «Frequenzgangmessungen im Pumpspeicherwerk Vianden». Energie 19 (1967) H. 7/8
- [4] Oldenburger, R., Donelson, J.: «Dynamic Response of a Hydroelectric Plant». AIEE (1962) H. 10
- [5] Fasol, K. H., Schedelberger, J., Tielsch, W.: «Ein neues Gerät für Frequenzgangmessungen in Kraftwerken» ÖZE 22 (1969) H. 7
- [6] Gebhardt, B., Mückenhoff, R.: Systemidentifikation mittels Multi-Frequenz-Testsignalen Schriftenreihe des Lehrstuhls für Meß- und Regelungstechnik, Ruhr-Universität Bochum, Heft 15, 1981
- [7] Hudovernik, W., Lein, G.: «Frequenzganguntersuchungen im Triebwasserweg von Hochdruck-Wasserkraftanlagen». ÖZE 22 (1969) H. 12
- [8] Hochstatter, J., Lein G.: «Druckpendelungen im Leitungssystem von Wasserkraftanlagen mit Wasserschloss.» Schweizer Ingenieur und Architekt (1980) H. 2
- [9] Schlitt, H.: «Zur Anwendung statistischer Verfahren in der Regelungstechnik». Regelungstechnik 7 (1959) H. 1
- [10] Fasol, K. H., Tuis, L.: «Identifizierung des Regelverhaltens von Wasserturbinensätzen mittels Korrelationsverfahren» VDI/VDE-GMR 2. Jahrestagung 11 (1976)
- [11] Krempl, R.: «Anwendung von dreiwertigen pseudozufälligen Signalen zur Identifikation nichtlinearer Regelungssysteme». Schriftenreihe Mess- und Regelungstechnik, Ruhr-Universität Bochum (1974)

rungsglied 1. Ordnung, hier ein hydraulischer Verstärker mit der Zeitkonstante T , ändert sich der Verlauf entsprechend Bild 6b, in dem der Anfangsbereich vergrössert dargestellt ist. Vernachlässigt man die Korrektur infolge T und ermittelt man b'_i mit a und T'_d mit b so ist:

$$b'_i = b_i \cdot \frac{T_d}{T_d - T}$$

$$T'_d = T_d - T$$

b'_i ist also um den Faktor $T_d/(T_d - T)$ zu gross, T'_d ist um die Zeitkonstante T zu klein. Sofern T klein gegen T_d ist, sind die Abweichungen nur gering; sie sind im übrigen auch kaum zu eliminieren.

Wenn die Integralzeit T_d klein ist, also z. B. bei Einstellung Netzbetrieb, wird - wie Bild 6c deutlich macht - die Direktauswertung schwierig und ungenau. Der Knick, der in Bild 6b am Beginn des Vorganges so deutlich erkennbar ist, ver-

