

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Report, Published Version

Schmitt-Heiderich, Peter; Gebhardt, Michael; Wohlfart, Sven
Optimierungsverfahren für die Parametrisierung von
Reglern der automatisierten Abfluss- und Stauzielregelung.
FuE-Abschlussbericht A39530310105

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/106735>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

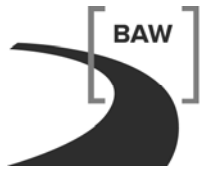
Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2012): Optimierungsverfahren für die Parametrisierung von Reglern der automatisierten Abfluss- und Stauzielregelung. FuE-Abschlussbericht A39530310105. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau.

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.

Verwertungsrechte: Alle Rechte vorbehalten

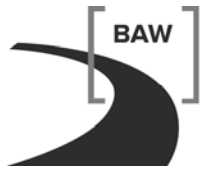


Bundesanstalt für Wasserbau
Kompetenz für die Wasserstraßen

**Optimierungsverfahren für die
Parametrisierung von Reglern der
automatisierten Abfluss- und
Stauzielregelung (ASR)**

Abschlussbericht FuE

A39530310105



Bundesanstalt für Wasserbau
Kompetenz für die Wasserstraßen

Abschlussbericht FuE
Optimierungsverfahren für die Parametrisierung von
Reglern der automatisierten Abfluss- und
Stauzielregelung

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung
WS13, Postfach 20 01 00
53170 Bonn

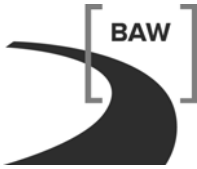
Auftrag vom: 19.05.2006, Az.:

Auftrags-Nr.: BAW-Nr. A39530310105

Aufgestellt von: Abteilung: Wasserbau im Binnenbereich
Referat: Wasserbauwerke, Stauhaltungen und Kanäle
(W3)
Bearbeiter: Dr.-Ing. Schmitt-Heiderich
Dr.-Ing. Gebhardt
Dipl.-Ing. Wohlfart

Karlsruhe, den 28.12.2012

Das Gutachten darf nur ungekürzt vervielfältigt werden. Die Vervielfältigung und eine Veröffentlichung bedürfen der schriftlichen Genehmigung der BAW.



Zusammenfassung

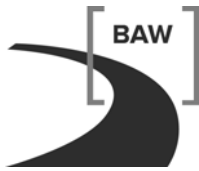
Zahlreiche Flüsse in Deutschland sind zur Verbesserung der Schifffahrt und zur Energieerzeugung staugeregt. Die unterschiedliche Nutzung muss gewährleisten, dass ein planfestgestelltes Stauziel innerhalb einer vorgegebenen Toleranz eingehalten wird. In diesem Themenkomplex ist eine Aufgabe der BAW, die Regelung für die Automatisierung zu konzipieren bzw. zu parametrisieren und die Funktionsweise nachzuweisen. Die Anforderungen an die ASR, die z.B. in Planfeststellungsbeschlüssen und Verwaltungsvorschriften definiert sind, verlangen die Erfüllung unterschiedlicher und zum Teil konträrer Ziele, wie die Einhaltung des Stauziels innerhalb der vorgegebenen Toleranz, die Hochwasserabfuhr, die Verringerung von Abflussschwankungen und die möglichst vollständige Nutzung des Wasserkraftpotenzials. Weitere Restriktionen sind zu berücksichtigen, beispielsweise müssen die Stellbefehle an den Wehren minimiert werden, damit diese nicht übermäßig beansprucht werden und schnell altern.

Die Automatisierung der ASR sorgt hier für eine Standardisierung der Bewirtschaftung der Wasserstraße und hilft die Regelung transparent und nachvollziehbar zu gestalten. Erfahrungswissen, Besonderheiten der Strecke und der Kontrollbauwerke werden in den Algorithmen und deren Parametrisierung berücksichtigt, wodurch die Sicherung des erarbeiteten und erfahrenen Wissens gewährleistet ist.

Jede Regelung beschreibt ein rückgekoppeltes Systemverhalten, bei der durch Vorgabe der Stellgrößen an den Regelorganen, üblicherweise Kraftwerk und Wehr, der Wasserstand der Regelstrecke geführt wird. Bei fehlerhaft ausgelegtem Regelungssystem bzw. Regelungsparametern können instabile Zustände in der Flussstauhaltung hervorgerufen werden, was sich in aufklingenden Wasserstandsschwingungen zeigt. Daher können die Regelparameter nicht im Betrieb bestimmt werden, diese müssen vorab bereitgestellt werden.

Das erfolgt in der BAW mit Hilfe einer detaillierten Simulation von Bauwerk und Flusstrecke (HN-Modell), die über die Leittechnik miteinander verknüpft werden. Da mit diesem Verfahren alle relevanten Prozesse möglichst wirklichkeitsgetreu wiedergegeben werden, ist diese Untersuchungsmethode entsprechend zeitaufwändig. Das FuE-Vorhaben zeigte auf, dass diese Vorgehensweise zielführend ist und keine weiteren Vereinfachungen zulässt. Allerdings zeigten die Untersuchungen, dass die Bemessung / Parametrisierung künftig standardisiert erfolgen kann.

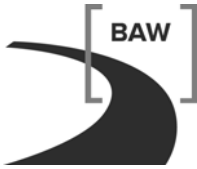
Die Ergebnisse dieses FuE-Vorhabens wurden am 17. November 2011 in der BAW im Rahmen eines Workshops einem Fachpublikum vorgestellt. Schriftlich dokumentiert werden die Ergebnisse in den BAW-Mitteilungen 96, die auf der Homepage der BAW (www.baw.de) als Download bereitstehen.



Inhaltsverzeichnis

Seite

1	Problemstellung und Ziel	1
1.1	Ingenieurwissenschaftliche Fragestellungen und Stand des Wissens	1
1.2	Bedeutung für die WSV	9
2	Ergebnisse	9
3	Literatur	11



Bildverzeichnis

Seite

Bild 1:	Stauregelung mit Kraftwerk und Wehr	2
Bild 2:	Blockschaltbild eines Regelkreises mit einem Steuerungsanteil infolge einer Störgrößenaufschaltung	3
Bild 3:	Schema einer Wasserstandsregelung	5
Bild 4:	Schema des Signalflusses zur Steuerung und Regelung eines staugeregelten Flusses	6

Tabellenverzeichnis

Seite

Tabelle 1:	Recherchierte Zeitschriften	10
------------	-----------------------------	----

Anlagenverzeichnis

Anlage 1:	Literaturstudie
-----------	-----------------

1 Problemstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellungen und Stand des Wissens

Deutschland verfügt über ein wirtschaftlich leistungsfähiges Wasserstraßennetz, das die Seehäfen an Nord- und Ostsee mit den Binnenhäfen verbindet. Die 7350 km des Bundeswasserstraßennetzes teilen sich auf in ca. 2570 km frei fließende Gewässer, ca. 1765 km Kanäle und ca. 3015 km staugeregelte Flussabschnitte. Damit werden an über 2/3 der deutschen Bundeswasserstraßen vorgegebene Wasserstände technisch eingehalten, wobei sich das FuE-Vorhaben mit den staugeregelten Flussabschnitten beschäftigt. Für die Stauregelung betreibt die WSV über 280 Wehranlagen, die in Zusammenarbeit mit den Laufwasserkraftwerken der Energieversorgungsunternehmen (EVU) die unterschiedlichen Nutzungsansprüche erfüllen müssen (Bild 1). Zu den staugeregelten Bundeswasserstraßen mit Wasserkraftnutzung zählen Weser, Oberrhein, Neckar, Main, Mosel, Saar, Donau und Lahn.

Die Stauziele der Bundeswasserstraßen sind für die Schifffahrt ausgelegt und stellen ganzjährig eine Mindestfahrwassertiefe bereit. Die Fahrwassertiefe bestimmt die maximal zulässige Ladung einer Fahrt und ist entscheidend für den wirtschaftlichen Betrieb der Wasserstraße. Um Grundberührungen und Brückenanfahrungen von Schiffen zu vermeiden, müssen die Stauziele sehr genau eingehalten werden. Beispielsweise beträgt die Stauzieltoleranz an der Mosel lediglich ± 5 cm.

Die parallele Nutzung einer Stauhaltung für unterschiedliche Zwecke kann zu Interessenskonflikten führen. So werden die Kraftwerksbetreiber daran interessiert sein, den tageszeitlich variierenden Strombedarf durch die Bewirtschaftung einer Lamelle mit großer Stautoleranz zu decken, während die Schifffahrt die Minimierung der Wasserstandsschwankungen fordert. Die Anforderungen, die z. B. in Planfeststellungsbeschlüssen und Verwaltungsvorschriften definiert sind, verlangen die Erfüllung mehrerer Ziele, die oft konkurrierend zueinander stehen.

Die Automatisierung von Staustufen erfordert dafür eine interdisziplinäre Zusammenarbeit von Hydraulik, Stahlwasserbau und Maschinenbau, von Messtechnik und Signalverarbeitung sowie von Steuerungs- und Elektrotechnik. In diesem Themenkomplex ist es Aufgabe der BAW, die Regelung für eine Automatisierung zu konzipieren, zu parametrisieren, die Funktionsweise nachzuweisen und die Inbetriebnahme und den Betrieb der Regelung zu betreuen.

Jede Regelung beschreibt ein rückgekoppeltes System, bei dem durch Vorgabe der Stellgrößen an den Regelorganen die Regelstrecke geführt wird. Bei fehlerhaft ausgelegter Re-

gelung können instabile Zustände in der Flusstauhaltung hervorgerufen werden, was sich in verstärkenden Wasserstandsschwingungen zeigt. Daher können die Regelparameter nicht im Betrieb bestimmt werden, sondern müssen vorab bereitgestellt werden. Die Auswirkungen unterschiedlicher Bewirtschaftungsstrategien können vorab analysiert werden, diese müssen nicht durch aufwändige und eventuell die Schifffahrt behindernde Naturversuche ermittelt werden.



Bild 1: Stauregelung mit Kraftwerk, Wehr und Schleuse

1.1.1 Erläuterung der Begriffe Regelung und Steuerung

Regelung und Steuerung sind die zentralen Begriffe bei der ASR, deren Unterschiede anschaulich an einem Blockschaltbild aufgezeigt werden (Bild 2). Bei Vernachlässigung des Steuergliedes ergibt sich ein geschlossener Regelkreis mit den vier klassischen Bestandteilen: Regelalgorithmus, Stellglied, Regelstrecke und Messwerterfassung, die ihrerseits aus Messglied und Messfilter besteht. Dieser Regelkreis findet sich in ähnlicher Form in vielen Standardlehrbüchern der Regelungstechnik (Unbehauen 2005, Föllinger 1994). Das Messfilter kann sich im Vorwärts- oder im Rückwärtszweig des geschlossenen Regelkreises befinden, abhängig davon, ob der Ausgang des Regelkreises als Originalwert oder geglätteter

Wert von Interesse ist. Eine Verlegung des Messfilters spiegelt sich dann in einer geänderten Übertragungsfunktion des geschlossenen Regelkreises wider.

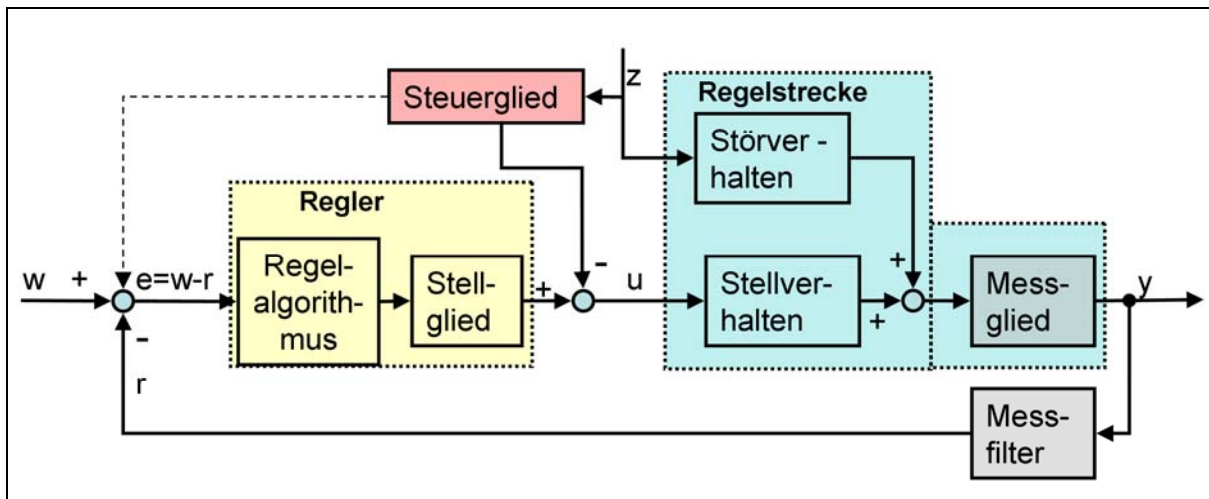


Bild 2: Blockschaltbild eines Regelkreises mit einem Steuerungsanteil infolge einer Störgrößenaufschaltung

Es bedeutet:

- y die Regelgröße (Istwert)
- r der Istwert nach Dämpfung durch ein Filter
- w die Führungsgröße (Sollwert)
- e die Regelabweichung
- u die Stellgröße
- z die Störgröße

Der Regelalgorithmus und das Stellglied werden im Regelkreis oft unter dem Begriff Regler zusammengefasst. Ebenso werden Störverhalten, Stellverhalten und Messglied unter der Regelstrecke vereint. Vernachlässigt man das Filterglied ($y = r$), so erhält man ein Blockschaltbild, das lediglich aus dem Regler und der Regelstrecke besteht. Die Stellgröße u entspricht dem Reglerausgang und wird in der Regelstrecke zu einem Istwert y umgesetzt, der rückkoppelnd auf den Regeleingang e wirkt. Auch die Führungsgröße w (Sollwert) wirkt auf die Regelabweichung e , weswegen von einer Festwertregelung für $w = \text{konstant}$ und einer Folgeregelung bei veränderlichem w gesprochen wird.

Eine Erweiterung des Regelkreises erhält man mit dem Steuerglied. Darunter versteht man die Rückführung einer Störgröße in den Wirkungsbereich der Stellgröße oder des Reglers. Die Übertragungsfunktion des Steuergliedes hängt vom Wirkungsbereich der Aufschaltung ab. Die Störgröße z kann entweder im Reglereingang (gestrichelte Linie) oder im Reglerausgang (durchgezogene Linie) berücksichtigt sein, letzteres ist bei der Bewirtschaftung von Stauhaltungen üblich. Die Störgröße z wird dabei zeitversetzt in der Stellgröße kompensiert. Bedingt

durch das Verzögerungsverhalten einer realen Strecke ist mit dem Steuerglied ein Anteil der Stellgröße zeitlich vorausschauend bekannt, sofern die Störgröße erfasst und das Streckenverhalten bekannt sind. Die Störgröße kann dabei an beliebigen Stellen in der Regelstrecke einwirken. Die Steuerung ist somit eine gerichtete Beeinflussung von außen und rückkopplungsfrei.

Sofern die einzelnen Glieder in Bild 2 als lineare und zeitinvariante Glieder (LZI-Glieder) approximiert werden können, kann die Regelung analytisch untersucht werden, da die Prozesse dann mit linearen Differenzialgleichungen (DGL) beschrieben sind. Diese linearen DGLs können mit der Laplace-Transformation in den Bildbereich überführt werden und sind dort den klassischen Analysemethoden der Regelungstechnik zugänglich (Nyquist-Kriterium, Bode-Diagramm, Wurzelortskurve etc.). Das Verhalten der Regelung kann dann hinsichtlich Schnelligkeit, Stabilität, Schwingungsanfälligkeit etc. untersucht und das Führungsverhalten bzw. das Störungsverhalten analysiert werden.

1.1.2 Übertrag auf die Abfluss- und Stauzielregelung von Flusstauhaltungen

Überträgt man das Blockschaltbild (Bild 2) auf die Stauzielregelung und stellt sie als Wasserstandsregelung vereinfacht entsprechend Bild 3 dar, so ergibt sich die Regelabweichung e aus dem Vergleich von Soll- und Istwasserstand. Der Sollwasserstand bzw. die Führungsgröße H_{Soll} muss dabei keine Konstante sein, an Mosel und Saar ist diese an den Abfluss gekoppelt. Der Zufluss in die Stauhaltung ist weitestgehend durch das natürliche Wasserdargebot und den Staustufenbetrieb des Oberlieggers vorgegeben und durch die lokale Regelung nicht beeinflussbar, während der Abfluss aus der Stauhaltung über die Stellorgane Turbine, Kraftwerk, Fischpass, Schleuse etc. kontrolliert wird. Der Gesamtabfluss aus der Stauhaltung, die Stellgröße Q_{Soll} , wird vom Regler vorgegeben.

Ein Zufluss in die Regelstrecke erfolgt aber nicht nur am oberen Ende einer Stauhaltung, sondern auch lateral: Gewässerein- bzw. -ableitungen sowie Misch- und Regenwassereinleitungen aus Kanalnetzen tragen hier zu einem "individuellen Verhalten" einer Stauhaltung bei. Die Zuflüsse werden in der Regelungstechnik als Störgröße bezeichnet, wobei der Begriff alle auf die Regelung störend einwirkenden Größen vereint, die oft nicht genau bekannt sind. Für den vorliegenden Fall der Stauregelung ist dieser Begriff insofern "unglücklich", da damit der Wunsch impliziert wird, die Störung zu vermeiden. Zuflüsse in eine Stauhaltung sind jedoch keine Störung des Systems sondern die treibende Kraft, die eine Stauregelung überhaupt erst ermöglicht.

