

Zeitschrift: bulletin.ch / Electrosuisse

Herausgeber: Electrosuisse

Band: 96 (2005)

Heft: 15

Artikel: Automatische Stauziel- und Durchflussregulierung einer Flussstaukette

Autor: Sachs, Roland / Glanzmann, Gabriela / Siebenthal, Martin von

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-857822>

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: 15.01.2026

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

Automatische Stauziel- und Durchflussregulierung einer Flussstaukette

Gleichzeitiges Dämpfen von Durchflussschwankungen und Einhalten der Konzessionspegel von Kraftwerken mittels Optimierungssoftware

Die Anforderungen an die Stau- und Abflussregulierungen von Laufwasserkraftwerken sind sehr vielfältig. So wird von den Regeleinrichtungen erwartet, dass sie die Staukapazitäten optimal nutzen und Ausuferungen verhindern. Das immer empfindlichere Umfeld verlangt außerdem, dass unnatürliche Pegel- und Durchflussschwankungen aus Rücksicht auf die Schifffahrt, aber auch zum Schutz der Flora und Fauna im Uferbereich vermieden werden. Der vorliegende Beitrag beschreibt einen Lösungsansatz mit einer zentralen Stauziel- und Durchflussregulierung¹⁾, welche alle gestellten Forderungen weit gehend erfüllen kann.

Allein die Aufgabe, Anlagenteile aus den verschiedensten technischen Epochen in eine harmonisch und automatisch funktionierende Gesamtanlage zu vereinen, ist für die Lieferanten von leittechnischen Systemen eine grosse Herausforderung.

Bisherige Lösungen werden nachfolgend im Hinblick auf heute übliche Anforderungen und insbesondere auch auf die Betriebssicherheit qualitativ beurteilt und bessere, auf neuen Methoden basierende Lösungen aufgezeigt.

Regelung einer einzelnen Staustufe

Die Regeleinrichtung einer Staustufe mit Wasserkraftnutzung hat eine Vielfalt von Aufgaben zu bewältigen. In der Praxis hat sich deshalb der Begriff Wasserhaushaltssystem (WHA) durchgesetzt. Die typischen Aufgaben einer WHA sind neben der Stauziel- und Durchflussregulierung auch der energetisch optimierte Maschineneinsatz, der schonende Wehrbetrieb, Sicherstellung der Schifffahrt,

Im Laufe des 20. Jahrhunderts wurden in Europa die meisten Flussläufe je nach Gefälle in mehr oder weniger lange Staustufen aufgeteilt und mit Laufkraftwerken ausgerüstet. So gelang es, das wertvolle Energiepotenzial der Flüsse für den Menschen umweltschonend nutzbar zu

Nicht selten müssen Maschinen aus den ersten Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts umgeben mit einer vielleicht 30-jährigen Instrumentierung mit modernsten Computern überwacht und gesteuert werden.

Roland Sachs, Gabriela Glanzmann, Martin von Siebenthal

machen. Unter dem ständig wachsenden Druck des wirtschaftlichen Umfelds werden die Betreiber von Wasserkraftwerken gezwungen, den Automatisierungsgrad ihrer Anlagen laufend zu erhöhen. Dabei spielt die Stauziel- und Durchflussregulierung eine zentrale Rolle.

Neben den wirtschaftlichen Zielen hat der Betreiber aber auch viele weitere Anforderungen von Umweltverbänden sowie aus dem politischen Umfeld zu erfüllen, was vermehrt zu Interessen- und Zielkonflikten führt.

Da in Europa das Wasserkraftpotenzial weit gehend ausgenutzt ist, werden kaum neue Wasserkraftwerke konzipiert und gebaut. Die meisten Anlagen haben zudem ein Alter von mehreren Jahrzehnten und werden heute im Hinblick auf eine Ertragssteigerung teilweise erneuert. Dabei stoßen Technologien aus unterschiedlichen Generationen zusammen.