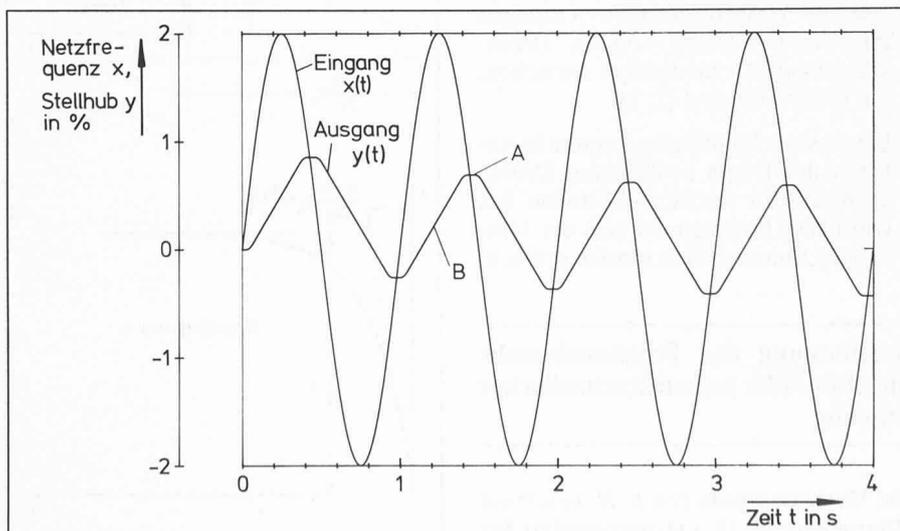


Bild 7. Einschwingvorgang bei der Direktmessung des Frequenzganges, Einfluss der Nichtlinearität. A Einfluss der Unempfindlichkeit, B Einfluss durch Begrenzung der Stellgeschwindigkeit.

wischt sich. Durch Anlegen der Tangente kann angenähert der Ausdruck

$$\left(\frac{b_i + b_p}{b_p}\right) T_d \approx \frac{b_i}{b_p} T_d \quad b_p \ll b_i$$

und damit – ähnlich wie bei der Auswertung der Frequenzkennlinien – das Produkt $b_i \cdot T_d$ bestimmt werden.

Es ist jedoch möglich, aus der Übergangsfunktion $y_{\ddot{u}}(t)$ den Frequenzgang zu berechnen; es gilt

$$F(j\omega) = \int_0^{\infty} \left(\frac{dy_{\ddot{u}}}{dt}\right)_{t>0} \cdot e^{-j\omega t} \cdot dt + y_{\ddot{u}}(0)$$

Die Berechnung erfolgt durch Diskretisieren der Übergangsfunktion und Summieren für die gewünschten ω -Werte und bietet keine grundsätzlichen Schwierigkeiten.

In der Praxis ist jedoch mit mehreren Einflüssen zu rechnen, die die Auswertung und Beurteilung erschweren können. Es sind zu nennen:

- Ein nahezu exakter Eingangssprung ist nur bei elektronischen Reglern zu erzielen. Man kann dafür einen zweiten Eingang oder den Sollwertsteller wählen oder auch den Reglerkreis auftrennen und den Normaleingang verwenden. Handelt es sich um einen mechanischen Regler, wird man von Hand – meist am Sollwertsteller – nur eine endliche Anstiegfront, eine sogenannte *Rampe*, erzeugen können. Am Ausgang wird dann eine zusätzliche Verzögerung erscheinen; diese lässt sich zwar theoretisch angenähert eliminieren, sofern man nur die Eingangsneigung kennt, meist lohnt dies jedoch nicht.
- Dem Verlauf der Ausgangsgrösse sind vielfach *Störsignale* überlagert, die vor der Berechnung des Frequenzganges durch Glätten eliminiert werden müssen, was insbesondere im Bereich schneller Änderungen, also am Anfang, zu Verfälschungen führen kann. Bei der optimalen visuellen Glättung

andererseits muss die Kurve zur rechnerischen Auswertung erst wieder digitalisiert werden.

- Beim Vorhandensein von *Nichtlinearitäten* wird der Verlauf der Antwortfunktion ebenso wie bei allen anderen Methoden verzerrt. Jedoch lassen sich diese Einflüsse bei der Übergangsfunktion besonders leicht beurteilen und damit berücksichtigen oder vermeiden. Der Einfluß der Nichtlinearitäten soll im folgenden Abschnitt näher untersucht werden.
- Ein eventueller D-Anteil (PID-Regler) ist zwar qualitativ aus der Form der Übergangsfunktion erkennbar, quantitativ kann er aber nicht direkt, sondern nur über die Frequenzkennlinien bestimmt werden.
- Ungenauigkeiten im Anfangsbereich der Übergangsfunktion, in dem grosse Gradienten auftreten, führen dazu, dass der daraus berechnete Frequenzgang insbesondere für hohe Werte ω ungenau wird. Den gleichen Effekt haben auch überlagerte Störsignale. Andererseits ist der Bereich hoher ω -Werte für die meisten Untersuchungen – z. B. Stabilitätsuntersuchungen – relativ unwichtig.

