

**Zeitschrift:** Schweizerische Bauzeitung  
**Herausgeber:** Verlags-AG der akademischen technischen Vereine  
**Band:** 88 (1970)  
**Heft:** 16

**Artikel:** Bemerkungen zur Stabilitätsprüfung in Wasserkraftwerken  
**Autor:** Fasol, K.H.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-84485>

### **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:** 30.01.2026

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

## 1. Notwendigkeit dynamischer Untersuchungen

Die steigenden Anforderungen, die an die Turbinenregelung gestellt werden, sind immer mehr Anlass für eingehende Untersuchungen des dynamischen Verhaltens der Regelstrecken von Wasserkraftanlagen [1], [4] bis [7]. Diesen Fragen wird auch von seiten der Betreiber immer grösseres Interesse entgegengebracht. In nationalen und internationalen Richtlinien finden sich Empfehlungen für die Durchführung von Untersuchungen an Reglern und Regelstrecken in Wasserkraftwerken [8], [9]. Grosses Augenmerk wird dabei auch der Stabilitätsprüfung für einen Inselbetrieb gewidmet. Dieses Thema wurde vor einiger Zeit in dieser Zeitschrift von T. Stein bearbeitet [7] und darin u. a. eindringlich darauf hingewiesen, dass bei Frequenzgang-Messungen am Regler der Einfluss der Erregungsamplitude nicht ausser acht gelassen werden darf.

Der vorliegende kurze Beitrag soll diesen Hinweis unterstützen und durch Messergebnisse des Autors noch unterstreichen. In diesem Zusammenhang sei auch daran erinnert, dass die Bezeichnung «Frequenzgang» bei einem Turbinenregler eigentlich nicht korrekt ist.

## 2. Unterschied zwischen Frequenzgang und Beschreibungsfunktion

Es ist bekannt, dass ein Turbinenregler keineswegs ein lineares, sondern vielmehr ein nichtlineares Übertragungssystem darstellt, dass es also durch eine *nichtlineare* Differentialgleichung beschrieben wird. Im allgemeinen betrachtet man aber den Regler als linear, was wohl meist mit guter Näherung möglich ist und für die überwiegende Mehrzahl der anzustellenden Überlegungen auch genügt. Dennoch ist es aber nicht immer zulässig.

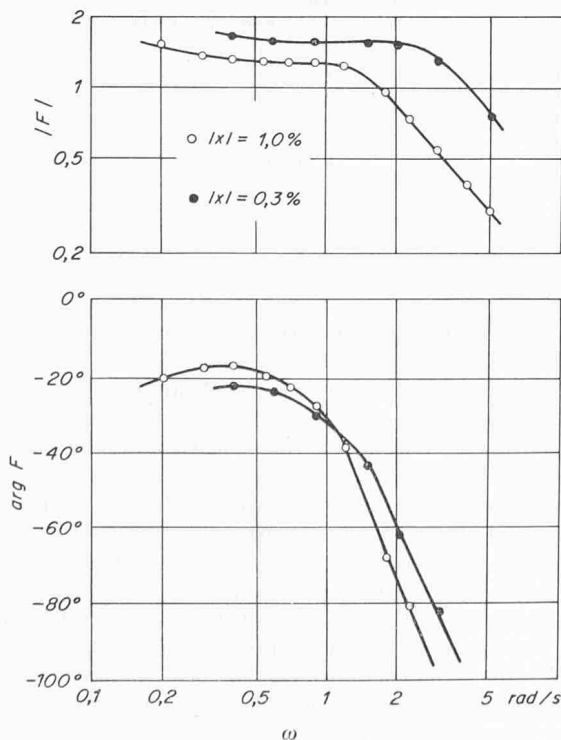


Bild 1. Frequenzkennlinien eines Turbinenreglers für verschiedene Erregungsamplituden  $|x|$  Ergebnisse der Messung in einem Kraftwerk.