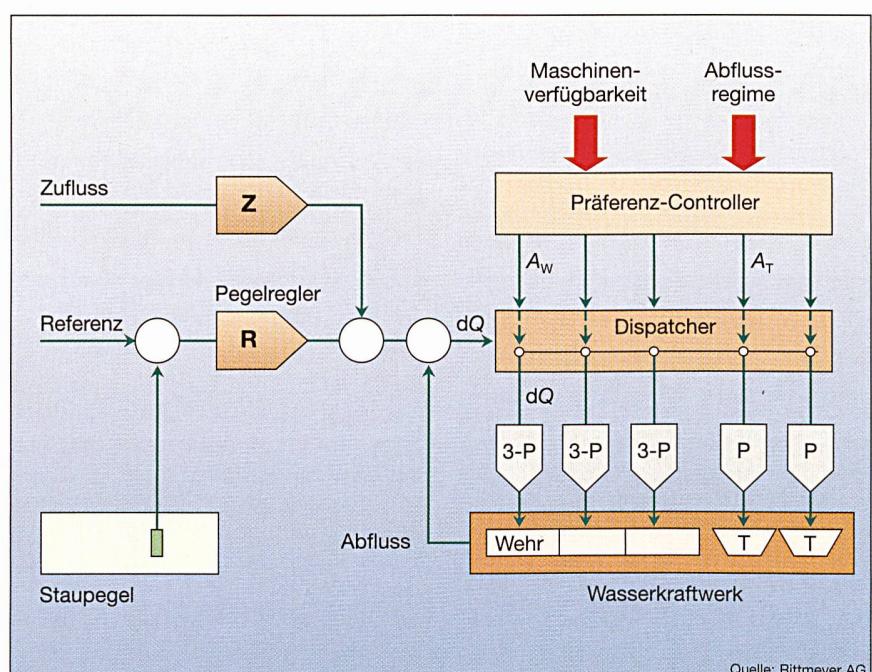


Bild 1 Wasserhaushaltssystematik einer Staustufe

A_W: Verfügbarkeit des Wehrs (Availability of Weir); dQ: Durchflussabweichung; P bzw. 3-P: Durchflussregler; R: Regler; T: Turbine; Z: Störgrößenaufschaltung

eine sichere Hochwasserentlastung und vieles mehr.

Gegenwärtiges Regelkonzept

Bild 1 zeigt ein bewährtes Konzept für eine lokale Wasserhaushaltsautomatik mit eingebauter Stauziel- und Durchflussregelung [1, 2].

Ein Pegelregler, meist ein PI-Regler (R) mit Störgrößenaufschaltung (Z), berechnet auf Grund der aktuellen Stauzielabweichung für die Staustufe einen Durchflusssollwert, welcher mit dem aktuellen Durchfluss verglichen wird. Die momentane Durchflussabweichung dQ wird vom Dispatcher an den Stellkreisregler (Durchflusssregler P/3-P) einer gezielt ausgewählten Turbine bzw. eines Wehrverschlusses weitergeleitet. Der Preference Controller bestimmt auf Grund des Abflussregimes und der Maschinenverfügbarkeit das zu steuernde Organ. Dank der zahlreichen Erneuerungsprojekte für Einzelstaustufen konnte sich die Mess-, Leit- und Regeltechnik für Wasserkraftwerke sehr gut entwickeln. Die modernen Automatisierungseinrichtungen vereint mit der langjährigen Erfahrung von etablierten Leit-, Mess- und Regeltechnik-Anbietern beherrschen die komplexen Prozesse einer Kraftwerksanlage heute weit gehend.

Resultierende Probleme

Bislang wurden die meisten Staustufenketten allein mit lokalen Stauziel- und Durchflussregeleinrichtungen ausgerüstet. Je nach Ausführung und Qualität der

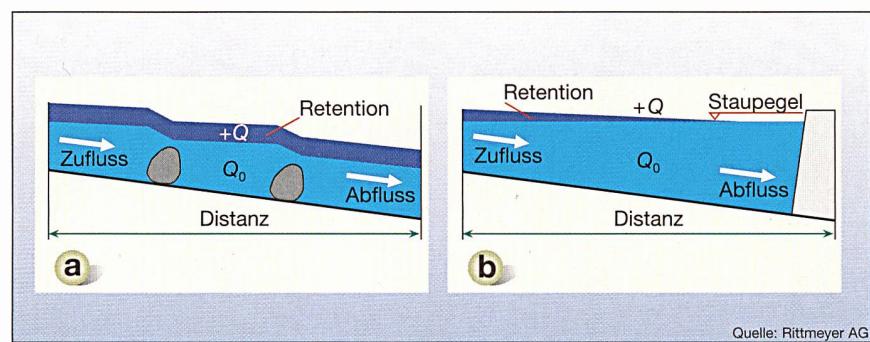


Bild 3 Retentionsvolumen einer geregelten Staustufe

Bild 3a: Retentionsvolumen einer Flussstrecke mit natürlichen Hindernissen; Bild 3b: Retentionsvolumen einer geregelten Staustufe

Einrichtungen neigen sie zum Überschwingen. Das heisst, dass Zuflusschwankungen verstärkt weitergegeben werden. Dies ist vor allem dann problematisch, wenn mehrere Stufen in Kaskade arbeiten. Wird der Zufluss als Stör- und/oder Führungsgroßes in den Regler eingebunden, kann die Regelgüte markant verbessert werden. Für Staustufensketten mit mehr als zwei Stufen reichen diese Massnahmen allein für eine befriedigende Lösung aber nicht aus.

