

Zeitschrift: Wasser- und Energiewirtschaft = Cours d'eau et énergie
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 67 (1975)
Heft: 4

Artikel: Stauregulierung an Flüssen
Autor: Kühne, Anton
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-920907>

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: 19.02.2026

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

Anton Kühne

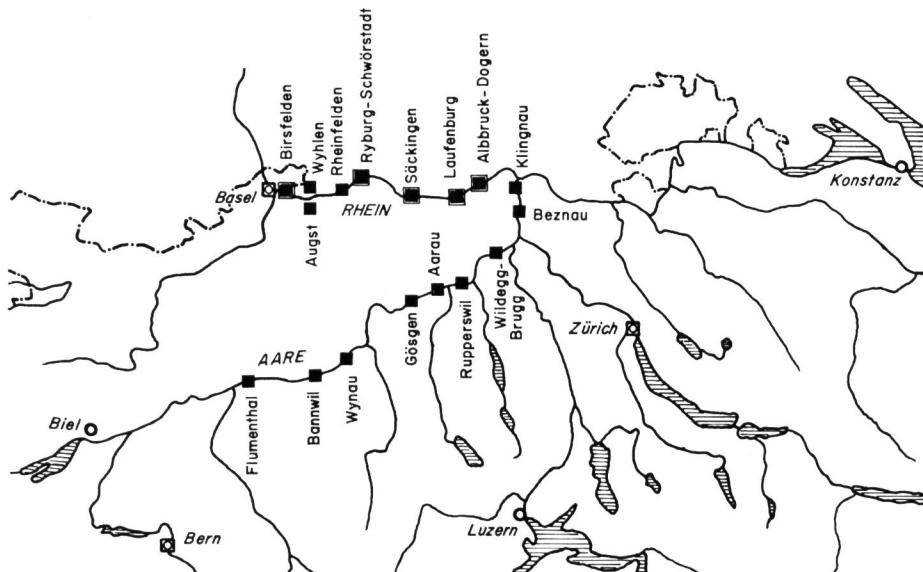
Am unteren Aarelauf und am Hochrhein wurde in den letzten Jahren wiederholt eine Anomalie beobachtet. Verschiedentlich wurden verhältnismässig rasche Abflusschwankungen flussabwärts von Staustufe zu Staustufe nicht gedämpft — wie dies zu erwarten gewesen wäre — sondern wesentlich vergrössert, obwohl jeweils alle Stauwerke versucht hatten, den an sie gestellten Regulierbedingungen gerecht zu werden. So ist zum Beispiel ein Ereignis bekannt, bei dem eine vorübergehende Drosselung des Bielersee-Ausflusses eine Verminderung der Wasserführung verursachte, die sich längs der fast 190 km langen Flussstrecke zwischen Bielersee und Basel rund um den Faktor 2.5 verstärkte.

Ein Blick auf die Schweizerkarte zeigt, dass die Aare und der Rhein auf der genannten Strecke durch insgesamt 16 Laufwerke genutzt werden, die zusammen eine fast lückenlose Stauwerkskette bilden, siehe Bild 1. Es war deshalb naheliegend, die Ursache der beobachteten Anomalien in diesem Umstand zu suchen. Es zeigte sich, dass die Regulierbedingungen für diese Laufwerke in den zugehörigen Konzessionen sehr eng umschrieben sind und meistens auch strikte eingehalten werden. Allerdings schenken die Konzessionen, die für die einzelnen Laufwerke zu ganz verschiedenen Zeitpunkten und von verschiedenen Konzessionsbehörden — wie Bund und Anliegerkantone — erteilt wurden, dem Zusammenspiel der Stauwerkskette keine besondere Beachtung. Dementsprechend sind die Reguliermethoden fast ausnahmslos auf den Betrieb eines Laufwerkes als Einzelwerk ausgerichtet.

Dem einzelnen Werk werden für die Stauregulierung häufig zwei Forderungen gestellt:

1. Der Stauspiegel soll unmittelbar beim Stauwerk oder an einer anderen Stelle im Stauraum konstant gehalten werden;
2. Der Zufluss soll möglichst unverändert weitergeleitet werden.

[] siehe Literaturangaben am Schluss dieses Berichtes



Werke mit einer maximal ■ 10 - 50 MW
möglichen Leistung von: □ 50 - 150 MW

Bild 1 Flusskraftwerke an Aare und Hochrhein zwischen Bielersee und Basel.

Die beobachteten Anomalien zeigen, dass eine Regulierung, die den Forderungen an ein einzelnes Stauwerk entspricht, in einem mehrfach gestauten Fluss nicht immer genügt. Eine Aufschaukelung von Abflussschwankungen ist natürlich höchst unerwünscht, weil sie eine Unruhe in die ganze Stauwerkskette bringt und insbesondere bei Niederwasser für die Schiffahrt prohibitive Fahrverhältnisse schafft. Es gilt deshalb, die Abflussaufschaukelung als Phänomen zu klären und zu beschreiben, um aus der entsprechenden Einsicht heraus die erforderlichen Gegenmassnahmen zu planen und zu verwirklichen.

Das Eidg. Amt für Wasserwirtschaft beauftragte daher die Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) an der ETH Zürich mit der Untersuchung des Verhaltens einer Stauwerkskette bei raschen Abflusschwankungen. Im Einverständnis mit dem Auftraggeber konnte der allgemein interessierende Inhalt der Untersuchungsergebnisse in Nr. 13 der Mitteilungen der VAW [4] veröffentlicht werden. Der vorliegende Bericht gibt eine Uebersicht über die grundsätzlichen Aspekte und die wichtigsten Ergebnisse jener Studie. Die entsprechenden Untersuchungen stützten sich auf mathematische Modelle; es wurden hauptsächlich systemtheoretische Methoden angewandt.

Im angrenzenden Ausland wurden bei einigen Stauwerksketten ebenfalls Anomalien beobachtet. Diese gaben Anlass zu ähnlichen Studien [3, 5], die unter anderem auch anhand von hydraulischen Modellversuchen durchgeführt wurden.

Es soll hier gezeigt werden, wie die zur Zeit praktisch verwendeten Reguliermethoden — vor allem die Proportional-Integralregelung, gegebenenfalls ergänzt durch eine Störgrössenaufschaltung [1] — die natürliche Wasserführung in einem Fluss verändern. Insbesondere wird geprüft, inwiefern den beiden eingangs erwähnten Forderun-

gen an die Stauregulierung entsprochen werden kann. Dabei konzentriert sich das Interesse auf kurzfristig auftretende Schwankungen in der Wasserführung. Diese sind meistens auf künstliche Eingriffe an irgendeinem Regulierorgan eines Oberliegers, seltener auf natürliche Ereignisse — wie Starkniederschläge — zurückzuführen. Langsame Veränderungen in der Wasserführung werfen für die Stauregulierung im allgemeinen keine besonderen Probleme auf. Es wird untersucht, mit welchen Pegelstands- und Abflussschwankungen bei verschiedenen Arten von kurzfristigen Zuflussstörungen gerechnet werden muss. Für das Ausmass dieser Schwankungen spielt die Handhabung der Reguliereinrichtung eine wichtige Rolle. Dem Einfluss und der Bedeutung der einzelnen Regulierparameter wird grosse Aufmerksamkeit geschenkt, um daraus Konsequenzen für eine günstige Regulier-Betriebsweise ableiten zu können.

1. Systembeschreibung

Es ist im allgemeinen nicht möglich, die meist recht komplizierten Fliessvorgänge in offenen Gerinnen — also etwa in Flüssen — in allen Einzelheiten zu erfassen. Eine Beschreibung der natürlichen Verhältnisse durch ein mathematisches Modell kann daher nur unter vereinfachenden Annahmen geschehen. Gewisse Abweichungen des Modells von der Natur sind dabei in Kauf zu nehmen. Diesem Nachteil stehen jedoch die grossen Vorteile einer mathematischen Beschreibung gegenüber, denn diese gestattet oft eine recht aufschlussreiche Analyse eines natürlichen Vorganges. Dank mannigfaltiger Variationsmöglichkeiten, die im Gegensatz zur Natur im mathematischen Modell leicht zugänglich sind, kann dieses eine ganze Auswahl von guten Lösungen, oft gar eine optimale Lösung eines Problems aufzeigen.

Zunächst soll die Aufmerksamkeit den Vorgängen an einem einzelnen Stauwerk gelten. Auf das Zusammenspiel in einer Stauwerkkette wird nachher eingegangen.

1.1 DIE STAUAUHALTUNG

Für die Beschreibung einer Stauhaltung werden im folgenden einschränkende Vereinfachungen angenommen, vgl. Bild 2.

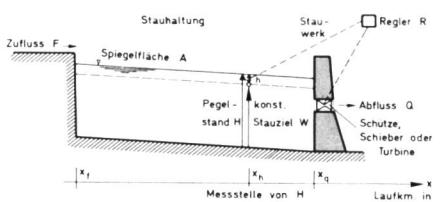


Bild 2 Schematische Darstellung einer Fluss-Stauhaltung.