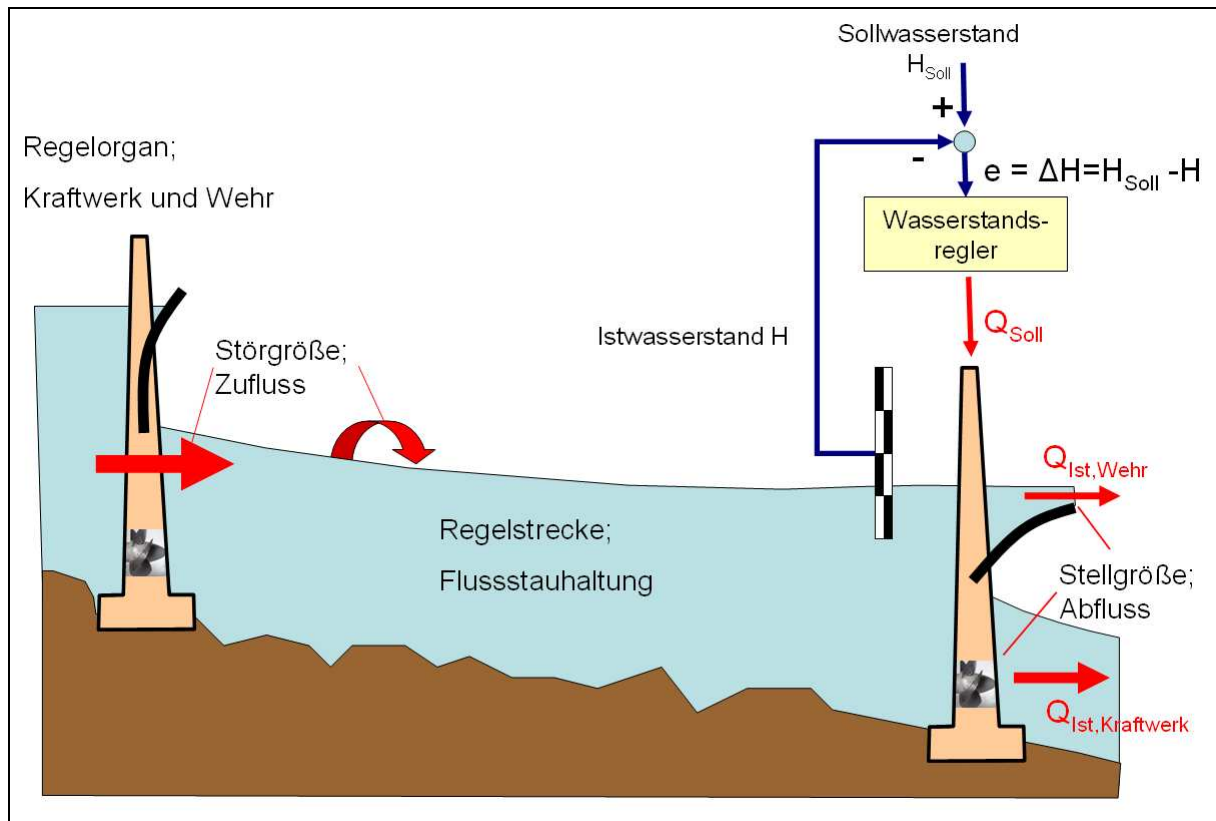


Bild 3: Schema einer Wasserstandsregelung

Die Wasserstandsregelung kann unter Berücksichtigung des Zuflusses auf ein kombinierte Abflusssteuerung und Wasserstandsregelung erweitert werden, wie z.B. die OW/Q-Regelung oder Wasserstandsregelung mit Antizipation. In Bild 4 ist der Informations- bzw. Signalfluss in der Leittechnik für beide Lösungen schematisch dargestellt. Dabei sind Informationen zum Wasserstand mit blauen Linien, zum Abfluss mit roten Linien und Maschinensignale mit grünen Linien gekennzeichnet.

Der Oberliegerzufluss ergibt sich aus der Summe der Abflüsse über Kraftwerk und Wehr oder aus einer Wasserstandsmessung in Verbindung mit einer Schlüsselkurve. Die Schleuungswassermenge wird meist vernachlässigt (gestrichelte Linie), da es sich um einen diskontinuierlichen Zufluss handelt. Damit kann der Zufluss berücksichtigt werden, bevor sich ein geänderter Zufluss in Wasserstandsänderungen am Regelungspegel bemerkbar macht. Dies erlaubt eine zeitlich vorausschauende Steuerung, da die Kenntnis des Zuflusses zeitlich versetzt in der Sollwertvorgabe berücksichtigt werden kann. Zusätzlich wirkt der Wasserstandsregler (OW-Regler) rückkoppelnd auf die Stellgröße, die OW-Regelung stellt im übertragenen Sinne die "Fehlerbehandlung" der mit Unsicherheiten behafteten Steuerung dar.

Die Störgrößenaufschaltung erfolgt entweder über eine Antizipation, d.h. die Störgröße wird auf die Führungsgröße aufgeschaltet, oder mit einer OW/Q-Regelung. Die Abkürzung

"OW/Q-Regelung" steht für eine Wasserstandsregelung (OW: Regelungsanteil) mit einer Störgrößenaufschaltung (Q: Steuerungsanteil). Wenn haltungsinterne Zu- oder Abflüsse nicht vernachlässigt werden können, können diese ebenfalls mit den Methoden der Antizipation bzw. Störgrößenaufschaltung berücksichtigt werden.

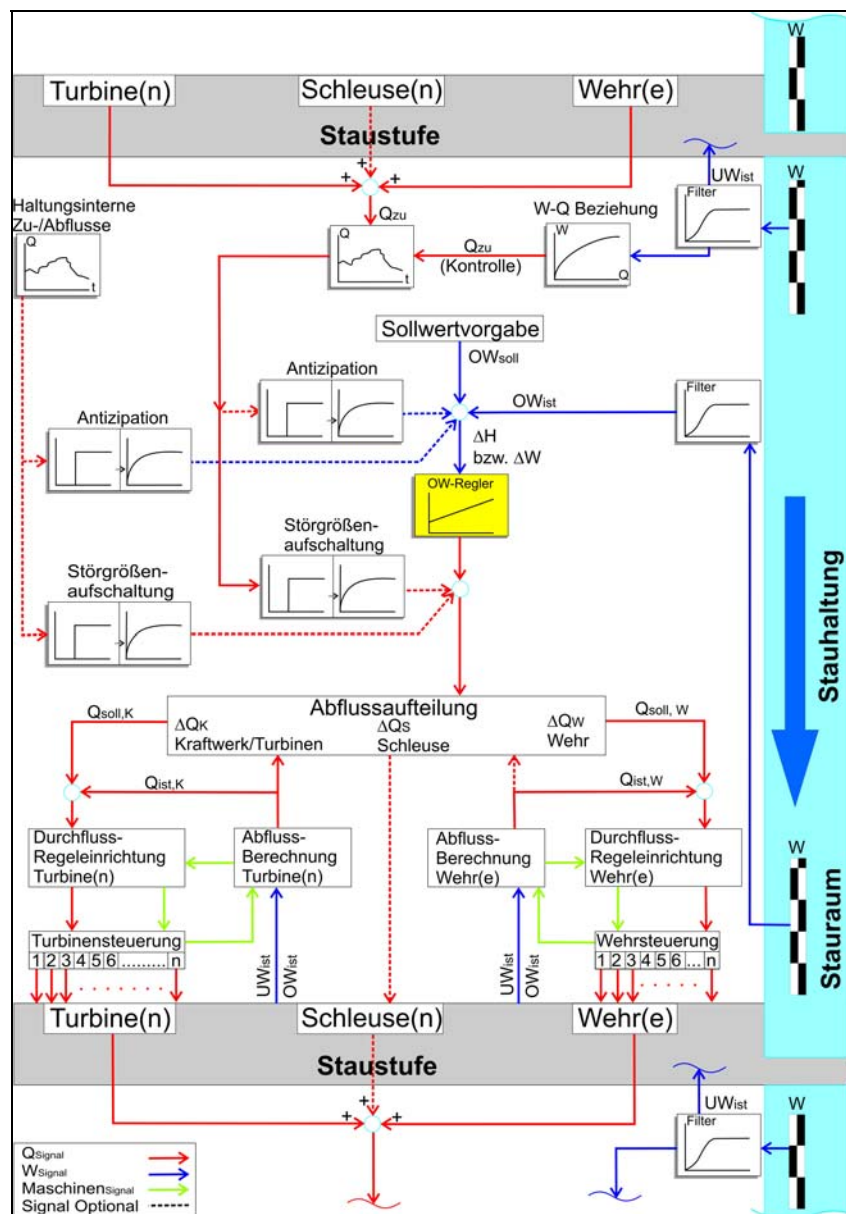


Bild 4: Schema des Signalfusses zur Steuerung und Regelung eines staugeregelten Flusses

Die OW/Q-Regelung ist für die Stauregelung der Stand der Technik. Aus der Regelabweichung ΔH wird über einen Regelalgorithmus der Regelungsanteil der OW/Q-Regelung ermittelt. Für Stauhaltungen wird hier i. d. R. ein PI-Regler genutzt, der mittels eines Proportional- und Integralalgorithmus den Wasserstand führt. Gleichung 1 beschreibt den PI-

Regelalgorithmus, der sowohl auf Änderungen der Regelgröße, hier der gemessene Wasserstand H , als auch der Führungsgröße, das Stauziel H_{Soll} bzw. OW_{Soll} , reagiert. Um den Einfluss von schleusungs-, schiffs- und windinduzierten Wellen in den Wasserstandsmessungen H bzw. OW_{Ist} herauszufiltern, ist jeder Wasserstandsmessung ein digitales Filter nachgeschaltet.

$$\begin{aligned}
 Q_{PI}(t) &= k_P \cdot \Delta H(t) + k_I \cdot \int_0^t \Delta H(t) \cdot dt \\
 &= k_R \cdot \left[\Delta H(t) + \frac{1}{T_N} \cdot \int_0^t \Delta H(t) \cdot dt \right] \quad (1)
 \end{aligned}$$

Q_{PI}	$[m^3/s]$	Abflussgröße aus dem PI-Regelalgorithmus
ΔH	$[m]$	Regelabweichung ($H_{\text{Soll}} - H$)
H_{Soll}	$[m]$	Sollwasserstand (in Bild 2: OW_{soll})
H	$[m]$	Istwasserstand (in Bild 2: OW_{Ist})
k_R, k_P	$[m^2/s]$	Regelparameter ($k_R = k_P$)
k_I	$[m^2/s^2]$	Regelparameter
T_N	$[s]$	Nachstellzeit (\cong Laufzeit; $T_N = k_P / k_I$)

Der PI-Regler ist ein kurzfristiger, passiver Regler, der erst reagiert, wenn der Wasserstand vom Stauziel abweicht. Die zeitlich vorausschauende Störgrößenaufschaltung lässt den Regelungsanteil klein ausfallen, wenn das Fließverhalten der Stauhaltung gut abgeschätzt werden kann. Der Sollabfluss ergibt sich aus der Addition von Steuerungs- und Regelungsanteil. Der Abflussverteiler übernimmt die Beaufschlagung der Wehre und Turbinen entsprechend vorliegender Fahrpläne. Die Umsetzung der vorgegebenen Sollwerte erfolgt in der untergelagerten Wehr- und Turbinensteuerung durch Stellbefehle, wenn sich der Soll- vom Istabfluss unterscheidet. Der Istabfluss wird über Kennlinien bestimmt: Bei Turbinen über die Leistung, die Fallhöhe und den Wirkungsgrad sowie bei Wehrverschlüssen über die Öffnungsweite sowie den Ober- und Unterwasserstand.

Die OW/Q-Regelung ist damit eine Betriebsweise, die Wasserstandsregelung und Abflusssteuerung miteinander verknüpft. Im regelungstechnischen Sprachgebrauch wird sie auch als einschleifiger Regelkreis mit Störgrößenaufschaltung auf das Stellglied bezeichnet.

1.1.3 Ziele des FuE-Vorhabens

In diesem Themenkomplex ist eine Aufgabe der BAW, die Regelung für die Staustufen zu konzipieren, zu parametrisieren und die Funktionsweise der automatisierten Abfluss- und Stauzielregelung nachzuweisen. Stand der Technik ist es heute, Stauhaltung und Leittechnik

in einem mathematischen Modell abzubilden, um den Regler zu untersuchen und zu parametrisieren, die Auswirkungen auf die Stauhaltung zu beurteilen und Sonderfälle im Staustufenbetrieb gefahrlos testen zu können. Die BAW geht hier einen Schritt weiter, indem zusätzlich das Stellglied Wehr in einem mathematischen Modell abgebildet wird (BAW, 2004, Gebhardt und Schmitt-Heiderich, 2008). Dies ist nicht üblich, wie Arnold und Sawodny (2008) in der Literaturstudie aufzeigen. Für die Modellierung des Bauwerkes wird eine Wehrprogrammsteuerung aufgebaut, die mit den Bauwerks- und Maschinenkennwerten den Sollabfluss in Stellbefehle umsetzt. Aus der aktuellen Lage der Wehrverschlüsse und dem Wasserstand am Wehr resultiert der Istabfluss über das Stellorgan Wehr, der im nächsten Simulationszeitschritt als Randbedingung für das Modell der Regelstrecke angesetzt wird.

Die Vernetzung der Mess-, Regel- und Stellgrößen mit den hydraulischen Berechnungen erfolgt mit der Entwicklungsplattform MATLAB & Simulink, die aufgrund zahlreicher Erweiterungen für Mess- und Regeltechnik sowie Signalübertragung ein Standardwerkzeug in Forschung und Industrie ist. Über eine C/C++ Schnittstelle wird das hydronumerische Modell eingebunden.

Mit dem an der BAW entwickelten Verfahren werden alle relevanten Prozesse möglichst wirklichkeitsgetreu abgebildet. Nachteilig an dem Verfahren ist, dass dieses den klassischen Methoden der Regelungstechnik nicht oder nur mit hohem Aufwand zugänglich ist. Damit wird die Schnelligkeit und Stabilität der Regelung nur für die untersuchten Szenarien nachgewiesen. Diesen Nachteil umgeht man durch die Untersuchungen möglichst zahlreicher Szenarien mit unterschiedlicher Charakteristik. Im Gegensatz zu dieser aufwändigen Vorgehensweise existieren einfache Verfahren, wie z.B. der Ansatz nach Kühne (1975), der die Regelungsparameter mit systemtheoretischen Methoden bestimmt. Nachteilig daran ist die stark vereinfachte Beschreibung der Prozesse, weswegen dieser Ansatz nur zur „groben Vordimensionierung“ geeignet ist.

Die Erfahrungen zeigen, dass die Methode der BAW zielführend ist und sich der Zeitaufwand lohnt. Eine vereinfachte Beschreibung der Prozesse würde zwar eine schnellere Parametrisierung des Reglers ermöglichen, aber den Aufwand an anderer Stelle, etwa bei der Betreuung des Wirkbetriebes, deutlich erhöhen. Daher lag ein Fokus in diesem FuE-Vorhaben auf einer Standardisierung der Methode, um die Dimensionierung der Leittechnik "halbautomatisch" durch den Rechner erledigen zu lassen.

Die Arbeiten in dem FuE-Vorhaben beschränkten sich zwar auf den lokalen Regler, die Erfahrungen aus dem Betrieb zeigen aber, dass es sinnvoll ist, die lokalen Regelungen mit einer übergeordneten Koordination zu verknüpfen. Dies ist Gegenstand weiterer Untersuchungen in der BAW und Thema eines weiteren FuE-Vorhabens.

1.2 Bedeutung für die WSV

Jede Regelung beschreibt ein rückgekoppeltes Systemverhalten, bei der durch Vorgabe der Stellgrößen an den Regelorganen, üblicherweise Kraftwerk und Wehr, der Wasserstand der Regelstrecke geführt wird. Bei fehlerhaft ausgelegtem Regelungssystem bzw. Regelungsparametern können instabile Zustände in der Flusstauhaltung hervorgerufen werden, was sich in aufklingenden Wasserstandsschwingungen zeigt. Daher können die Regelparameter nicht im Betrieb bestimmt werden, diese müssen vorab bereitgestellt werden. Die Auswirkungen unterschiedlicher Bewirtschaftungsstrategien kann vorab durch die BAW analysiert werden, diese müssen nicht durch aufwändige und eventuell die Schifffahrt behindernde Naturversuche ermittelt werden.

Weitere Anforderungen der WSV an eine automatisierte ASR und die Bedeutung der ASR für die WSV können in den BAWMitteilungen 96 in dem Beitrag von Hörter (2012) nachgelesen werden.

2 Ergebnisse

Die Ergebnisse des FuE-Vorhabens sind in den BAWMitteilungen 96 (2012) in zahlreichen Artikeln ausführlich dokumentiert. In Arnold et al. (2012) wird der Stand von Wissenschaft und Technik zur ASR erläutert, Schmitt-Heiderich et al. (2012) beschreiben ausführlich den Einfluss der Stellorgane und Schmitt-Heiderich und Gebhardt (2012) den Einfluss der Regelstrecke auf die Abfluss- und Stauzielregelung. Der Einfluss der Messwertfilterung wird von Gebhardt et al. (2012) erläutert. Wohlfart und Gebhardt (2012) beschreiben das Model-Based-Design und die automatische Codegenerierung und zeigen Wege auf, wie die am Rechner entwickelten Algorithmen auf eine Zielplattform (speicherprogrammierbare Steuerung SPS) übertragen werden können.

Durch die Modellierung zahlreicher nicht-linearer Prozesse ist eine Stabilitätsbetrachtung der Regelung nicht möglich. Mit der datenbankgestützten Simulation der möglichen Parameterkombinationen werden stabile Regelungsparameter erhalten (Schmitt-Heiderich und Belzner, 2012). Der Weg von den Voruntersuchungen bis zur Inbetriebnahme einer ASR wird in Gebhardt und Wohlfart (2012) beschrieben.