Bild 2 veranschaulicht die Grenzen der herkömmlichen Regeleinrichtungen. Ein Regler mit Störgrößenaufschaltung (Bild 2b) kann eine Zuflussänderung bestenfalls nur leicht gedämpft weitergeben. Oft muss man sich mit einem ungedämpften Übertragungsverhalten abfinden.

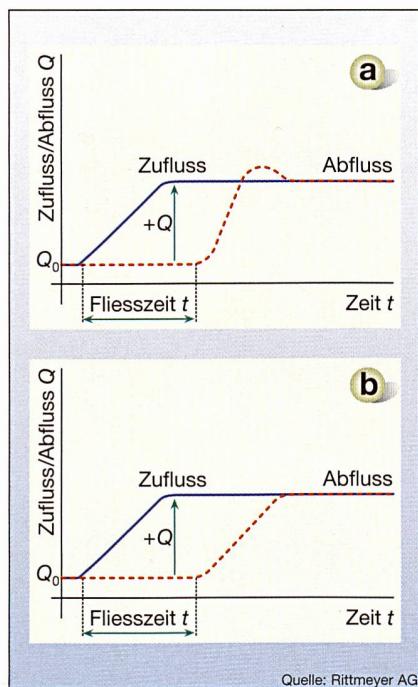


Bild 2 Regler ohne (a) und mit (b) Störgrößenaufschaltung

Kraftwerksbetreiber mit den klassischen Regeleinrichtungen weit gehend abgedeckt werden können, sind die oben erwähnten Argumente Motivation genug, um nach verbesserten Lösungen zu suchen.

Erhöhung des Retentionsvermögens

Obwohl in den Stauräumen keine bleibenden Stauzielabweichungen zugelassen werden, kann durch vorübergehende und koordinierte Absenkung bzw. Anhebung der Pegel innerhalb tolerierbarer Grenzen ein dämpfendes Übertragungsverhalten erreicht werden. Dazu müssen Pegelabweichungen zum Stauziel zeitlich begrenzt zulässig sein und die Zuflüsse zu den einzelnen Staustufen gemessen werden.

Betrachtung an einem Beispiel aus der Praxis

Die untere Aare (CH) wird zwischen den Ortschaften Murgenthal und Brugg von 6 Kraftwerken genutzt, wovon 4 als Kanalkraftwerke ausgebildet sind. Zwischen den einzelnen Staustufen existieren kaum Freifließsstrecken. Die Kraftwerksbetreiber müssen gemäss den Konzessionsbestimmungen konstante Staupegel einhalten. Die einzelnen Kraftwerke wurden nach und nach im Laufe der letzten 10 Jahre mit modernen WHA ausgerüstet (Bild 1). Die Zuflüsse in die Stauräume werden erfasst und als Störgrößes in die WHA eingebunden.

Mit einem Toleranzband um das Stauziel von ± 2 bis ± 5 cm für vorübergehendes Absenken bzw. Aufstauen könnte das Retentionsvermögen kurzfristig um mindestens $150\,000 \text{ m}^3$ erhöht werden (Bild 4).

Das nachfolgende einfache Rechenbeispiel verdeutlicht, welches Dämpfungsvermögen durch eine gezielte Ausnutzung der Stautoleranzen gewonnen werden kann.

Flusskraftwerke

Szenario

Als Folge eines extremen Ereignisses im Oberlauf der Aare erhöht sich der Durchfluss in Murgenthal während 30 Minuten um $200 \text{ m}^3/\text{s}$. Die geschätzte Summe der nutzbaren Retentionsvolumina über alle Staustufen bis Brugg beträgt $150\,000 \text{ m}^3$. Dieses Gesamtvolumen kann erreicht werden, wenn alle Staustufen das Toleranzband von 5 cm nach unten ausnützen (Vorabsenkung).