Die Spiegelfläche A der Stauhaltung sei unabhängig vom Volumen V der sich darin befindenden Wassermenge. Es sollen keine nennenswerten seitlichen Zuflüsse in die Stauhaltung münden. Nur der eine Zufluss F trete am oberen Ende in den Stauraum ein. Desgleichen trete nur der Abfluss Q am unteren Ende der Stauhaltung aus. F, Q und V sind natürlich zeitabhängige Größen. Die zeitliche Wasservolumenänderung in der Stauhaltung werde allein durch die Kontinuitätsgleichung in der folgenden Weise beschrieben:

$$\frac{dV}{dt} = F - Q$$

Im weiteren liege eine eher geringe Wasserführung vor, so dass sich der gesamte Abfluss aus der Stauhaltung durch die Turbinen vollzieht.

1.2 DIE STAUREGULIERUNG

Der Zufluss F zur Stauhaltung ist als eine gegebene Größe anzusehen. Der Abfluss Q jedoch kann durch entsprechende Einstellungen an den Abflussorganen beeinflusst werden. Das zeitliche Verhalten des Volumens im Stauraum ergibt sich dann aus der Kontinuitätsgleichung.

Für die Festsetzung des Abflusses sind bei einem regulierten Flussstauwerk grundsätzlich zwei «Strategien» möglich, nämlich eine Regulierung mit konstantem Stauziel oder eine Regulierung mit vorgeschriebenem Abfluss. Im ersten Fall wird der Abfluss aus dem Stauraum so eingestellt, dass der Oberwasserpegelstand H an einer bestimmten Stelle in der Stauhaltung mit einem vorgeschriebenen Sollwert W (Stauziel) übereinstimmt, bzw. höchstens um eine kleine bewilligte Toleranz $\pm \Delta W$ davon abweicht. W wird in der Regel konstant sein und ist durch die amtliche Konzession festgelegt. Ausserordentliche Umstände, zum Beispiel sehr starke Veränderungen in der Wasserführung, können eine zeitweilige Anpassung dieses Sollwertes verlangen. Bei der Regulierung mit vorgeschriebenem Abfluss wird hingegen der Abfluss aus dem Stauraum direkt nach dem Zufluss oder einem vorgegebenen Programm, unabhängig vom Wasserstand in der Stauhaltung, eingestellt.

Bei einem grossen Teil der heute in Betrieb stehenden Laufwerke wird der Oberwasserpegelstand konstant gehalten. Als Gründe dafür können angeführt werden: Landschaftsschutz, Uferschutz, Schiffahrt. Im folgenden wird daher unter «Stauregulierung» stets eine Regulierung mit konstantem Stauziel verstanden.

Zur Beschreibung der Vorgänge bei der Stauregulierung wird hier von einem stationären Verhalten ausgegangen. In diesem Anfangszustand sind der Zufluss F_0 und der Abfluss Q_0 gleich; der Pegelstand H_0 stimmt dabei normalerweise mit dem konstanten Stauziel W überein. Im folgenden werden die Abweichungen von diesen Größen mit kleinen Buchstaben bezeichnet. Wenn zur Zeit $t = 0$ eine Veränderung $f(t)$ des Zuflusses einsetzt, bewirkt dies im Stauraum eine entsprechende Veränderung im Wasservolumen, also auch im Pegelstand. Damit letztere klein bleibt, muss der Abfluss angepasst werden: $Q(t) = Q_0 + q(t)$.

Zu diesem Zweck wird bei der Pegelmessstelle in der Stauhaltung ständig die Abweichung $h = H - W$ des momentanen Wasserstandes H vom Sollwert W registriert und durch den Regler in eine entsprechende Verstellung an den Abflussorganen umgesetzt. (Bei einer nicht automatisch betriebenen Anlage wird die Funktion des Reglers sinngemäß durch einen Angestellten des betreffenden Stauwerkes übernommen.)

Wenn bei einer Veränderung im Zufluss erst auf die entsprechende Auswirkung im Pegelstand reagiert wird, kann in der Abflussanpassung eine gewisse Verzögerung resultieren. Um diesem Umstand zu begegnen, wird oft eine Zuflussänderung bei der Einstellung des Abflusses direkt berücksichtigt. Es darf vorausgesetzt werden, dass die Abflusseinstellungen nach einer bestimmten Gesetzmässigkeit erfolgen, so dass eine Abflussgleichung der folgenden Form gilt:

$$q = g(H-W, f) = g(h, f), \text{ bzw.}$$

$$Q = Q_o + g(h, f)$$

Wenn weiter vorausgesetzt wird, dass ein eindeutiger Zusammenhang zwischen V und H von der Form $V = V(H)$ besteht, so beschreiben die Abfluss- und die Kontinuitätsgleichung zusammen das System der Stauregulierung. Bei gegebenem Zufluss $F(t)$ ist dann der zeitliche Verlauf des Pegelstandes $H(t)$ und des Abflusses $Q(t)$ bestimmt.

1.3 DER STAUREGELKREIS

In der Sprache der Regelungstechnik formuliert, stellt das System der Stauregulierung einen Regelkreis dar [7]. Dabei werden der Sollwert W als Führungsgröße, der Zufluss F als Störgröße, der Pegelstand H als Regelgröße, die Differenz $h = H - W$ als Regelabweichung und der Abfluss Q als Stellgröße bezeichnet. Der Teil des Systems, in welchem die Regelgröße konstant zu halten ist und an dem die Stellgröße und die Störgröße angreifen — im vorliegenden Fall also die Stauhaltung mit der Spiegelfläche A — wird Regelstrecke genannt. Ihr Einfluss wird nach Ersetzen von V durch $V(H)$ durch die Kontinuitätsgleichung beschrieben. Der Regler R ist in dem hier betrachteten System charakterisiert durch eine Abflussgleichung, welche die Anpassung der Stellgröße wiedergibt.

Diese Anpassung kann auf grundsätzlich drei verschiedene Arten vorgenommen werden, nämlich durch eine reine Regelung, eine reine Steuerung (Störgrössenaufschaltung) oder eine Regelung mit einer zusätzlichen Störgrössenaufschaltung.

a) Reine Regelung:

Die Stellgröße wird nur in Abhängigkeit von der Regelabweichung verstellt; die Abflussgleichung reduziert sich dann zu $q = g(h)$.

Es seien drei in der Regelungstechnik häufig verwendete Reglertypen mit ihren zugehörigen Abflussgleichungen angeführt, nämlich

a1) Proportional-Regelung (P-Regelung): $q = k_p h$

Die Veränderung der Stellgröße ist proportional zur gemessenen Regelabweichung; k_p ist ein sogenannter Uebertragungsbeiwert.

a2) Integral-Regelung (I-Regelung):

$$q = k_i \int h dt, \text{ bzw. } \frac{dq}{dt} = k_i h$$

Die Geschwindigkeit der Stellgrößenänderung ist proportional zur gemessenen Regelabweichung; Uebertragungsbeiwert k_i .

a3) Proportional-Integral-Regelung (PI-Regelung):

$$q = k_p h + k_i \int h dt$$

Eine Kombination aus P- und I-Regelung.

b) Reine Steuerung (Störgrössenaufschaltung):

Die Stellgröße wird direkt in Abhängigkeit von der Änderung der Störgröße verstellt, also $q = g(f)$. Unter der Voraussetzung, dass der Zufluss einigermassen zuverlässig bestimmbar ist, kann bei der Stauregulierung eine Steuerung auf die folgende Weise angesetzt werden: $q = k_s f$.

Die Veränderung der Stellgröße ist in diesem Fall direkt proportional zu jener der Störgröße; Uebertragungsbeiwert k_s mit $0 \leq k_s \leq 1$.

Eine solche Steuerung bietet den Vorteil, dass Änderungen des Zuflusses sofort berücksichtigt werden im Abfluss, während bei den Regelungen a1) bis a3) dies erst geschieht, wenn Zuflussstörungen als Änderungen im Pegelstand messbar werden. Als Nachteil der reinen Steue-

rung muss hingegen angeführt werden, dass es unter Umständen nicht möglich ist, die Zuflussänderungen genügend genau zu erfassen und den Abfluss präzise und zeitgerecht anzupassen. Eine dauernde, eventuell gar anwachsende Abweichung des Pegelstandes vom Stauziel kann die Folge sein.

c) Regelung, ergänzt durch Störgrössenaufschaltung:

Durch Kombination von a) und b) wird die Stellgröße in Abhängigkeit von der Regelabweichung und der Störgrössenänderung verstellt: $q = g(h, f)$. Dies kann bei der Stauregulierung realisiert werden durch eine PI-Regelung mit zusätzlicher Störgrössenaufschaltung mit folgender Abflussgleichung:

$$q = k_s f + k_p + h + k_t \int h dt$$

Durch diese Kombination aus Regelung und Steuerung werden die Zuflussänderungen und die Pegelstandsabweichungen gemessen und für eine Anpassung des Abflusses verwendet. Die Vorteile der Steuerung und der Regelung sind dadurch vereinigt. Ungenauigkeiten bei der Erfassung des Zuflusses werden nachträglich durch die Regelung ausgeglichen, welche darauf ausgerichtet ist, den Pegelstand konstant zu halten.

Bei einer Handregulierung, wo die Funktion des Reglers durch einen Angestellten des betreffenden Stauwerkes übernommen wird, kann keine derart ausgeprägt stetige Arbeitsweise erwartet werden, wie sie den obigen Abflussgleichungen zugrunde liegt. h ändert sich jedoch verhältnismässig langsam. Daher können auch aufmerksam durchgeführte Handregulierungen jeweils im Mittel durch eine der genannten Gleichungen mit guter Annäherung charakterisiert werden.