Einfluß von Nichtlinearitäten

Wie bereits erwähnt, sind die am häufigsten auftretenden Nichtlinearitäten

- die *Begrenzung der Stellgeschwindigkeiten* (Sättigung) mit Rücksicht auf die Druckänderungen im Wasserführungssystem,
- die *Unempfindlichkeit* im Steuerventil der Verstärkerstufen.

Bei der Frequenzgangdirektmessung wirken sie sich wie in Bild 7 skizziert aus. Bei der Auswertung ergibt dies letztlich nicht den Frequenzgang, der ja amplitudenunabhängig ist, sondern die amplitudenabhängige Beschreibungs-

Bild 8a. Übergangsfunktion eines idealisierten PI-Reglers mit bleibendem P-Grad und nachgeschaltetem Verstärker; Einfluss der Begrenzung der Stellgeschwindigkeit auf den Anfangsbereich.

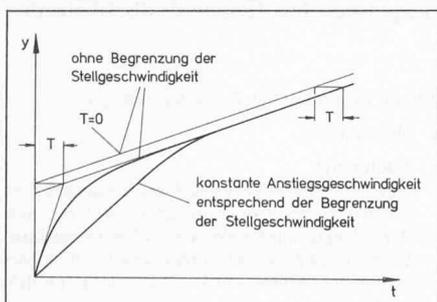
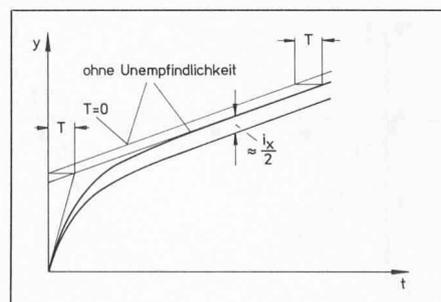


Bild 8b. Übergangsfunktion eines idealisierten PI-Reglers mit bleibendem P-Grad und nachgeschaltetem Verstärker, Einfluss einer Unempfindlichkeit.

