

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Theobald, Stephan

Optimierter Betrieb von Staustufen

Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:

Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/104074>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Theobald, Stephan (1998): Optimierter Betrieb von Staustufen. In: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hg.): 100 Jahre Hubert-Engels-Laboratorium - Hydraulische und numerische Modelle im Wasserbau, Entwicklung-Perspektiven. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 13. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik. S. 285-294.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Optimierter Betrieb von Staustufen

Kurzfassung

Beim Betrieb von Staustufen sind verschiedene Nutzungsanforderungen und Restriktionen zu beachten. Mit Hilfe eines Computerprogrammes, dessen wesentliche Elemente in diesem Artikel kurz beschrieben werden, kann die geeignete Betriebsstrategie für eine Staustufenkette bestimmt werden. Die für die Realisierung vor Ort benötigten Strukturen und Parameter der Automatisierung werden ebenfalls ermittelt.

Abstract

The operation of barrages in rivers has to fulfill different requirements. The paper describes a software tool for designing a structure of the automated operation of hydropower plants. The program optimizes the parameters of automation and allows to define the best operation method for a cascade of barrages or hydropower plants.

1. Einleitung

Viele Flüsse Deutschlands und Europas sind hauptsächlich zur Energieerzeugung und zur Schiffbarmachung durch Staustufen ausgebaut und der Betrieb dieser Staustufen wird gegenwärtig mehr und mehr automatisiert. Über 20 % des gesamten Güterverkehrsaufkommens in der Bundesrepublik Deutschland werden auf den Bundeswasserstraßen transportiert, zu denen auch die staugeregelten Flüsse Oberrhein, Neckar, Main, Mosel, Saar, Donau und Weser zählen. Als regenerative Energiequelle erzeugt die Wasserkraft ca. 5 % des Energiebedarfs Deutschlands. Der Betrieb der Anlagen in den Steuerzentralen geschieht meist noch manuell, und es entstehen dabei neben hohen Personalkosten Probleme, die mit einer nicht optimierten Betriebsweise der Anlagen zusammenhängen. Die Kraftwerksbetreiber und die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) des Bundes sind aus vielfältigen Gründen daran interessiert, den Betrieb der Kraftwerk- und Wehranlagen zu automatisieren. Ziel ist es, die Betriebsweise jeder einzelnen Staustufe innerhalb einer Kette derart zu koordinieren, daß den teilweise konträren Nutzungsanforderungen aus

- Wasserkraft
- Hochwasserschutz
- Schifffahrt
- Landeskultur/Ökologie

weitgehend entsprochen wird. Bei der Festlegung der Automatisierung bzw. des Automatisierungsgrades ergeben sich Fragen nach geeigneten Analyse- und Entwurfsmethoden unter Berücksichtigung eines technisch notwendigen, aber auch ökonomisch vertretbaren Aufwandes.

2. Aufgabenstellung und Methode

Beim automatisierten Betrieb gibt der Wasserhaushaltsregler - analog zum Schichtpersonal auf der Warte - mit Hilfe von Wasserstands- sowie Zu- und Abflußinformationen an bestimmten Stationen im Stauraum den Abfluß an der eigenen Stauanlage vor.

Die Ziele des Betriebs und somit Aufgaben eines Wasserhaushaltsreglers lassen sich daher aus hydraulischer Sicht vereinfachend so definieren, daß unter Einhaltung der Konzessionsbedingungen betriebsinterne Vorgaben (z.B. Bewirtschaftung) zu erfüllen sind. Diese Vorgaben führen bei genauer Analyse des Strömungsprozesses zur Einspeisung des idealen Volumens, woraus sich in vielen Fällen als Betriebsstrategie die Volumenregelung ableitet.

Zur Bearbeitung der Thematik des automatisierten Betriebes von Staustufen wird das Programmsystem *KASSMO* (Karlsruher-StauStufen-Simulationsmodell) eingesetzt, das speziell für Fragestellungen zum Betrieb von Staustufen entwickelt wurde und das sich im vielfachen Einsatz bei der Projektbearbeitung bewährt hat.