2. Regulierung am Einzel-Stauwerk

2.1 GRUNDLAGEN

Es ist bereits festgehalten worden, wie durch weitgehende Vereinfachungen das Verhalten einer Stauhaltung durch die Kontinuitätsgleichung bestimmt wird. Als weitere einschränkende Vereinfachung soll angenommen werden, dass jede Volumenänderung ΔV im Stauraum überall die gleiche, ortsunabhängige Pegelstandsänderung ΔH bewirkt. ΔV und ΔH seien zueinander direkt proportional, nämlich: $\Delta V = A \Delta H$. Diese Voraussetzung bedeutet, dass sich zum Beispiel durch eine Zunahme des Zuflusses bei konstant bleibendem Abfluss der Stauraum wie ein Behälter füllt [8]; der Wasserspiegel beginnt sich also im ganzen Stauraum gleichmässig zu heben. Es treten keine Schwall- und Sunkwellen auf. Diese Annahmen treffen vor allem auf verhältnismässig kurze Stauhaltungen bei geringer Wasserführung des Flusses zu. Die Kontinuitätsgleichung schreibt sich somit in der Form:

$$\frac{dH}{dt} = \frac{1}{A} (F - Q)$$

Nun kann untersucht werden, wie sich eine zur Zeit $t = 0$ beim stationären Anfangszustand $F_0, H_0 = W, Q_0 = F_0$ einsetzende Veränderung $f(t)$ im Zufluss auf den Pegelstand und den Abfluss bei einer regulierten Staustufe auswirkt. Massgebend sind hierbei die Kontinuitäts- und die der entsprechenden Regulierung zugeordnete Abflussgleichung.

Diese Gleichungen zeigen, dass es nicht auf die absoluten Größen $F(t) = F_0 + f(t), H(t) = W + h(t)$ und $Q(t) = Q_0 + q(t)$ ankommt, sondern nur auf die Abwei-

chungen $f(t)$, $h(t)$ und $q(t)$. Die Kontinuitätsgleichung nimmt dabei die folgende Gestalt an:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{A} (f - q)$$

Das zeitliche Verhalten von $h(t)$ und $q(t)$ hängt einerseits von der gewählten Abflussgleichung, also von der Art der Reguliereinrichtung, und andererseits von der Form der Zuflussveränderung $f(t)$ ab.

2.2 ZUFLUSS-TESTFUNKTIONEN

Die Änderungen im Zufluss zu einer Stauhaltung haben mehrheitlich zufälligen Charakter. Jede Nachbildung durch eine explizite Funktion $f(t)$ kann nur näherungsweise geschehen. Auf eine eingehende Analyse des Zuflusses mit den Methoden der Statistik wird hier verzichtet. Vielmehr wird die Antwort des Systems auf eine Reihe von Testfunktionen $f(t)$ untersucht, siehe Bild 3. Die Sprungfunktion und die harmonische Schwingung sind die beiden üblicherweise in der Regelungstechnik verwendeten Testfunktionen (Methode der Sprungantworten und Frequenzgangmethode [2]). Vielfach können Zuflussänderungen während einer gewissen Zeit (einige Stunden) gut durch solche Funktionen, wie sie das Bild 3 zeigt, charakterisiert werden. Werden dort die Amplitudenfaktoren a , bzw. a_f mit negativen Vorzeichen versehen, so lassen sich auch Zuflussstörungen in entgegengesetzter Richtung erfassen. Es ergeben sich dadurch keine grundsätzlich neuen Aspekte.

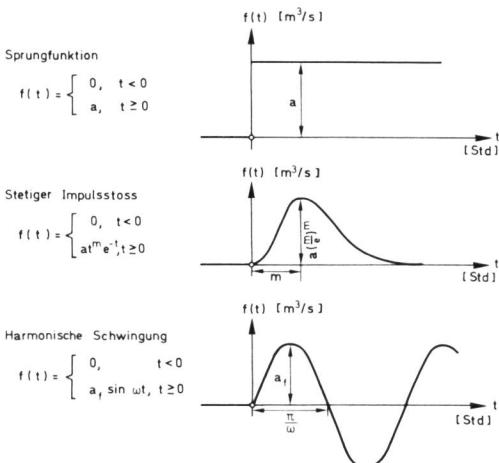


Bild 3 Beispiele von Zufluss-Testfunktionen.

2.3 LINEARE ÜBERTRAGUNGEN

Aus der Kontinuitätsgleichung kann zusammen mit jeder der möglichen Abflussgleichungen je eine Differentialgleichung für die Pegelstandsabweichung $h(t)$ und die Abflussveränderung $q(t)$ abgeleitet werden. Wird zum Beispiel die Stauregulierung nach den Gesetzen einer PI-Regelung mit Störgrößenaufschaltung vorgenommen, so ergeben sich die folgenden Differentialgleichungen (' bedeutet die

Ableitung nach der Zeit: $\frac{d}{dt}$,

für $h(t)$: $A h'' + k_p h' + k_t h = (1 - k_s) f'$

für $q(t)$: $A q'' + k_p q' + k_t q = A k_s f' + k_p f' + k_t f$

In dieser Untersuchung der Stauregulierung wird davon ausgegangen, dass $F_o = Q_o$ und $H_o = W$, das heisst $f = q = h = 0$ für $t < 0$, und dass zur Zeit $t = 0$ eine bestimmte Änderung $f(t)$ des Zuflusses einsetzt. Die Differentialgleichungen für $h(t)$ und $q(t)$ sind linear. Der vorlie-

gende Stauregelkreis stellt also eine lineare Uebertragung dar zwischen f und h einerseits und f und q andererseits. Auf einen vorgegebenen Eingang $f(t)$ antwortet das System mit den eindeutig bestimmten Ausgängen $h(t)$ und $q(t)$. Diese Feststellungen treffen ebenso für die P-, I-, PI-Regelung sowie für die reine Störgrößenaufschaltung zu, welche alle als Spezialfälle der PI-Regelung mit Störgrößenaufschaltung angesehen werden können.

In der Regelungstechnik ist es üblich, an Stelle der Differentialgleichungen von linearen Uebertragungen deren Laplace-Transformierte zu diskutieren. Es sind wirkungsvolle Techniken bekannt, die es erlauben, das Verhalten eines Systems weitgehend anhand dieser Transformierten zu studieren. Für Einzelheiten sei auf die Fachliteratur verwiesen, zum Beispiel [6, 7].

An den Laplace-Transformierten kann untersucht werden, ob die verschiedenen, im Abschnitt 1.3 beschriebenen Regulierungen auf stabile Systeme der Stauregulierung führen. Ein lineares System wird genau dann als (asymptotisch) stabil bezeichnet, wenn jedes beschränkte Eingangssignal $x(t)$ ein ebenfalls beschränktes Ausgangssignal $y(t)$ zur Folge hat. Es kann folgendes Ergebnis festgehalten werden: Alle im Abschnitt 1.3 angeführten Reguliermethoden ergeben, mit Ausnahme der I-Regelung, für beliebige Uebertragungsbeiwerte stabile Stauregelkreise. Die reine I-Stauregelung ist strukturinstabil, das heisst unabhängig vom gewählten Uebertragungsbeiwert k_t immer instabil. Dies bedeutet, dass gewisse Zuflussstörungen $f(t)$ eine mit der Zeit stets grösser werdende Aufschaukelung der Pegelstandsabweichung $h(t)$ und der Abflussänderung $q(t)$ bewirken würden. Die reine I-Regelung ist daher für die Stauregulierung nicht geeignet.

2.4 P- UND PI-REGELUNG

Mit $k_s = 0$ beschreiben die Differentialgleichungen für $h(t)$ und $q(t)$ im Abschnitt 2.3 die reine PI-Stauregelung. Es erweist sich als zweckmässig, die folgenden Abkürzungen einzuführen:

$$\beta = k_p/A, \quad \gamma = \sqrt{k_t/A}, \quad D = \beta/2\gamma$$

β und γ sind sogenannte Zeitkonstanten; sie haben die Dimension [1/Zeit]. Die dimensionslose Konstante D wird als Dämpfungsfaktor (auch Dämpfungsgrad oder Dämpfungsmass) bezeichnet. β gibt die Grösse des P-Anteils, γ jene des I-Anteils der PI-Regelung bei einer Stauhaltung mit der Spiegelfläche A an.

Eine kurze Illustration über mögliche Grössenordnungen von β und γ : Da die Änderungen in der Wasserführung relativ langsame Vorgänge sind, eignen sich Stunden als Einheiten für die Zeit t . Bei einer festgestellten Abweichung des Pegelstandes vom Stauziel um X cm bedeutet zum Beispiel in einer Stauhaltung mit der Spiegelfläche $A = 900000 \text{ m}^2$ der Wert $\beta = 4 \text{ Std.}^{-1}$, dass der Abfluss durch den P-Anteil eine einmalige Verstellung um $10 \times X \text{ m}^3/\text{s}$ erfährt. In der gleichen Stauhaltung wird bei $\gamma = 2 \text{ Std.}^{-1}$ durch den I-Anteil der Abfluss stetig verändert mit einer Geschwindigkeit von $10 \times X \text{ m}^3/\text{s}$ pro Stunde. $\beta = 4, \gamma = 2$ ergibt einen Dämpfungsfaktor $D = 1$.