Wie Bild 5 zeigt, müsste ohne Ausnutzung der Retention der Zufluss bei Murgenthal um die Fliesszeit später bei Brugg ungedämpft abgegeben werden. Die ausgezogene dunkelblaue Linie im Diagramm mit der Bezeichnung *Abfluss Brugg* stellt diese Situation dar. Zur Nutzung der verfügbaren Retentionskapazität werden alle Stauräume vor dem Eintreffen der Schwallwelle koordiniert um 5 cm abgestaut.

Das abstaubare Volumen $V_R(-)$ bzw. die Abstauzeit t_1 kann näherungsweise nach der folgenden Formel bestimmt werden.

$$V_R(-) \approx \frac{t_1 \cdot \Delta Q_m}{4} \quad \text{bzw. } t_1 \approx \frac{4 \cdot V_R(-)}{\Delta Q_m} \quad (1)$$

Mit $V_R = 150000 \text{ m}^3$ wird die Abstauzeit $t_1 = 3000 \text{ s}$. Aus Symmetriegründen beträgt auch t_3 (Aufstauzeit) 3000 s. t_2 entspricht der Dauer des Zuflussanstieges und beträgt daher 1800 s. Mit der Summe aller drei Zeiten ($t_1+t_2+t_3$) erhält man die gesamte Dauer der Durchflussänderung bei Brugg. Sie beträgt somit 7800 s.

Fazit

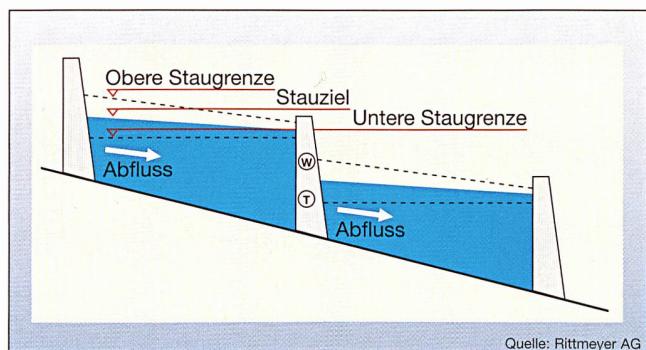
Mit einer koordinierten Ausnutzung des Retentionsvermögens aller 6 Staustufen wird die Steilheit der Durchflussänderung bei Brugg (rot gestrichelte Linie) um den Faktor 3,3 verringert.

Mit dieser vereinfachten Berechnung kann nur das Verbesserungspotenzial abgeschätzt werden; dynamische und die nichtlinearen Vorgänge werden dabei nicht berücksichtigt.

Übergeordnete Regelung einer Staustufenkaskade

In den letzten Jahrzehnten wurden die meisten Flussstaustufen modernisiert und auch weit gehend automatisiert. In einzelnen Fällen konnte die Automatisierung für ganze Flussabschnitte gleichzeitig konzipiert werden. Meistens aber wurden aus wirtschaftlichen oder Besitzstandsgründen nur einzelne Werke in ein Erneuerungsprojekt einbezogen. Eine ganzheitliche Lösung für eine optimale Flussbewirtschaftung stand daher selten im Vordergrund.

Bild 4 Stauräume mit Stautoleranzband



Quelle: Rittmeyer AG

Mit dem Ziel, das Dämpfungsverhalten eines gestauten Flusses unter Einhaltung der auferlegten Beschränkungen bezüglich des Konzessionspegels wieder herzustellen (Bild 6), ohne dabei wirtschaftliche Einbussen in Kauf nehmen zu müssen, wurde nach neuen Lösungsansätzen gesucht. Um den betriebswirtschaftlichen und sicherheitstechnischen Belangen Rechnung zu tragen, sollen dabei die bestehenden Automatisierungseinrichtungen, die weniger als 10 Jahre alt sind – und soweit sie den grundsätzlichen Anforderungen genügen – weiter verwendet werden können.

zentralen Staustufen von einem zentralen Rechner (zentraler Durchflussregler/Central Flow Controller, CFC) mit Durchflussvorgaben geführt (Bild 7).

Der CFC berechnet für jede Staustufe die Durchflusssollwerte so, dass die zulässigen Stautoleranzen im Hinblick auf eine maximal mögliche Durchflussdämpfung ausgenutzt, aber möglichst nicht überschritten werden. Diese Optimierungsaufgabe wurde von der Firma Rittmeyer AG als Diplomarbeit für Studenten am Institut für Automatik der ETH Zürich in Auftrag gegeben.