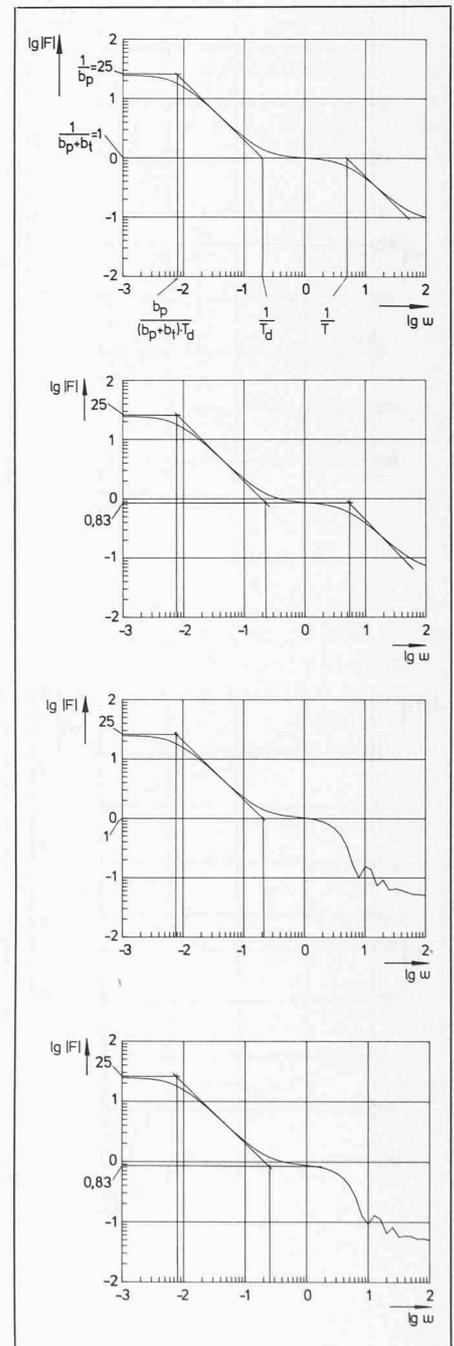


| | 8a | 8b | 8c | 8d |
|-------|------|-------|------|------|
| b_p | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 |
| b_i | 0,96 | 1,16 | 0,96 | 1,16 |
| T_d | 5s | 4,6s | 4,8s | 4,2s |
| T | 0,2s | 0,18s | - | - |

aus Bild 9 ermittelt (ohne iterative Korrektur)

Bild 9. Einfluss von Nichtlinearitäten auf die Frequenzkennlinien.

- a Der Reglerverstärker arbeitet im linearen Bereich, d. h. ohne Unempfindlichkeit,
- b Der Reglerverstärker hat eine extrem grosse Unempfindlichkeit von $i_x/2 = 3 \cdot 10^{-3}$,
- c Der Reglerverstärker arbeitet ohne Unempfindlichkeit, aber mit Sättigung (Begrenzung),
- d Der Reglerverstärker arbeitet mit Unempfindlichkeit und mit Sättigung



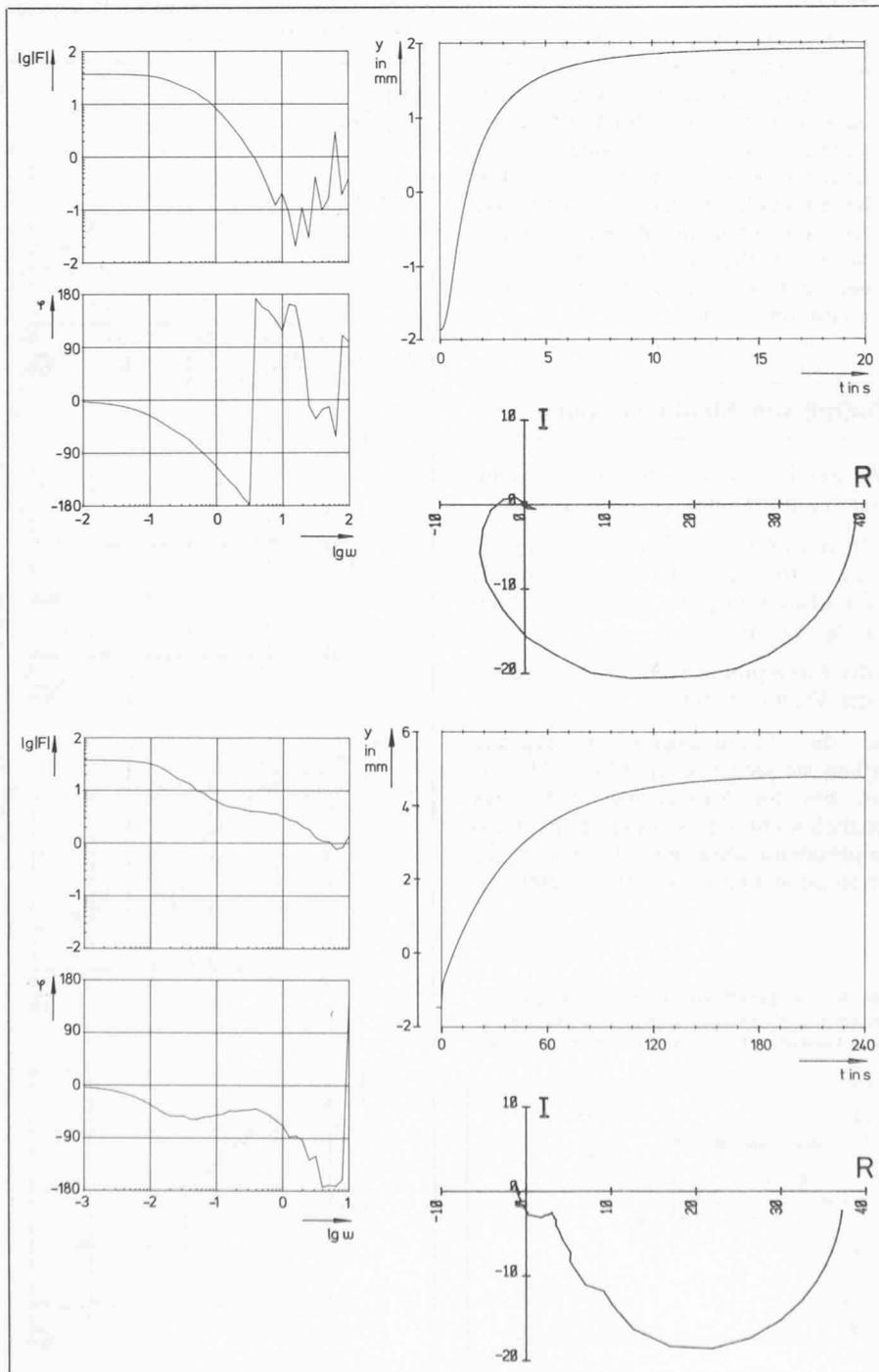
funktion. In solchen Fällen sollte die Messung mit unterschiedlichen Eingangsamplituden durchgeführt werden. Man erhält dann amplitudenabhängig mehrere Paare von Frequenzkennlinien.