Unter Verwendung der Zeitkonstanten β und γ nehmen die Differentialgleichungen der PI-Stauregelung die folgende Gestalt an:

$$h'' + \beta h' + \gamma^2 h = f/A$$

$$q'' + \beta q' + \gamma^2 q = \beta f' + \gamma^2 f$$

Wesentliche Hinweise auf das Verhalten des PI-Stauregelkreises liefert das Studium der sogenannten Sprungantworten; als solche werden die Systemantworten $h(t)$ und

$q(t)$ bezeichnet, welche sich aus einer Zuflussänderung $f(t)$, die in Form einer Sprungfunktion auftritt, ergeben. Bei einer solchen Störung im Zufluss um einen festen Betrag a hängt das zeitliche Verhalten der Sprungantworten in der Stauhaltung (mit gegebener Staupiegelfläche A) nur von den Zeitkonstanten β und γ ab. Eine massgebende Rolle spielt dabei die Grösse des Dämpfungsfaktors $D = \beta/2\gamma$. Im Bild 4 ist dies illustriert am Beispiel einer sprungförmigen Änderung des Zuflusses um $50 \text{ m}^3/\text{s}$, wieder in einer frei gewählten Stauhaltung mit $A = 900000 \text{ m}^2$.

Einige wichtige Ergebnisse aus dem Studium der Sprungantworten seien nachfolgend festgehalten, vgl. auch Bild 4. Im Fall der reinen P-Regelung, welche als Spezialfall der PI-Regelung angesehen werden kann ($\gamma = 0$, also $D = \infty$), nähert sich bei positiver Zuflussänderung a der Wert der Abflussänderung $q(t)$ von unten asymptotisch dem konstanten Wert a ; $q(t)$ wird jedoch nie grösser als a . Die Folge davon ist eine bleibende Anhebung des Pegelstandes, welche proportional zu a/k_p ist. Wenn sich der Zufluss um einen grossen Betrag a ändert, kann mit einer reinen P-Regelung das Stauziel nicht eingehalten werden, weil dem Uebertragungsbeiwert k_p in der Praxis Grenzen gesetzt sind. Durch Erweitern der reinen P-Regelung um einen I-Anteil zu einer PI-Regelung kann erreicht werden, dass der Pegelstand nach gewisser Zeit wieder mit dem Stauziel übereinstimmt. Der maximale Wert der Pegelstandsabweichung $h(t)$ kann sowohl durch einen verstärkten P-Anteil als auch durch einen vergrösserten I-Anteil reduziert werden. Allerdings muss bei der PI-Regelung in Kauf genommen werden, dass in jedem Fall die Sprungantwort $q(t)$ den Eingangswert a zeitweilig überschwingt. Dieses Ueberschwingen ist um so stärker, je grösser der I-Anteil γ im Verhältnis zum P-Anteil β , das heisst je kleiner die Dämpfung D ist. Bei einer sprungförmigen Änderung $f(t)$ um einen bestimmten Betrag a hängt der maximale Wert q_{\max} der Abflussänderung $q(t)$ nur von D ab. Mit fallendem D nimmt dabei q_{\max} monoton zu von $q_{\max} = a$ bei $D = \infty$ (reine P-Regelung) bis $q_{\max} = 2a$ bei $D = 0$ (reine I-Regelung), siehe Bild 5.

Im Fall $D < 1$ schlägt bei positivem a der Pegelstand auch auf die negative Seite (bezogen auf das Stauziel) aus. Er schwingt oszillatorisch um den Sollwert, wobei sich diese Schwingungen mit zunehmender Zeit abdämpfen. Die Abflussänderung $q(t)$ führt analoge Schwingungen um den konstanten Wert a der Zuflussänderung $f(t)$ aus. Eine solche zusätzliche, durch die Regulierung verursachte Unruhe in der Wasserführung des Flusses ist natürlich unerwünscht.

Für eine PI-Stauregelung ist also ein möglichst grosser Dämpfungsfaktor D , mindestens aber $D = 1$, anzustreben [1]. Diese wichtige Folgerung aus den Sprungantworten wird auch bestätigt durch eingehende Frequenzgangbetrachtungen, bei welchen die Reaktion des Systems der Stauregulierung auf Zuflussänderungen von der Form $f(t) = a_f \sin(\omega t)$ untersucht wird. Vertiefte Frequenzganguntersuchungen im Zusammenhang mit der Regulierung an Staustufen finden sich in [3].

2.5 PI-REGELUNG MIT STÖRGRÖSSENAUFSCHALTUNG

Mit einer zusätzlichen Störgrössenaufschaltung zur PI-Regelung sind Verbesserungen in der Stauregulierung zu erreichen, wenn vorausgesetzt werden darf, dass die Zuflussänderungen einigermassen zuverlässig erfasst werden können.

Die Systemantworten $h(t)$ und $q(t)$ bei Anwendung einer reinen PI-Regelung sollen hier kurz mit h_{PI} und q_{PI} , jene

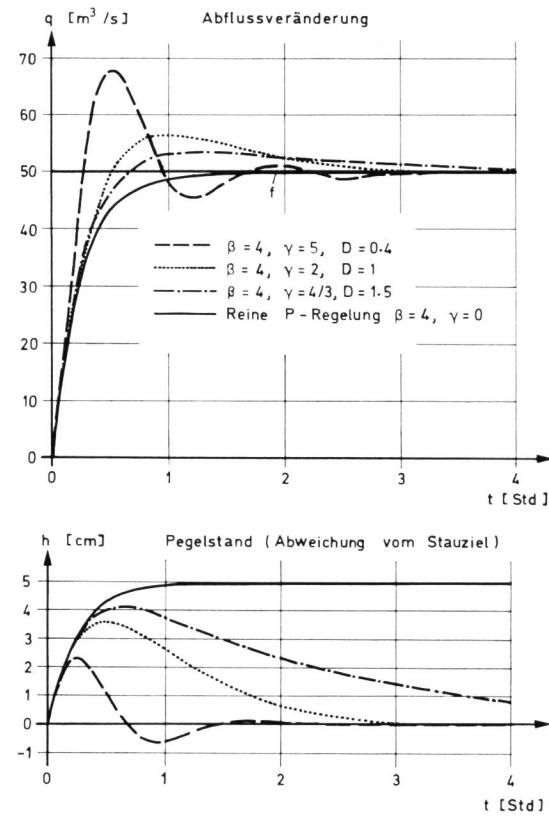


Bild 4 P- und PI-Regelung: Abhängigkeit der Sprungantworten in einer Stauhaltung von der Wahl der Regelparameter.

f: sprungförmige Zuflussstörung, $A = 900000 \text{ m}^2$

bei PI-Regelung ergänzt durch Störgrössenaufschaltung mit h_{PIS} und q_{PIS} bezeichnet werden. Dann folgt aus einem Vergleich der entsprechenden Differentialgleichungen bei beliebiger, nicht notwendigerweise sprungförmiger Zuflussänderung $f(t)$:

$$h_{PIS} = (1 - k_s) h_{PI}$$

$$q_{PIS} = f + (1 - k_s) (q_{PI} - f)$$

Die erste Beziehung zeigt, dass durch eine zusätzliche Störgrössenaufschaltung die Pegelstandsabweichungen gegenüber der reinen PI-Regelung verringert werden, weil $1 \geq 1 - k_s \geq 0$ ist. Gleichzeitig passt sich nach der zweiten Gleichung die Abflussveränderung q_{PIS} besser als q_{PI} der Zuflussänderung an. Diese Verbesserungen gelten für den gesamten Zeitbereich. Sie sind um so auffälliger, je grösser k_s ($0 \leq k_s \leq 1$) wird, das heisst je stärker die zusätzliche Störgrössenaufschaltung in Erscheinung tritt.

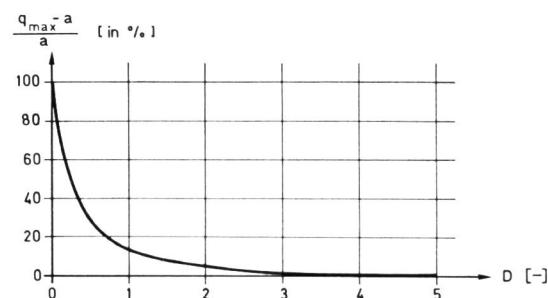


Bild 5 PI-Regelung: Aufschaukelung des maximalen Abflusses q_{\max} gegenüber dem konstanten Wert a der sprungförmigen Zuflussänderung ($f(t)$), in Abhängigkeit vom Dämpfungsfaktor D

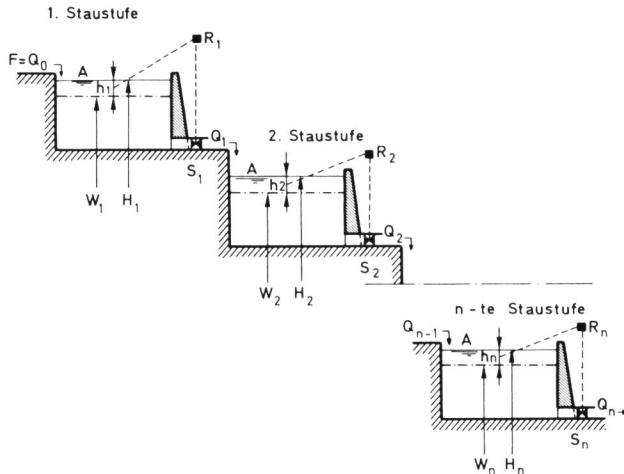


Bild 6 Kaskade: Ein vereinfachtes Modell einer Stauwerkskette von n Stufen

Im Idealfall $k_s = 1$ ergäbe sich $f(t) \equiv q(t)$ und $h(t) \equiv 0$. Eine Regelung würde sich dabei erübrigen; die Steuerung allein würde genügen. Die Wirkung einer zusätzlichen Störgrössenaufschaltung wird im Abschnitt 3.3 noch veranschaulicht.