Für die Lösung wurde MPC (Model Predictive Control) in der Matlab-Umgebung eingesetzt [3]. MPC verwendet ein mathematisches Modell der Regelstrecke, um deren Verhalten vorherzusagen. Im Falle der Wasserpegelregelung sind dies mathematische Gleichungen, die den zeitlichen Verlauf der Konzessionspegel in Abhängigkeit der Kraftwerkserdurchflüsse beschreiben. Dies ermöglicht es dem Regler, Durchflüsse zu berechnen, die die Durchflussschwankungen

Technisches Konzept

Als Grundlage für die technische Lösung wird vorausgesetzt, dass alle Staustufen eine gut und sicher funktionierende WHA besitzen (Bild 1). Der eingebaute Stauzielregler wird so parametriert, dass er dann regulierend eingreift, wenn das vorgegebene Pegeltoleranzband verletzt wird. Innerhalb des Toleranzbandes, also im Normalbetrieb, werden die ein-

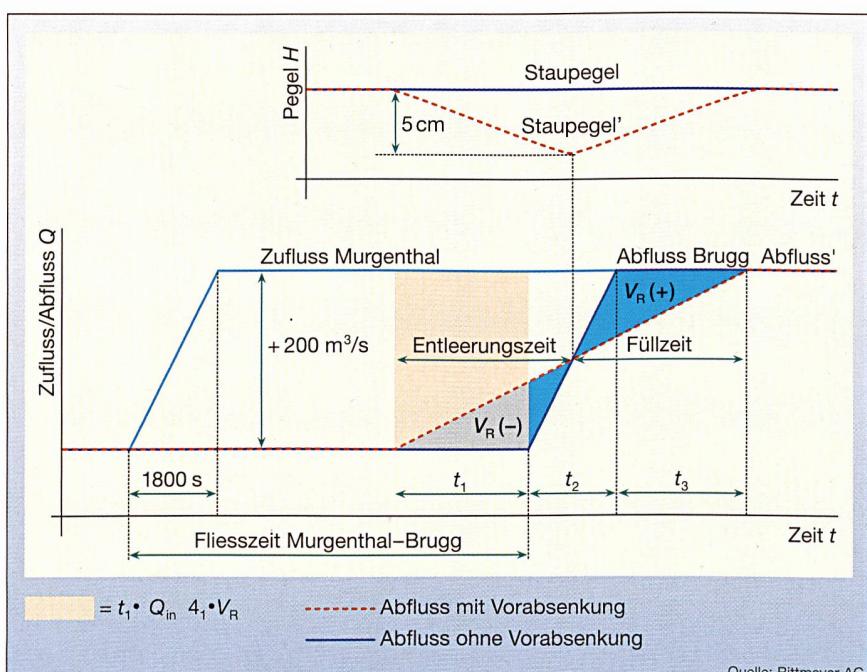


Bild 5 Gedämpfte Übertragungsfunktion am Beispiel «Untere Aare»

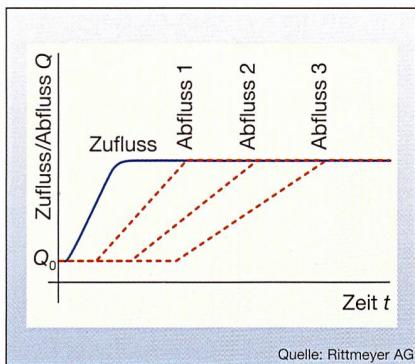


Bild 6 Dämpfendes Abflussverhalten über 3 Staustufen

kungen optimal dämpfen und die Konzessionspegel innerhalb der vorgegebenen Begrenzungen halten.

In einem ersten Schritt wurde ein mathematisches Modell des zu regelnden Flussabschnitts mit dessen Kraftwerken erstellt, das auf den so genannten Saint-Venant-Gleichungen, die das hydraulische Verhalten eines Flusses mittels zweier partieller Differentialgleichungen beschreiben, basiert [1]. Die zugehörigen Parameter lassen sich direkt aus der Topographie des Flusses ableiten, insbesondere aus den Querschnitten und dem Gefälle des Flussbettes. Die bisherigen Erfahrungen zeigen, dass heute die meisten grösseren Flussläufe ausgemessen und die Daten in hinreichender Qualität verfügbar sind.