Das FuE-Vorhaben ist mit dem BAWMitteilungen 96 (2012) abgeschlossen. Die Texte dieses Mitteilungsblattes stehen unter http://www.baw.de/de/die_baw/publikationen/mitteilungsblaetter/index.php.html als Download bereit.

In den BAWMitteilungen 96 wird in Arnold et al. (2012) der Inhalt einer Literaturstudie verkürzt wiedergegeben. In diesem Beitrag zu den BAWMitteilungen wird nur auf jene Literatur Bezug genommen, die sich im weitesten Sinne mit der Steuerung und Regelung von Flussstauhaltungen beschäftigt. Diese Literaturstudie wurde im Auftrag der BAW am Institut für Systemdynamik der Universität Stuttgart durchgeführt (Arnold und Sawodny, 2008). Gegenstand der Studie sind etwa 200 Veröffentlichungen in referierten Zeitschriften, Tagungsbänden zu Konferenzen und weiteren Quellen. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die recherchierten wissenschaftlichen Zeitschriften.

Water Resources Research	38(2002)–44(2008)
Journal of Water Resources Planning and Management	123(1997)–134(2008)
Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering	123(1997)–134(2008)
Journal of Irrigation and Drainage Engineering	124(1998)–134(2008)
- insbesondere 124(1998)1: canal automation	
at – Automatisierungstechnik	48(2000)–56(2008)
Automatica	33(1997)–44(2008)
IEEE Transactions on Automatic Control	45(2000)–53(2008)
Applied Mathematical Modelling	22(1998)–32(2008)

Tabelle 1: Recherchierte Zeitschriften

Die Literaturstudie zeigt eine Tendenz hin zu komplexeren Regelungsverfahren, die die Regelungsziele besser, aber dafür mit aufwändigeren Methoden erfüllen. Der überwiegende Teil der Literatur bezieht sich auf die Modellierung und den Reglerentwurf von Bewässerungssystemen und nur ein geringer Anteil befasst sich mit der Regelung von Flussstauhaltungen. Während für die Bewirtschaftung von Flussstauhaltungen zumeist klassische regelungstechnische Verfahren und modell-prädiktive-Regelungsansätze (MPR) eingesetzt werden, kommen bei Bewässerungssystemen sämtliche Ansätze der modernen Regelungstechnik zur Anwendung. Allerdings ist deren praktische Umsetzung nicht immer nachvollziehbar dokumentiert.

Die fachliche Kommunikation beider Arbeitsgebiete erscheint wenig ausgeprägt, obwohl mit der geregelten Bewirtschaftung eine ähnliche Aufgabenstellung vorliegt. Allerdings ist die Variabilität des Abflusses in der Flussstauhaltung in der Regel wesentlich größer. Die entscheidende Voraussetzung vieler Modellansätze, insbesondere die Vereinfachung und Linearisierung der de Saint-Venant-Gleichungen, ist ein konstanter oder langsam veränderlicher Durchfluss mit geringer Variabilität. Damit ist der überwiegende Anteil der vereinfachten Ansätze für die Flussstauhaltungen nicht nutzbar. Ein weiterer Unterschied besteht darin, dass bei Flussstauhaltungen die beschreibenden Zeitkonstanten der Regelung abflussabhängig sind, während sie bei Bewässerungssystemen nahezu konstant sind.

Die Literaturstudie (Arnold und Sawodny, 2008) ist in Anlage 1 vollständig dokumentiert.

3 Literatur

Arnold, E. und Sawodny, O. (2008): Parametrisierung von Reglern zur automatisierten Abfluss- und Stauzielregelung. Literaturstudie. Institut f. Systemdynamik der Universität Stuttgart, 14. November 2008

Arnold, E., Schmitt-Heiderich, P., Sawodny, O. (2012): Parametrisierung von Reglern zur automatisierten Abfluss- und Stauzielregelung (ASR) – Stand von Wissenschaft und Technik. In: BAWMitteilungen Nr. 96, 2012, S. 23-64.

BAW (2004): Numerische Simulation von Hydraulik und Leittechnik zur Optimierung der automatisierten Steuerung und Regelung von Wehren und Wasserkraftwerken. In: Tätigkeitsbericht der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Wasserbau im Binnenbereich, S. 54-58

BAWMitteilungen (2012): Automatisierte Abfluss- und Stauzielregelung (ASR). ISSN 2190-9199; Heft 96; November 2012;

Föllinger, O. (1994): Regelungstechnik; 8. überarbeitete Auflage, Verlag Hüthig GmbH Heidelberg

Gebhardt, Michael und Schmitt-Heiderich, Peter (2008): Entwicklung und Simulation von Regelalgorithmen für Staustufen an Bundeswasserstraßen. Wasserwirtschaft 6 / 2008, S. 16 ff.

Gebhardt, M., Schmitt-Heiderich, P., Zhang, B. (2012): Einfluss von Messgrößen auf die Regelgüte und Möglichkeiten zur Filterung relevanter Informationen. In: BAWMitteilungen Nr. 96, 2012, S. 99-110.

Gebhardt, M., Wohlfart, S. (2012): Die automatische Regelung einer Stauhaltungskette – Von den Voruntersuchungen bis zur Inbetriebnahme der automatisierten Moselstaustufen. In: BAWMitteilungen Nr. 96, 2012, S. 135-144.

Hörter, P. (2012): Anforderungen der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung an die automatisierte Abfluss- und Stauzielregelung (ASR). In: BAWMitteilungen Nr. 96, 2012, S. 15-22.

Kühne, A. (1975): Flusstaueregulierung, Grundsätzliche Betrachtungen mit systemtheoretischen Methoden; Mitteilungen der Versuchsanstalt f. Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Technische Hochschule Zürich.

Schmitt-Heiderich, P. (2012): Motivation zum FuE-Vorhaben „Optimierungsverfahren für die Parametrisierung von Reglern der automatisierten Abfluss- und Stauzielregelung (ASR)“. In: BAWMitteilungen Nr. 96, 2012, S. 7-14.

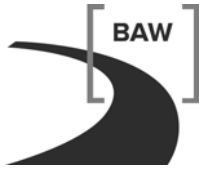
Schmitt-Heiderich, P., Gebhardt, M., Wohlfart, S. (2012): Der Einfluss der Stellorgane auf die Abfluss- und Stauzielregelung (ASR). In: BAWMitteilungen Nr. 96, 2012, S. 65-80.

Schmitt-Heiderich, P., Gebhardt, M. (2012): Der Einfluss der Regelstrecke Stauhaltung auf die Abfluss- und Stauzielregelung (ASR). In: BAWMitteilungen Nr. 96, 2012, S. 81-98.

Schmitt-Heiderich, P., Belzner, F. (2012): Verfahren zur Parametrisierung von PI-Reglern einer automatisierten Abfluss- und Stauzielregelung. In: BAWMitteilungen Nr. 96, 2012, S. 123-134.

Unbehauen, H. (2005): Regelungstechnik I; 13. Auflage, Vieweg Verlag, Wiesbaden

Wohlfart, S., Gebhardt, M. (2012): Automatisierung der Abfluss- und Stauzielregelung durch Model-Based Design und automatische Codegenerierung. In: BAWMitteilungen Nr. 96, 2012, S. 111-122.



Anlage 1

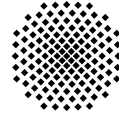
Literaturstudie

Parametrisierung von Reglern zur automatisierten Abfluss- und Stauzielregelung

Arnold, Eckhard und Sawodny, Oliver
Institut f. Systemdynamik der Universität Stuttgart
14. November 2008



Institut für Systemdynamik
Univ.-Prof. Dr. O. Sawodny



Universität Stuttgart

Literaturstudie
**Parametrisierung von Reglern zur
automatisierten Abfluß- und Stauzielregelung**

Dr.-Ing. Eckhard Arnold
Univ.-Prof. Dr. Oliver Sawodny

Universität Stuttgart
Institut für Systemdynamik
Pfaffenwaldring 9
D-70569 Stuttgart

E-Mail: {arnold,sawodny}@isys.uni-stuttgart.de

Tel.: +49 (0)711/685-66302

Fax: +49 (0)711/685-66371

14. November 2008

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
1 Zielstellung der Literaturstudie	6
1.1 Ausgangssituation / Problembeschreibung	6
1.2 Ziel der Literaturstudie	9
1.3 Literaturrecherche	10
2 Übersicht und Anforderungen	13
3 Projekt „Automatische Abfluß- und Stauzielregelung der Unteren Mosel“	17
4 Modellbildung	26
4.1 SAINT-VENANT-Gleichungen	27
4.2 Modellansätze durch Vereinfachung der SAINT-VENANT-Gleichungen	30
4.2.1 Linearisierung der SAINT-VENANT-Gleichungen	30
4.2.2 LAPLACE-Transformation und Übertragungsmatrix	31
4.2.3 Übertragungsmatrix und ID-Modell	34
4.2.4 Übertragungsmatrix und IDZ-Modell	35
4.2.5 Diffusive Wellengleichung	37
4.2.6 MUSKINGUM-Ansatz	38
4.2.7 Inkrementelles Volumenbilanzmodell	39
4.2.8 Diskretisierung der SAINT-VENANT-Gleichungen	40
4.3 Regelungstechnische Modellansätze	40
4.3.1 ID-Modell	41
4.3.2 Lineare parameter-variante Modelle	41
4.3.3 Identifikation der Modellstruktur	42
4.3.4 Einfache Modellansätze für Bewässerungskanäle	43
4.4 Identifikation	44
4.5 Modellierung des Wehrabflusses	45

5	Klassische regelungstechnische Ansätze	46
5.1	Abflußregelung, Stauzielregelung, OW/Q-Regelung	46
5.1.1	Stauraum-Kenngrößen: Retentions- und Laufzeit	46
5.1.2	Regelungsstrukturen	47
5.1.3	Untersuchungen an einem I-T _t -Modell	50
5.1.4	Bemerkungen zur „string instability“	54
5.2	Regelungsstrukturen für Bewässerungskanalsysteme	55
5.2.1	Klassifikation von Regelungsstrukturen	55
5.2.2	Dezentrale PI-Regler ohne und mit Entkopplung	57
5.2.3	Stabilitätsanalyse für dezentrale Regelung von Stauhaltungsketten	57
5.2.4	PI-Regler mit Stellgröße Wehrstellung	57
5.2.5	Störgrößenaufschaltung bei geplanten Wasserentnahmen	58
5.3	Ein- und mehrschleifige Regelungen	58
5.3.1	PID-Regler, Störgrößenaufschaltung, Kaskadenregelung	58
5.3.2	Einstellregeln für PID-Regler	61
5.3.3	Reglerentwurf anhand der Frequenzgangs der offenen Kette	62
5.3.4	Erweiterte PI-Ansätze zur Wasserstands- und Abflußregelung	65
5.3.5	Modifikationen zur Vermeidung des Windup-Effekts	65
5.3.6	SMITH-Prädiktor und Modellbasierte Regelung (IMC)	67
5.3.7	Reglerbemessung mittels Parameteroptimierung	69
5.4	Fuzzy-basierte Regelungskonzepte	73
6	Mehrgrößenregelungen	75
6.1	Zustandsregler	75
6.2	Zustandsrekonstruktion: LUENBERGER-Beobachter und KALMAN-Filter	77
6.3	Zustandsregler für Bewässerungskanalsysteme unter Verwendung eines diskretisierten Modells	78
6.4	Zustandsregler für Bewässerungskanalsysteme unter Verwendung vereinfachter Modelle	80
6.5	Unvollständige Zustandsrückführung / Ausgangsrückführung	82
6.5.1	Zentrale und dezentrale PI-Regler auf Basis eines ID-Modells	83
6.5.2	Regelungsentwurf mit Volumenbilanzmodell	84
6.5.3	Ausgangsrückführung für einen Modellkanal	85

7	Modell-prädiktive Regelungsansätze	86
7.1	Modell-prädiktiver Regler	86
7.2	Modell-prädiktive Regelung hybrider linearer Systeme	89
7.3	Zustandsschätzung auf bewegtem Horizont	90
7.4	Modell-prädiktiver Regler für die Moselstaustufe Trier	90
7.5	Übergeordnete Führung einer Stauhaltungskaskade mittels modell-prädiktiver Regelung	92
7.6	Prädiktive Regelung für Bewässerungskanalssysteme	94
7.6.1	Lokaler prädiktiver Regler mit MUSKINGUM-Modell	94
7.6.2	Lokaler prädiktiver Regler mit linearem Differenzgleichungsmodell	95
7.7	Weitere MPC-Ansätze	96
7.7.1	Modell-prädiktiver Regler für einen Experimentalkanal	96
7.7.2	Modell-prädiktive Regelung eines Hochwasserentlastungssystems	96
7.7.3	Modell-prädiktive Regelung für den Roten Fluß	97
7.7.4	Modell-prädiktiver Regler mit ID-Modell	97
7.7.5	Modellbasierter Prädiktivregler zur Abflußvergleichmäßigung	98
7.8	MPC unter Einbeziehung von Unsicherheiten	99
7.8.1	Multi-Modell-MPC für ein Entwässerungskanalssystem	99
7.8.2	Bewirtschaftung eines Energieversorgungssystems	100
8	Verteilt-parametrische, nichtlineare und stochastische Regelungsansätze	102
8.1	Verteilt-parametrische Regelungsansätze	102
8.1.1	Randsteuerung mittels RIEMANN-Invarianten	102
8.1.2	Weitere verteilt-parametrische Ansätze	103
8.2	Nichtlineare Regelungsansätze	103
8.2.1	Exakte Linearisierung	104
8.2.2	Nichtlinearer IMC-Regler	104
8.3	Stochastische Modellansätze	105
9	Sonstiges	106
9.1	Überwachung von Regelungssystemen	106
10	Zusammenfassung	108
	Literatur	112
	Weitere Literatur	122

1 Zielstellung der Literaturstudie

1.1 Ausgangssituation / Problembeschreibung¹

Zahlreiche Flüsse in Deutschland sind zur Verbesserung der Schifffahrt staugeregelt. Oft erfolgt dabei eine Nutzung des Wasserdargebotes zur Energieerzeugung. In der Regel werden Schleusen und Wehre an den Bundeswasserstrassen von der Bundesrepublik Deutschland betrieben, d. h. durch die dafür zuständigen Wasser- und Schifffahrtsämter, während der Betrieb der Kraftwerke in der Zuständigkeit Dritter liegt. Die gemeinsame Nutzung muß gewährleisten, daß ein planfestgestelltes Stauziel innerhalb einer vorgegebenen Toleranz eingehalten wird.

In diesem Themenkomplex ist eine Aufgabe der BAW, die Regelung für die Automatisierung der Wehre zu konzipieren bzw. zu parametrisieren und die Funktionsweise nachzuweisen. In der Abbildung 1.1 ist hierzu der Informations- bzw. Signalfluß in der Leittechnik einer automatisierten Staustufe schematisch dargestellt. Dabei sind Informationen zum Wasserstand mit blauen Linien, zum Abfluß mit roten Linien und Maschinensignale mit grünen Linien gekennzeichnet. Der Zufluß aus der oberliegenden Stauhaltung ergibt sich aus der Summe der Abflüsse über Kraftwerk und Wehr oder aus einer Wasserstandsmessung in Verbindung mit einer Schlüsselkurve. Um den Einfluß von Schleusungs-, Schiffs- und windinduzierten Wellen in den Wasserstandsmessungen herauszufiltern, ist jeder Messung ein digitaler Filter nachgeschaltet. Die Schleusungswassermenge wird meist vernachlässigt (gestrichelte Linie), da es sich um einen diskontinuierlichen Zufluß handelt.

Die Kenntnis des Zuflusses (Störgröße) in die Stauhaltung ist notwendig, wenn eine „zeitlich vorausschauende“ Regelung des Wasserstandes (Führungsgröße) den Zufluß bzw. Änderungen im Zufluß in der aktuellen Regelung berücksichtigen soll. Dies geschieht entweder bei der Wasserstandsregelung mit Antizipation (Aufschaltung der Störgröße auf die Führungsgröße) oder der OW/Q-Regelung. Wenn haltungsinterne Zu- oder Abflüsse nicht vernachlässigt werden können, können diese ebenfalls mit den Methoden der Antizipation bzw. Störgrößenaufschaltung berücksichtigt werden.

Der Regler (Regelalgorithmus) berechnet aus der Regelabweichung (Oberwasserstand – Stauziel) und der Störgrößenaufschaltung den Sollabfluß für die Staustufe und verteilt diesen auf die vorhandenen Wehrverschlüsse und Turbinen. Die Umsetzung der vorgegebenen Sollwerte erfolgt in der untergelagerten Wehr- und Turbinensteuerung durch Stellbefehle, wenn sich der Soll- vom Istabfluß unterscheidet. Der Istabfluß wird dabei über die Leistung und den Wirkungsgradverlauf der Turbinen und den Wehrbezugskurven, abhängig vom Ober- und Unterwasserstand der Staustufe, bestimmt.

¹Dieser Abschnitt wurde BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU 2006 entnommen, siehe auch BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU 2004.