3. Regulierung einer Stauwerkskette

3.1 KASKADENMODELL

Werden die Untersuchungen auf die Regulierung einer Stauwerkskette ausgedehnt, kann eine sogenannte Kaskade, wie sie im Bild 6 dargestellt ist, als Modell für eine derartige Folge von Staustufen in einem Fluss dienen. Für jede Stauhaltung sollen weiterhin die im Abschnitt 1.1 gemachten Voraussetzungen gelten. Die Numerierung der Stauwerke wird in Fliessrichtung vorgenommen; $j = 1$ gibt die oberste, $j = n$ die unterste Stufe in der Kette an.

Damit sich einigermassen überblicken lässt, wie sich eine Änderung im Zufluss zur ersten Stauhaltung im Gang durch die ganze Kaskade bemerkbar macht, werden zusätzlich die folgenden vereinfachenden Annahmen getroffen. Der Abfluss aus der j -ten Stauhaltung sei gleich dem Zufluss zur nachfolgenden, also zur $(j+1)$ -ten. Von weiteren störenden Zu- und Abflüssen wird abgesehen. Alle Stauhaltungen sollen die gleiche Spiegelfläche A haben. Zudem werde die Stauregelung bei allen Werken auf dieselbe Art und mit den gleichen Uebertragungsbeiwerten durchgeführt.

Im folgenden wird analog zum Abschnitt 1.2 von einem Grundzustand stationärer Wasserführung in der ganzen Stauwerkskette ausgegangen, wobei in jeder Stauhaltung der Oberwasserspiegel mit dem entsprechenden Sollwert übereinstimmt. Bevor zur Zeit $t = 0$ eine Störung im Zufluss zur ersten Stauhaltung auftritt, sei also

$$Q_1 = Q_2 = \dots = Q_n (= F_0) \text{ und}$$

$$H_i = W_i, \text{ für } j = 1, 2, \dots, n$$

Dabei bezeichnen im j -ten Stauraum Q_{j-1} den Zufluss, Q_j den Abfluss, H_i den gemessenen und W_i den vorgeschriebenen Oberwasserpegelstand. Die Abweichungen von den entsprechenden Grössen des stationären Grundzustandes werden wieder mit kleinen Buchstaben bezeichnet. Dann ist also für $t < 0$:

$$f = q_1 = q_2 = \dots = q_n = 0 \text{ und}$$

$$h_1 = h_2 = \dots = h_n = 0$$

Wenn nun zur Zeit $t = 0$ am Eingang zur Kaskade, also im Zufluss zum ersten Stauraum, eine Veränderung um $f(t)$ einsetzt, wird in jeder der n Stauhaltungen der zeitliche Verlauf der Pegelstands- und Abflussänderung durch die Kontinuitätsgleichung

$$\frac{dh_i}{dt} = \frac{1}{A} (q_{i-1} - q_i), \quad i = 1, 2, \dots, n$$

und eine der Regulierung entsprechende Abflussgleichung bestimmt. ($q_0(t)$ ist identisch mit der Zuflussänderung $f(t)$ in der ersten Stauhaltung.)

3.2 PI-REGELUNG

Wird bei allen Gliedern der Stauwerkskette die gleiche PI-Regelung angewendet, gilt bei jeder Stufe die folgende Abflussgleichung:

$$q_i = k_p h_i + k_t \int_0^t h_i dt, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

Einen ersten Einblick in das Verhalten der Kaskade geben die beiden Systemantworten $h_i(t)$ und $q_i(t)$, $i = 1, 2, \dots, n$, in den einzelnen Stauhaltungen, welche als Reaktionen auf eine sprungförmige Veränderung $f(t)$ im Zufluss zum ersten Stauraum auftreten. In diesem verhältnismässig einfachen Fall könnten die Systemantworten $h_i(t)$ und $q_i(t)$ zwar analytisch berechnet werden. Eine Diskussion über das Verhalten dieser Sprungantworten anhand der analytischen Ausdrücke für $h_i(t)$ und $q_i(t)$ ist jedoch wenig ergiebig, sobald die Anzahl der Staustufen $n \geq 2$ wird. Für die Lösung des Differentialgleichungssystems, welches sich aus der Kontinuitäts- und der Abflussgleichung ergibt, drängen sich daher numerische Methoden auf, um so mehr als auch die Reaktion des Systems auf andere, nicht sprungartige Störfunktionen interessiert. Eine systematische Untersuchung der Sprungantworten liefert die folgenden Ergebnisse.

Unter dem Einfluss einer Störsprungfunktion $f(t)$ schaukeln sich sowohl $h_i(t)$ als auch $q_i(t)$ in einer PI-geregelten Kaskade auf. Dies bedeutet, dass die maximalen Werte von $h_i(t)$ und $q_i(t)$ von Stufe zu Stufe (beginnend bei der obersten Stauhaltung $j = 1$) grösser und die minimalen Werte kleiner werden. Für die Grösse der Aufschaukelungen ist allein der Dämpfungsfaktor $D = \beta/2\gamma$ massgebend; je grösser D , um so geringer die Aufschaukelungen. In der einheitlich PI-geregelten Kaskade verbindet jeweils die gleiche lineare Uebertragung sowohl die Abflussveränderungen als auch die Pegelstandsabweichungen zweier aufeinanderfolgender Stauhaltungen. Wenn auch bei kräftigen Zuflussstörungen die Schwankungen sämtlicher Pegelstände in der Kaskade klein bleiben sollen, ist daher eine starke Regelung (β und γ beide gross) mit günstiger (grosser) Dämpfung notwendig. Die starke Regelung hält nämlich die Abweichung des Pegelstandes vom Stauziel im ersten Stauraum klein, während die grosse Dämpfung die Pegelstandsschwankungen in den nachfolgenden Stauhaltungen von Stufe zu Stufe nur noch wenig anwachsen lässt.

In der zweiten Kolonne der Tabelle 1 kann die Abflussaufschaukelung in einer zehn Stauhaltungen umfassenden Kaskade bei reiner PI-Regelung mit dem Dämpfungsfaktor $D = 1$ verfolgt werden. Das Bild 7 gibt eine Illustration über mögliche Aufschaukelungen sowohl der Abfluss- als auch der Pegelstandsschwankungen. Dort sind auszugsweise die Systemantworten $h_i(t)$ und $q_i(t)$ auf einen stetigen Impulsstoss $f(t)$ sowohl bei reiner PI-Regelung ($k_s = 0$) als auch bei PI-Regelung mit Störgrössenaufschaltung ($k_s = 0.5$) dargestellt.

3.3 PI-REGELUNG MIT STÖRGRÖSSENAUFSCHALTUNG

Es interessiert nun, ob auch in der Kaskade durch eine zusätzliche Störgrössenaufschaltung Verbesserungen gegenüber einer reinen PI-Regelung erzielt werden können. Hier wird eine Störgrössenaufschaltung betrachtet, bei der in jeder Stauhaltung nur der «eigene» Zufluss, also nur der Abfluss aus dem unmittelbar angrenzenden Oberlieger, für die Steuerung berücksichtigt wird. Für jede Stufe gilt also die Abflussgleichung

$$q_j = k_s q_{j-1} + k_p h_j + k_t \int h_i dt, \quad j = 1, 2, \dots, n$$

Es kann analytisch nachgewiesen werden, dass in all den Fällen, wo sich durch die reine PI-Regelung die Abflussveränderungen $q_j(t)$ von Stauwerk zu Stauwerk aufschaukeln, eine zusätzliche Störgrössenaufschaltung diese Aufschaukelungen kleiner macht. Es sei an dieser Stelle lediglich an der Tabelle 1 und im Bild 7 illustriert, wie sich die Verhältnisse bezüglich der Abflussaufschaukelungen in einer Kaskade durch eine zusätzliche Störgrössenaufschaltung gegenüber der reinen PI-Regelung verbessern können. In der Tabelle 1 bezeichnet $\max(q_j(t))$ den grössten Wert der Abflussveränderung in der j -ten Stauhaltung.

Reduktion der Abflussaufschaukelung in einer Kaskade durch zusätzliche Störgrössenaufschaltung am Beispiel einer sprungförmigen Zuflussänderung $q_0(t)$ um den konstanten Betrag von 50 m³/s.