Der Ablauf eines Regelzyklus sieht folgendermassen aus: Der Regler sagt mit Hilfe des Flussmodells die Abfolge der Durchflüsse durch die fünf Kraftwerke über eine Stunde voraus. Theoretisch könnte diese Sequenz als Fahrplan für die nächste Stunde verwendet werden. Da das Modell, auf dem die Berechnungen basieren, nicht perfekt mit der Realität

übereinstimmt, und da ausserdem während einer Stunde unerwartete Zuflusschwankungen auftreten können, wird von der berechneten Durchflussequenz nur die erste Minute verwendet, die Auswirkungen dieses Regelschrittes und eventueller anderer Einwirkungen ermittelt und die Berechnungen von neuem begonnen.

Bei der Regelung einer Kraftwerkskaskade sollen einerseits die Durchflusschwankungen gedämpft und andererseits die Konzessionspegel der Kraftwerke nahe der vorgeschriebenen Referenzwerte gehalten werden. Diese beiden Anforderungen widersprechen sich. Mittels eines so genannten Reglerkriteriums in Form einer quadratischen Kostenfunktion lassen sich diese Anforderungen gewichten. Basierend auf dem Flussmodell berechnet MPC die im Sinne des definierten Reglerkriteriums optimalen Kraftwerksdurchflüsse. Ein grosser Vorteil von MPC besteht darin, dass die Beschränkungen, auf den Konzessionspegeln problemlos berücksichtigt werden können. Daher garantiert MPC die Einhaltung dieser Beschränkungen, sofern der Fluss dies physikalisch erlaubt. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Berechnung der optimalen Kraftwerksdurchflüsse auf den realen, gemessenen Pegel- und Durchflusswerten basiert und sich deshalb allfällige Modellgenauigkeiten kaum auswirken. Auch falsche Voraussagen auf Grund von Messfehlern werden durch kontinuierlichen Einbezug des realen Verlaufs korrigiert. Es können also auch mit vereinfachten und relativ ungenauen Modellen bereits gute Resultate erzielt werden. Genau diese Eigenschaft macht den Central Flow Controller mit MPC interessant und praxistauglich.

Zur Evaluation des Konzeptes wurde die Flussstrecke mit Floris, einem Simu-

lationsprogramm der Firma Scietec, realisiert. Bild 8 zeigt das Dämpfungsverhalten der neuen Regeleinrichtung über 5 Staustufen bei 2 unterschiedlichen Störungseignissen (hell: mit lokalen PI-Reglern, dunkel: mit übergeordnetem CFC basierend auf MPC). Es wird deutlich, dass der übergeordnete Regler die erlaubten Abweichungen der Konzessionspegel vollständig nutzt, um eine beachtliche Dämpfung der Durchflusschwankungen zu erreichen, während die PI-Regler die Schwankungen sogar noch verstärken und auch die Begrenzungen auf den Konzessionspegeln nicht überall eingehalten werden. Durch MPC kann das ganze Verbesserungspotenzial, welches durch die Toleranzbänder geschaffen wird, optimal ausgeschöpft werden.

Gefahren und Risiken

Es ist hinreichend bekannt, dass der Betrieb von Staustufen mit einem hohen Gefahrenpotenzial verbunden ist. Sowohl Menschen, Bauwerke, Maschinen und Landschaften innerhalb und ausserhalb der Anlagen können von Unfallereignissen, welche durch Fehlfunktionen oder Fehlmanipulationen verursacht werden können, betroffen sein. Durch die ständige Erhöhung des Automatisierungsgrades entziehen sich die Anlagen mehr und mehr der menschlichen Aufsicht vor Ort. Dies muss bei der Planung und Ausführung von Automatisierungsprojekten mit höchster Priorität berücksichtigt werden. Auch beim Einsatz der vorgeschlagenen Lösung mit dem Central Flow Controller spielen Sicherheitsüberlegungen eine wichtige Rolle. Es ist unbedingt darauf zu achten, dass als Folge der Anbindung an den übergeordneten Rechner keine neuen Risiken entstehen; die bestehenden Sicherheits- und Schutzeinrichtungen in den Wasserhaushaltssystemen dürfen durch den Einfluss der zentralen Führung unter keinen Umständen beeinträchtigt werden.