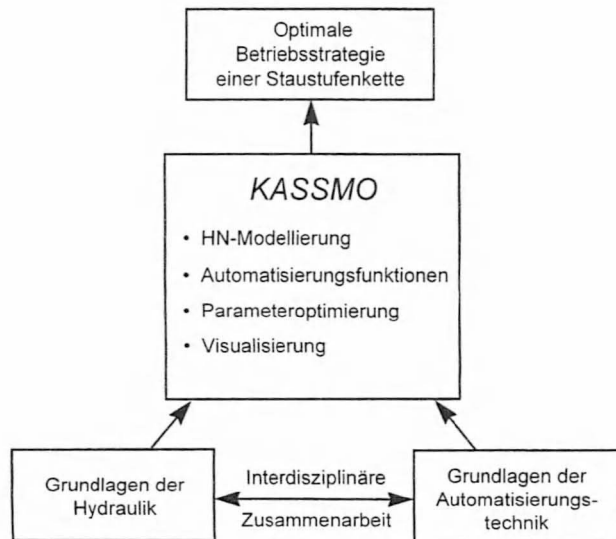


Bild 1: Simulationsmodell *KASSMO*

Das Programmsystem *KASSMO* setzt sich aus vier Kernbausteinen zusammen.

Baustein 1: Stauraummodell - Hydrodynamisch-numerisches Modell (HN-Modell) des Stauraumes zur Simulation der Abflußverhältnisse

Baustein 2: Automatisierungsfunktionen zur Ansteuerung der Kontrollbauwerke mit Angabe der zeitvariablen Abflüsse an der Stauanlage in Abhängigkeit des Prozeßzustandes und der Betriebsfallvorgabe (Erweiterung des HN-Modells)

Baustein 3: Optimierungseinheit zur Reglerparametrierung

Baustein 4: Visualisierungseinheit

Ziel dieses Verfahrens ist es, einen Entwurf in Struktur und Parameter für die automatisierte Betriebsweise einer Staustufe oder einer Staustufenkette durchzuführen, mit der auch die Voreinstellung des Prototyps in der Natur erfolgt.

3. Simulation der Abflußverhältnisse im Stauraum - Baustein 1

Entscheidend für die Wahl des geeigneten Verfahrens zur Modellierung des Stauraumes ist die Erfüllung bestimmter Anforderungen, wie

- Simulation der Abflußverhältnisse im Stauraum, (instationäre Berechnungen, Wasserstand und Durchfluß an bestimmten Stationen als Ein- und Ausgangsgrößen des automatisierten Betriebs)
- Hohe Anforderung bezüglich der Naturähnlichkeit der berechneten Größen
- Ermittlung charakteristischer Stauraumkenngrößen
- Geringer Rechenzeitbedarf und geringer Modellierungsaufwand

Als sehr vorteilhaft hat sich der Einsatz eines eindimensionalen, instationären hydrodynamisch-numerischen (HN-) Modells erwiesen.

Die Geländegeometrie wird in Form von Querprofilen diskretisiert, wobei der Abstand der Profile entsprechend den hydraulischen Anforderungen und den zur Verfügung stehenden Naturdaten angepaßt gewählt werden kann. An den Rändern der Stauhaltung, wo sich in der Regel Kraftwerke und Wehre befinden, können instationäre Randbedingungen wie Zu- bzw. Abflüsse, Wasserstände und Schlüsselkurven vorgegeben werden. Bauwerke wie Schütze, Wehre, Brücken, Verengungen und Aufweitungen, sowie verzweigte und vermaschte Flußsysteme können ebenfalls programmtechnisch berücksichtigt werden.

Der Strömungsvorgang wird mit Hilfe der Kontinuitäts- und Impulsgleichung nach Saint-Venant beschrieben. Die unabhängigen Variablen in diesem Gleichungssystem sind die Zeit- und die Ortskoordinate, die abhängigen Variablen sind der Durchfluß $Q(x,t)$ und die durchströmte Fläche $A(x,t)$ bzw. der Wasserstand $y(x,t)$. Die Lösung dieses Gleichungssystems erfolgt mittels eines impliziten Differenzenverfahrens, d.h. die Ableitungen in den Gleichungen werden durch Differenzenquotienten approximiert. Das eingesetzte Verfahren beruht auf dem Preismann-Schema (vgl. /2/).

