Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 79 (1987)

Heft: 5-6

Artikel: Numerische Simulation automatischer Stauregelungen bei Laufwasserkraftwerken

Autor: Fäh, Roland / Kühne, Anton

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-940642

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: 10.07.2025

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

Numerische Simulation automatischer Stauregelungen bei Laufwasserkraftwerken

Roland Fäh und Anton Kühne

Zusammenfassung

Die numerische Simulation der automatischen Abfluss- oder Wasserstandsregelung an Laufwasserkraftwerken, die alle wesentlichen Vorgänge erfasst, ist heute mit vertretbarem Aufwand möglich. Ein Computerprogramm, das diese Aufgabe löst, wird vorgestellt. Vergleichsrechnungen zeigen, dass die numerische Simulation wesentlich mehr und genauere Informationen über die wirklichen Abflussvorgänge bei geregelten Stauwerken liefert als analytische Modelle. Die vereinfachenden Modellannahmen der analytischen Methoden schränken die Aussagekraft ihrer Resultate ein.

Résumé: Simulation numérique du contrôle automatique d'aménagements à basse chute

La simulation numérique du contrôle automatique des débits ou des niveaux d'eau dans les aménagements à basse chute, simulation qui s'étend à tous les processus essentiels, peut être aujourd'hui réalisée avec une ampleur de moyens raisonnable. Un programme d'ordinateur capable de mener à bien cette tâche est présenté ici. Des calculs comparatifs montrent que la simulation numérique permet d'obtenir une information nettement plus dense et précise sur les processus effectifs d'écoulement dans les ouvrages contrôlés que ne le font les modèles analytiques. Les hypothèses simplificatrices sur lesquelles sont basés les modèles propres aux méthodes analytiques limitent la portée des résultats obtenus.

Synopsis: Numerical simulation of automatic control of river power plants

Today, with the aid of modern computers, it is possible to make an accurate numerical simulation, which includes all significant processes, of the automatic control of discharge and waterlevel on river power plants. In this paper a computer-program that solves this problem is briefly described. Computations show, that numerical simulation gives much more precise information on the real behaviour of discharge and waterlevel in the river reservoirs than do the analytical models. The restrictive assumptions of the analytical methods impair their effectiveness.

1. Einleitung

Der Betrieb eines Laufwasserkraftwerkes stellt hohe Anforderungen an die Regelung des Abflusses bzw. Wasserstandes. Verschiedene, zum Teil im Widerstreit stehende Interessen, müssen optimal aufeinander abgestimmt werden. Eine Reihe von Restriktionen wird durch die Konzessionsbehörde festgelegt. Sie macht Auflagen bezüglich der Restwassermengen und der Grösse der Abflussschwankungen und schreibt im Regulierreglement vor, innerhalb welcher Grenzen sich die Kote des Wasserspiegels – bei einer bestimmten Abflussmenge – bewegen darf. Auf der anderen Seite stehen die wirtschaftlichen Interessen, möglichst viel Strom zum richtigen Zeitpunkt zu produzieren. Ein Interessenkonflikt kann sich zum Beispiel bei Hochwasser ergeben, wenn aus Sicherheitsgründen der Stauspiegel abgesenkt werden muss. Das dadurch verminderte Gefälle zwischen Ober- und Unterwasserstand am Kraftwerk bewirkt eine Einbusse bei der Energieproduktion.

Eine Herausforderung an die Leistungsfähigkeit einer Regelung stellt sich dann, wenn Störungen infolge künstlicher Eingriffe – beispielsweise durch einen Notschnellschluss eines Oberliegerkraftwerkes – auftreten. Die dabei entstehenden Schwall- und Sunkwellen laufen wesentlich schneller ab als natürliche Ereignisse, wie zum Beispiel Hochwasserwellen. Schwierigkeiten können auch auftreten, wenn es gilt, den Wasserstand an einem Standort, der weit vom Stellorgan (Turbine, Wehr) entfernt ist, zu regeln. Ausser den ökologischen, hydraulischen und wirtschaftlichen Erfordernissen muss die Steuerung und Regelung am Flusskraftwerk vielfach noch einer grossen Anzahl von innerbetrieblichen Anforderungen genügen.

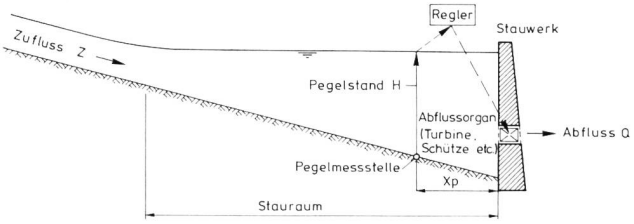
Bei vielen Laufwasserkraftwerken wird noch von Hand geregelt. Im Zuge von Rationalisierungen wurde oder wird aber bei verschiedenen Anlagen auf automatische Regelung umgestellt. Neuanlagen werden im allgemeinen ohnehin weitgehend automatisch betrieben. Die Erfahrung zeigt, dass das Einrichten einer automatischen Regelung eine anspruchsvolle Aufgabe ist. Jede Anlage hat, als Folge verschiedener Randbedingungen, ihre besonderen Probleme. Dieser Artikel will zeigen, wie computergestützte Lösungsmethoden die Aufgabe erleichtern können.