Ausblick

Bereits heute werden Staustufenketten oft zentral gesteuert und überwacht. Zentrale automatische Optimierungseinrichtungen hingegen sind noch selten anzutreffen. Die in diesem Beitrag aufgezeigte Lösung baut weit gehend auf den bestehenden Strukturen auf, was die Nachrüstung bestehender Anlagen mit relativ geringem Aufwand ermöglicht. Dies bietet sich vor allem dort an, wo mehrere Staustufen eingebunden werden können, und wo Abflussvergleichsmässigungen ein Thema sind. Der CFC kann natürlich

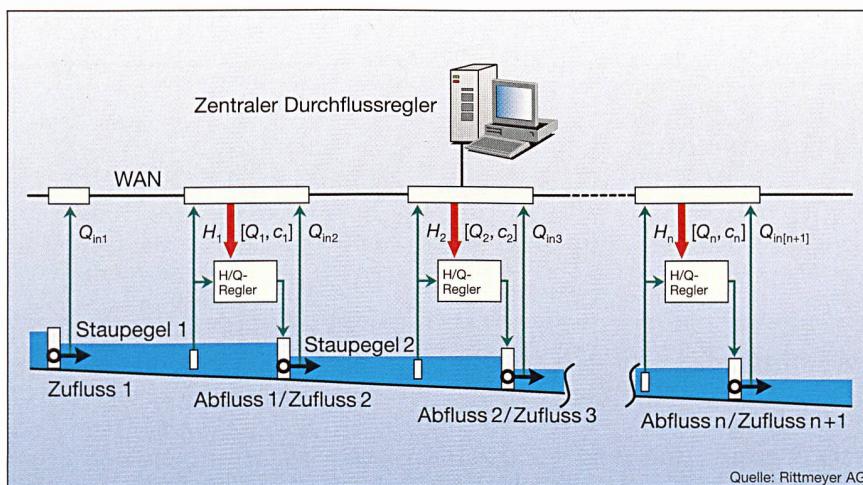


Bild 7 Regeleinrichtung für Staustufenketten

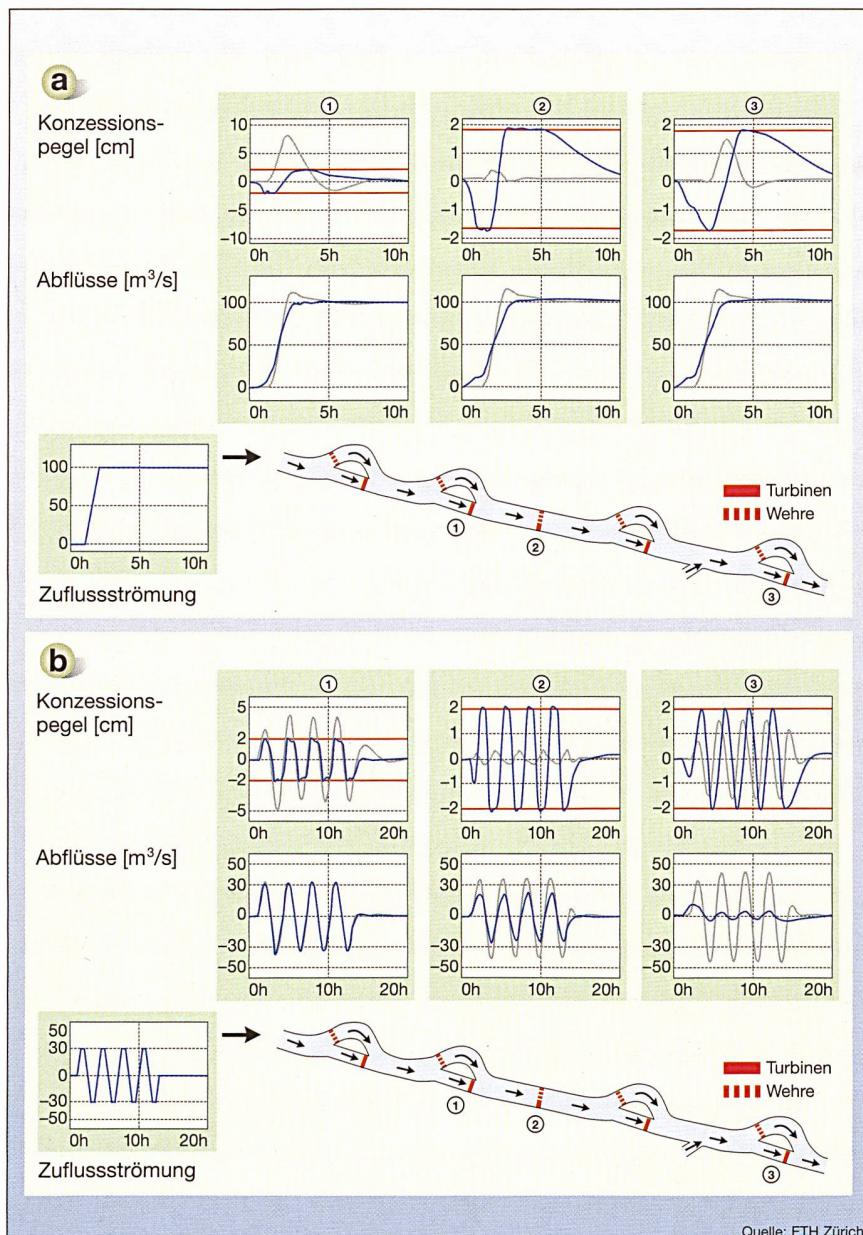


Bild 8 Pegel und Durchflüsse bei einer Zuflussrampe (a) und eines Zuflusssinus (b)

Grau: lokale PI-Regler, blau: MPC

nicht nur für die Durchflussdämpfung, sondern auch als Bewirtschaftungsrechner eingesetzt werden. Damit könnte – wenn dies überhaupt zulässig ist – eine Staukette im Hinblick auf eine Ertragsteigerung automatisch bewirtschaftet werden.

Referenzen

- [1] J. Chapuis: Modellierung und neues Konzept für die Regelung von Wasserkraftwerken, Diss. ETH Zürich Nr. 12765, CH-8092 Zürich, 1998.
- [2] R. Sachs: Fuzzy-Logic in der Regelung von Laufkraftwerken. Wasser, Energie, Luft, 11/12, 1999.
- [3] S. J. Qin, T. A. Badgwell: A survey of industrial model predictive technology. Control Engineering Practice, 11, 733-764, 2003.

Angaben zu den Autoren

Dipl. El. Ing. FH **Roland Sachs** ist seit 1986 Mitarbeiter bei der Firma Rittmeyer AG in Zug. Bis 1994 leitete er das Engineeringteam in der BU Kraftwerke und ab 1995 ein Projektteam für die Automatisierung von Wasserkraftwerken.

Rittmeyer AG, CH-6302 Zug,
roland.sachs@rittmeier.com