Als Ergebnis einer Berechnung erhält man den Wasserstand und den Abfluß als Funktion des Ortes und der Zeit. Anhand dieser Größen können damit weitere hydraulische Kenngrößen wie mittlere Geschwindigkeiten und die durchströmten Querschnittsflächen errechnet werden.

Der Einsatz eines 1D-HN-Modells und die erzielte Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Wasserständen ist in /8/ beschrieben.

4. Automatisierte Abflußsteuerung - Baustein 2

Speziell zur Untersuchung des automatisierten Betriebs von Stauanlagen wurde das HN-Modell am Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik (IWK, ehemals: Wasserbau und Kulturtechnik) um eine automatisierte Abflußsteuerung erweitert. Der Abfluß wird dabei aus Zufluß- und Wasserstandsdaten berechnet, wobei Konzessionsbedingungen unter optimaler Erfüllung der Nutzungsanforderungen einzuhalten sind. Bild 2 zeigt die Anordnung der Automatisierung beim Betrieb einer Staustufe.

Einen wesentlichen Bestandteil der Erweiterung bilden Automatisierungsfunktionen wie beispielsweise Proportional-Integral-Differential (PID)-Regler, Verzögerungs- und Totzeitglieder. Die Beiwerte für den PID-Regler und der Verzögerungsglieder sind in Abhängigkeit vom Abfluß zu wählen (vgl. /3/).

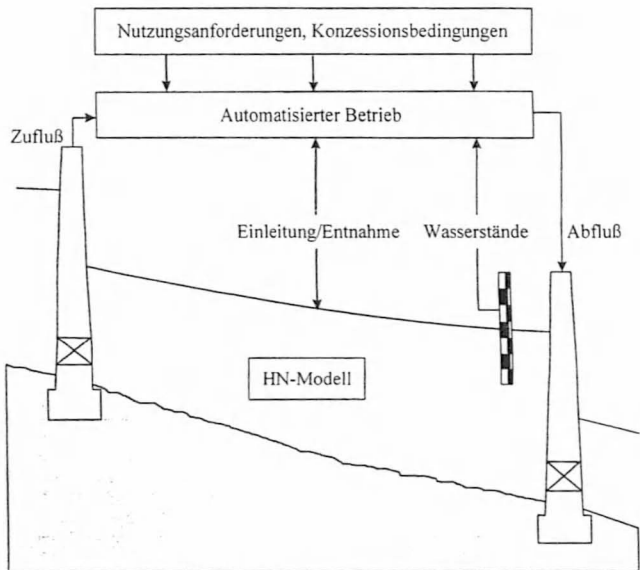


Bild 2: Funktionsbeschreibung des numerischen Verfahrens für eine Staustufe

Wie in /5,8/ beschrieben, ist bei der Wahl der richtigen Betriebsweise zur Erfüllung der Betriebsziele und der Konzessionsbedingungen die Analyse der Abflußverhältnisse im Stauraum unabdingbar. In der Praxis führt das reine Steuerungsprinzip (Abflußvorgabe lediglich als Funktion der Zuflüsse) ohne zusätzliche Wasserstandsregelung aufgrund der Ungenauigkeiten bei einer Abflußbestimmung zu einem Wegdriften des Wasserstandes vom Stauziel. Deshalb muß bei jeder Betriebsart eine kontinuierliche Wasserstandsmessung vorhanden sein, was meist in Form eines PI- Reglers erfolgt. Die Kopplung der Wasserstandsregelung mit der Zuflußänderung bezeichnet man als Störgrößenaufschaltung. Nachfolgend werden zwei Möglichkeiten einer Störgrößenaufschaltung vorgestellt, die auch in der Praxis beim Betrieb von Staustufen Verwendung finden.