Wenn man sich also der Tatsache bewusst ist, dass der Regler nichtlinear ist, dann dürfte man eigentlich nicht von seinem «Frequenzgang» sprechen. Definitionsgemäss ist nämlich der Frequenzgang ein Spezialfall der komplexen Übertragungsfunktion  $W(s)$  (und zwar die Übertragungsfunktion für  $s = i\omega$ ; seine Ortskurve ist die konforme Abbildung der imaginären Achse mit Hilfe von  $W(s)$  als Abbildungsfunktion), wobei die Übertragungsfunktion – und das ist das Wesentliche – nur für zeitinvariante und vor allem nur für lineare Systeme definiert ist. Ein nichtlineares System hat keine Übertragungsfunktion und daher auch keinen Frequenzgang. Um aber dennoch die Vorteile der Frequenzgangdarstellung auch auf nichtlineare Systeme auszudehnen, verwendet man die Methode der harmonischen Beschreibungsfunktion, wobei an die Stelle des nichtlinearen Systems ein lineares Ersatzsystem tritt. Das Übertragungsverhalten dieses Ersatzsystems wird aber jetzt auch noch von der absoluten Grösse der Eingangsamplitude bestimmt, u. a. [2].

Streng genommen wird also nicht das dynamische Verhalten eines Turbinenreglers durch eine einzige Ortskurve bzw. durch ein einziges Paar von Frequenzkennlinien charakterisiert, sondern es wird das Ersatzsystem durch eine Schar solcher Kurven mit der Erregungsamplitude als Parameter beschrieben.

## 3. Stabilitätsprüfung für Inselbetrieb

Üblicherweise wird diese Stabilitätsprüfung unter Anwendung der sogenannten Zwei-Ortskurven-Methode vorgenommen, die auf einfache Weise aus dem Stabilitätskriterium von Nyquist hergeleitet werden kann, u. a. [2]. Man verwendet dabei zum Beispiel einerseits die Ortskurve

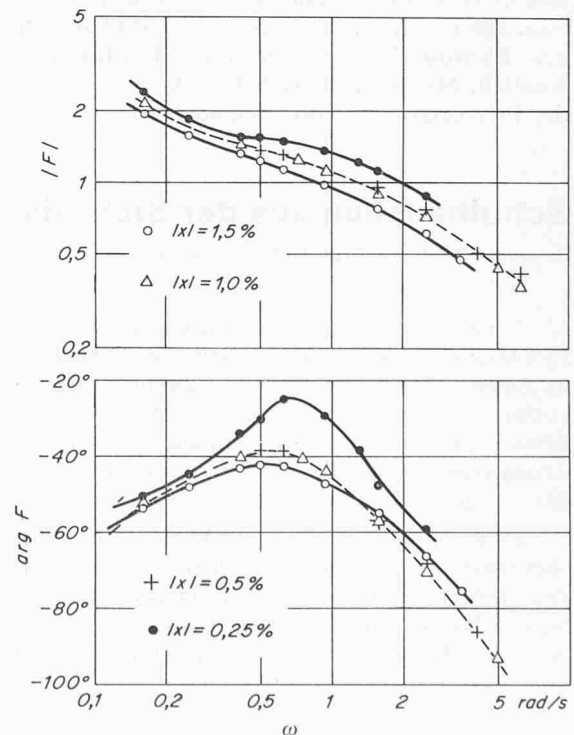


Bild 2. Frequenzkennlinien eines Turbinenreglers für verschiedene Erregungsamplituden  $|x|$  Ergebnisse der Messung am Prüfstand.

des Reglers, bzw. die Schar seiner Ortskurven für verschiedene Amplituden, sowie andererseits die negativ inverse Ortskurve der Strecke. Diese zweite Ortskurve kann für ein Inselnetz nur selten tatsächlich gemessen werden. Man kennt aber ihren grundsätzlichen Verlauf; auf diese Erfahrung baut die Empfehlung in den VDI/VDE-Richtlinien [9] auf, wobei für den Verlauf der (einzigen) Ortskurve des Reglers entsprechende Vorschriften gemacht werden. Über die Grösse der Eingangsamplitude, bei der die Messung durchzuführen ist, fehlt aber wegen der vorgenommenen Linearisierung jegliche Aussage.