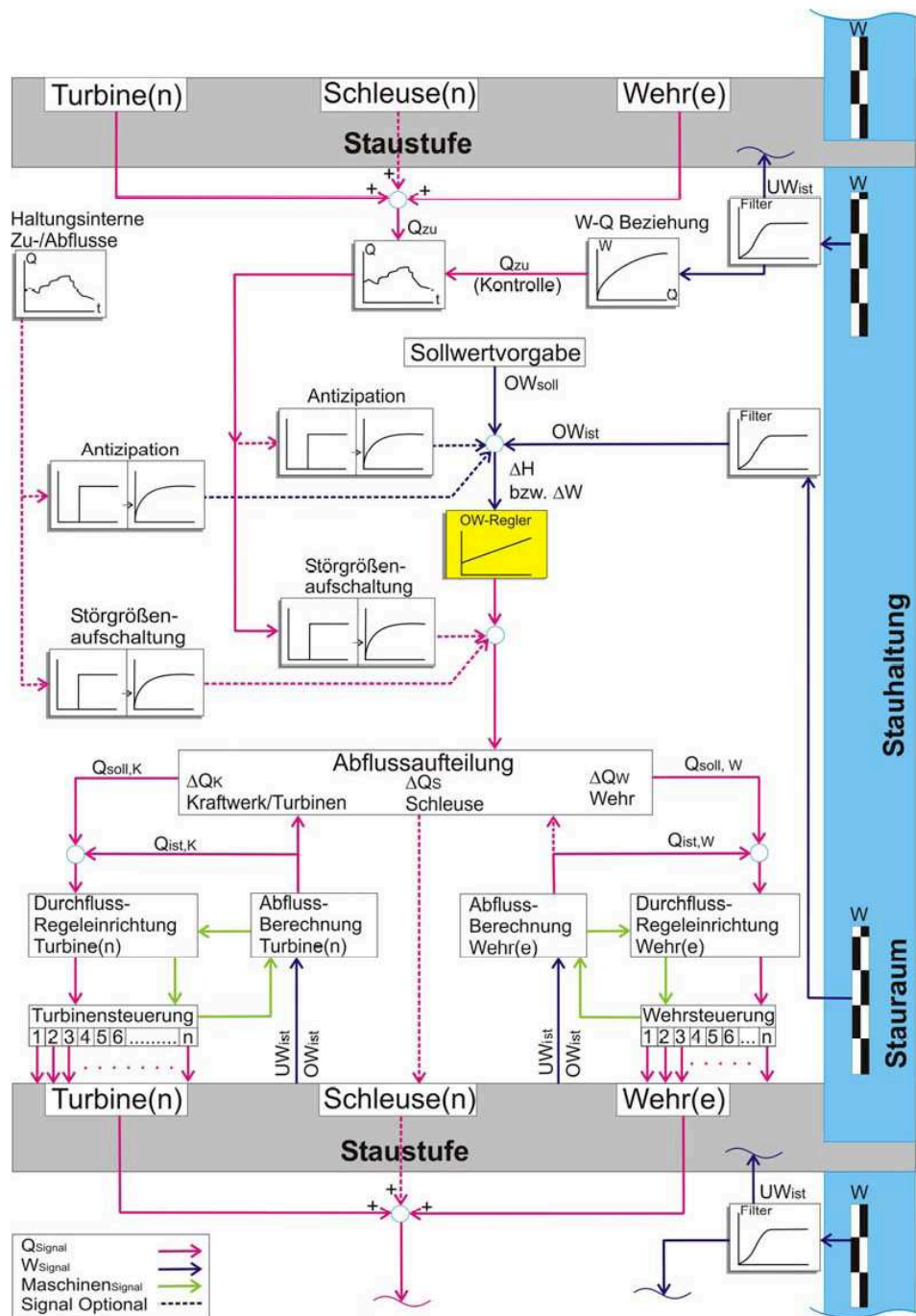


Abbildung 1.1: Schema des Signalfusses zur Steuerung und Regelung eines staugeregelten Flusses.

Die automatisierte Steuerung und Regelung einer Staustufe erfordert die Parametrisierung des Reglers, um die örtlichen Verhältnisse zu berücksichtigen. Die Parameter können nicht aus dem Betrieb der Staustufe abgeleitet werden, sie müssen vorab bereit gestellt werden.

Dies erfolgt in der BAW mit Hilfe einer Simulation von Bauwerk und Flußstrecke (HN-Modell), die über die Simulation der Leittechnik miteinander verknüpft werden. Die Hydraulik der Flußstrecke wird mit einem 1-D-instationären HN-Modell abgebildet. Dabei wird das SAINT-VENANT'sche Gleichungssystem über ein explizites Charakteristikenverfahren gelöst und liefert im Ergebnis ereignisabhängig die Wasserspiegellagen. Aus der Abweichung zwischen gerechneten und geforderten Wasserständen wird über die Simulation der Leittechnik (OW/Q-Regelalgorithmus) der Sollabfluß über das Wehr bestimmt, der in Abhängigkeit von baulichen und hydraulischen Voraussetzungen der Wehranlage in Stellbefehle umgesetzt wird. Daraus resultiert der Istabfluß über das Wehr, der wiederum als Randbedingung für die HN-Modellierung im nächsten Simulationszeitschritt angesetzt wird.

Mit dem an der BAW entwickelten Verfahren werden alle relevanten Prozesse möglichst wirklichkeitsgetreu wiedergegeben. Diese Untersuchungsmethode ist in verschiedener Hinsicht äußerst zeitaufwendig:

- Für die Beschreibung des Bauwerkes zur Bestimmung der instationären Abflußleistung müssen zahlreiche Charakteristiken des Wehres bekannt sein und modelliert werden (Wehrstellung, Verstellgeschwindigkeiten, Einschalt- und Umschaltvorgänge, W-Q-Beziehungen, etc.). Somit entsteht immer dann ein hoher Entwicklungsaufwand, wenn der Wehrtyp zum ersten Mal im Rahmen der Regelung untersucht wird. So liegt z. Z. für die Sektorwehre der Mosel ein Bauwerksmodell vor, doch läßt sich dieses nicht auf die Wehre z. B. an der Saar übertragen (Zugsegmente mit aufgesetzter Fischbauklappe).
- Bei der Simulation aller relevanten Prozesse entstehen hohe Rechenzeiten. Diese hohen Rechenzeiten erlauben es, lediglich wenige Parameterkombinationen zu untersuchen. Damit findet im mathematischen Sinne keine Optimierung statt, sondern es werden wenige Parameter in sinnvollen Bereichen variiert.
- Die Gutachten werden mit zunehmendem Grad an Detaillierung aufwendiger.

Nachteilig an dem BAW-Verfahren ist, daß dieses den klassischen Methoden der Regelungstechnik nicht oder nur mit hohem Aufwand zugänglich ist. Damit ist die Schnelligkeit und Stabilität der Regelung nur für die untersuchten Szenarien nachgewiesen.

Diese Untersuchungsmethode ist zeitaufwendig und im Ergebnis nicht zwingend eindeutig, da aufgrund der abzubildenden Prozesse zahlreiche Parameter vorhanden sind, die sich signifikant auf das Berechnungsergebnis auswirken können. Die Wahl der Parameter, sofern diese nicht betriebstechnisch vorgegeben sind, erfordert langjährige Erfahrungen. Da die Parameter der Filterzeiten, Hysteresen, Einschalt- und Ausschaltvorgänge und Umschaltvorgänge gewässer-, regional- und anlagenspezifisch sind, ist die Übertragung bewährter Regelungsparameter auf andere Anlagen nicht ohne weiteres möglich.

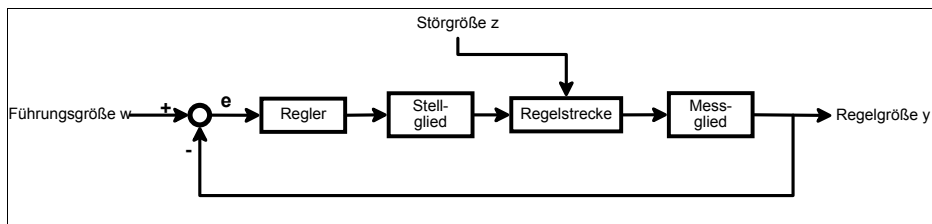


Abbildung 1.2: Schema einer Regelung.

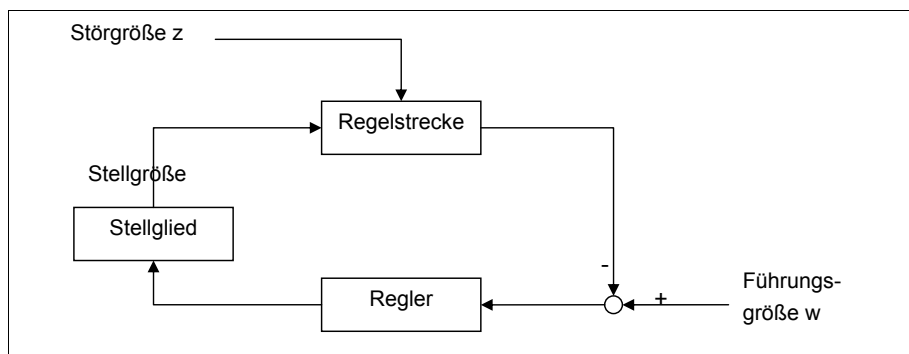


Abbildung 1.3: Schema der Regelung nach THEOBALD 1998b.

1.2 Ziel der Literaturstudie²

Üblicherweise wird die Grundstruktur einer Regelung nach dem Schema der Abbildung 1.2 dargestellt. Es variiert der Angriffspunkt der Störgröße z , welcher hier jedoch nicht weiter beachtet werden muß. In dieser Abbildung können Regelstrecke und Meßglied zusammengefaßt werden, da bei der Stauregelung durch die Messung keine wesentlichen Verzögerungen auftreten. Die Taktzeit der Leittechnik beträgt üblicherweise 1 Minute. Das zeitliche Verhalten wird im Wesentlichen durch das Verhalten der Regelstrecke dominiert.

In Abbildung 1.3 ist die Regelung als Strukturdiagramm so dargestellt, wie es von THEOBALD 1998b vorgeschlagen wurde. Regelstrecke und Meßglied sind hierbei zusammengefaßt.

Sofern die einzelnen Glieder der Abbildung 1.3 als LZI-Glieder mathematisch formuliert werden können, kann der Regelung analytisch untersucht werden. Beispielhaft wird der Ansatz von KÜHNE erwähnt, der in Kapitel 5.1.3 kurz erläutert wird.

Im Gegensatz zu dem Verfahren der BAW bestimmt der Ansatz von KÜHNE 1975 die Regelungsparameter mit systemtheoretischen Methoden. KÜHNE geht dazu von einem vereinfachten Modell der Regelstrecke aus und linearisiert um den Arbeitspunkt. Das Stellglied bleibt unbeachtet. Bei einer Kraftwerksregelung dürfte die Vernachlässigung des Stellglieds unproblematisch sein, da das Kraftwerk innerhalb einer Taktzeit (1 Minute) einen beliebigen Durchfluß innerhalb seines Abflußspektrums anfahren kann.

²Dieser Abschnitt wurde BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU 2006 entnommen.

Der Vorteil dieses Ansatzes liegt darin, daß die getroffenen Annahmen es erlauben, die Prozesse mit linearen Differentialgleichungen zu beschreiben. Diese linearen DGLs können mit der Laplace-Transformation in den Bildbereich überführt werden und sind dort den klassischen Analysemethoden der Regelungstechnik zugänglich (Nyquist-Kriterium, Bode-Diagramm, Wurzelortskurve, etc.). Das Verhalten der Regelung kann dann hinsichtlich Schnelligkeit, Stabilität, Schwingungsanfälligkeit, etc. untersucht werden. Nachteilig an dem Ansatz von KÜHNE ist die stark vereinfachte Beschreibungen der Prozesse.

Beide Bemessungsverfahren basieren auf unterschiedlichen Detaillierungsgraden. Zwischen diesen beiden Extremen der Bemessungsverfahren sollten Zwischenstufen existieren, die einerseits die Realität hinreichend genau beschreiben und andererseits den Aufwand gegenüber dem BAW-Verfahren deutlich reduzieren. Dies soll durch eine Literaturstudie geklärt werden (Erweiterung des Wissenstandes).

[...] Die Literaturstudie sollte auf die folgenden Fragen Antworten liefern:

1. Welche Ansätze existieren, mit denen der Regelkreis nach Abbildung 1.3 analytisch beschrieben werden kann (in Bildbereich darstellbar)?
2. Das Verhalten der Regelstrecke und des Stellglieds sind nichtlinear. Welche Linearisierungen um Arbeitspunkte sind denkbar, damit diese als LZI-Glieder formuliert werden können (vgl. auch Pkt. 1)
3. Kann der untergeordnete Wehrregelkreis (genauer Steuerkreis) in eine analytische Form für einen Kaskadenregelkreis gebracht werden?
4. Welche analytischen Ansätze existieren, mit denen eine Mehrzielregelung (Wasserstand und Durchfluß) betrieben werden kann?
5. Wie kann die Störgröße in den analytischen Ansätzen berücksichtigt werden?
6. Üblicherweise entspricht der Führungsgröße w das Stauziel. Existieren Ansätze, die als Führungsgröße den Durchfluß bzw. das Stauraumvolumen nutzen?
7. Inwieweit können die Ansätze auf Stauketten umgesetzt werden?
8. Der Betrieb einer Staukette hat oft die Optimierung der Bewirtschaftung mit der Ressource Wasser zum Ziel. Inwieweit können diese Ansätze zur Optimierung genutzt werden?
9. Sind für eine automatisierte Parameteroptimierung auch Kombinationen unterschiedlicher Verfahren möglich?

1.3 Literaturrecherche

Neben den Vorgaben durch den Auftraggeber BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU 2006 wurden im Rahmen dieser Literaturstudie die in Tabelle 1.1 aufgeführten wissenschaftlichen Zeitschriften sowie die Beiträge der in Tabelle 1.2 Konferenzen systematisch recherchiert. Weitere Quellen wurden durch Internetrecherchen erschlossen. Zudem flossen die durch eigene Vorarbeiten bekannten Literaturquellen ein. Der weitaus überwiegende Teil der Quellen bezieht sich auf Modellierung und Regelungsentwurf für Bewässerungskanalssysteme, nur ein geringer Anteil bezieht sich auf Flußstauungen und Entwässerungskanalssysteme.

Water Resources Research	38(2002)–44(2008)7
Journal of Water Resources Planning and Management	123(1997)–134(2008)4
Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering	123(1997)–134(2008)4
Journal of Irrigation and Drainage Engineering	124(1998)–134(2008)4
insbesondere 124(1998)1: canal automation	
at – Automatisierungstechnik	48(2000)–56(2008)6
automatica	33(1997)–44(2008)6
IEEE Transactions on Automatic Control	45(2000)–53(2008)4
Applied Mathematical Modelling	22(1998)–32(2008)12

Tabelle 1.1: Recherchierte Zeitschriften.

American Control Conference ACC	1999, 2003, 2005, 2007
European Control Conference ECC	1999, 2003, 2005, 2007
IEEE Conference on Systems, Man, and Cybernetics	1998
IEEE International Conference on Mechatronics & Automation	2005
IFAC World Congress	2002, 2005, 2008
Modelica	2005, 2008

Tabelle 1.2: Recherchierte Konferenzen.

Im folgenden wird versucht, die Arbeiten hinsichtlich der untersuchten Problemstellungen und Herangehensweisen zu systematisieren: Modellbildung (Kapitel 4), klassische regelungstechnische Ansätze (Kapitel 5), Mehrgrößenregelungen (Kapitel 6), modell-prädiktive Regelungsansätze (Kapitel 7) und verteilt-parametrische sowie nichtlineare Regelungsansätze (Kapitel 8). Zur Vermeidung von Wiederholungen wird zu Beginn jeden Kapitels eine kurze Übersichtsdar-

CANARI: www Database on Irrigation Canals (Malaterre, P.-O.)	http://www.canari.free.fr/canari.htm
Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft, Univ. Kassel (Theobald, S.)	http://www.uni-kassel.de/fb14/wasserbau
Project: Modelling and control of irrigation channels (Weyer, E.)	http://www.ee.unimelb.edu.au/research/cssip/res_projects/hybrid_sys
Seatzu, C.	http://www.diee.unica.it/~seatzu/publications.html
Water Resources Management, TU Delft	http://www.tudelft.nl/live/pagina.jsp?id=04773fbf-622e-409d-b63f-84836f108fad&lang=en
Journal of Irrigation and Drainage Engineering	http://pubs.asce.org/journals/irrigation/
Journal of Water Resources Planning and Management	http://scitation.aip.org/wro/
Water Resources Research	http://www.agu.org/journals/wr/

Tabelle 1.3: Informationsquellen im Internet.

stellung der als wesentlich erachteten Probleme und Lösungsansätze gegeben.

In Kapitel 3 werden zudem in Kurzfassung die Ergebnisse des in Kooperation zwischen der BAW und der Technischen Universität Ilmenau bearbeiteten Projekts „Automatische Abfluß- und Stauzielregelung der Unteren Mosel“ dargestellt.

2 Übersicht und Anforderungen

Die Auslegung der Abflußsteuerung¹ einer Flußstauhaltung muß sich an den Betriebszielen und den vorliegenden hydraulischen Verhältnissen und Möglichkeiten im Stauraum orientieren. NESTMANN und THEOBALD 1994, THEOBALD 1997, CUNO 1997, THEOBALD 1998b, THEOBALD 2006 nennen als übergeordnete Ziele:

- Erfüllung der Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt,
- Nutzung der regenerativen Energiequelle Wasserkraft,
- Erfüllung der Kriterien des Hochwasserschutzes,
- Erhalt der Vielfalt von Strömung und Wasserständen sowie
- Berücksichtigung des Brauch- und Nutzwasserbedarfs der Industrie.

CHAPUIS 1998 benennt ergänzend die Ziele für den Kraftwerksbetrieb:

- optimale Nutzung des Wasserangebots für die Energieproduktion und
- Bewirtschaftung des Stauraums zur Befriedigung einer vorübergehend höheren Energienachfrage.

Das Regelungsziel kann allgemein als gewünschte Beeinflussung der Wasserspiegellage und der Abflußverhältnisse im Stauraum bezeichnet werden und läßt sich untersetzen in

- die Regelungsaufgabe für eine einzelne Stauhaltung, beispielsweise die Einhalten des Wasserstandes am Referenzpunkt (z. B. OW-Pegel, Konzessionspegel oder Wendepegel) innerhalb der vorgegebenen Toleranzen,
- die Regelungsaufgabe für eine Stauhaltungskette, hier im wesentlichen die Dämpfung von Abflußwellen und Vermeidung einer Aufteilung des Abflusses sowie
- die (unterlagerte) Steuerung oder Regelung des Abflusses, die Aufteilung des Abflusses auf die unterschiedlichen Abflußorgane mit weiteren Güteforderungen wie z. B. Einsatz der Kraftwerke zumeist im Laufbetrieb, Schwellbetrieb lediglich zur Wellenglättung, siehe z. B. ALLMER, PFISTERER, SMOLAK u. a. 2000.