Dipl. El.-Ing. ETH/MSc ETH **Gabriela Glanzmann**²⁾ erhielt 2004 den Titel Master of Science in Electrical Engineering and Information Technology von der ETH Zürich und arbeitet seither als Doktorandin am Institut für elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnologie der ETH.

Institut für elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnologie, ETH Zentrum, CH-8092 Zürich, glanzmann@eeh.ee.ethz.ch

Dipl. El.-Ing. ETH/MSc ETH **Martin von Siebenthal**²⁾ erhielt 2004 den Titel Master of Science in Electrical Engineering and Information Technology von der ETH. Seither arbeitet er als Doktoratsstudent am Institut für Bildverarbeitung der ETH.

Institut für Bildverarbeitung, ETH Zentrum, CH-8092 Zürich ETH-Zentrum, mvonsieb@vision.ee.ethz.ch

¹ Stauziel: Das Stauziel ist der Staupegel, der mit Hilfe einer Pegelregelung eingehalten werden soll (Sollwert).

² Gabriela Glanzmann und Martin von Siebenthal erhielten 2004 die ETH-Medaille für ihre gemeinsame Diplomarbeit *Supervisory Water Level Control for Cascaded River Power Plants* am Institut für Automatik der ETH.



Wir gratulieren

An der Generalversammlung von Electrosuisse am 8. Juni 2005 in Luzern wurde die diesem Fachartikel zugrunde liegende Masterarbeit «Supervisory Water Level Control for Cascaded River Power Plants» von Gabriela Glanzmann und Martin von Siebenthal mit einem Innovationspreis ausgezeichnet. (Siehe auch Bulletin SEV/VSE Nr. 13/14, Seite 37.)

Félicitations

A l'occasion de l'assemblée générale du 8 juin 2005 d'Electrosuisse à Lucerne, le travail de maîtrise à la base de cet article technique, «Supervisory Water Level Control for Cascaded River Power Plants» de Gabriela Glanzmann et Martin von Siebenthal a reçu un Prix Innovation. (Voir également Bulletin SEV/AES no. 13/14, page 37.)