Tabelle 1

Stau- hal- tung Nr. j	Reine PI-Rege- lung $D = 1$	PI-Reg. mit Stör- grössenaufsch., $D = 1; k_s = 0.5$	PI-Reg. mit Stör- grössenaufsch., $D = 1; k_s = 0.75$
	$\max(q_j(t))$ [m ³ /s]	$\max(q_j(t))$ [m ³ /s]	$\max(q_j(t))$ [m ³ /s]
1	56.8	53.4	51.7
2	63.4	56.5	53.3
3	70.3	59.6	54.8
4	77.5	62.6	56.3
5	85.1	65.6	57.8
6	93.2	68.7	59.2
7	101.8	71.7	60.7
8	110.9	74.9	62.1
9	120.7	78.0	63.5
10	131.2	81.2	65.0

Wenn in der rein PI-geregelten Kaskade eine Aufschaukelung der Pegelstandsschwankungen vorliegt, so reduziert sich diese durch eine zusätzliche Störgrössenaufschaltung auf gleiche Weise wie die Abflussaufschaukelung, weil zwischen den Pegelständen zweier aufeinander folgenden Stauhaltungen der PI-geregelten Kaskade mit Störgrössenaufschaltung die selbe lineare Uebertragung gilt wie zwischen den Abflüssen. Eine wesentliche Verbesserung ergibt sich im weitern dadurch, dass durch eine zusätzliche Störgrössenaufschaltung in der ersten und damit in allen folgenden Stauhaltungen die Pegelstandsabweichungen mit dem Faktor $(1 - k_s)$ multipliziert werden. Bei $k_s = 0.5$ reduzieren sich somit alle Abweichungen der Pegelstände von ihrem Stauziel um mindestens 50 %, vgl. Bild 7.

4. Erweiterungen

Dem hier präsentierten mathematischen Modell zur Beschreibung von Stauregulierungen liegen weitreichende Vereinfachungen zugrunde. Diese Einfachheit ist bewusst gewählt, damit ein guter Einblick in die wesentlichen

Aspekte der vielschichtigen Vorgänge möglich wird. Im folgenden sei auf einige Erweiterungen am Modell hingewiesen, welche zu einer auch quantitativen guten Erfassung der wirklichen Ereignisse führen.

Bei stationärem Durchfluss, gekennzeichnet durch $F(t) = Q(t)$, stellt sich in der Stauhaltung, die mit konstantem Stauziel betrieben wird, ein zugehöriger, eindeutig bestimmter Wasserspiegel ein. Dadurch ist auch jedem stationären Q ein bestimmtes Wasservolumen V im Stauraum zugeordnet. Der Zusammenhang zwischen Q und V in einer Stauhaltung kann durch eine für diese charakteristische Beckeninhaltslinie dargestellt werden: $V = V(Q)$ [5]. Die Ableitung $dV/dQ = \tau_r$ hat die Dimension einer Zeit. τ_r hängt wohl von Q ab, kann aber mit genügender Genauigkeit in begrenzten Bereichen von Q als konstant angenommen werden. τ_r liefert eine Aussage über das sogenannte Retentionsvermögen des Stauraumes. Dies äussert sich darin, dass die Stauhaltung beim Übergang vom stationären Durchfluss Q_1 (Volumen V_1) zum stationären Durchfluss Q_2 (Volumen V_2) eine Wassermenge $\Delta V = V_2 - V_1 = \tau_r (Q_2 - Q_1)$ aufnimmt (bzw. abgibt) ohne Veränderung des Pegelstandes an der Messstelle; lediglich das Spiegelgefälle wird sich ändern. Die Konstante τ_r wird hier als Retentionszeit bezeichnet. Sie erlaubt auch folgende Interpretation: Von jeder kleinen Zuflussstörung dF wird zuerst das Volumen $\tau_r dF$ durch den Stauraum absorbiert als Folge des Retentionsvermögens. Erst nach Ablauf der Retentionszeit τ_r trägt die genannte Zuflussänderung etwas zu einer Veränderung des Pegelstandes bei.

Nach der Kontinuitätsgleichung wird der Pegelstand im Stauraum durch den Zufluss F und den Abfluss Q be-

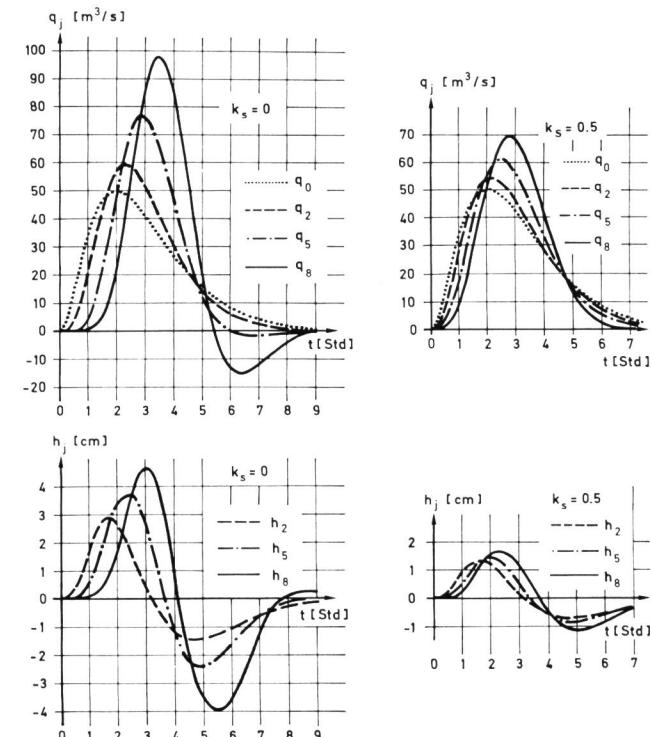


Bild 7 Stauregulierung in der Kaskade: Verbesserung der reinen PI-Regelung (links) durch eine zusätzliche Störgrössenaufschaltung (rechts).

q_j : Abflussveränderung, h_j : Pegelstandsabweichung bei der j -ten Stufe
 $Zuflussstörung q_0(t) = at^2 e^{-t}$
 $\beta = 4 \text{ Std.}^{-1}$, $\gamma = 2 \text{ Std.}^{-1}$, $D = 1$, $A = 900000 \text{ m}^2$

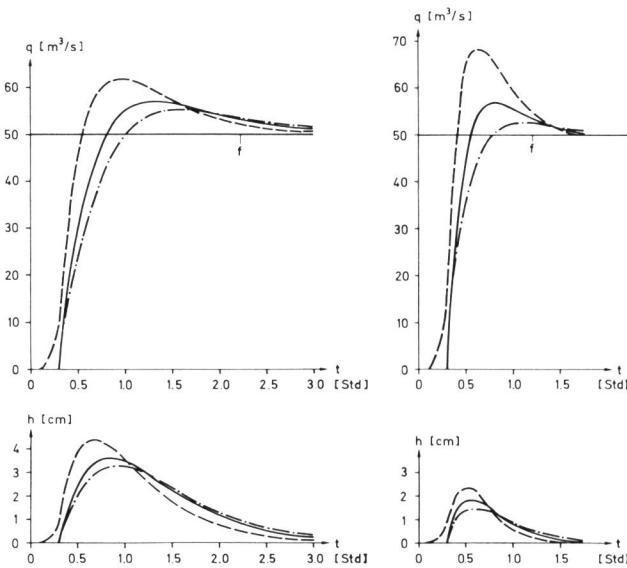


Bild 8 Die Bedeutung der Differenz zwischen der Laufzeit τ_f und der Retentionszeit τ_r , dargestellt an den Sprungantworten einer PI-geregelten Stauhaltung ($A=900\,000 \text{ m}^2$)
 f: sprungförmige Zuflussstörung
 q: Abflussveränderung
 h: Pegelstandabweichung (vom Stauziel)
 $\tau_f = 0.3, \tau_r = 0.1$
 $\tau_f = \tau_r = 0.3$
 $\tau_f = 0.3, \tau_r = 0.4$
 links: Zeitkonstanten $\beta=4, \gamma=2$
 rechts: Zeitkonstanten $\beta=8, \gamma=4$

stimmt. Veränderungen in F bzw. in Q, also am oberen bzw. am unteren Ende des Staubeckens, machen sich nicht sofort, sondern zeitverzögert um die Laufzeit τ_f bzw. τ_q bei der Pegelmessstelle innerhalb der Stauhaltung bemerkbar. In den meisten Fällen ist der Pegelstand am unteren Ende der Stauhaltung, also unmittelbar beim Stauwerk, konstant zu halten, so dass τ_q vernachlässigbar klein gegenüber τ_f ist.

Eine zur Zeit $t = t_0$ festgestellte Störung im Zufluss wird durch eine zusätzliche Störgrößenaufschaltung im Abfluss zum Zeitpunkt $t = t_0 + \tau_s$ berücksichtigt. Diese Verzögerung τ_s kann zum Teil durch die Datenübertragung bedingt sein. Eine Steuerung des Abflusses kann aber auch absichtlich verzögert werden bis zum günstigsten Zeitpunkt für eine solche Massnahme.

Die drei wesentlichen Größen τ_r , τ_f und τ_s , welche alle einer verfeinerten Beschreibung der Regelstrecke dienen, lassen sich in das mathematische Modell einbauen. Sie bringen wichtige Ergänzungen.

Es zeigt sich deutlich, dass nebst der Wahl der Regelparameter β , γ und k_s bei der PI-Stauregelung mit Störgrößenaufschaltung auch die Differenz $d = \tau_f - \tau_r$ zwischen der Laufzeit τ_f und der Retentionszeit τ_r von Bedeutung ist für den zeitlichen Verlauf der Pegelstands- und der Abflussfunktionen. Im Gegensatz zu β , γ und k_s ist d eine nicht zu beeinflussende, charakteristische Größe des Stauraumes. Es stellt sich heraus, dass die Stauhaltungen, bei welchen $\tau_f > \tau_r$ ist, stärker zu Abflussaufschaukelungen neigen als jene mit $\tau_f \leq \tau_r$. Bei ersten ergeben sich auch etwas grössere maximale Pegelstandsabweichungen. Das unterschiedliche Verhalten zweier Stauhaltungen mit ungleicher Differenz $\tau_f - \tau_r$ zeigt sich bei einer reinen PI-Regelung um so ausgeprägter, je kräftiger reguliert wird, siehe Bild 8. Wenn τ_r merklich grösser als

τ_f ist, fällt das unerwünschte Phänomen der Abflussaufschaukelung durch die PI-Regelung auch bei Beachtung von ziemlich engen Pegelstandstoleranzen fast gänzlich weg. Diese Ergebnisse, welche das hier zugrunde liegende mathematische Modell liefert, decken sich im wesentlichen mit ähnlichen Feststellungen in [5]. In der Praxis scheinen leider die Stauhaltungen mit der ungünstigen Konstellation $\tau_f > \tau_r$ zu dominieren.