Bei der sogenannten OW/Q-Regelung wird die Zuflußänderung als Steuerungsanteil und die Wasserstandsänderung als Regelungsanteil bei der Abflußsteuerung berücksichtigt. Eine Zuflußänderung wird hierbei zeitversetzt als Abflußänderung direkt auf den Abfluß gegeben. Die OW/Q-Regelung entspricht somit einer Störgrößenaufschaltung auf das Stellglied. Sie wird häufig an den Bundeswasserstraßen eingesetzt, wo insbesondere durch den Schiffsverkehr im Vergleich zu nicht schiffbaren Flüssen auch eine stärkere Beeinflussung der Regelgröße Wasserstand vorliegt. Modifikationen beim Betrieb einer Staustufenkette mit einer Oberoberliegeraufschaltung sind ebenfalls denkbar. Die zweite Alternative stellt die sogenannte Wasserstandsregelung mit Antizipation dar. Bei ihr wird die Zuflußänderung in eine entsprechende Änderung der Führungsgröße Wasserstand umgerechnet, d.h. die Zuflußänderung bewirkt indirekt über den Wasserstandsregler bei geänderter Führungsgröße eine Abflußveränderung. Es liegt somit eine Störgrößenaufschaltung auf die Führungsgröße vor.

Als neue Methode zur automatisierten Betriebsweise einer Staustufe ist in *KASSMO* eine mit A/Q-Regelung bezeichnete Betriebsweise implementiert, welche die Vorteile der OW/Q-Regelung und der Wasserstandsregelung mit Antizipation verbindet. Bei der A/Q-Regelung wird eine Zuflußänderung sowohl auf das Stellglied als auch auf die Führungsgröße weitergegeben. Der Einsatz der A/Q-Regelung ist insbesondere für Stauräume mit $T_R < T_L$ bei großer Differenz zwischen T_R und T_L von Vorteil.

5. Parameteroptimierung - Baustein 3

Die in Kap. 4 genannten Betriebsweisen beschreiben die Struktur der Automatisierung. Für die Umsetzung müssen noch die geeigneten Parameter bestimmt werden. Eine einheitliche Parametrierungsvorschrift läßt sich aufgrund der Vielzahl möglicher Strukturen, der unterschiedlichen Anforderungen durch die Betriebsziele und der unterschiedlichen Abflußcharakteristik des betrachteten Flußabschnittes nicht ableiten. Als wichtigste Parameter der genannten Betriebsweisen

sind aber dennoch die Stauraumkenngrößen Lauf- und Retentionszeit, der P- und I-Anteil der Wasserstandsregelung und ein Absenkungsfaktor k für die Antizipation zu nennen. Bei den Größen ist auf die Durchflußabhängigkeit zu achten. Die Parameter der Störgrößenaufschaltung richten sich nach den Lauf- und Retentionszeiten des Stauraumes. Die Parameter der Wasserstandsregelung orientieren sich hingegen an der Relation von Abflußänderung zu Wasserstandsänderung. Wasserstandsregelung und Störgrößenaufschaltung stehen in Wechselwirkung zueinander, so daß eine gegenseitige Beeinflussung der Parameter vorliegt.

Zur Wahl geeigneter Parameter werden insgesamt fünf Bewertungskriterien definiert:

- Einhalten des OW-Standes
- Vermeidung einer Abflaufaufsteilung
- Unveränderte Weitergabe des Zuflusses
- Anzahl der Stellbefehle
- Anzahl der Stellbefehle mit kurzfristiger Richtungsumkehr des Öffnungs- und Schließvorganges

Diese Regelgütekriterien werden durch Bewertungsfunktionen beschrieben, so daß eine quantitative Aussage der vorgenommenen Parametrierung vorliegt /8/.

5.1 Einhalten des OW-Standes

Das Einhalten des OW-Standes als Vorgabe einer Betriebsweise einer Staustufe ist in vielen Konzessionserteilungen festgeschrieben. Die Bewertung, ob der Wasserstand gut oder schlecht eingehalten wird, richtet sich nach zwei Kriterien:

- Größe der Abweichung
- Dauer der Abweichung

In vielen Fällen wird man zusätzlich ein Toleranzband definieren, das kleine Wasserstandsschwankungen ohne Bestrafung zuläßt. Bild 3 zeigt den Verlauf eines Wasserstandes mit den Bereichen, die negativ bewertet werden.