Übersichtsdarstellungen zu Anforderungen und eingesetzten Regelungsverfahren – insbesondere den klassischen Eingrößenregelungen – finden sich beispielsweise in THEOBALD 1998b, THEOBALD 1998a, THEOBALD 2006, CUNO 1998. Standard ist die in Abschnitt 1.1 bereits erwähnte OW/Q-Regelungsstruktur, bei der der Sollabfluß der Stauhaltung (Stellgröße) aus der Abweichung des Wasserstandes am Referenzpunkt (Regelgröße) von der Zielvorgabe und einem auf

¹„Abflußsteuerung“ bedeutet das Einstellen eines Abflusses an einem Kontrollbauwerk mit meß-, steuerungs- und regelungstechnischen Einrichtungen.

dem Zufluß in die Stauhaltung basierenden vorsteuernden Anteil bestimmt wird. Die Vorsteuerung als Störgrößenaufschaltung dient der Entkopplung der lokalen Regelkreise einer Stauhaltungskette. In einer untergeordneten Steuerung oder Regelung wird der Sollabfluß der Stauhaltung in entsprechende Wehr- und Turbinenstellungen umgesetzt.

In den letzten Jahren wurden modell-prädiktive Regelungsansätze, siehe z. B. Abschnitte 3, 7.4, 7.5, entwickelt, die gegenüber einer OW/Q-Regelung den Vorteil haben, daß zum einen im internen Modell das dynamische Verhalten der gesamten Stauhaltungskette berücksichtigt werden kann und zum anderen Nichtlinearitäten, Beschränkungen und unterschiedliche Zielstellungen (wie Einhaltung des Sollwasserstands *und* Abflußglättung) betrachtet werden können.

Die Anforderungen an die Bewirtschaftung von Bewässerungskanälen sind ähnlich, so werden von OOI und WEYER 2007 genannt:

- Einhaltung der vorgegebenen Wasserstände, da der Abfluß in die Seitenkanäle meist über Wehre fester Höhe erfolgt
- Verringerung oder Vermeidung von Wasserverlusten durch zu hohe Wasserstände, insbesondere im Endsegment des Kanals.

Bewässerungssysteme können sehr große Ausmaße annehmen, beispielsweise ist in CANTONI, WEYER, LI u. a. 2007 ein System in Australien (Goulburn-Murray Irrigation District) mit 7000 km Kanälen und einer Jahreswassermenge von 2 Gm^3 beschrieben, wobei ein einziger Kanal bei einer Länge von 74 km 35 Haltungen aufweist.

Für die Regelung von Bewässerungssystemen wird eine eigene Terminologie zur Klassifikation von Regelalgorithmen eingeführt, siehe MALATERRE, ROGERS und SCHUURMANS 1998. Dabei werden die folgenden Kriterien herangezogen:

- Regel-, Meß- und Steuergrößen: Die Größen werden den Haltungen des Bewässerungskanalsystems zugeordnet und hinsichtlich der Lage in der Haltung klassifiziert. Regelgrößen ist ein Sollwert (Zielgröße) zugeordnet. Beispiele für Regel- und Meßgrößen sind Wasserstände, Durchflüsse oder Speichervolumina. Steuer- oder Stellgrößen sind i. a. Wehrstellungen oder Abflüsse.
- Regelalgorithmus und Regelungsstruktur: Hier wird zwischen (Vorwärts-)Steuerung in offener Wirkungskette, geschlossenem Regelkreis und kombinierten Strukturen unterscheiden. Die Klassifikation umfaßt zudem die Zuordnung von Regel- und Steuergrößen, die für Eingrößenregelungen relevant sind. Beispielsweise kann der Wasserstand einer Haltung über die Stellgrößen Oberliegerzufluß oder Abfluß aus der Haltung selbst geregelt werden.
- Entwurfsverfahren: Eingrößenregelungen (z. B. PID-Regler), Mehrgrößenregelungen (z. B. Zustandsregler), Entkopplungsstrukturen.

In MALATERRE, ROGERS und SCHUURMANS 1998 werden beispielhaft Regelungsansätze nach dem entwickelten Schema klassifiziert.

MALATERRE und BAUME 1998 klassifizieren die (im Erscheinungsjahr 1998) aus der Literatur bekannten Modellierungs- und Regelungsansätze, ohne dabei auf Details einzugehen. Die Autoren stellen als großen Mangel das Fehlen geeigneter Benchmark-Kanalsysteme sowie einheitlicher Bewertungskriterien heraus. Daher ist eine vergleichende Bewertung der Ansätze schwierig oder unmöglich.

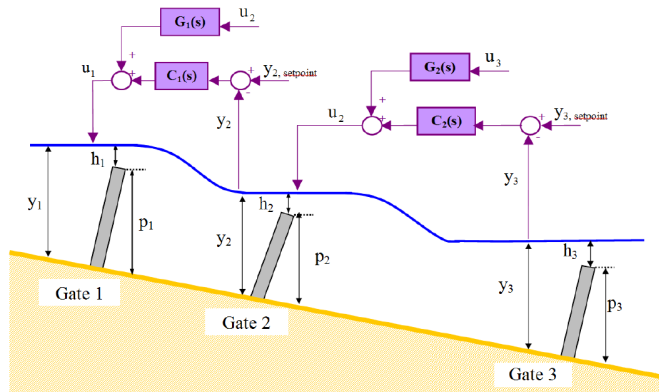


Abbildung 2.1: Bewässerungskanal: Schema einer Wasserstandsregelung nach OOI und WEYER 2007.

Einen solchen Benchmark (im folgenden als ASCE-Benchmark bezeichnet) stellen CLEMMENS, KACEREK, GRAWITZ u. a. 1998 vor. Es werden zwei Modellkanäle mit unterschiedlichen Parametern wie Querschnittsgeometrie, Sohlneigung und Wandreibung und jeweils acht Stauhaltungen vorgestellt, die sich an einem realen Bewässerungskanalsystem in den USA orientieren. Es werden die Testszenarien definiert, die sich insbesondere hinsichtlich der Wasserentnahmen unterscheiden. Um verschiedene Regelalgorithmen vergleichen zu können, werden eine Reihe von Gütekriterien, wie z. B. die maximale absolute Regelabweichung der Wasserstände, die integrale absolute Regelabweichung, die integrale absolute Durchflußänderung etc. vorgegeben.

ROGERS und GOUSSARD 1998 geben einen Überblick über die in Bewässerungskanalsystemen eingesetzten klassischen Regelungssysteme. Dies sind

- automatische hydromechanische Wehre, die ohne externe Antriebe lediglich durch den Ober- und Unterwasserstand bewegt werden,
- lokale 3-Punkt-Regler, die bei Überschreitung von Schwellwerten der Regelabweichung die Wehrstellung in vorgegebener Weise verändern,
- lokale PI- und PID-Regler, die als Regelgröße entweder den lokalen Oberwasser- bzw. Unterwasserstand („constant level close upstream/downstream“) oder den Wasserstand am stromab gelegenen Ende der Haltung („distant downstream“) regeln,
- heuristische Ansätze und Handsteuerungen.

Dies zeigt, daß (zumindest im Jahre 1998) die Mehrzahl der in der Praxis in großen Bewässerungssystemen eingesetzten Regelungen weit entfernt von derzeit eingesetzten effektiven Konzepten sind. Sicherlich werden bei anstehenden Modernisierungen der Anlagen auch die Regelungssysteme aktualisiert, jedoch wird wohl noch über Jahrzehnte ein Nebeneinander notwendig sein.

RUIZ-CARMONA, CLEMMENS und SCHUURMANS 1998 geben eine Reihe von Regelungsansätzen an, die in Bewässerungskanalsystemen eingesetzt werden (PID, SMITH-Prädiktor, Prädiktive Regelung, RICCATI-Regler) und zeigen, daß diese in zeitdiskreter Form einheitlich mittels Polynommatrizen (RST-Form) dargestellt werden können. Dieses Ergebnis ist nicht auf die konkrete

Anwendung beschränkt. **Anmerkung:** Die sehr allgemein gehaltenen Aussagen ermöglichen keinen konkreten Vergleich der Ansätze.

Die Anforderungen an Entwässerungskanalsysteme sind ähnlich denen an Bewässerungskanalsysteme. OVERLOOP, SCHUURMANS und BROUWER 2003 geben an, daß die Kanalsysteme in den Niederlanden sowohl zur Entwässerung als auch (in Trockenperioden) zur Bewässerung genutzt werden. Aufgabe der Wasserstandsregelung ist die Einhaltung des Wasserstands an vorgegebenen Punkten des Kanalsystems. Stellgröße ist der Abfluß, der im Entwässerungsfall durch Pumpen realisiert wird. Bei Abfluß ins Meer wird zeitenabhängig gepumpt bzw. der Abfluß durch das Öffnen von Schleusen gewährleistet, wobei im letzteren Fall die Betriebskosten deutlich niedriger sind. Der Wasserstand im Kanalsystem und die Verfügbarkeit der Stellgrößen sind vom Wind abhängig.

3 Projekt „Automatische Abfluß- und Stauzielregelung der Unteren Mosel“

In den Jahren 1999–2002 wurde in Zusammenarbeit zwischen der Bundesanstalt für Wasserbau, dem Wasser- und Schifffahrtsamt Trier, der Technischen Universität Ilmenau und dem Fraunhofer Anwendungszentrum Systemtechnik eine

„Automatische Abfluß- und Stauzielregelung der Unteren Mosel“

für die Staustufen Detzem, Wintrich und Zeltingen entwickelt. Das Ergebnis ist eine zweischichtige Regelungsstruktur nach Abbildung 3.1, bestehend aus lokalen OW/Q-Reglern der einzelnen Staustufen und einem modellbasierten (modell-prädiktiven) Koordinator. Die Vorteile einer solchen Struktur gegenüber einer reinen lokalen Regelung bzw. einer zentralen Lösung sind

- Eine optimierte Prozeßführung für das Gesamtsystem insbesondere hinsichtlich einer Abflußvergleichmäßigung. Die unterlagerte Regelung ermöglicht dabei die Verwendung vereinfachter Modelle im Koordinator und damit eine Begrenzung des Rechenaufwands.
- Eine schnelle Reaktion der lokalen Regler auf Störungen und Modellabweichungen, die vom Koordinator nicht erfaßt werden.
- Eine erhöhte Ausfallsicherheit, da die lokalen Regler auch bei Kommunikationsausfall eine zuverlässige Wasserstandsregelung gewährleisten.

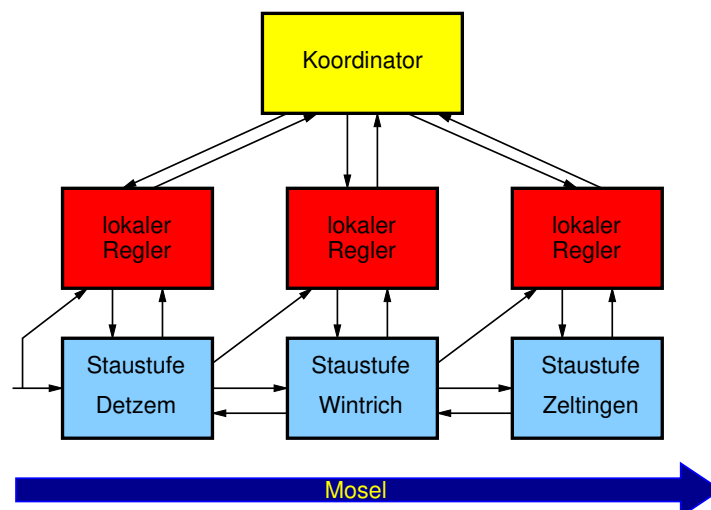


Abbildung 3.1: Koordinator und lokale Regler.

Diese Arbeiten basieren auf der im Rahmen des Projekts „Optimierte Wasserbewirtschaftung des Mittellandkanals und des Elbe-Seitenkanals“ (siehe z. B. [ARNOLD, LINKE und SIEBERT 1999](#), [ARNOLD und LINKE 2002](#), [ARNOLD und LINKE 2004](#)) entwickelten Methode zur Modellierung und modell-prädiktiven Regelung eines Kanalsystems, die – mit wesentlichen Erweiterungen, wie z. B. der Einbeziehung der Kraftwerke – zur Koordination eingesetzt und um die lokale Regelung ergänzt wird.

Die Ergebnisse sind im Detail in [LINKE und ARNOLD 2000](#) [LINKE und ARNOLD 2002](#) sowie in den Forschungsberichten [ARNOLD und LINKE 1999](#), [ARNOLD und LINKE 2001](#) und [LINKE und ARNOLD 2001](#) sowie in der Dissertation [LINKE 2005](#) dargestellt und sollen im folgenden kurz zusammengefaßt werden.

Anforderungen

Die Anforderungen an die Regelung ergeben sich aus der Zielstellung der WSV für das Gesamtprojekt nach [WSD SÜDWEST 1998](#):

- Automatikbetrieb im gesamten Abflußspektrum,
- Regelbereich NNQ bis zum Ende des Regelbereiches (Legen der Sektoren),
- Stauzieleinhaltung am OW-Pegel innerhalb eines vorgegebenen Toleranzbereiches, dessen Lage abflußabhängig ist (Stauziele gemäß Konzessionsbedingungen [WSD SÜDWEST 1997](#)),
- Abflußvergleichmäßigung: Dämpfung von Abflußwellen entlang der gesamten unteren Mosel und Vergleichmäßigung des Moselzufflusses in den Rhein,
- Stützen des Wasserstandes am UW der einzelnen Staustufen,
- Beaufschlagung der Stellorgane:
 - Regelung durch das örtliche Kraftwerk zwischen technisch minimal und maximal möglichem Abfluß,
 - stoßfreie Übergabe der OW/Q-Regelung zwischen Wehrregelung und Kraftwerk,
 - optionale Ausgabe von Steuervorgaben (Solldurchfluß) auch für das Kraftwerk,
 - Minimierung der Stellbefehle durch Ausnutzung des Toleranzbereiches.

Modellbildung

Die Modellierung der Stauhaltungskette erfolgt mit einem strukturtreuen Prozeßmodell auf der Basis der SAINT-VENANT-Gleichungen, siehe Abschnitt [4.1](#). Das Modell dient zur Simulation sowie zur Bemessung und zum Test des lokalen Reglers. In einer grobauflösenden Variante ist das HN-Modell Bestandteil des MPC-Algorithmus im Koordinator.

Zur numerischen Lösung des hyperbolischen partiellen Differentialgleichungssystems wird ein Finite-Volumen-Verfahren (GODUNOV-Methode [KRÖNER 1997](#), [LEVEQUE 1992](#), [ROE 1981](#), [OSHER 1984](#), [WEIYAN 1992](#)) mit einem Diskretisierungsgitter von 1 min/ \approx 600 m für das Simulationsmodell und 5 min/ \approx 3 km für das Optimierungsmodell verwendet.

Die Modellanpassung erfolgt anhand der Geometriedaten (Profile, Sohlhöhen), wobei eine trapezförmige Querschnittsfläche angenommen wird. Die Reibungskoeffizienten und der abflußwirksame Querschnitt werden anhand von Meßdaten (Naturversuche) mit einem Least-Squares-Verfahren angepaßt. Abbildung 3.2 zeigt exemplarisch gemessene und simulierte Wasserstände der Stauhaltung Detzem im Vergleich. Vergleichende Simulationen mit einem hochaufgelösten

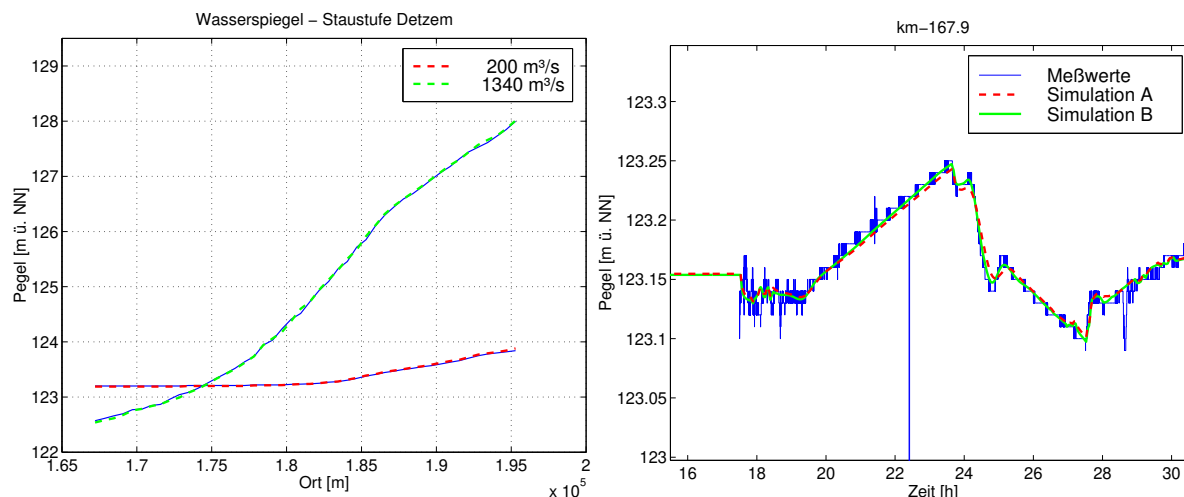


Abbildung 3.2: Modellvergleich Stauhaltung Detzem: Messung und Simulation des Wasserspiegels (links) und Vergleich mit Naturversuch (rechts).