Es stellt sich die Frage, wie gross die Verzögerung τ_s zu wählen ist, damit eine zusätzliche Störgrößenaufschaltung zur PI-Regelung eine optimale Wirkung zeigt. Es dürfte recht schwierig sein, auf analytischem Weg eine optimale Lösung für τ_s zu finden, welche für verschiedene Störfunktionen zu minimalen Pegelstands- und Abflusschwankungen führt. Heuristische Überlegungen sowie numerische Rechnungen lassen die folgende Wahl von τ_s als vorteilhaft erscheinen:

$$\begin{aligned} \tau_s &= \tau_r, \quad \text{falls } \tau_f > \tau_r \quad \text{und} \\ \tau_s &= \tau_f, \quad \text{falls } \tau_f \leq \tau_r \end{aligned}$$

5. Praktische Anwendung

Im Rahmen des eingangs erwähnten Auftrages durch das Eidg. Amt für Wasserwirtschaft bot sich die Gelegenheit, das erarbeitete mathematische Modell praktisch anzuwenden. Es konnte dadurch auf seine Tauglichkeit zur Simulation von wirklich durchgeföhrten Regulievorgängen getestet werden. Die entsprechenden Untersuchungen bezogen sich auf das Rheinkraftwerk Birsfelden, einem einigermassen typischen Vertreter für die Werke an der Aare und am Hochrhein. Die zugehörige Stauhaltung weist eine Länge von 7900 m, eine durchschnittliche Breite von 214 m, also eine Staupiegelfläche von 1,69 km² auf. Der Abfluss aus der Oberlieger-Stufe Augst-Wyhlen stellt den einzigen massgebenden Zufluss in den Stauraum Birsfelden dar; nennenswerte seitliche Zuflüsse liegen nicht vor.

Beim Kraftwerk Birsfelden wurde die Stauregulierung zum Zeitpunkt der Untersuchung von Hand betrieben. Die Regulierung war darauf ausgerichtet, beim massgebenden Oberwasserpegelstand in der Nähe des Maschinenhauses das vorgeschriebene konstante Stauziel von 254,25 m ü.M. mit einer Toleranz von ± 2 cm einzuhalten. Der praktizierte Regulierbetrieb liess sich gut durch das Abflusgesetz der PI-Regelung mit einer zusätzlichen Störgrößenaufschaltung beschreiben; dies ergab sich einerseits aus den Beobachtungen im Kommandoraum des Kraftwerkes und wurde andererseits durch die späteren Rechnungen bestätigt.

Im Bild 9 ist eines der Beispiele festgehalten, bei welchen die wirklichen Vorgänge der Stauregulierung anhand des mathematischen Modells durch numerische Rechnungen nachgebildet wurden. Aus Aufzeichnungen des Eidg. Amtes für Wasserwirtschaft konnten die numerischen Werte für die Retentionszeit τ_r , aus Werkangaben jene für die Laufzeit τ_f ermittelt werden. Die Beobachtungen im Kommandoraum lieferten gute Ausgangswerte für die Übertragungsbeiwerte k_p , k_t , k_s und damit für die Zeitkonstanten β und γ . Durch geeignete Variation wurden dann die dem Geschehen am besten angepassten Werte dieser Parameter gefunden.

Bei der Simulation der wirklichen Vorgänge musste der Einfluss der Schleuse auf den Regulierbetrieb an der Staustufe Birsfelden berücksichtigt werden. Aus den numerischen Rechnungen resultierte der Gesamtabfluss aus der Stauhaltung. Von diesem wurde der Abfluss in die Schleusenkammer während der Schleusenfüllungen abgezogen. Der so erhaltene Turbinenabfluss konnte mit den entspre-

chenden Werten verglichen werden, welche aus der zugehörigen Leistungskurve des Kraftwerkes Birsfelden ermittelt wurden.

Wenn die Resultate der Rechnung mit den Aufzeichnungen auf den Limnigraphenbogen, bzw. mit den aus der Leistungskurve ermittelten Werten verglichen werden, kann nicht ohne weiteres eine sehr genaue Uebereinstimmung erwartet werden. Es gilt zu bedenken, dass durch ein verhältnismässig einfaches Modell ein Ablauf nachbeschrieben wird, welcher bei aller Regelmässigkeit auch zufälligen und unregelmässigen Einflüssen ausgesetzt ist. Diese Einwirkungen können schwerlich erfasst werden. Einige Ursachen, welche die Abweichung zwischen den wirklichen und den gerechneten Regulievorgängen erklären, seien hier kurz erwähnt:

Die Zuflussänderungen konnten (für die Rechnung wie auch für die wirklichen Regulievorgänge) nur angenähert erfasst werden. Während der Schleusenfüllungen wurde nicht der exakte zeitliche Verlauf, sondern nur der Mittelwert des Abflusses in die Schleusenkammer vom errechneten Gesamtabfluss abgezogen. Alle in der Rechnung verwendeten Daten bezüglich der Stauhaltung (Spiegelfläche, Laufzeit, Verzögerung, Retentionszeit) sowie die Übertragungsbeiwerte sind lediglich gute Näherungswerte. Im weitern ist zu beachten, dass die Pegelstandsmessung O.W. Birsfelden auf Störungen reagieren kann, denen keine Veränderungen im Wasserinhalt des Stauraumes entsprechen (zum Beispiel Wellen). Ausserdem besteht keine eindeutige Beziehung zwischen der exakten Pegelstandsmessung des O.W. Birsfelden (auf mm genau) und der entsprechenden, für die Handregulierung massgebenden, Ziffernanzeige im Kommandoraum (auf cm genau). Die Ziffernanzeige wechselt nicht immer bei den halben Zentimetern. Tendenzen umkehrungen bei den Pegelstandsänderungen verschieben diese cm-Sprünge. Die Ursachen dafür liegen in der Konstruktion der entsprechenden Geräte. Naturgemäß ist auch die Ablesegenauigkeit auf den Limnigraphenbogen beschränkt.

Wenn diese verschiedenen Ungenauigkeiten beachtet werden, lässt sich auf Grund der gerechneten Beispiele feststellen, dass das erarbeitete mathematische Modell die wirklichen Regulievorgänge an einer Staustufe gut zu beschreiben vermag.

6. Schlussfolgerungen

Die Untersuchung zeigt, dass sich die P-Regelung nur bedingt, die I-Regelung gar nicht und die PI-Regelung in gewissen Fällen gut für die Stauregulierung eignet.

Bei der PI-Regelung ist zu beachten, dass die extremen Schwankungen des Abflusses jene des Zuflusses übertreffen können. Massgebend dafür, ob ein solches Ueberschwingen auftritt, ist vor allem die Form der Zuflussänderung. Das Ausmass eines allfälligen Ueberschwingens wird wesentlich durch den Dämpfungsfaktor D der PI-Regelung bestimmt. Die Abweichung des Pegelstandes vom Stauziel kann auch bei kräftigen Störungen im Zufluss klein gehalten werden, wenn stark reguliert wird (β und γ möglichst gross innerhalb ihrer natürlichen Grenzen). Damit aber gleichzeitig der Abfluss den Zufluss in jedem Fall nur wenig überschwingt, sind der Proportional- und der Integralanteil der Regelung, also β und γ , in einem für die Dämpfung D günstigen Verhältnis zu wählen. Dies ist möglich, wenn $D \geq 1$ wird. Der freien Wahl dieser Parameter sind jedoch in der Praxis gewisse Grenzen gesetzt.