Nun hat T. Stein in [7] aber schon auf ein Messergebnis verwiesen, bei dem ein beträchtlicher Einfluss der Amplitude auftritt. Die nachfolgend gezeigten Versuchsergebnisse sollen diese Angabe ergänzen und ebenfalls dazu anregen, bei künftigen Messungen dieser Frage mehr Bedeutung beizumessen.

#### 4. Versuchsergebnisse

Dem Verfasser steht für «Frequenzgang»-Messungen ein Gerät zur Verfügung, das in weiten Bereichen die stufenlose Veränderung sowohl der Frequenz als auch der Erregungsamplitude erlaubt. Diese Einrichtung umfasst einen kommerziellen elektronischen Frequenzgang-Messplatz und einen Frequenztransmitter. Der Messplatz besteht aus einem Sinusgenerator als Signalquelle für die harmonische Erregung und aus einer digitalen Auswerteeinheit, der Transmitter im wesentlichen aus einem Steuerteil mit einer Drehzahl-Folgeregelung für einen Gleichstrommotor, der mit einem Pendelgenerator gekuppelt ist. Der Transmitter hat die Aufgabe, die sinusförmige Ausgangsspannung des Funktionsgenerators in einen entsprechenden, der Frequenz 50 Hz überlagerten Frequenzverlauf umzuwandeln. Die Auswertung der Versuche wird von der digitalen Rechenschaltung des Messplatzes vorgenommen; die Ergebnisse (Betrag und Phase der Ortskurve) werden unmittelbar angezeigt. Die Rechenschaltung ist so ausgeführt, dass mit hoher Genauigkeit die Grundwelle der Ausgangsschwingung bestimmt und für die Auswertung benützt wird und dass auch alle regellosen Störungen weitgehend ausgefiltert werden. Es wird also die harmonische Beschreibungsfunktion ermittelt. Mit Hilfe dieser Schaltung einerseits sowie dank der Freizügigkeit bei der Amplitudeneinstellung andererseits

ist es möglich, die Kennlinienscharen der Beschreibungsfunktion zu messen. Das Gerät ist an anderer Stelle ausführlich beschrieben worden [3].

Bild 1 zeigt die Frequenzkennlinien eines Turbinenreglers für die zwei Amplituden  $|x| = 1,0\%$  und  $|x| = 0,3\%$  als Ergebnis der in einem Kraftwerk durchgeführten Messungen. Mit zunehmender Frequenz  $\omega$  tritt hier ein grosser Unterschied in den Amplitudenkennlinien  $|F|$  auf. Auf Bild 2 sind die für vier verschiedene Eingangsamplituden am Prüfstand gemessenen Kennlinien eines anderen Reglers aufgezeichnet. Hier ist besonders die Abweichung der Phasenkennlinie für  $|x| = 0,25\%$  auffallend.

Solange nicht mehr Ergebnisse bekannt sind, zeigen diese Beispiele deutlich die Notwendigkeit, den Amplituden Einfluss zu untersuchen, denn sie lassen vermuten, dass in anderen Fällen unter Umständen noch grössere Unterschiede auftreten können.

Adresse des Verfassers: Dr. techn. K. H. Fasol, o. Prof. für Mess- und Regelungstechnik an der Ruhr-Universität Bochum, D-4630 Bochum-Querenburg, Postfach 2148.