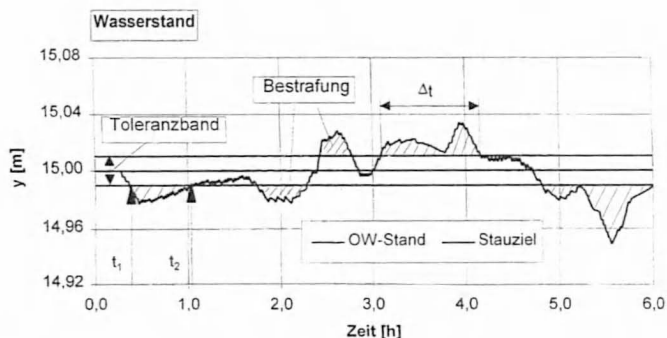


Bild 3: Bewertung des Wasserstandsverlaufes

Die Quantifizierung erfolgt durch folgende Formel:

$$S_{\text{OW-Stand}} = \sum_{i=1}^N \int_{t_{2i-1}}^{t_{2i}} (y_{\text{ist}}(t) - y_{\text{soll}}(t))^2 dt \cdot \sqrt[3]{t_{2i-1} - t_{2i}} \quad (1)$$

Hierbei definieren t_{2i-1} und t_{2i} das Zeitintervall, in dem die Wasserstandsabweichung außerhalb des Toleranzbandes liegt. N gibt die Anzahl dieser Intervalle an.

5.2 Vermeidung der Verstärkung einer Zuflußänderung im Abfluß

Eine sehr wichtige Rolle beim Betrieb von Staustufen und insbesondere von Staustufenketten ist die Vermeidung einer Aufsteilung des Abflusses in Relation zum Zufluß. Die Vermeidung einer Verstärkung gilt sowohl für ein Ansteigen als auch ein Absinken des Zuflusses. Für die Bewertung und einer entsprechenden Quantifizierung werden deshalb relevante lokale Extrema definiert, die für einen vorgegebenen Zeitbereich nicht zu überschreiten sind.

Bei einer gegebenen Zuflußganglinie unterscheidet man zwischen lokalen Extrema (A), die durchaus überschritten werden können und solchen, die nicht überschritten werden dürfen (B). Das Maß für die Relevanz des Extremums ist die Dauer, wie lange das Extremum Bestand hat. In Bild 4 wird dieser Sachverhalt mit der Darstellung einer Zu- und Abflußganglinie und den bewerteten Bereichen dargestellt.

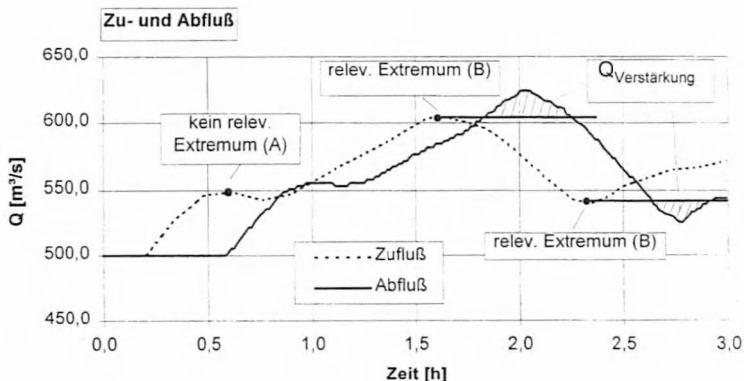


Bild 4: Zufluß- und Abflußganglinie, lokale und relevante Extrema; Bereiche mit einer Verstärkung einer Zuflußänderung

Die Quantifizierung geschieht mit folgender Formel:

$$S_{Q_{\text{verst.}}} = \sum_{i=1}^N \int_{t_{2i-1}}^{t_{2i}} (Q_{\text{ab}}(t) - Q_{\text{Extr.,rel}}(t))^2 dt \quad (2)$$