Die PI-Regelung kann daher den Vorschriften für die

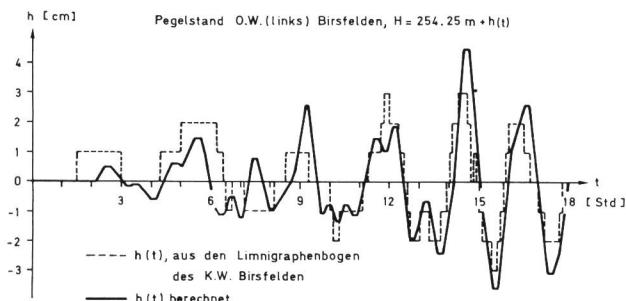
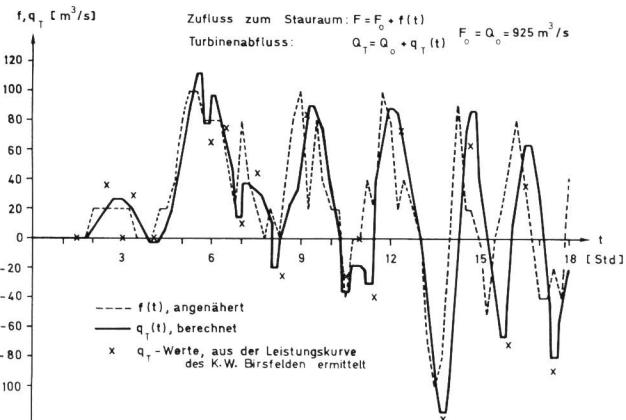


Bild 9 Simulation der Stauregulierung vom 8. August 1972 beim Kraftwerk Birsfelden

Laufzeit $\tau_f = 0.3$ Std., Retentionszeit $\tau_r = 0.12$ Std. ($\tau_s = \tau_r$)

Zeitkonstanten: $\beta = 2.3$ Std. $^{-1}$, $\gamma = 3.3$ Std. $^{-1}$ ($D = 0.35$)

Übertragungsbeiwert $k_s = 0.6$

Stauregulierung nicht immer genügen, insbesondere nicht in einer Stauwerkette. Werden durch eine geeignete Wahl der Regelparameter die Pegelstandsabweichungen im tolerierten engen Bereich gehalten, so führt dies im allgemeinen zu Aufschaukelungen der Abflusschwankungen, von Stufe zu Stufe, so dass in den letzten Stauhaltungen einer mehrgliedrigen Kaskade der Abfluss den Zufluss zum ersten Stauraum kräftig überschwingen kann. Dieses Ueberschwingen kann anderseits durch eine entsprechende Regelung nahezu ausgeschlossen werden; als Folge davon muss jedoch bei grossen Zuflusschwankungen mit grösseren Abweichungen im Pegelstand in einzelnen oder gar in allen Stauhaltungen gerechnet werden. Ist also eine gleichmässige Wasserführung im Fluss erwünscht, so müssen für die Pegelstandsabweichungen genügend grosse Toleranzen zugelassen werden.

Eine Störgrössenaufschaltung zu einer PI-Regelung bringt sowohl bezüglich der Pegelstandsabweichungen als auch der Abflussverhältnisse praktisch immer eine Verbesserung. Eine solche Regulierung setzt allerdings eine einigermaßen zuverlässige Messung der Zuflussänderungen voraus. Diese Messung bedingt zwar einen erheblichen technischen Aufwand. Sie wird immerhin in all jenen Fällen erleichtert, wo nur ein einziger massgebender Zufluss, nämlich der Abfluss des Oberliegers, erfasst werden muss. Es ist nicht zu übersehen, dass der Zufluss eine sehr wesentliche Größe für den Verlauf eines Regulievorganges ist. Ob sich die ideale Lösung einer sehr genauen und rechtzeitigen Anpassung des Abflusses an den Zufluss durch eine Störgrössenaufschaltung technisch realisieren lässt, muss hier eine offene Frage bleiben.

In einer längeren Fluss-Stauwerkette kommt den Massnahmen, welche die Abflussverstärkungen vermindern,

also der Störgrössenaufschaltung und einer starken Dämpfung in der PI-Regelung, noch grössere Bedeutung zu als beim Einzel-Stauwerk.

LITERATURANGABEN

- [1] N. Fichtscherer: Regelung des Oberwasserpegels an Staustufen. Die Wasserwirtschaft, Heft 10, Okt. 1965.
- [2] K. Göldner: Mathematische Grundlagen für Regelungstechniker. Verlag Harri Deutsch, Frankfurt/M. und Zürich, 1969.
- [3] H. Horn und W. Zielke: Das dynamische Verhalten von Flussstauhaltungen. Versuchsanstalt für Wasserbau der Technischen Universität München, Bericht Nr. 29, 1973.
- [4] A. Kühne: Flusstauregulierung. Grundsätzliche Betrachtungen mit systemtheoretischen Methoden. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Mitteilung Nr. 13, 1975.
- [5] M. Neumüller und W. Bernhauer: Stauregelung und Abflussregelung an Laufwasserkraftwerken. Die Wasserwirtschaft, Heft 10, Okt. 1969.
- [6] W. Oppelt: Kleines Handbuch technischer Regelvorgänge. Verlag Chemie, Weinheim/Bergstr., 1967.
- [7] G. Pressler: Regelungstechnik. B.I.-Hochschultaschenbücher, Band 63, 1964.
- [8] D. Viscer: Die stetige Regelung eines Flüssigkeitsstandes. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Mitteilung Nr. 4, 1971.

Adresse des Verfassers:

Dr. Anton Kühne
Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und
Glaziologie an der ETH Zürich
Gloriastrasse 37—39, 8006 Zürich

DK 628.14

ÜBERREGIONALE WASSERVERSORGUNGEN

Eine Möglichkeit zur haushälterischen Nutzung der Wasservorkommen und zur Steigerung der Versorgungssicherheit.

Rudolf Biedermann

Das für die Versorgung mit Trink- und Brauchwasser benötigte Wasser konnte bis heute sowohl seitens der Wasserwerke wie auch seitens der Industrie in der Regel relativ leicht, das heißt meist in der Nähe des Bedarfs und somit kostengünstig beschafft werden.

Die Anzeichen, dass dies für die öffentliche Wasserversorgung — und nur diese soll hier angesprochen werden — in Zukunft nicht mehr überall und jederzeit so sein wird, mehren sich jedoch:

- Verschiedenenorts sinken die Wasserstände der genutzten Grundwasservorkommen tendenziell ständig ab und vermögen sich selbst während ausgeprägter Niederschlagsperioden — oder gar Hochwasserereignissen — nicht mehr vollständig zu regenerieren, ein deutlicher Hinweis, dass entweder die Nutzung bereits grösser als das langfristige Dargebot ist, oder dass im Verlauf der Jahre die natürliche Grundwasserneubildung infolge der menschlichen Tätigkeiten zurückgegangen ist.
- Die Trockenjahre 1971 und 1972 haben für einzelne Gebiete erkennen lassen, dass die Wasserversorgung bei aussergewöhnlich ungünstigen hydrologischen Voraussetzungen nicht ausreichend sichergestellt ist und dass solche Engpässe zum Teil nur mittels eines Anschlusses an ein leistungsfähiges Wasserwerk vermieden werden können.
- Immer mehr häufen sich die Fälle, dass sich Gemeinden zusammenschliessen, um gemeinsam und unter Einbezug leistungsfähiger Wasservorkommen eine ausreichende Versorgungssicherheit herbeizuführen.
- Alle langfristigen Wasserversorgungsplanungen, die für einzelne Kantone oder Regionen durchgeführt wurden, lassen durchwegs künftige Mangelgebiete erkennen, die dereinst mit Wasser aus entfernter gelegenen Ueberschussgebieten versorgt werden müssen.

Hieraus muss gefolgert werden, dass die Versorgung mit Trink- und Brauchwasser in Zukunft nicht mehr so problemlos wie bisher und insbesondere nicht mehr überall auf lokaler oder klein-regionaler Ebene gelöst werden kann, sondern dass künftig immer häufiger grösserräumige Ausgleichsmassnahmen zwischen Ueberschuss- und Mangelgebieten erforderlich werden.

Soweit aufgrund von Planungsstudien bereits konkretere Vorstellungen bestehen, ist vorgesehen,

- bisher schwach genutzte Grundwasservorkommen in gering bevölkerten Gebieten heranzuziehen,
- geeignete Grundwasservorkommen durch künstliche Anreicherung leistungsfähiger zu gestalten sowie
- natürliche Seen verstärkt in den Dienst der Wasserversorgung zu stellen, und zwar vor allem dort, wo ein grösserer See nicht zu weit vom Versorgungsgebiet entfernt liegt.

Die bisherige Praxis, für die Wasserversorgung primär Grundwasser zu verwenden und nur dann Seewasser zu nutzen, wenn dies entweder wirtschaftlicher oder aus anderen Gründen zweckdienlicher ist, soll also fortgesetzt werden und dies sicher zu Recht. Grundwasser ist im Vergleich zum Oberflächenwasser nicht nur besser gegen Verunreinigungen aller Art geschützt; bei der Infiltration und der langsamen Bodenpassage erfolgt meist eine derart weitgehende Reinigung, dass das gewonnene Grundwasser entweder nicht oder nur in bescheidenem Ausmass aufbereitet werden muss. Dies wirkt sich nicht nur auf die Kosten des bereitgestellten Wassers günstig aus; dank der verbleibenden Möglichkeit, eine zusätzliche, d.h. nicht unbedingt erforderliche Aufbereitungsstufe anordnen zu können, kann die Sicherheit für den Fall einer temporären Verschlechterung der Rohwassergüte erheblich gesteigert werden. Das Vorhandensein gut unterhaltener, leistungsfähiger Wassergewinnungsanlagen in den stark dezentralisierten Grundwasservorkommen ist auch im Hinblick auf eine allfällige Notwasserversorgung im Kriegsfall von erneuter Bedeutung.

Dank der zielstreibigen Verwirklichung der Reinhaltungsmaßnahmen im Einzugsgebiet der Seen und des dort verlangten hohen Reinigungsgrades dürfen aber auch die Seen in einem Gütezustand erhalten werden können, dass ihr Wasser auch künftig mit beherrschbarem Aufwand und ausreichender Sicherheit zur Gewinnung und Aufbereitung von Trinkwasser herangezogen werden kann. Dies ist insoweit bedeutsam, als sich der Wasserbezug aus Seen gemäss der Statistik des Schweizerischen Vereins von Gas- und Wasserfachmännern (SVGW) seit 1960 etwa verdoppelt hat und nicht anzunehmen ist, dass die Entwick-