Bereits in einem früheren Beitrag dieser Zeitschrift wurden die wesentlichen Aspekte und Merkmale der Stauregelung, soweit sie sich aufgrund von systemanalytischen Betrachtungen ergeben, dargestellt [5]. In einem weiteren Bericht wurde an einem Beispiel illustriert, wie das Verhalten des Stauraumes – als Regelstrecke bildet er ein wichtiges Element im Stauregelkreis – mit einem hydrodynamischen Modell (Computerprogramm) untersucht werden kann [6]. Um die Abflussvorgänge im staugeregelten Fluss nachzuvollziehen, bedarf es aber eines detaillierten Modells, das sowohl die Elemente der Regelung als auch der Hydraulik möglichst genau erfasst. Ein solches Gesamtmodell wird in diesem Beitrag vorgestellt. Dessen Anwendung erfordert numerische Simulationen. Der entsprechende Rechehaufwand ist grösser als bei Modellansätzen, die wesentliche Vereinfachungen in Kauf nehmen. Der grössere Rechenaufwand zahlt sich aber insofern aus, als wichtige Phänomene rechnerisch erfasst werden, die bei einfachen Modellen verwischt werden. Dieser Umstand wird im vorliegenden Beitrag besonders beleuchtet.

2. Regelaufgabe und Regelkreis

Die folgenden Ausführungen beschränken sich auf die Regelung an einem einzelnen Flusskraftwerk. Die besonderen Aspekte, die bei einer Staustufenkette auftreten, werden hier ausgeklammert. Bild 1 enthält eine schematische Darstellung des Systems «Einzellaufwasserkraftwerk» mit den wesentlichen Elementen, die für die Regelung von Bedeutung sind. Der Zufluss Z zum Stauraum ist als eine gegebene Grösse anzusehen. Sie lässt sich im allgemeinen nicht bzw. nur mit Massnahmen ausserhalb des Systems beeinflussen. Hingegen kann der Abfluss Q aus dem Stauraum durch entsprechende Einstellung der Abflussorgane im ge-

Bild 1. Schema eines Laufwasserkraftwerkes.



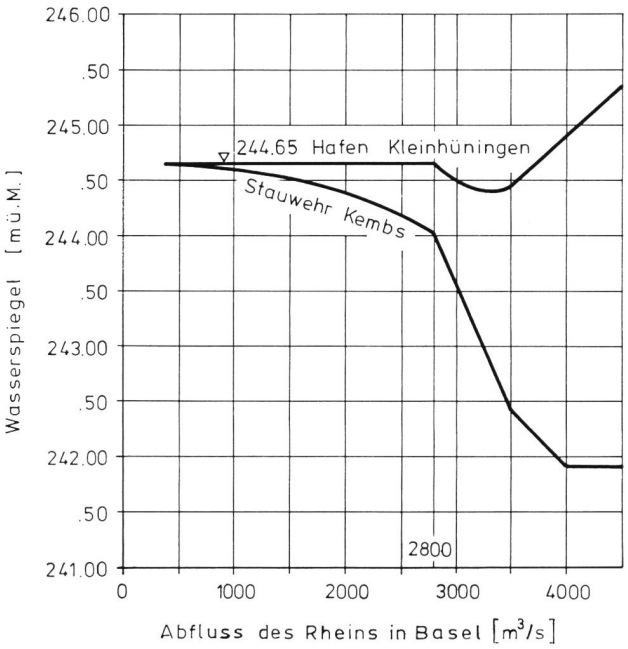
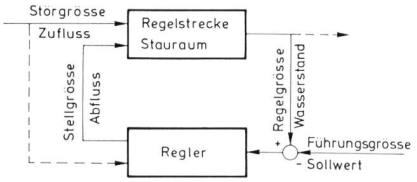


Bild 2. Auszug aus einem Regulierreglement mit vorgeschriebenen Wasserständen (Stauregelung beim Kraftwerk Kembs am Rhein).

wünschten Sinne verändert werden. Die Zeitfunktionen $Z(t)$ und $Q(t)$ stellen zwei Randbedingungen dar, die die Wasserbewegung innerhalb des Stauraumes mitbestimmen.
Für die Festsetzung des Abflusses aus dem Stauraum sind grundsätzlich zwei «Strategien» möglich, nämlich eine Regelung mit konstantem Stauziel oder eine Regelung mit vorgeschriebenem Abfluss.
Bei der Regelung mit konstantem Stauziel ist der Wasserstand an einer bestimmten Pegelmessstelle im Stauraum auf einem vorgegebenen Niveau W zu halten. W ist ein Sollwert, der durch die behördliche Konzession bzw. ein Regulierreglement festgelegt ist. Dieser Sollwert kann von der Wasserführung des Flusses abhängen, wird aber oft über weite Bereiche konstant sein (Bild 2).
Das Prinzip der Regulierung mit konstantem Stauziel – oft auch kurz «Wasserstandregelung» oder «Stauregelung» genannt – kann wie folgt umschrieben werden:
Sobald der Wasserstand beim bezeichneten Pegel – als Folge einer Zuflussänderung – vom gegebenen Sollwert abweicht, soll der Regler den Abfluss aus der Stauhaltung so korrigieren, dass sich der Wasserspiegel wieder auf den vorgeschriebenen Wert einpendelt. Störungen, die das Abflussverhalten und den Stauspiegel beeinflussen, treten aber nicht nur im Zufluss auf. Sie können auch durch den Betrieb des Kraftwerkes selbst verursacht werden. Dies trifft zum Beispiel dann zu, wenn der Durchfluss durch die Turbinen, infolge einer verminderten Nachfrage nach elektrischer Leistung, gedrosselt wird.
Bei der Regelung mit vorgeschriebenem Abfluss, kurz «Abflussregelung», wird der Durchfluss durch die Auslassorgane (Turbinen, Schützen usw.) direkt nach dem Zufluss oder einem vorgegebenen Programm eingestellt – unabhängig vom Wasserstand.
Bild 3 zeigt den Regelkreis, der der Stauregelung an einem Einzelflusskraftwerk entspricht. Aus der Darstellung geht auch hervor, welche regeltechnische Funktion den einzelnen physikalischen Grössen und Systemteilen zukommt. Der Regelkreis in Bild 3 stellt insofern eine Vereinfachung der gesamten Regelaufgabe dar, als er nur den sogenannten Führungsregler im Detail zeigt. Dieser hat die Aufgabe, die Stellgrösse, also den notwendigen Abfluss zu ermitteln. Dabei spielen drei Einflussgrössen mit, nämlich der Zufluss Z als Störgrösse, das Stauziel W als Führungsgrösse und der Wasserstand H (bei der Pegelmessstelle) als Regelgrösse. Die Realisierung des durch den Führungsregler ermittelten Abflusswertes ist eine weitere anspruchsvolle Regelaufgabe. Dabei müssen Öffnungen von Turbinen, Wehren, evtl. Schleusen durch geeignete Stellbefehle angepasst werden. Auf diese Problematik wird hier nicht eingegangen. Der vorliegende Aufsatz befasst sich nur mit Fragen rund um den Führungsregler.