5.3 Unveränderte Weitergabe des Zuflusses

Eine weitere Forderung an den Betrieb von Staustufen kann die zeitverschobene, aber unveränderte Weitergabe des Zuflusses sein. Dieses Verhalten wird auch mit Abfluschnachführung bezeichnet und schließt mit der Definition der unveränderten Weitergabe sowohl eine Verstärkung als auch eine Dämpfung einer Zuflußänderung aus. Die Umsetzung der Bewertung wird so vorgenommen, daß die Zuflußganglinie zeitverschoben mit einem vorgegebenen Toleranzband von Q über die Abflußganglinie gelegt wird. Die Bestrafung ergibt sich aus der Summe der Beträge der Abweichungen.

$$S_{Q_{\text{nach.}}} = \sum_{i=1}^N \int_{t_{2i-1}}^{t_{2i}} (Q_{\text{ab}}(t) - Q_{\text{zu}}(t + t_R))^2 dt \quad (3)$$

5.4 Anzahl der Stellbefehle

Beim Betrieb vieler, vor allem älterer Anlagen wird oft die Forderung an die Automatisierung erhoben, daß die Stellantriebe möglichst geschont werden sollen und deshalb die Anzahl von Stellbefehlen möglichst klein zu halten ist. Im numerischen Verfahren ist daher zur Untersuchung dieser Fragestellung ein steuerbarer Mindestschritt für Turbine und Wehr implementiert, bei dessen Überschreitung erst eine Abflußänderung vorgenommen wird. Für die Bewertung wird jede Abflußänderung registriert. Das Gütemaß entspricht der Anzahl der Stellbefehle mit

$$S_{\text{Stell}} = n_{\text{Stell}} \quad (4)$$

Durch die unterschiedliche Größe der Hysterese wird auch der unterschiedlichen Abflußcharakteristik von Wehr und Turbine Rechnung getragen.

5.5 Anzahl der Stellbefehle mit kurzfristiger Richtungsumkehr

Die Berücksichtigung dieser Forderung ergab sich aus Besprechungen mit Kraftwerksbetreibern, die anführten, daß es ungünstig sei, wenn Turbine oder Wehr innerhalb eines kurzen Zeitintervalls sich öffnen, schließen und wieder öffnen. Auch hier geht es um die Vermeidung unnötiger Stellbefehle und somit um eine Reduzierung des Verschleißes. Die Umsetzung der Bewertung erfolgt dadurch,

daß überprüft wird, ob innerhalb eines vorgegebenen Zeitintervalls (z.B. 5 Minuten) der Zustand "Öffnen - Schließen - Öffnen" oder analog "Schließen - Öffnen - Schließen" eines Stellorganes vorkommt. Die Bewertung erfolgt durch Aufsummieren dieser Ereignisse.

$$S_{\text{Umkehr}} = n_{\text{Umkehr}} \quad (5)$$

5.6 Gesamtgüte

Nach einer Normierung der Einzelkriterien können diese zu einer Gesamtgüte zusammengefaßt werden. Da aber jeder Anwender unterschiedliche Schwerpunkte auf die Erfüllung der Einzelziele setzt oder manche der angegebenen Kriterien überhaupt nicht oder nur wenig bewertet haben möchte, werden die Einzelgüten mit Wichtungsfaktoren belegt. Die Gesamtbewertung setzt sich dann folgendermaßen zusammen.

$$S_{\text{Gesamt}} = \alpha_1 S_{\text{OW-Stand}} + \alpha_2 S_{\text{Qverst}} + \alpha_3 S_{\text{Qnach}} + \alpha_4 S_{\text{Stell}} + \alpha_5 S_{\text{Umkehr}} \quad (6)$$

Die Regelgüten werden so bewertet, daß ein hoher Zahlenwert einer schlechten und ein niedriger Zahlenwert einer guten Bewertung entspricht.

Zur Suche eines Optimums der Reglerparametrierung wird ein genetischer Algorithmus (GA) eingesetzt, der als effizientes Suchverfahren eine große Rechenzeitersparnis bringt (vgl. /6,7/).