HN-Modell (SIEBERT und WITTE 2000, BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU 2002) und Meßdaten (Naturversuche) ermöglichen eine Modellvalidierung.

Für die Stellorgane Wehr und Kraftwerk werden Modelle auf der Basis von Wehr- bzw. Turbinenkennlinien erstellt.

Durch gezielte Simulationsrechnungen können die Retentions- und Laufzeiten der Stauhaltungen in Abhängigkeit vom Abfluß ermittelt werden.

Lokaler Regler

Die lokale Regelung basiert auf der OW/Q-Struktur nach Abbildung 5.1, d. h. ein PI-Regler regelt die Regelgröße Oberwasserstand mit der Stellgröße Staustufenabfluß. Zusätzlich wird der Zufluß (Oberliegerabfluß) gefiltert auf die Stellgröße aufgeschaltet (Störgrößenaufschaltung). Ein Abflußverteiler verteilt den Staustufenabfluß auf das Kraftwerk und die Wehrfelder. Die untergeordnete Wehrsteuerung regelt die Sektorlagen entsprechend dem vorgegebenen Wehrabfluß unter Einbeziehung weiterer Anforderungen wie Minimalverstellungen, beschränkter Verstellgeschwindigkeit etc..

Kern des lokalen Reglers ist ein PI-Algorithmus mit abflußabhängigen Parametern. Die Parametrierung erfolgt anhand von Simulationsrechnungen an einem HN-Modell mit den Bemessungsregeln nach ZIEGLER-NICHOLS, siehe Abschnitt 5.3.2, für verschiedene Abflüsse. Die

aktuellen Reglerparameter werden basierend auf dem mittels Tiefpaß gefilterten Staustufenabfluß durch Interpolation der Reglerparametersätze für die Bemessungsabflüsse gewonnen (Gain-Scheduling).

Der Sollwert, das Stauziel, ist gemäß den Konzessionsbedingungen WSD SÜDWEST 1997 in Abhängigkeit vom Zufluß in die gesamte Stauhaltungskette (Pegel Trier UW) festgelegt. Zur Vermeidung von permanenten Umschaltvorgängen im Grenzbereich zwischen zwei Stauzielen wird der Meßwert mit einem Tiefpaß gefiltert und zudem eine Sperrzeit für den Stauzielwechsel vorgegeben.

Die Stellgrößenbeschränkungen (Wehrsektoren in Endlage, minimaler/maximaler Turbinendurchfluß) erfordern eine Erweiterung zur Vermeidung von Windup-Effekten. Eine gewisse Besonderheit gegenüber üblichen Stellgrößenbeschränkungen ist dadurch gegeben, daß beispielsweise im Hochwasserfall nicht die Stellgröße Staustufenabfluß beschränkt ist, sondern diese nach Erreichen der unteren Endlagen durch die Wehrsektoren nicht mehr zu beeinflussen ist. Daher wird die Anti-Windup-Erweiterung nicht mit einer Struktur nach Abbildung 5.13 realisiert, sondern durch Deaktivierung („Anhalten“) des Integrators im PI-Regler bei Erreichen der Stellgrößenbeschränkungen.

Ein stoßfreies Einschalten des PI-Reglers wird durch entsprechende Initialisierung des Integrators und eine Anstiegsbegrenzung im Sollwert erreicht.

Durch eine Ansprechempfindlichkeit (Totzone) im I-Anteil des Reglers wird in Kombination mit einer weiteren Ansprechempfindlichkeit (Minimalverstellung) in der Wehrsteuerung eine Reduktion der Verstellbewegungen der Wehrsektoren erreicht.

Der Oberliegerabfluß wird mittels Tiefpaß gefiltert und um die Retentionszeit verzögert auf den Abflußverteiler aufgeschaltet. Die Retentionszeit wird abflußabhängig anhand von HN-Simulationen ermittelt. Da im Fall der Staustufe Detzem der Oberliegerabfluß anhand der Pegelmessung im Unterwasser der Staustufe Trier berechnet wird, muß durch eine zusätzliche Filterung verhindert werden, daß Schwall- und Sunkwellen, die durch Stellhandlungen am Wehr Detzem hervorgerufen werden und insbesondere bei Niedrigwasser die Haltung nahezu ungedämpft stromaufwärts durchlaufen, als Zuflußänderungen interpretiert werden.

Der Abflußverteiler verteilt den Staustufenabfluß auf die Stellorgane. Hier sind die Wechselwirkungen zwischen Wehr- und Kraftwerksregelung zu beachten, siehe WSD SÜDWEST 1997. Für Sondersituationen wie Turbinenschnellschluß oder -notschluß ist die stoßfreie Übernahme des Staustufenabflusses durch das Wehr zu gewährleisten. Anhand von Simulationsrechnungen konnte gezeigt werden, daß die Vorgaben WSD SÜDWEST 1997 zum Wechsel der Betriebsarten im Übergangsbereich zwischen Wehr- und Kraftwerksregelung zu starken Pegelabweichungen führen können.

Koordinator

Der Koordinator ist als nichtlinearer modell-prädiktiver Regler (siehe Abschnitt 7.1) konzipiert. Basierend auf dem grobauflösenden HN-Modell ist eine Prognose der Wasserstands- und Abflußentwicklung der gesamten Stauhaltungskette möglich. Die Eingangsgrößen (Stellgrößen) im

Koordinatormodell sind die Staustufenabflüsse (Wehr- und Kraftwerksabfluß), die lokale Regelung wird dabei als ideal angenommen. Zustandsgrößen sind Wasserstände und Durchflüsse in den Diskretisierungszellen des grobauflösenden HN-Modells.

Die Bewirtschaftungsaufgabe für die Stauhaltungskette wird als nichtlineares Optimalsteuerungsproblem formuliert. Die Einhaltung der Vorgaben für die Oberwasserstände h_{OW} als primäres Ziel wird als harte Beschränkung umgesetzt:

$$h_{OW,i,min}^k \leq h_{OW,i}^k \leq h_{OW,i,max}^k, \quad k = \hat{k}, \dots, \hat{k} + K \quad (3.1)$$

Der Zeitindex k läuft dabei vom aktuellen Zeitschritt \hat{k} bis zum Ende des Optimierungshorizonts $\hat{k} + K$ mit der Abtastzeit $\Delta T \approx 30$ min, und i ist der Index der Stauhaltung. Die Minimal- und Maximalwerte ergeben sich aus dem jeweiligen Stauziel und dem vorgegebenen Toleranzband. Die Stauziele werden gemäß den Konzessionsbedingungen WSD SÜDWEST 1997 in Abhängigkeit vom Zufluß in die gesamte Stauhaltungskette (Pegel Trier UW) festgelegt. Gleiches gilt für die Pegeländerung

$$|h_{OW,i}^k - h_{OW,i}^{k-1}| \leq v_{max} \Delta T. \quad (3.2)$$

Die geforderte Stützung des Unterwasserpegels wird ebenfalls als Ungleichungsbeschränkung umgesetzt:

$$h_{UW,i}^k \geq h_{UW,i,min}, \quad k = \hat{k}, \dots, \hat{k} + K. \quad (3.3)$$

Im Gütekriterium wird die geforderte Abflußvergleichmäßigung in eine geeignete Bewertung der zeitlichen Änderung des Staustufenabflusses Q_i umgesetzt

$$J_Q = \sum_{k=\hat{k}}^{\hat{k}+K} \sum_i (Q_i^k - Q_i^{k-1})^2. \quad (3.4)$$

LINKE 2005 gibt weitere Möglichkeiten an, die zusätzlich die zeitliche und räumliche Abflußvariation bewerten. Weiterhin wird die Abweichung des Oberwasserstandes vom Stauziel $h_{OW,Ziel}$ bewertet

$$J_h = \sum_{k=\hat{k}}^{\hat{k}+K} \sum_i (h_{OW,i}^k - h_{OW,Ziel,i}^k)^2. \quad (3.5)$$

Die Einbeziehung eines vereinfachten Kraftwerksmodells gestattet die Berechnung der erzeugten elektrischen Leistung in Abhängigkeit von Ober- und Unterwasserstand und Staustufenabfluß, die zeitabhängig mit dem Ertragsfaktor c^k zu wichten ist

$$J_{El} = \sum_{k=\hat{k}}^{\hat{k}+K} \sum_i c^k P_{El}(h_{OW,i}^k, h_{UW,i}^k, Q_i^k). \quad (3.6)$$

Die Gesamtzielfunktion ergibt sich gewichtete Addition der Teilziele

$$J = \rho_Q J_Q + \rho_h J_h - J_{El} \longrightarrow \min \quad (3.7)$$

Das Optimalsteuerungsproblem, bestehend aus den Modellgleichungen des grobauflösenden HN-Modells, der Zielfunktion (3.7) und den Beschränkungen (3.1)–(3.3) wird numerisch

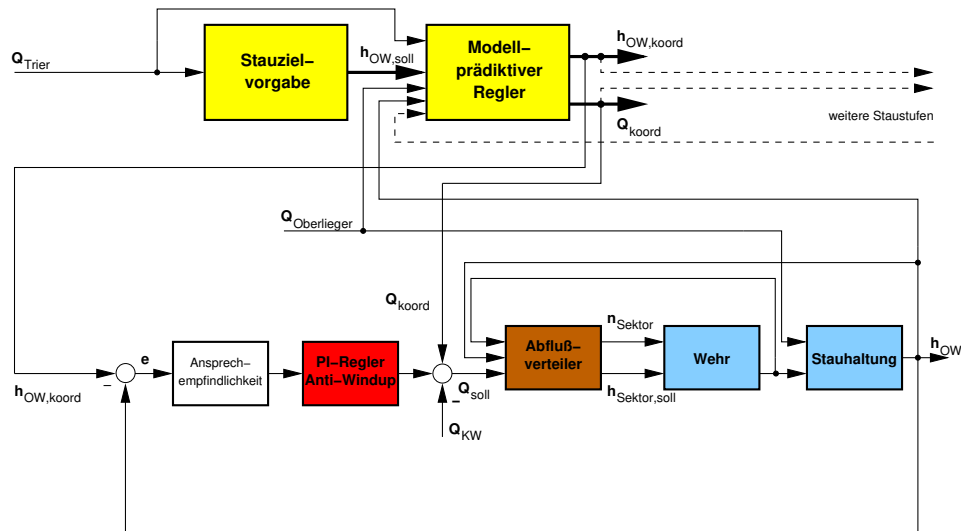


Abbildung 3.3: Anbindung des lokale Reglers an den Koordinator.

mit einem angepaßten Algorithmus gelöst, siehe LINKE 2005. Die harten Beschränkungen (3.1), (3.2), (3.3) sind in bestimmten Situationen aufgrund der Stauraumdynamik nicht einzuhalten. Um in solchen Fällen Optimalsteuerungsprobleme ohne zulässige Lösung zu vermeiden, wird die Formulierung der Ungleichungsbeschränkungen durch sogenannte „soft constraints“ geeignet erweitert, siehe Abschnitt 7.1.

Die Wichtungsfaktoren ρ_Q und ρ_h sowie der Optimierungshorizont K als wesentliche Tuningparameter des modell-prädiktiven Reglers werden anhand umfangreicher Simulationsrechnungen festgelegt. Der Optimierungshorizont K sollte die wesentliche Dynamik des Systems erfassen und muß daher etwa der Laufzeit einer Zuflußstörung durch die Stauhaltungskette entsprechen. Für das im Projekt betrachtete System der drei Mosel-Stauhaltungen sind das ca. 9 h.

Im Systemmodell des Koordinators werden ideale lokale Regler angenommen, im Ergebnis der Optimierungsrechnung stehen damit sowohl optimierte Wasserstands- als auch Abflußvorgaben zur Verfügung. Die Anbindung der lokalen Regler an den Koordinator erfolgt derart, daß die vom Koordinator berechneten Wasserstände als Sollwerte für die Wasserstandsregelung und die Abflüsse als Sollabflüsse direkt auf die Abflußverteiler der Staustufen aufgeschaltet werden, siehe Abbildung 3.3. Koordinations- oder Koppelvariable zwischen oberer (Koordinator) und unterer (lokale Wasserstandsregler) Steuerungsschicht sind sowohl die Abflüsse als auch die Sollwerte für die OW-Pegel der Staustufen. Somit wird eine parallele Antizipation realisiert.

Dies entspricht einer Zwei-Freiheitsgrade-Struktur nach Abschnitt 5.3 und Abbildung 5.11. Die Struktur der OW/Q-Regelung bleibt erhalten, und bei Ausfall des Koordinators oder der Kommunikation können die Werte durch die Vorgaben der Stauziele bzw. des (gefilterten) Zuflusses in die Stauhaltung ersetzt werden.

Die Zustandsgrößen des Koordinatormodells sind nicht direkt meßbar. Daher wird eine Zustandsschätzung auf bewegtem Horizont nach Abschnitt 7.3 zur Zustandsermittlung aus den Pegel- und Durchflußmessungen unter Berücksichtigung des grobauflösenden HN-Modells ein-

gesetzt. Der Optimierungshorizont \tilde{K} für die Zustandsschätzung ist im untersuchten System ca. 7h.

Simulativer Test und Ergebnisse

Sowohl die klassische OW/Q-Regelung als auch die koordinierte Bewirtschaftung der Stauhaltungskette mit modell-prädiktivem Koordinator und unterlagerten lokalen Reglern wurde anhand vorgegebener Szenarien, die Niedrig-, Mittel- und Hochwasserereignisse über jeweils mehrere Tage umfaßten, simulativ getestet. Dabei diente ein hochauflösendes HN-Modell als Originalersatz, d. h. in einer abschnittswisen Simulation wurden aus der HN-Simulation Pegelwerte als Meßwerte übernommen, und die vom Regelungssystem berechneten Wehrstellungen wurden dann als Eingangsgrößen für die HN-Simulation des folgenden Zeitabschnitts aufgeschaltet.

Die Ergebnisse zeigen, daß mit und ohne Koordinator die dynamischen Stauziele im vorgegebenen Toleranzbereich eingehalten werden und im gesamten Abflußspektrum ein zuverlässiger Betrieb des Regelungssystems gewährleistet werden kann. Mit einer reinen OW/Q-Regelung wird eine Abflubaufteilung vermieden, eine wirksame Abflußvergleichmäßigung ist jedoch nur mit einer koordinierten Bewirtschaftung zu erreichen, siehe Abbildungen 3.4 und 3.5. Die modell-prädiktive Koordination ermöglicht die Einbeziehung weiterer Teilziele wie die Stützung des Unterwasserstandes. Das Regelungssystem gewährleistet einen stoßfreien Übergang zwischen Wehrregelung und Kraftwerksbetrieb und zeigt ein befriedigendes Verhalten in Sondersituationen wie Turbinenschnellschluß. Die Frequenz der Wehrverstellungen kann durch geeignete Ansprechempfindlichkeiten im lokalen Wasserstandsregler und in der Wehrsteuerung reduziert werden, hier bestehen jedoch noch Reserven, beispielsweise kann das (dynamische) Verhalten der Wehrsteuerung im Prozeßmodell des Koordinators in vereinfachter Form berücksichtigt werden. Durch den Einsatz des Koordinators kann die Energieerzeugung der Kraftwerke in Mittelwassersituationen durch Ausnutzung des Toleranzbereichs der Wasserstände und Vermeidung von Wasserabgaben über die Wehre erhöht werden.

Die numerisch aufwendigen Berechnungen im Koordinator, die numerischen Lösung der nichtlinearen Optimalsteuerungsprobleme zur Zustandsschätzung und zur Steuerungsberechnung, ist zuverlässig und mit verfügbarer Rechentechnik unter Einhaltung der Echtzeitforderungen zu realisieren.

Ein wesentlicher Vorteil der zweischichtigen Steuerungsstruktur wird in ihrer Robustheit gesehen: im Normalbetrieb erfolgt eine optimierte Prozeßführung, während bei Kommunikationsausfall zwischen Koordinator und lokalen Reglern die lokale Wasserstandsregelung funktionsfähig bleibt.

Inbetriebnahme des lokalen Reglers für die Staustufe Detzem

Der erweiterte PI-Algorithmus für den lokalen Regler der Staustufe Detzem wurde durch die Fa. Tausch, Neubrandenburg implementiert und Ende 2000 in Detzem in Betrieb genommen, siehe Abbildung 3.6. Der Probetrieb verlief erfolgreich, eine weitere Anpassung der Reglerparameter war nicht erforderlich. Lediglich die Ansprechempfindlichkeit für den I-Anteil wurde

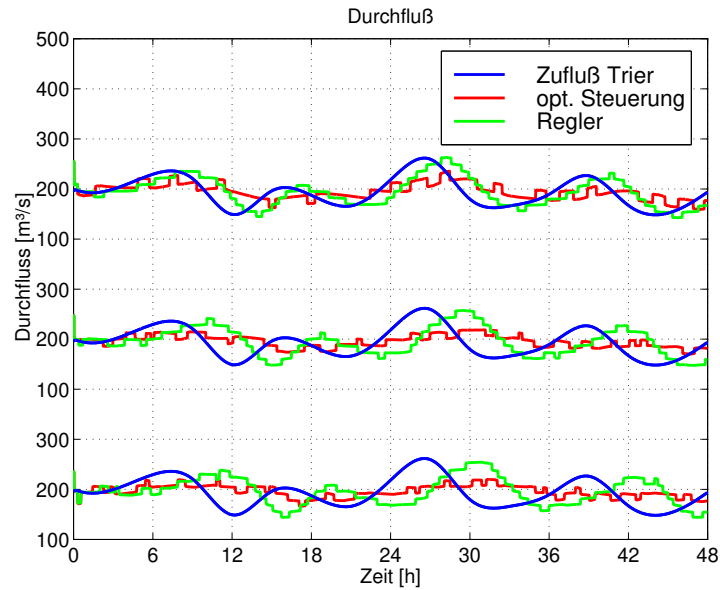


Abbildung 3.4: Vergleich lokaler Regler mit Koordinator (opt. Steuerung) für ein synthetisches Niedrigwasserszenario (von oben: Abfluß Detzem, Wintrich, Zeltingen).