Bild 3. Regelkreis der Stauregelung am Laufwasserkraftwerk.



3. Modelle zur Beschreibung des Regelkreises

Ziel der Stauregelung ist es, dass der ausgewählte Pegelstand möglichst exakt mit dem vorgegebenen Stauziel übereinstimmt. Dazu muss die Stellgrösse angepasst werden, sofern eine Regelabweichung von bestimmter Grösse festgestellt wird. Nach welchem Konzept ist diese Anpassung vorzunehmen? Dies ist eine erste Aufgabe, die in der Praxis von Fall zu Fall unterschiedlich zu lösen sein wird. Ist ein geeignetes Konzept (Regeleinrichtung) gefunden, gilt es innerhalb der gewählten Struktur die freien Parameter so zu finden, dass die Regelung bei allen denkbaren Ereignisabläufen ihr Ziel erfüllt. Die Suche der optimalen Parameter umfasst Versuche, Überprüfungen und Anpassungen vor Ort, die sich über Jahre erstrecken können [7]. Es liegt daher nahe, den Systemprozess durch ein geeignetes mathematisches Modell nachzubilden. Mit Hilfe von rechnerischen Methoden kann dann die Suche nach den optimalen Regelparametern unterstützt und verkürzt werden. Einfache Modelle lassen analytische Lösungsansätze und Berechnungsverfahren zu. Komplexere Modelle, die die natürlichen Abläufe möglichst detailliert zu erfassen suchen, erfordern numerische Simulationen. Im Unterschied zu der analytischen Behandlung können auf dem Digitalrechner alle massgebenden physikalischen Prozesse, mit im Prinzip beliebiger Genauigkeit, simuliert werden. Freilich sind durch die Leistungsfähigkeit der Computer praktische Grenzen gesetzt.

3.1 Analytische Modelle

Lässt man gewisse Vereinfachungen zu, kann man die Regelung des Wasserstandes mit analytischen Modellen charakterisieren [1, 9]. Als Beispiel sei im folgenden eine Art «Behältermodell» für die Stauregelung kurz beschrieben; umfassendere Ausführungen hiezu finden sich in [4, 5].

Annahmen und Voraussetzungen
Voraussetzung 1: Für den Stauraum gelte die Kontinuitätsgleichung

$$dV/dt = Z(t) - Q(t) \qquad (1)$$

mit
V gespeichertes Wasservolumen im Stauraum
Z Zufluss zum Stauraum
Q Abfluss aus dem Stauraum

Voraussetzung 2: Der Stauraum wird als Behälter betrachtet. Wellenbewegungen innerhalb des Behälters werden nicht berücksichtigt. Jede Volumenänderung ΔV im Stauraum bewirke überall die gleiche, ortsunabhängige Wasserstandsänderung ΔH. ΔV und ΔH seien zueinander direkt proportional, nämlich

$$\Delta V = F \Delta H \qquad (2)$$

mit

F Wasserspiegelfläche des Stauraumes (konstant)
H Wasserstand (m ü.M.) bei der Pegelmessstelle

Voraussetzung 3: Es sollen keine nennenswerten seitlichen Zuflüsse in den Stauraum münden. Massgebend sei allein der Zufluss Z am oberen Ende des Stauraumes. Desgleichen trete nur der Abfluss Q am unteren Ende aus der Stauhaltung aus.
Voraussetzung 4: Der gesamte Abfluss aus der Stauhaltung erfolge durch die Turbine (dies trifft primär bei einer geringen Wasserführung des Flusses zu).
Voraussetzung 5: Die Regelung arbeite kontinuierlich und ohne Verzögerungen. H und Z werden ständig gemessen und Q unverzüglich – nach Massgabe des Reglers – angepasst.
Im stationären Grundzustand zum Zeitpunkt 0 ist $Q_0 = Z_0$ und $H = W$. Eine Störung z im Zufluss oder eine solche q im Abfluss wird nach gewisser Zeit zu einer Regelabweichung $h = H - W \neq 0$ führen. Dies wiederum veranlasst den Regler, die Stellgrösse (Abfluss) anzupassen: $Q(t) = Q_0 + q$.

Regel-Gesetz
Automatische Wasserstandregelungen werden häufig nach dem Konzept der Proportional-Integral-Regelung (PI-Regelung), allenfalls ergänzt durch eine Störgrössenaufschaltung, durchgeführt. Die massgebenden Reglergleichungen sind nachfolgend im Kästchen zusammengestellt.