Arbeitet man mit stochastischen und pseudostochastischen Eingangssignalen, so erschweren Nichtlinearitäten die Auswertung [10, 11].

Bei der Aufnahme von Übergangsfunktionen lässt sich der Einfluss beider Nichtlinearitäten relativ leicht abschätzen, wie aus den Bildern 8a und 8b hervorgeht, deren Kurven ebenfalls berechnet wurden.

- Die erstgenannte Nichtlinearität, die Begrenzung der Stellgeschwindigkeit, führt wie Bild 8a zeigt, bei entsprechend hoher Eingangsamplitude selbstverständlich auch zu einer Begrenzung der Anfangsneigung der Übergangsfunktion. Letztlich mündet die Kurve aber wieder in diejenige, die sich ohne Stellgeschwindigkeitsbegrenzung ergeben würde. Die Kennwerte b_p, b'_i, T_d lassen sich also nach wie vor direkt ablesen. Durch Verkleinern der Amplitude kann - ebenso wie bei der Direktmessung des Frequenzganges - der Einfluss dieser Nichtlinearität vermieden werden.

- Die zweite Nichtlinearität, eine Unempfindlichkeit, hat die im Bild 8b gezeigte Wirkung, die Kurve verläuft unterhalb derjenigen ohne Unempfindlichkeit, und zwar etwa um den Betrag der Unempfindlichkeit senkrecht verschoben; dabei ist vorausgesetzt, dass die Ausgangsstellung in der Mitte des Totbandes lag. Bei bekannter Unempfindlichkeit und mehrmaliger Aufnahme der Übergangsfunktion in beiden Richtungen, lässt sich auch dieser Einfluss eliminieren und die Kennwerte b_p, b'_i, T_d können direkt abgelesen werden. In Wirklichkeit tritt am Verstärkereingang infolge der stets vorhandenen Verzögerungen keine Sprungänderung mehr auf. Dies führt am Verstärkerausgang zu einer totzeitähnlichen Zeitverschiebung.



Bei der Berechnung der *Frequenzkennlinien* aus der Übergangsfunktion erhält man auch hier für jede Amplitude andere Kurvenpaare. Die Bilder 9a - d zeigen einige durch rechnerische Simulation gewonnene Zusammenhänge zwischen Übergangsfunktion und Frequenzkennlinien und die daraus ermittelten Kennwerte. Da die Unempfindlichkeit i. a. wesentlich kleiner ist als die den Bildern 8b und 8d zugrunde gelegten 3%, ist meist auch die Verfälschung nur gering.