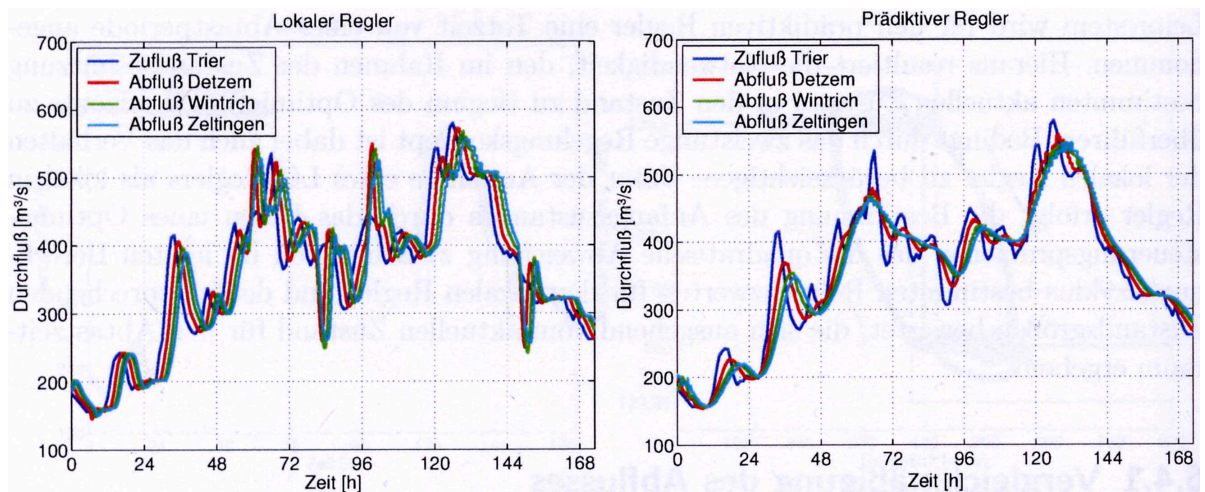


Abbildung 3.5: Abfluß der Staustufen Detzem, Wintrich und Zeltingen bei Nutzung von lokaler und koordinierter Bewirtschaftung für das Mittelwasserszenario vom 25.10.1992 bis 01.11.1992 (nach LINKE 2005).

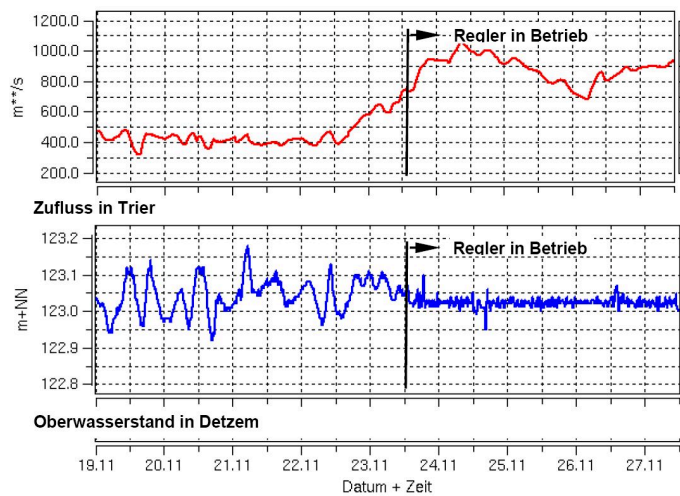


Abbildung 3.6: Inbetriebnahme des lokalen Reglers der Staustufe Detzem.

vergrößert und damit die Verstellfrequenz der Wehrsektoren geringfügig verringert. Für die Betriebsart ohne Koordinator wurde die Sollwertfolge ohnehin als weniger wichtig angesehen.

Im Rahmen des Projekts wurde lediglich der lokale Regler für die Staustufe Detzem realisiert, so daß weder das Zusammenwirken der lokalen Regler für die Stauhaltungskette noch der Koordinator praktisch getestet werden konnte.

4 Modellbildung

Ausgangspunkt einer physikalischen (strukturtreuen) Modellierung einer einzelnen Stauhaltung sind die SAINT-VENANT-Gleichungen, ein nichtlineares, hyperbolisches System partieller Differentialgleichungen, das durch entsprechende Rand- und Anfangsbedingungen, wie z. B. gegebene Zuflüsse oder Wehrkennlinien, ergänzt werden.

Von zahlreichen Autoren, z. B. CANTONI, WEYER, LI u. a. 2007 wird hervorgehoben, daß die SAINT-VENANT-Gleichungen zwar die betrachteten Prozesse theoretisch exakt beschreiben, der praktische Einsatz zur Identifikation und zum Steuerungsentwurf aufgrund der Komplexität begrenzt ist.

Daher werden unterschiedliche Ansätze zur Vereinfachung verfolgt mit dem Ziel, für den regelungstechnischen Entwurf geeignete Modelle zu erhalten, die dennoch die wesentlichen dynamischen Eigenschaften der Prozesse nachbilden. Dies wird beispielsweise erreicht durch

- Linearisierung der SAINT-VENANT-Gleichungen unter vereinfachenden Annahmen und Lösung einer Randwertaufgabe im Bildbereich der LAPLACE-Transformation. Im Ergebnis wird eine transzendente Übertragungsmatrix erhalten, die durch eine gebrochenrationale Übertragungsmatrix und Totzeit-Terme approximiert werden kann.
- Linearisierung und Diskretisierung der SAINT-VENANT-Gleichungen zur Gewinnung eines linearen Zustandsmodells,
- Vernachlässigung einzelner Terme der SAINT-VENANT-Gleichungen, wodurch die diffusive Wellengleichung und nach Linearisierung das HAYAMI-Modell erhalten wird, das durch ein LZI-System approximiert werden kann.

Ein wesentlicher Vorteil dieser Modellumformungen besteht darin, daß die Parameter der vereinfachten Modelle aus den Parametern der SAINT-VENANT-Gleichungen (Geometrie- und Hydraulikparameter) und weiteren Größen, beispielsweise dem Referenzabfluß der Linearisierung berechnet werden können. Diese Parameter werden als gegeben vorausgesetzt, da in vielen Fällen ein HN-Modell zur Simulation und Validierung vorhanden ist. Zudem kann eine einfache Adaption der Parameter an (langsam) veränderliche Abflüsse erfolgen.

Eine weitere Gruppe von Modellansätzen basiert auf einer einfachen Volumenbilanz, ggf. unter Berücksichtigung von Totzeiten. Diese Modelle sind ohne weitere Umformungen für einen klassischen linearen Regelungsentwurf geeignet. Die Modellparameter können durch Identifikation anhand von Meßdaten (oder Simulationsergebnissen mit einem HN-Modell) ermittelt werden. Da jedoch der Zusammenhang zu den physikalischen Parametern fehlt, kann eine Adaption nur heuristisch erfolgen. Gleiches gilt für Modellerweiterungen zur Nachbildung weiterer dynamischer Effekte, die ohne physikalische Begründung bleiben.

4.1 Saint-Venant-Gleichungen

Instationäre, eindimensionale Strömungsvorgänge in offenen Gerinnen können mathematisch mit den SAINT-VENANT-Gleichungen, einem nichtlinearen, hyperbolischen System partieller Differentialgleichungen beschrieben werden. Voraussetzungen sind

- eindimensionale Strömung, d. h. Durchfluß und Fließgeschwindigkeit werden querschnittsgemittelt betrachtet,
- geradlinige Strömungsrichtung, so daß die freie Oberfläche als horizontal über dem Querschnitt betrachtet werden kann,
- vernachlässigbare transversale Strömungsgeschwindigkeit,
- hydrostatische Druckverteilung,
- kleine Sohlneigung.

Zur Ableitung der SAINT-VENANT-Gleichungen, der Relation zu den NAVIER-STOKES- und Flachwassergleichungen sowie anderer grundsätzlicher Betrachtungen zur Gerinnehydraulik siehe beispielsweise THEOBALD 2006.

$$\frac{\partial A(\xi, t)}{\partial t} + \frac{\partial Q(\xi, t)}{\partial \xi} = q_l(\xi) \quad (4.1a)$$

$$\frac{\partial Q(\xi, t)}{\partial t} + \frac{\partial (Q(\xi, t)^2/A(\xi, t))}{\partial \xi} + gA(\xi, t) \frac{\partial H(\xi, t)}{\partial \xi} = gA(\xi, t) (S_0(\xi) - S_f(Q, H)) \quad (4.1b)$$

Gleichung (4.1a) ergibt sich aus der Massenerhaltung und Gleichung (4.1b) aus der Impulserhaltung in einem infinitesimalen Volumenelement. Die unabhängigen Variablen sind die Zeit t und die Ortskoordinate ξ in Längsrichtung des Gerinnes. A bezeichnet den benetzten Querschnitt, Q den über A gemittelten Durchfluß und H den Wasserstand. A und H sind über die Gerinnegeometrie (Breite B) verkoppelt:

$$A(\xi, t) = \int_0^{H(\xi, t)} B(\xi, h) dh. \quad (4.2)$$

Die Terme der rechten Seite der SAINT-VENANT-Gleichungen sind der seitliche Zufluß q_l und die Wirkung der Sohlneigung S_0 und der Wandreibung S_f .

Zur Beschreibung des Einflusses der Wandrauigkeit wird i. a. der Ansatz von CHEZY-MANNING verwendet

$$S_f(Q, H) = \frac{n^2 Q |Q|}{A^2 R_H^{4/3}}, \quad (4.3)$$

wobei n den MANNING-Faktor und R_H den hydraulischen Radius bezeichnet, der als Quotient aus A und dem benetzten Umfang P wiederum von H abhängt.

Alternativ kann die Wandrauigkeit mit einem Ansatz von STRICKLER beschrieben werden, siehe z. B. CHAPUIS und SACHS 1996

$$S_f(Q, H) = \frac{V^2}{k_{Str}^2 R_H^{4/3}} \quad (4.4)$$

Hier bezeichnet $V = Q/A$ die Strömungsgeschwindigkeit und k_{Str} den STRICKLER-Koeffizienten.

Der Beitrag des seitlichen Zuflusses q_l zur Impulsbilanz (4.1b) wird meist vernachlässigt. BAUME, MALATERRE, BELAUD u. a. 2005 geben $q_l \frac{Q}{A}$ für Zufluß und 0 für Abfluß aus der Stauhaltung an.

Gegebenenfalls ist die durch eine Windlast hervorgerufene Schubspannung τ mit einem quadratischen Ansatz in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit in die Impulsbilanz (4.1b) einzubeziehen.

Randbedingungen sind zumeist für den Zufluß in den Gerinneabschnitt (Position $\xi = 0$) der Länge L vorgegeben

$$Q(0, t) = Q_0(t) \quad (4.5a)$$

sowie als Abflußbedingung (Position $\xi = L$)

$$Q(L, t) = Q_L(t) \quad (4.5b)$$

oder als Wehrkennlinie

$$A(L, t) = f(Q(L, t)) \quad (4.5c)$$

oder – z. B. bei Abfluß in einen See – als

$$\frac{\partial Q}{\partial \xi}(L, t) = 0. \quad (4.5d)$$

Für einen rechteckigen Kanalquerschnitt der Breite B_0 vereinfachen sich (4.1) zu

$$B_0 \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial \xi} = q_l \quad (4.6a)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + 2 \frac{Q}{B_0 H} \frac{\partial Q}{\partial \xi} + \left(g B_0 H - \frac{Q^2}{B_0 H^2} \right) \frac{\partial H}{\partial \xi} = g A (S_0 - S_f) \quad (4.6b)$$

Unter bestimmten Bedingungen können einzelne Terme der SAINT-VENANT-Gleichungen vernachlässigt werden.

- Die diffusive Wellengleichung ergibt sich durch Vernachlässigung der Trägheitsterme, d. h. der ersten beiden Summanden in der Impulsgleichung (4.1b). Ein solcher Ansatz ist bei langsam veränderlichem Durchfluß berechtigt.
- Die kinematische Wellenapproximation ergibt sich bei zusätzlicher Vernachlässigung des dritten Summanden in der Impulsgleichung (4.1b). Damit ist das Reibungsgefälle gleich dem Sohlgefälle. Rückstauereffekte werden nicht mehr beschrieben, da die Ortsabhängigkeit des Wasserstandes entfällt.
- Den Normalabfluß erhält man bei zusätzlicher Vernachlässigung der zeitlichen Änderungen, d. h. im stationären Zustand.

Numerische Lösung der Saint-Venant-Gleichungen, Parameteridentifikation, Simulationssysteme¹

OOI, KRUTZEN und WEYER 2005 beschreiben eine Anpassung des MANNING-Faktors und von Wehrkoeffizienten an Pegelganglinien eines Bewässerungskanals. Die numerische Lösung der SAINT-VENANT-Gleichungen erfolgt mit einem PREISSMANN-Verfahren, und die Modellparameter werden mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate numerisch bestimmt. Die damit erreichte Modellanpassung ist signifikant besser als die mit Tabellenwerten der Parameter. Die Autoren heben hervor, daß nur wenige Untersuchungen zum Vergleich von Meßdaten aus realen Kanalsystemen mit HN-Simulationsergebnissen bekannt wären.

CHAPUIS 1998 gibt eine Methode zur Bestimmung des STRICKLER-Koeffizienten k_{Str} anhand von Meßwerten bei stationärem Durchfluß an, die auf der Auswertung der Impulsleichung (4.7b) beruht.

THAI 2005 entwickelt ein numerisches Verfahren zur numerischen Integration der SAINT-VENANT-Gleichungen, bei dem die Ortsableitung durch finite Differenzen ersetzt und das resultierende System gewöhnlicher Differentialgleichungen mit einem geeigneten Solver (hier einem BDF-Mehrschrittverfahren DAESOL) integriert werden (Linienmethode). Mittels Optimierungsansatz können Modellparameter (MANNING-Faktoren) bestimmt werden.

Die folgenden Simulationssysteme werden in der Literatur genannt:

- FLORIS (Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich)
- INSTA (BAW): Charakteristiken-Verfahren, siehe BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU 1999
- MODES (TU Delft): implizites PREISSMANN-Verfahren
- SIC (Cemagref): semi-implizites PREISSMANN-Verfahren, siehe BAUME, MALATERRE, BELAUD u. a. 2005
- SOBEK (Delft Hydraulics)
- MIKE 11 (DHI Water & Environment)
- HEC-RAS (U.S. Army Corps of Engineers)
- CanalCAD (Univ. of Iowa): implizites PREISSMANN-Verfahren
- KASSMO (Universität Karlsruhe): implizites PREISSMANN-Verfahren, siehe z. B. THEOBALD, CELAN und NESTMANN 2002

CLEMMENS, BAUTISTA, WAHLIN u. a. 2005 vergleichen häufig eingesetzte Simulationssysteme hinsichtlich der Flexibilität bei der Einbeziehung von anwenderseitig vorgegebenen Regelalgorithmen. Dies ist nur bei CanalCAD (FORTRAN-Routinen), MIKE 11 (Pascal-Routinen) und SOBEK (Matlab-Schnittstelle) in vollem Umfang möglich.

¹Zu diesen Themen wurde nicht gezielt recherchiert.

4.2 Modellansätze durch Vereinfachung der Saint-Venant-Gleichungen

4.2.1 Linearisierung der Saint-Venant-Gleichungen

Die Ableitung eines linearen Modells durch Linearisierung der SAINT-VENANT-Gleichungen und nachfolgende LAPLACE-Transformation wird in zahlreichen Arbeiten beschrieben, beispielhaft seien BAUME, SAU und MALATERRE 1998, LITRICO und FROMION 2002a, SCHUURMANS, BOSGRA und BROUWER 1995 genannt, die sich teilweise auf ältere Veröffentlichungen beziehen.

Eine stationäre Strömung liegt vor, wenn der benetzte Querschnitt $A = A_0(\xi)$, der Durchfluß $Q = Q_0(\xi)$ und der Wasserstand $H = H_0(\xi)$ zeitlich konstant sind. Ohne seitlichen Zufluß ($q_l = 0$) ergibt sich dann für ein prismatisches Gerinne aus den SAINT-VENANT-Gleichungen (4.1)

$$\frac{dQ_0(\xi)}{d\xi} = 0 \quad (4.7a)$$

$$\frac{dH_0(\xi)}{d\xi} = \frac{S_0 - S_{f0}(\xi)}{1 - \text{Fr}_0(\xi)^2} \quad (4.7b)$$

mit der FROUDE-Zahl

$$\text{Fr} = \frac{V}{C} = \frac{Q/A}{\sqrt{gH}} \quad \text{bzw.} \quad \text{Fr}_0 = \frac{V_0}{C_0} = \frac{Q_0/A_0}{\sqrt{gH_0}} \quad (4.8)$$

V ist die Strömungsgeschwindigkeit und C die Wellengeschwindigkeit. Die FROUDE-Zahl gestattet eine Klassifikation nach (im Gerinne i. a. vorliegenden) unterkritischem ($\text{Fr} < 1$, strömender Abfluß), kritischem ($\text{Fr} = 1$) und überkritischem ($\text{Fr} > 1$, schießender Abfluß) Strömungszustand.

Die nichtlineare Differentialgleichung (4.7b) beschreibt zusammen mit den Randbedingungen (4.5a), (4.5b) die Wasserspiegellinie im stationären Fall.