#### Literaturverzeichnis

- [1] H. Eilken und G. Lein: Die Regulierung von Kaplanturbinen. «Voith, Forschung und Konstruktion» 1964, H. 12.
- [2] K. H. Fasol: Die Frequenzkennlinien. Eine Einführung in die Grundlagen des Frequenzkennlinien-Verfahrens und dessen Anwendungen in der Regelungstechnik. Wien 1968, Springer-Verlag.
- [3] K. H. Fasol, J. Schedelberger, W. Tielsch: Ein neues Gerät für Frequenzgangmessungen in Kraftwerken. ÖZE 22 (1969), H. 7, S. 333 bis 336.
- [4] G. Hutarew: Regelungstechnik. Kurze Einführung am Beispiel der Drehzahlregelung von Wasserturbinen. 3. Aufl. Berlin-Göttingen-Heidelberg 1969, Springer-Verlag.
- [5] G. Hutarew: Tests on Turbine Governing Systems. «Water Power», 15 (1963), H. 4, 5, 6.
- [6] G. Lein und K. Parzany: Frequenzgangmessungen im Pumpspeicherwerk Vianden. «Energie» 19 (1967), H. 7/8, S. 236 bis 243.
- [7] T. Stein: Stabilitätsprüfung in grossen Wasserkraftwerken. «Schweiz. Bauzeitung» 86 (1968), H. 40, S. 703 bis 707.
- [8] IEC (International Electrotechnical Commission): Draft International Code for Testing of Speed Governing Systems for Hydraulic Turbines. Genf, 1965.
- [9] Richtlinienentwurf VDI/VDE 3510: Richtlinien zur Aufstellung von Spezifikationen für Drehzahlregler von Wasserturbinen. Düsseldorf 1968, VDI-Verlag.

## Schulhausbau aus der Sicht des Lehrers

DK 727.001

Zu einem Buch von Heinrich Schneider, Zürich<sup>1)</sup>

Unserem Schulhausbau wäre überaus gedient, wenn dessen Problemkreis zwischen Lehrerschaft und Architekten vermehrt im Sinne zeitgemässer Lösungen diskutiert werden könnte. Leider hat das schon lange dauernde Bestreben, diesen Erfahrungs- und Gedankenaustausch im Rahmen eines schweizerischen Schulbauzentrums zu intensivieren und nutzbar zu machen, noch wenig Erfolg aufzuweisen.

Es ist deshalb vielleicht ein Akt von Selbsthilfe, jedenfalls aber erfreulich, dass der Dialog in Sachen Schulbaufragen nun vom Lehrer Heinrich Schneider aufgenommen worden ist. Seine Schulbaubibel ist aus einer mit dem ersten Rang ausgezeichneten Preisaufgabe der kantonalen Zürcher Schulsynode 1967 hervorgegangen.

<sup>1)</sup> «Schulhausbau aus der Sicht des Lehrers». Ein Beitrag für Architekten, Behörden und Schulen. Von H. Schneider. 70 S. mit 72 Photos, Zeichnungen und Plänen, zum Teil ganzseitig. Winterthur 1969, Verlag «Werk». Preis 16 Fr. kart.

Den Ausgangspunkt bildet das pädagogische Bemühen, den Schüler durch die *Erarbeitungsmethodik*, das heisst, durch Selbsttätigkeit zur Selbständigkeit zu erziehen. Dabei verfährt man exemplarisch. Der Lehrer zeigt an einem Beispiel den entscheidenden Sachverhalt, der dann gewissermassen stellvertretende Funktion für viele ähnliche Fälle hat, die einzeln zu behandeln der Stoffdruck an unsern Schulen kaum zulässt («Es kommt nicht auf die Kenntnisse an, sondern auf die Schulung der Kraft, Kenntnisse zu erwerben», sagt Pestalozzi).

Ein exemplarischer Unterricht (Arbeitsschule) verlangt kleine Klassenbestände oder die Möglichkeit, die Schüler in Gruppen zur Zusammenarbeit zu bringen. Hier zeigen sich Ansätze für die Projektierung. Was in den Kapiteln über «das pädagogische Bemühen der Schule» und über «Das Kind und seine Umwelt» aus der Schule geplaudert wird, gehört zum Neuen, Anregenden und Auswertbaren für den Architekten. Freilich gilt dabei die Einschränkung, dass unsere Lehrerschaft in der Volksschule methodische Freiheit geniesst