In den Bildern 10a und b sind noch einige auf dem Prüffeld an einem elektronischen Regler mit einfacher Verstärkung, praktisch ohne Unempfindlichkeit und ohne Stellzeitbegrenzung, aufgenommene Übergangsfunktionen und die daraus errechneten Frequenzkennlinien sowie die Ortskurve des Frequenzganges wiedergeben.

Die Beispiele lassen erkennen, dass es praktisch unmöglich ist, die Verstärkerzeitkonstanten direkt aus der Übergangsfunktion abzulesen. Die Berechnung der Frequenzkennlinien im Bereich hoher ω -Werte ist nur bei sehr guter Glättung der Übergangsfunktion einwandfrei möglich; dies beeinflusst auch wieder in erster Linie die Bestimmung der Zeitkonstanten der Verstärker.

Bild 11 zeigt den Anfang der Übergangsfunktion der PID-Regeleinrichtung einer Maschine des Pumpspeicherwerkes Kühtai der Tiroler Wasserkraftwerke AG, an der die Einflüsse der Stellzeitbegrenzung und der Unempfindlichkeit des

Bild 10. Ergebnisse von Prüffeldmessungen.

a Netzbetrieb,

b Inselbetrieb

Der unregelmässige Verlauf der Frequenzkennlinien für grosse ω -Werte ist im wesentlichen durch Ungleichmässigkeiten der Übergangsfunktionen bedingt. Diese wurden bewusst nicht geglättet, um die Grenzen der Auswertung deutlich zu machen.

Bild 11. Anfangsbereich der Übergangsfunktionen der PID-Regelrichtung einer Pumpturbine des Pumpspeicherwerkes Kühltai der Tiroler Wasserkraftwerke AG.

- S Ausgang des elektronischen Drehzahlreglers
- S₁ Ausgang des elektronischen Drehzahlreglers nach Einführung der Stellzeitbegrenzung
- Y Servomotorhub

Verstärkers besonders deutlich zu erkennen sind. Aufgezeichnet wurden

- der Ausgang des elektronischen Drehzahlreglers, S,
- der Ausgang eines nachgeschalteten elektronischen Bausteines, S₁, in dem bereits die Stellgeschwindigkeiten begrenzt werden, und
- der Servomotorhub Y.

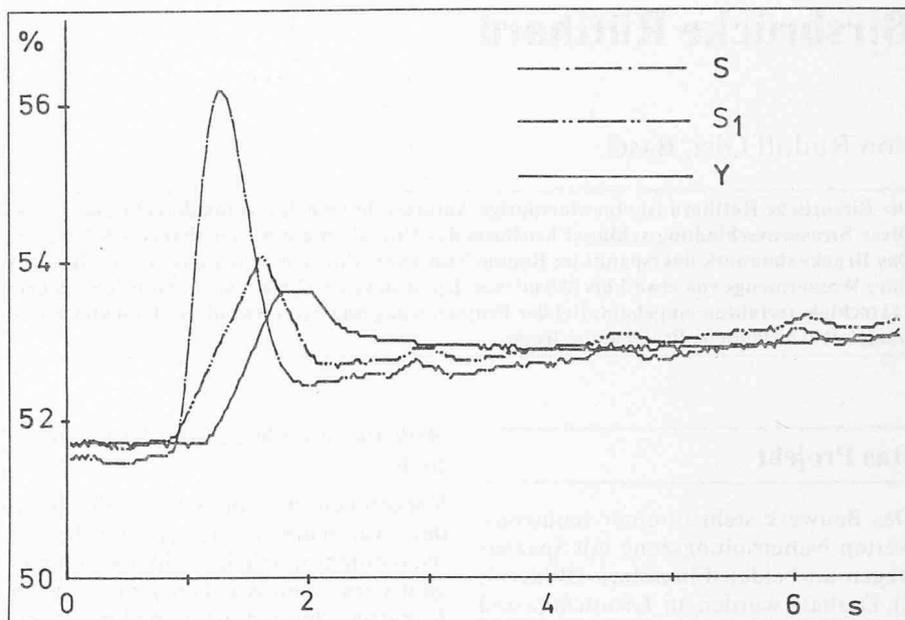
Die Stellzeitbegrenzung bewirkt, daß der D-Anteil, der am Reglerausgang voll wirksam ist, stark abgebaut wird. Die Unempfindlichkeit der Verstärkung erzeugt zusätzlich eine Verzögerung der Servomotorbewegung und eine weitere Abminderung des D-Anteiles. Das Beispiel zeigt weiterhin die unvermeidlichen überlagerten Störungen, welche die daraus errechneten Frequenzgänge im allgemeinen trotz Glättung bei großen ω -Werten ungenau machen.