Proportional - Regelung (3)

$$q(t) = k_p\, h(t)$$

Integral - Regelung (4)

$$q(t) = k_i \int_0^t h(\tau)\, d\tau$$

bzw. $q'(t) = k_i\, h(t)$

Störgrössenaufschaltung (5)

$$q(t) = k_s\, z(t - t_s)$$

Proportional - Integral - Regelung mit Störgrössenaufschaltung (6)

$$q(t) = k_p\, h(t) + k_i \int_0^t h(\tau)\, d\tau + k_s\, z(t - t_s)$$

Der *Proportional-Regler* bewirkt eine Veränderung der Stellgrösse um einen Betrag q, der proportional zur gemessenen Regelabweichung ist (k_p wählbarer Beiwert).
Beim *Integral-Regler* wird die Geschwindigkeit der Stellgrössenveränderung proportional zur gemessenen Regelabweichung vorgenommen (k_i Beiwert).

Die Regelung wird oft um ein *Steuerungselement* ergänzt, indem Zuflussänderungen direkt oder mit einer Zeitverzögerung t_s im Abfluss brücksichtigt werden (Gleichung 5). Für den Beiwert k_s soll gelten:

$$0 \leq k_s \leq 1.$$

Der *PI-Regler mit Störgrössenaufschaltung* stellt eine Kombination von (3), (4) und (5) dar.

Lineare Übertragung und Systemverhalten
Im vorliegenden Modell wird das Verhalten der Regelstrecke durch die Beziehungen (1) und (2) charakterisiert. Diese lassen sich in die Gleichung

$$dH/dt = (Z-Q)/F, \text{ bzw. } dh/dt = (z-q)/F \qquad (7)$$

für die Regelstrecke zusammenfassen. Durch die Gleichung (7) und die zutreffende Reglergleichung – beispielsweise (6) für PI-Regelung mit Störgrössenaufschaltung – wird der Regelkreis der Wasserstandregelung vollständig beschrieben. Nach geeigneter Umformung führen (6) und (7) auf ein System von linearen Differentialgleichungen, nämlich

$$F h'' + k_p h' + k_i h = (1-k_s) z' \qquad (8)$$

$$F q'' + k_p q' + k_i q = F k_s z'' + k_p z' + k_i z. \qquad (9)$$

Dieses System deutet auf eine lineare Übertragung zwischen Störgrössenänderung und Regelabweichung bzw. Störgrössenänderung und Stellgrössenveränderung hin. Setzt man für z geeignete *Testfunktionen* an, wird man einen gewissen Aufschluss über das Systemverhalten bekommen. Als Testfunktionen kommen in der Regeltechnik primär die Sprungfunktion und die harmonische Schwingung in Frage (Bild 4). Wie in [4] gezeigt wurde, lassen sich durch Analyse der Sprungantworten und durch Frequenzgangbetrachtungen verschiedene charakteristische Eigenheiten des Stauregelkreises herauskristallisieren. Insbesondere wird auch klar, welche Bedeutung dem Verhältnis der verschiedenen Regelparameter k_p, k_i und k_s untereinander zukommt. Numerische Integration von (8) und (9) liefert den zeitlichen Verlauf der Systemantworten $h(t)$ und $q(t)$ für beliebige Störfunktionen $z(t)$. Ferner kann mit numerischen Rechnungen untersucht werden, wie sich eine Variation der Regelparameter auswirkt.

Der Einfluss der Regelstrecke macht sich im Behältermodell nur durch einen einzigen Parameter, nämlich die Oberfläche F des Stauraumes, bemerkbar. Diese Vereinfachung kann für Speicher zulässig sein, erweist sich aber für Flussstauhaltungen als zu restriktiv. Wesentliche hydrodynamische Vorgänge in der Stauhaltung, die für die Regelung bedeutungsvoll sind, gehen durch die vereinfachende Voraussetzung 2 verloren. Daher drängt sich eine Erweiterung des Modells auf, die das Verhalten der Regelstrecke genauer wiederzugeben vermag.

3.2 Numerische Simulationsmodelle

Für eine wirklichkeitsnahe Beschreibung der Hydrodynamik im Stauraum stehen die Differentialgleichungen von *de Saint-Venant* zur Verfügung. Ohne Vereinfachungen lassen sich diese aber nicht analytisch lösen. Berechnungen aufgrund der vollständigen de Saint-Venantschen Gleichungen erfordern aufwendige numerische Verfahren. Bis vor kurzem waren diese nur durch Grosscomputer zu bewältigen. Um den Aufwand zu reduzieren, wurde deshalb

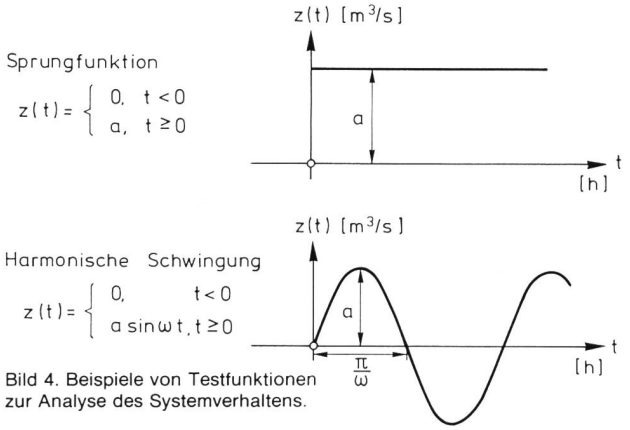


Bild 4. Beispiele von Testfunktionen zur Analyse des Systemverhaltens.