6. Visualisierungseinheit, Einsatz als Schulungs- und Trainingsprogramm - Baustein 4

Das Programmsystem *KASSMO* wird neben der alltäglichen Projektbearbeitung auch als Schulungs- und Trainingsprogramm eingesetzt und erfüllt dabei auch unterschiedliche didaktische Anforderungen. Als Trainingsaufgabe kann man sich beispielsweise den Durchgang einer Hochwasserwelle vorstellen. Der Operator nimmt hierbei aktiv an der Simulation teil. Im Gegensatz zum realen Betrieb an der Steuerwarte darf der Lernende bei der Simulation Fehler machen, ohne dadurch Mensch und Natur zu gefährden. Fehlbedienungen werden als Bestandteil des Lernprozesses betrachtet. Ähnlich einem Flugsimulator trainiert das Bedienpersonal die eigene Fahrweise, überprüft die Auswirkungen auf die Abflußverhältnisse und sammelt somit wertvolle Erfahrungen für den aktiven Einsatz. Wesentliche Merkmale der Visualisierungseinheit sind (vgl. /1/):

- Online Darstellung hydraulischer Größen wie Wasserstände und Durchflüsse in Form von Ganglinien
- Möglichkeit zum interaktiven Eingriff in das Prozeßgeschehen
- Echtzeitsimulation

7. Anwendungsgebiete von KASSMO

Das IWK führte u.a. Untersuchungen zum automatisierten Betrieb der Rheinkraftwerke Albrück-Dogern AG (RADAG) und Säckingen (RKS) durch. Seit 1997 ist der Wasserhaushaltsregler in Säckingen in Betrieb und erfüllt nach Aussagen der Betriebsleitung die gestellten Anforderungen. Für RADAG wurde eine neue Struktur der Automatisierung gewählt, da mittlerweile weitere Meßgrößen zur Verfügung stehen. Der Vergleich von Simulationen zwischen der bisher installierten und der neu strukturierten und parametrisierten Wasserhaushaltsregelung läßt eine deutliche Verbesserung hinsichtlich der gestellten Anforderung nach Vergleichmäßigung des Abflusses erwarten. Detaillierte Informationen sind unter /8/ nachzulesen.

8. Literatur

- [1] **Celan, A.:** *Einsatzmöglichkeiten von Simulationsprogrammen*. Workshop "Gestaute Flußsysteme - Dynamik und automatisierte Betriebsführung", veranstaltet vom FA 2.5 des DVWK, Universität Karlsruhe, 1997
- [2] **Cunge, Holly, Verwey:** *Practical Aspects of Computational River Hydraulics*. Pitman Advanced Publishing Program
- [3] **Cuno, B.:** *Grundlagen der Automatisierung*. Workshop "Gestaute Flußsysteme - Dynamik und automatisierte Betriebsführung", veranstaltet vom FA 2.5 des DVWK, Universität Karlsruhe, 1997
- [4] **Nestmann, F.; Theobald, S.:** *Numerisches Modell zur Steuerung und Regelung einer Staustufenkette an Beispielen von Rhein und Neckar*. *Wasserwirtschaft* 2/1994, S. 72-78, und BAW-Mitteilungsblatt, Nr. 71, Sept. 1994, S. 1-14
- [5] **Neumüller, M.; Bernhauer W.:** *Stauregelung und Abflußregelung an Laufwasserkraftwerken*. *Wasserwirtschaft* 10(1969), Seite 297-303
- [6] **Rechenberg, I.:** *Evolutionsstrategie: Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution*. Frommann und Holzboog, Stuttgart-Bad Cannstatt, 1973
- [7] **Schöneberg, E.; Heinzmann, F.; Feddersen, S.:** *Genetische Algorithmen und Evolutionsstrategien: Eine Einführung in Theorie und Praxis der simulierten Evolution*. 1. Aufl., Bonn: Addison-Wesley, 1994
- [8] **Theobald, S.:** *Numerische Simulation von Staustufenketten mit automatisiertem Betrieb*. Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Mitteilungen 200, Universität Karlsruhe, 1998

Dr.-Ing Stephan Theobald
Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik
Universität Karlsruhe
Kaiserstr.12
76128 Karlsruhe
e-mail: Stephan.Theobald@bau-verm.uni-karlsruhe.de