Die Aufnahme und Auswertung von Übergangsfunktionen hat also folgende Vorteile:

- geringer Zeitaufwand für die Messung,
- Direktablesung der Kennwerte der Regleinrichtung angenähert möglich,
- Einfluss von Nichtlinearitäten abschätzbar,
- keine periodische Erregung des Systems.

Die Nachteile sind:

- die erforderliche Glättung vor der Berechnung der Frequenzkennlinien und damit zusammenhängend
- die Schwierigkeiten bei der Ermittlung der Verstärkerzeitkonstanten, also des bereiches grosser ω -Werte.



Schlussfolgerungen

Auf Grund der Ergebnisse sind die Verfasser der Meinung, dass in Wasserkraftanlagen für die Praxis die Aufnahme von Übergangsfunktionen zur Bestimmung der Regelungskennwerte eine empfehlenswerte Methode ist. Die Messdauer ist gering, eine Grobauswertung ist direkt visuell möglich. Die Berechnung der Frequenzkennlinien führt in den meisten Fällen zu vernünftigen Ergebnissen. Schwierigkeiten kann lediglich die Bestimmung der Verstärkerzeitkonstanten machen.

Im übrigen dürfte es nicht sinnvoll sein, die Genauigkeitsforderungen an Reglermessungen so hoch zu treiben wie etwa bei Wirkungsgradmessungen. Im Regelkreis befinden sich noch viele andere Elemente, die nicht exakt erfasst werden können; es sei nur an die Verbrauchercharakteristik erinnert.

Präzision ist aber unbedingt erforderlich bei der Messung der Unempfindlichkeit, die ja global alle «Schmutzeffekte» enthält. Eine geringe Unempfindlichkeit ist

auch die Basis für ein präzises Regelverhalten und ist deshalb vor allem in solchen Anlagen erforderlich, in denen wirklich geregelt wird.

Werden regelungstechnische Messungen in Anlagen durchgeführt, wird man selbstverständlich neben den Ausgangsgrößen der Regeleinrichtung - vgl. Bild 11 - auch noch weitere Größen registrieren, im Netzbetrieb z. B. die Leistung und wichtige Drücke in der Wasserführung.

Diese Messungen gestatten dann z. B. Stabilitätsuntersuchungen für den Inselbetrieb. Rechnerisch muss dazu lediglich der drehzahlabhängige Teil der Regelstrecke ergänzt werden, wofür das Kennfeld der Maschine benötigt wird. Der Einfluss des Wasserführungssystems kann dagegen aus den im Netzbetrieb gemessenen Leistungskurven bestimmt werden.

Manuskript eingereicht August 1981, überarbeitet Februar 1984.

Adresse der Verfasser: Dr.-Ing. S. Etter und Prof. Dr.-Ing. G. Lein, Institut für Hydraulische Strömungsmaschinen, Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 10, D-7000 Stuttgart 80.