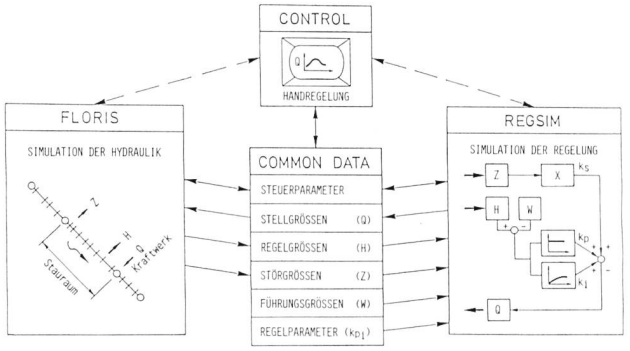


Bild 5. Schematischer Aufbau des interaktiven Programmsystems *Regel* zur numerischen Simulation von Stauregelungen bei Laufwasserkraftwerken.

nach vereinfachten Lösungsansätzen für das Problem der Stauregelung gesucht [3, 8]. Mit den heute zur Verfügung stehenden leistungsfähigen Hardware- und Software-Mitteln drängen sich solche Vereinfachungen weniger auf. Der Aufwand der numerischen Simulationen ist ohne weiteres zu bewältigen.

Bausteine des Simulations-Modells «Regel»

Im Stauregelkreis gemäss Bild 3 wird das Verhalten von Abfluss und Wasserstand im wesentlichen durch zwei Elemente bestimmt, nämlich durch Regler und Regelstrecke. Ein drittes Element kommt hinzu, wenn man die Vorgänge, die im Kommandoraum des Kraftwerkes ablaufen, mitberücksichtigt. In dieser Leitstelle können alle wesentlichen Prozesse über Anzeigetafeln oder Monitore beobachtet werden. Falls nötig, kann von hier aus auch eingegriffen werden. Beispielsweise kann der Sollwert für den Wasserspiegel, die Stellung eines Wehres oder ein Regelparameter verändert, kurz, von Hand reguliert werden.

Dieser Struktur trägt ein Computerprogrammsystem Rechnung, das an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich entwickelt worden ist. Mit dem System kann die Regelung an einem Laufwasserkraftwerk simuliert werden. Wie Bild 5 zeigt, besteht es aus drei unabhängigen Programmen, die über einen gemeinsamen Datenbereich miteinander kommunizieren.

Control ist das zentrale Programm, von dem aus die anderen interaktiv gesteuert werden. Mit Hilfe dieses Programmes kann man eine Handregulierung simulieren. Dies bedeutet, dass die im voraus spezifizierten Stellglieder (Wehrstellungen, Turbinendurchflüsse), die Führungsgrössen (zum Beispiel Sollwert des Wasserspiegels) und die Regelparameter während der Simulation verändert werden können. Der Ablauf der simulierten Vorgänge kann am Bildschirm direkt mitverfolgt werden, entweder in alphanumerischer Form wie das Bild 6 zeigt, oder auch als Graphik (Bild 7). Das Programm *Control* repräsentiert also die Vorgänge im Kommandoraum des Kraftwerkes.

Mit den Programm *Floris* werden die hydraulischen Verhältnisse rund um das Kraftwerk modelliert, soweit sie das Abflussgeschehen in der Stauhaltung (Regelstrecke) beeinflussen. Das entsprechende System umfasst im allgemeinen neben der Stauhaltung, die Wehr- und Turbinendurchflüsse, einen eventuellen Schleusenbetrieb, die Verhältnisse im Unterwasser und gegebenenfalls ein Oberliegerkraftwerk.

Floris berechnet den instationären, eindimensionalen Abfluss in einem Flusssystem auf der Basis der Differentialgleichungen von de Saint-Venant [2]. Diese Gleichungen werden durch ein Differenzenverfahren mit einem wählbaren Zeitschritt gelöst. Die einzelnen Flussäste können in den sogenannten Knoten beliebig miteinander verknüpft werden. Knoten werden dort eingeführt, wo spezielle Abflussbedingungen vorliegen. Dies ist zum Beispiel bei Wehrdurchflüssen der Fall. Die Geometrie der Flussäste wird mit Querprofilen beschrieben. Im Input für *Floris* wird auch festgelegt, bei welchen Querprofilen Regel- oder Messgrössen vorgesehen sind. Das Verhalten von Abfluss und Wasserspiegel in diesen Querprofilen kann dann über das Programm *Control* am Bildschirm mitverfolgt werden. Knoten mit Wehren und Turbinen, die als Stellorgane verwendet werden, müssen ebenfalls in *Floris* spezifiziert werden.

Das Programm *Regsim* simuliert den Regler. Eingabegrössen sind Regelparameter, Führungsgrössen und Steuer-

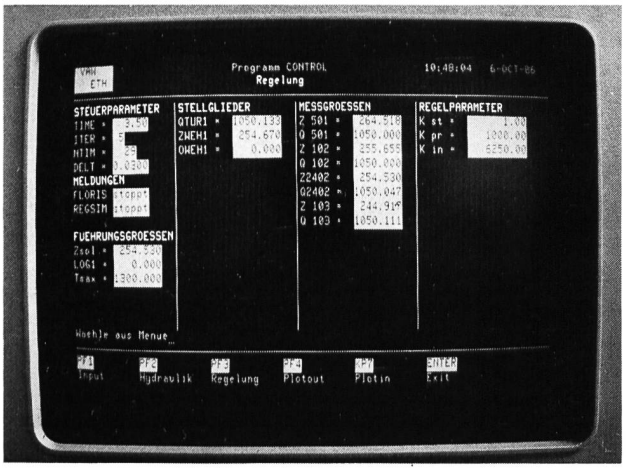
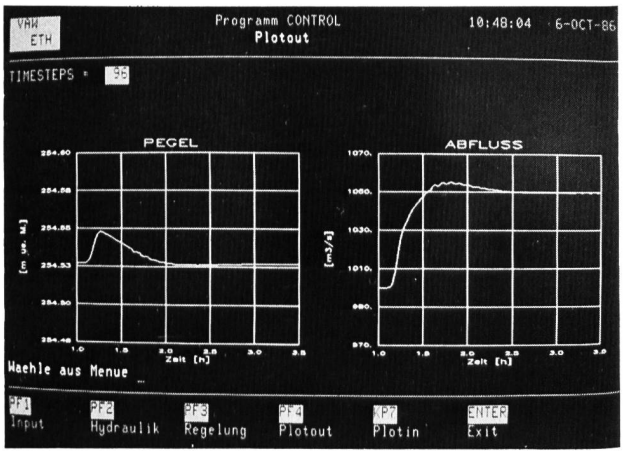


Bild 6. Tabellarische Darstellung der Resultate auf dem Bildschirm. Der Bildschirm wird laufend, das heisst nach jedem Berechnungszeitschritt, mit den aktuellen Werten überschrieben.

Bild 7. Graphische Darstellung des zeitlichen Verhaltens von Abfluss und/oder Wasserstand in ausgewählten Querprofilen. Die Entwicklung der Ganglinie kann – aufgrund der laufenden Berechnung – am Bildschirm verfolgt werden.



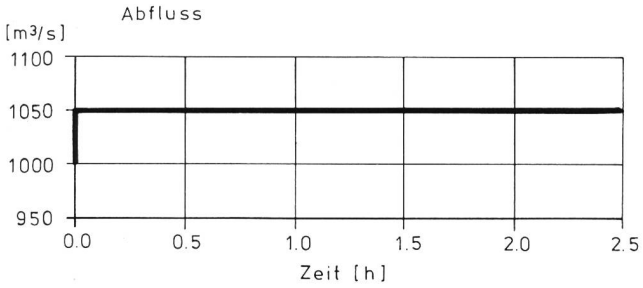


Bild 8. Zuflussstörung, mit der die Stauhaltung in den nachfolgend erläuterten Berechnungen beaufschlagt wurde.

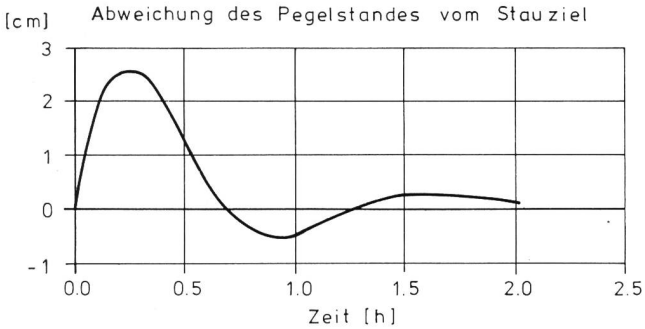


Bild 9. Sprungantwort des Regelkreises aufgrund des einfachen Behältermodells.

parameter, mit denen zwischen verschiedenen vorprogrammierten Regleranordnungen (zum Beispiel PI-Regelung mit oder ohne Störgrössenaufschaltung) und Betriebsarten umgeschaltet werden kann.

Programmablauf

Die Simulation läuft wie folgt ab: Ausgehend von einem stationären Zustand in der Stauhaltung, berechnet *Regsim* den momentanen Wert der Stellgrössen, wie er sich aufgrund der eingegebenen Regelparameter ergibt. Mit diesen Werten wird nun in *Floris* ein Zeitschritt gerechnet. Als Resultat erhält man den Abfluss und die Kote des Wasserspiegels in allen Querprofilen des ganzen Flusssystems nach Ablauf eines (wählbaren) Zeitintervalls Δt. Anschliessend bestimmt *Regsim* wieder die neuen Wehrstellungen bzw. Turbinenabflüsse, und der ganze Vorgang wird wiederholt, bis alle vorgesehenen Zeitschritte durchgerechnet sind.

4. Auswirkung gewisser vereinfachender Annahmen in den Modellen

Aus den vorangehenden Ausführungen geht hervor, dass die verschiedenen Modelle sich hauptsächlich darin unterscheiden, wie das physikalische Verhalten der Regelstrecke beschrieben wird. Im folgenden wird auf einige Konsequenzen eingegangen, die sich aufgrund der unterschiedlichen Voraussetzungen bei den einzelnen Modellen ergeben.

4.1 Vereinfachung in bezug auf die Stauhaltung

Als Ausgangspunkt für den Vergleich diene das einfache Behältermodell aus Abschnitt 3.1. Der Stauraum weise eine Wasseroberfläche von 900000 m² auf. Der Wasserstand werde durch einen PI-Regler geregelt. Die Regelparameter seien wie folgt gewählt:

$k_p = 1000\,\mathrm{m^2/s}$ und $k_i = 6250\,\mathrm{m^2/s{\cdot}h}$ bzw. $1{,}74\,\mathrm{m^2/s^2}$

Wird ein so reguliertes Becken mit der in Bild 8 ersichtlichen Zuflussstörung beaufschlagt, lässt sich aufgrund des Behältermodells die in Bild 9 gezeigte Sprungantwort des Regelkreises analytisch berechnen [4]. Die Abweichung des Wasserstandes vom Stauziel folgt nämlich der Funktion

$$h(t) = \frac{a \sin bt}{bF} \exp(-\beta t/2), \qquad (10)$$

mit

$a = 50\,\mathrm{m^3/s}$

$b = \sqrt{k_i/F - (\beta/2)^2}$

$\beta = k_p/F$

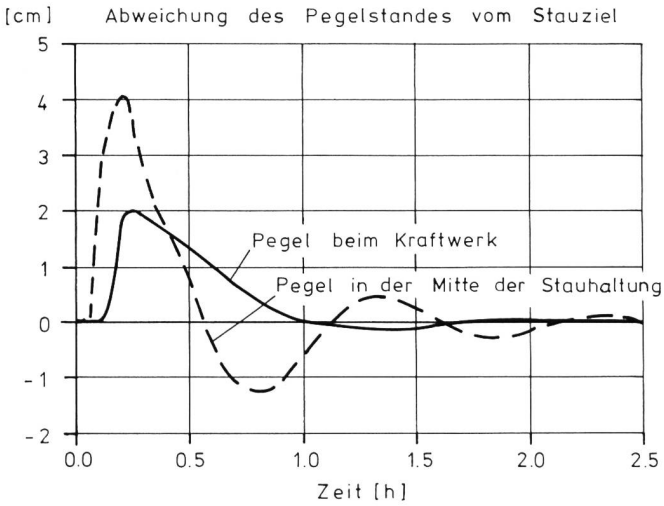
Welches Verhältnis Länge/Breite müsste nun ein rechteckiges Staubecken mit der gleichen Wasseroberfläche von 900000 m² haben, damit die PI-Stauregelung tatsächlich eine Sprungantwort wie Bild 9 bewirkt? Diese Frage lässt sich mit Hilfe des Simulationsmodells *Regel* finden, indem Länge und Breite des Beckens variiert werden. Dabei werden die gleichen Regelparameter wie im Behältermodell verwendet. (Die Pegelmessstelle wird im folgenden jeweils am unteren Ende des Stauraumes angenommen.) Als Resultat erhält man erwartungsgemäss ein sehr kurzes und dafür um so breiteres Staubecken, nämlich ein solches mit Länge 150 m und Breite 6000 m.

Die Behälterbetrachtungsweise impliziert eine Aussage über die Form, das heisst die Längenausdehnung des Stauraumes. Die Länge der Stauhaltung wiederum bestimmt massgeblich, welchen Einfluss die Reibung auf das Verhalten des Regelkreises hat. In einem kurzen Becken spielt die Reibung praktisch keine Rolle. Dies ist anschaulich klar und kann auch durch eine Rechnung am numerischen Modell bestätigt werden. Man erkennt den Einfluss der Reibung, wenn man beispielsweise die gleiche Rechnung für eine Stauhaltung durchführt, die zwar die gleiche Oberfläche aber umgekehrtes Verhältnis von Länge zu Breite hat (L = 6000 m, B = 150 m), vgl. Bild 10.

Eine weitere Besonderheit des Behältermodells ist es, dass das Verhalten des zugehörigen Regelkreises unabhängig von der örtlichen Lage der Regelgrösse ist. In Wirklichkeit trifft dies nicht zu. Regelparameter, die für einen Pegelstandort beim Kraftwerk optimal sind, sind möglicherweise für einen Pegel, der sich zum Beispiel in der Mitte der Stauhaltung befindet, ungünstig. Sie können gegebenenfalls unerwünschte Schwingungen hervorrufen (Bild 11).

Neben diesen sehr auffälligen Einflüssen kommen auch die im Behältermodell unterschiedlichen hydraulischen Verhältnisse bei Hoch- und Niedrigwasser nicht zum Ausdruck. Auch Reflexionen und Störungen, wie sie an jeder Stelle mit deutlicher Veränderung der Gerinnegeometrie entstehen, bleiben unberücksichtigt.

Bild 10. Sprungantworten des Regelkreises aufgrund des numerischen Simulationsmodells, mit und ohne Berücksichtigung der Reibung in der Staustrecke.



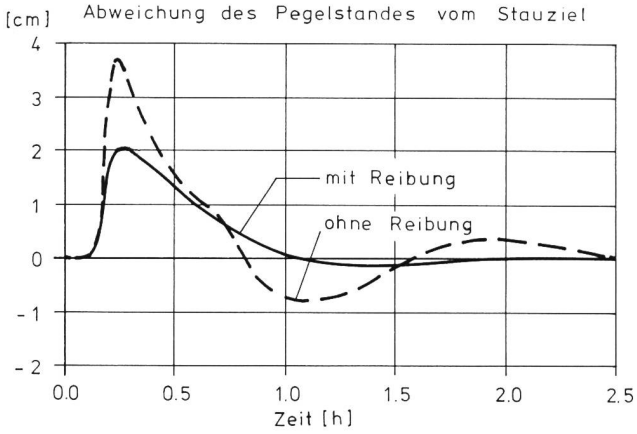


Bild 11. Sprungantworten des Regelkreises aufgrund des numerischen Simulationsmodells bei unterschiedlicher örtlicher Lage der massgebenden Pegelmessstelle. (Die übrigen Parameter wurden für beide Rechnungen gleich gewählt.)

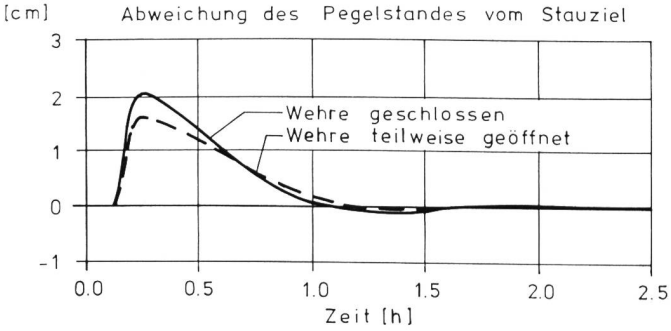
4.2 Vereinfachung in bezug auf die eingesetzten Abflussorgane

Die Annahme, dass alles Wasser durch die Turbine abfliesst (siehe Voraussetzung 4 in Abschnitt 3.1), deutet auf eine Regelstrecke ohne Ausgleich hin. Das heisst, dass nach der Änderung der Stellgrösse (Turbinenabfluss) oder der Störgrösse die Regelgrösse dauernd wächst bzw. fällt, sofern nicht der Regler eingreift. In Wirklichkeit stehen aber zusätzliche Abflussorgane zur Verfügung, die für einen gewissen Ausgleich sorgen. Dies trifft beispielsweise zu, wenn ein Teil des Wassers über ein Wehr abfliesst. In diesem Fall werden ankommende Wasserwellen am Stauwerk nur zum Teil reflektiert. Die Schwingungen des Wasserstandes an der Pegelmessstelle werden dadurch – im Vergleich zur Regelstrecke ohne Ausgleich – merklich gedämpft. Bild 12 veranschaulicht dies.

4.3 Vereinfachung in bezug auf seitliche Zu- und Abflüsse

Normalerweise fallen die natürlichen und auch die künstlichen seitlichen Zu- oder Abflüsse bei einer Flussstauhaltung mengenmässig nicht stark ins Gewicht. Die Regelung wird davon kaum betroffen. Grösseren Einfluss haben Schleusenfüllungen und Entleerungen. Der Schleusenbetrieb kann die Stauregelung stark erschweren. Durch ein einfaches analytisches Verfahren lassen sich die entsprechenden Abläufe nicht mehr genügend genau erfassen. Es müssen zusätzliche Randbedingungen sowie die örtliche und zeitliche Entwicklung der Wasserstandschwankungen berücksichtigt werden. Dies rechtfertigt die Verwendung eines komplexeren Modells und systematische Untersuchungen mit Hilfe von numerischen Simulationen.

Bild 12. Sprungantworten des Regelkreises aufgrund des numerischen Simulationsmodells bei unterschiedlicher Wehröffnung. Die dämpfende Wirkung des teilweise geöffneten Wehres beruht darauf, dass die ankommende Welle nicht vollständig reflektiert wird.



5. Schlussfolgerungen

Die Einrichtung einer automatischen Regelung an einem Laufwasserkraftwerk ist eine anspruchsvolle Aufgabe. Für jedes Projekt muss praktisch eine eigenständige Lösung gesucht werden. In der Projektierungsphase sind gründliche theoretische Analysen notwendig, damit ein systemgerechtes optimales Konzept realisiert werden kann. Dabei könnten numerische Simulationen mit einem Modell, das alle relevanten Vorgänge möglichst genau erfasst, wichtige Aufschlüsse über die Wirksamkeit einer geplanten Regelung geben. Von solchen vorgängigen Systemsimulationen wird aber oft abgesehen, weil entweder das notwendige Instrumentarium fehlt oder der rechnerische (und damit zeitliche und finanzielle) Aufwand gescheut wird.

Praktisch wird das Problem etwa so gelöst [7]: Aufgrund der theoretischen Kenntnisse und der Erfahrung bei anderen Projekten entsteht ein erster Entwurf für die Regeleinrichtung. Im Laufe der Realisierung wird das Konzept überprüft. Dabei werden analytische Methoden oder Prozesssimulationen angewendet. Aber diese Verfahren basieren in der Regel auf vereinfachenden Modellvorstellungen. Wie die vorangehenden Ausführungen zeigen, können Vereinfachungen an der Regelstrecke dazu führen, dass gewisse Abläufe, die die Regelung wesentlich beeinflussen, nicht korrekt wiedergegeben werden. Dementsprechend tragen die Schlussfolgerungen bezüglich Regelkonzept oder Parameterwahl, die aus einem vereinfachenden Modell gezogen werden, den tatsächlichen Verhältnissen nicht immer genügend Rechnung. Darum sind lange Versuchs- und Testphasen an neuen Einrichtungen vielfach nicht zu vermeiden.

Mit dem hier vorgestellten Simulationsprogrammsystem *Regel* steht ein ausbaufähiges Hilfsmittel zur Verfügung, das die massgebenden Elemente der Regelung an Laufwasserkraftwerken sehr detailliert erfassen kann. Der Aufwand für diese komplexere Modellierung ist – entgegen oft gehegter Befürchtungen – überblickbar und vertretbar. Damit ist ein Werkzeug geschaffen, das es dem Praktiker erlauben sollte, die notwendigen Unterlagen für eine optimale automatische Regelung schneller und kostengünstiger zu erarbeiten. Das Programm kann auch auf einem modernen Personal Computer eingesetzt werden.

Literatur

[1] *Fichtlscherer N.* Regelung des Oberwasserpegels an Staustufen. «Wasserwirtschaft», Heft 10/1965.

[2] *Fäh R., Kühne A.* Computersimulation im Dienst des Hochwasserschutzes. «Schweizer Ingenieur und Architekt», Heft 47/1984.

[3] *Horn H., Zielke W.* Das dynamische Verhalten von Flussstauhaltungen. Versuchsanstalt für Wasserbau der TU München, Bericht Nr. 29, 1973.

[4] *Kühne A.* Flussstauregulierung. Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, Nr. 13, 1975.

[5] *Kühne A.* Stauregulierung an Flüssen. «Wasser- und Energiewirtschaft», Heft 4/1975.

[6] *Kühne A.* Schwall- und Sunkerscheinungen in einer Flussstauhaltung. «wasser, energie, luft», Heft 10/1984.

[7] *Leutenegger H.J.* Regelungstechnik in der Praxis – am Beispiel Laufwasserkraftwerk. «Bull. SEV/VSE» *76*, 11, 1985.

[8] *Neumüller M., Bernhauer W.* Stauregelung und Abflussregelung an Laufwasserkraftwerken mit automatischen Verfahren. «Wasserwirtschaft», Heft 9/1976.

[9] *Vischer D.* Die stetige Regelung eines Flüssigkeitsstandes. «Technische Rundschau», Nr. 53, 54, 1970.

Adresse der Verfasser: Dipl. Ing. ETH *Roland Fäh* und Dr. *Anton Kühne*, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH-Zentrum, CH-8092 Zürich.