Werden nun die SAINT-VENANT-Gleichungen (4.1) in einer Umgebung der stationären Lösung $Q_0(\xi)$, $A_0(\xi)$, $H_0(\xi)$ linearisiert, so ergibt sich für die Abweichungen $q = Q - Q_0$, $h = H - H_0$ das lineare partielle Differentialgleichungssystem

$$B_0(\xi) \frac{\partial h(\xi, t)}{\partial t} + \frac{\partial q(\xi, t)}{\partial \xi} = 0 \quad (4.9a)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q(\xi, t)}{\partial t} + 2V_0(\xi) \frac{\partial q(\xi, t)}{\partial \xi} - \beta_0(\xi)q(\xi, t) + (C_0(\xi)^2 - V_0(\xi)^2)B_0(\xi) \frac{\partial h(\xi, t)}{\partial \xi} \\ - \gamma_0(\xi)h(\xi, t) = 0 \end{aligned} \quad (4.9b)$$

$B_0(\xi)$ ist die Wasserspiegelbreite im stationären Zustand. $\beta_0(\xi)$ und $\gamma_0(\xi)$ hängen u. a. von der Ortsableitung der stationären Wasserspiegellinie $\frac{dH_0}{d\xi}$ ab, die Bestimmungsgleichungen

$$\begin{aligned} \beta_0 &= -\frac{2g}{V_0} \left(S_0 - \frac{dH_0}{d\xi} \right) \\ \gamma_0 &= gB_0 \left((1 + \kappa)S_0 - (1 + \kappa - \text{Fr}_0^2(\kappa - 2)) \frac{dH_0}{d\xi} \right) \\ \kappa &= \frac{7}{3} - \frac{4A_0}{3B_0P_0} \frac{dP_0}{dH} \end{aligned} \quad (4.10)$$

sind beispielsweise in LITRICO und FROMION 2002a angegeben.

Gleichförmige Strömung liegt vor, wenn der benetzte Querschnitt A nicht vom Ort ξ abhängt und nach Gleichung (4.7b) das Reibungsgefälle gleich dem Sohlgefälle ist. Damit sind der Durchfluß Q_0 , die Geschwindigkeit V_0 und der Wasserstand H_0 konstant in Ort und Zeit. Bei gegebenem Durchfluß Q_0 läßt sich der zugehörige Normalwasserstand $H_n(Q_0)$ durch Auflösung der nichtlinearen Gleichung

$$\frac{n^2 Q_0 |Q_0|}{A_0^2 R_H^{4/3}} = S_0 \quad (4.11)$$

nach H bestimmen. LITRICO und FROMION 2004c geben hierfür eine Näherungsformel an. Bei Linearisierung der SAINT-VENANT-Gleichungen in einer Umgebung einer Lösung mit gleichförmiger Strömung wird ebenfalls das lineare partielle Differentialgleichungssystem (4.9) erhalten, jedoch entfällt die Ortsabhängigkeit der Koeffizienten B_0 , V_0 , C_0 , β_0 und γ_0 .

4.2.2 Laplace-Transformation und Übertragungsmatrix

Mittels LAPLACE-Transformation erhält man aus den linearisierten SAINT-VENANT-Gleichungen (4.9) ein System linearer gewöhnlicher Differentialgleichungen in der Ortsvariablen ξ mit der (komplexwertigen) LAPLACE-Variablen s als Parameter

$$\begin{bmatrix} \frac{dq(\xi, s)}{d\xi} \\ \frac{dh(\xi, s)}{d\xi} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & -B_0(\xi)s \\ \frac{\beta_0(\xi)-s}{B_0(\xi)(C_0(\xi)^2-V_0(\xi)^2)} & \frac{2V_0(\xi)B_0(\xi)s+\gamma_0(\xi)}{B_0(\xi)(C_0(\xi)^2-V_0(\xi)^2)} \end{bmatrix}}_{=\mathbf{A}(\xi, s)} \begin{bmatrix} q(\xi, s) \\ h(\xi, s) \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

Dabei werden stationäre Anfangsbedingungen $q(\xi, t=0) = h(\xi, t=0) = 0$ vorausgesetzt. Die Elemente der Matrix $\mathbf{A}(\xi, s)$ sind vom Ort ξ und vom stationären Durchfluß Q_0 abhängig.

Die allgemeine Lösung des Differentialgleichungssystems (4.12) kann mit der Fundamentalmatrix $\Phi(\xi, 0, s)$ in der Form

$$\begin{bmatrix} q(\xi, s) \\ h(\xi, s) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \phi_{11}(\xi, s) & \phi_{12}(\xi, s) \\ \phi_{21}(\xi, s) & \phi_{22}(\xi, s) \end{bmatrix}}_{=\Phi(\xi, 0, s)} \begin{bmatrix} q(0, s) \\ h(0, s) \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

dargestellt werden. Gleichung (4.13) beschreibt Wasserstand und Durchfluß an einem beliebigen Ort $0 \leq \xi \leq L$ bei Kenntnis der Randbedingungen in $\xi = 0$ im Bildbereich der LAPLACE-Transformation. Da im allgemeinen die Randbedingungen neben dem Zufluß $q(0, t)$ nicht den Wasserstand $h(0, t)$, sondern den Abfluß $q(L, t)$ vorgeben, wird Gleichung (4.13) umgeformt in

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} h(0, s) \\ h(L, s) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\frac{\phi_{11}(L, s)}{\phi_{12}(L, s)} & \frac{1}{\phi_{12}(L, s)} \\ \phi_{21}(L, s) - \frac{\phi_{11}(L, s)\phi_{22}(L, s)}{\phi_{12}(L, s)} & \frac{\phi_{22}(L, s)}{\phi_{12}(L, s)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q(0, s) \\ q(L, s) \end{bmatrix} \\ &= \underbrace{\begin{bmatrix} p_{11}(L, s) & p_{12}(L, s) \\ p_{21}(L, s) & p_{22}(L, s) \end{bmatrix}}_{\text{Übertragungsmatrix}} \begin{bmatrix} q(0, s) \\ q(L, s) \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (4.14)$$

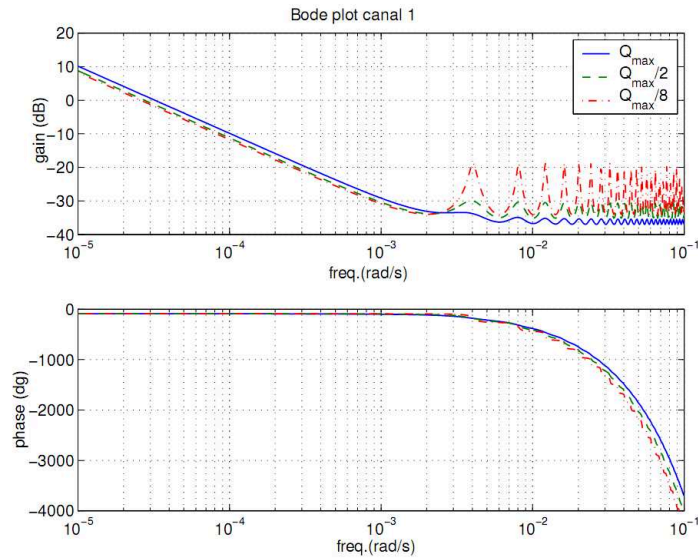


Abbildung 4.1: BODE-Diagramm zu $p_{21}(s)$ nach LITRICO und FROMION 2002a.

Gleichung (4.14) beschreibt die Abhängigkeit der Wasserstände (Abweichung von den stationären Werten) am oberen und unteren Ende der Haltung vom Zufluß und Abfluß (Abweichung von den stationären Werten) im Bildbereich der LAPLACE-Transformation.

Die Elemente der Übertragungsmatrix (4.14) lassen sich im allgemeinen Fall aufgrund der Ortsabhängigkeit der Matrix $\mathbf{A}(\xi, s)$ nicht in geschlossener Form angeben.

LITRICO und FROMION 2002a, LITRICO und FROMION 2004b beschreiben ein angepaßtes Verfahren zur numerischen Lösung der Differentialgleichung (4.12), das eine punktweise Berechnung der zugehörigen Frequenzgänge gestattet, siehe Abbildung 4.1. LITRICO und FROMION 2004b vergleichen die so berechneten Frequenzgänge mit den Frequenzgängen der linearisierten SAINT-VENANT-Gleichungen, die zur Berechnung mit dem PREISSMANN-Schema diskretisiert werden. Im niederfrequenten Bereich bis wenig unterhalb der durch die Diskretisierungsschrittweite bestimmten NYQUIST-Frequenz stimmen die Frequenzgänge sehr gut überein.

Im Fall gleichförmiger Strömung ist die Matrix $\mathbf{A}(\xi, s) = \mathbf{A}(s)$ nicht von der Ortsvariablen ξ abhängig, und die allgemeine Lösung des Differentialgleichungssystems (4.12) ergibt sich zu

$$\begin{bmatrix} q(\xi, s) \\ h(\xi, s) \end{bmatrix} = e^{\mathbf{A}(s)\xi} \begin{bmatrix} q(0, s) \\ h(0, s) \end{bmatrix}. \quad (4.15)$$

Damit erhält man die Elemente der Übertragungsmatrix (siehe z. B. LITRICO und FROMION

2004a) zu

$$p_{11}(L, s) = \frac{\lambda_2 e^{\lambda_1 L} - \lambda_1 e^{\lambda_2 L}}{B_0 s (e^{\lambda_2 L} - e^{\lambda_1 L})} \quad (4.16a)$$

$$p_{12}(L, s) = \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{B_0 s (e^{\lambda_2 L} - e^{\lambda_1 L})} \quad (4.16b)$$

$$p_{21}(L, s) = \frac{(\lambda_2 - \lambda_1) e^{(\lambda_1 + \lambda_2)s}}{B_0 s (e^{\lambda_2 L} - e^{\lambda_1 L})} \quad (4.16c)$$

$$p_{22}(L, s) = \frac{\lambda_1 e^{\lambda_1 L} - \lambda_2 e^{\lambda_2 L}}{B_0 s (e^{\lambda_2 L} - e^{\lambda_1 L})} \quad (4.16d)$$

mit

$$\lambda_{1,2}(s) = \frac{2B_0 V_0 s + \gamma_0 \pm \sqrt{4C_0^2 B_0^2 s^2 + 4B_0 (V_0 \gamma_0 - (C_0^2 - V_0^2) B_0 \beta_0) s + \gamma_0^2}}{2B_0 (C_0^2 - V_0^2)} \quad (4.16e)$$

Damit ist die Übertragungsmatrix in transzendenter Form gegeben. BAUME, SAU und MALATERRE 1998 geben eine entsprechende Beziehung für den Fall an, daß $q(0, s)$ und $h(L, s)$ gegeben und $q(L, s)$ und $h(0, s)$ zu berechnen sind.

Entscheidend für das dynamische Verhalten sind die Polstellen, die mit den Nullstellen von $\phi_{12}(s)$ übereinstimmen. Neben einem Pol bei $s = 0$ (Integrator) existieren noch unendlich viele weitere Polstellen, die im Fall gleichförmiger Strömung analytisch berechnet werden können. Im allgemeinen Fall können Polstellen numerisch berechnet werden (LITRICO und FROMION 2002a).

LITRICO und FROMION 2002a skizzieren einen Ansatz zur rationalen Approximation der numerisch berechneten Frequenzgänge der Übertragungsmatrix (4.14).

CHAPUIS und SACHS 1996, CHAPUIS 1998 untersuchen zwei Ansätze zur Vereinfachung der SAINT-VENANT-Gleichungen: eine Diskretisierung, siehe Abschnitt 4.2.8 und eine Modellvereinfachung auf Basis der transzendenten Übertragungsmatrix. Bei diesem zweiten Ansatz wird das SAINT-VENANT-Modell zunächst so transformiert, daß ein äquivalenter Kanal mit konstanten Parametern (idealer Kanal mit rechteckförmigem Querschnitt) erhalten wird.

Die Wasserspiegelbreite des rechteckigen Kanals ist dabei gleich dem Mittelwert der Wasserspiegelbreite des ursprünglichen Kanals, und das mittlere Reibungsgefälle sowie die Summe der Ausbreitungszeiten von sich gerinneaufwärts und -abwärts bewegenden Wellen ist in beiden Kanälen ebenfalls gleich.

Die linearisierten SAINT-VENANT-Gleichungen können für diesen Spezialfall mittels LAPLACE-Transformation in den Bildbereich überführt werden. Es werden transzendente Übertragungsfunktionen, beispielsweise für den Zusammenhang zwischen Zufluß oder Abfluß und dem Wasserstand an einer beliebigen Position $\xi \in [0, L]$ erhalten:

$$G_{zu}(\xi, s) = \frac{h(\xi, s)}{q(0, s)} = e^{\alpha(s)\xi} \frac{\alpha(s) \sinh(\beta(s)(\xi - L)) + \beta(s) \cosh(\beta(s)(\xi - L))}{s \sinh(\beta(s)L)} \quad (4.17a)$$

$$G_{ab}(\xi, s) = \frac{h(\xi, s)}{q(L, s)} = -e^{\alpha(s)(\xi - L)} \frac{\alpha(s) \sinh(\beta(s)\xi) + \beta(s) \cosh(\beta(s)\xi)}{s \sinh(\beta(s)L)} \quad (4.17b)$$

Die Funktionen $\alpha(s)$ und $\beta(s)$ hängen von der Gerinnegeometrie und vom Referenzdurchfluß der Linearisierung ab. Die transzendenten Übertragungsfunktionen (4.17) besitzen jeweils eine Polstelle im Ursprung (I-Verhalten) und unendlich viele Pole mit negativem Realteil. Rein reelle Pole und damit gedämpftes Systemverhalten ergibt sich tendenziell bei steilem Wasserspiegelgefälle, langen Kanälen und großen Reibungsbeiwerten. Ansonsten können unendlich viele konjugiert komplexe Polpaare mit negativem Realteil und damit unendlich viele gedämpfte Schwingungsmodi auftreten. Eine Reihenentwicklung der Übertragungsfunktionen ermöglicht eine Modellreduktion durch Vernachlässigung der höheren Moden.

Dieser Ansatz zur Vereinfachung der SAINT-VENANT-Gleichungen sowie die durch örtliche Diskretisierung der linearisierten SAINT-VENANT-Gleichungen gewonnene Zustandsbeschreibung (Abschnitt 4.2.8) werden mit Ergebnissen des Simulationssystems FLORIS verglichen. Für eine Stauhaltung des Rheins (Augst-Wylen/Birsfelden) wird bei unterschiedlichen Nominaldurchflüssen der Zufluß sprunghaft geändert. Die Ergebnisse für das Zustandsraummodell stimmen bei zehn Diskretisierungsintervallen recht gut mit den Resultaten von FLORIS überein, für die reduzierten Übertragungsfunktionen reicht offenbar schon eine Entwicklung bis zum dritten Glied aus.

SREEJA und GUPTA 2008 approximieren die Elemente der Übertragungsmatrix (4.16) durch

$$\begin{aligned} \hat{p}_{11}(s) &= \frac{A_{11}}{s}, & \hat{p}_{12}(s) &= \frac{A_{12}}{s} e^{-T_1 s} \approx \frac{A_{12}}{s} (1 - T_1 s), \\ \hat{p}_{21}(s) &= \frac{A_{21}}{s} e^{-T_2 s} \approx \frac{A_{21}}{s} (1 - T_2 s), & \hat{p}_{22}(s) &= \frac{A_{22}}{s} \end{aligned} \quad (4.18)$$

und verifizieren die Übertragungsfunktionen anhand von experimentellen Untersuchungen an einem Modellkanal von 6.5 m Länge. Die Sprungantworten stimmen recht gut überein.

4.2.3 Übertragungsmatrix und ID-Modell

SCHUURMANS, BOSGRA und BROUWER 1995 analysieren die einzelnen Terme der Übertragungsmatrix (4.16) hinsichtlich des Einflusses auf die Wellendeformation. SCHUURMANS, BOSGRA und BROUWER 1995, SCHUURMANS, CLEMMENS, DIJKSTRA u. a. 1999, SCHUURMANS, HOF, DIJKSTRA u. a. 1999 unterteilen die Stauhaltung in eine freie Fließstrecke mit gleichförmiger Strömung und den Staubereich, ähnlich Abbildung 4.2. Für die freie Fließstrecke kann die Übertragungsfunktion $p_{11}(s)$ in Gleichung (4.16) als reine Totzeit approximiert werden, dies entspricht einer kinematischen Wellenapproximation. Für den Staubereich wird eine waagerechte Wasserspiegellage angenommen, dies führt auf ein reines I-Verhalten. Das ID-Modell („integrator-delay“: I-T_t) der gesamten Stauhaltung ergibt sich damit zu

$$A_S \frac{dh(L, t)}{dt} = q(0, t - T_t) - q(L, t). \quad (4.19)$$

Dabei bezeichnet A_S die Wasseroberfläche im Staubereich und die Totzeit kann wie folgt berechnet werden:

$$T_t = \frac{2L_F}{(1 + \varkappa)V_0}, \quad \varkappa = 1 + \frac{4P_0}{3B_0} \frac{dR_{H,0}}{dH} \quad (4.20)$$

wobei L_F die Länge der freien Fließstrecke darstellt.

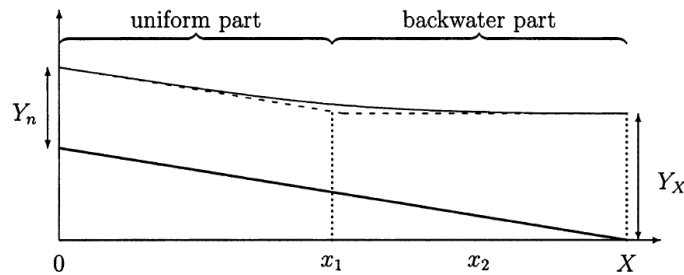


Abbildung 4.2: Wasserspiegellinie und Geradenapproximation mit freier Fließstrecke und Staubereich LITRICO und FROMION 2004a.

SCHUURMANS, BOSGRA und BROUWER 1995 vergleichen die Sprungantwort des ID-Modells mit einer HN-Simulation für zwei Stauhaltungen. SCHUURMANS, CLEMMENS, DIJKSTRA u. a. 1999 verifizieren das ID-Modell an einem Teilsystem (zwei Haltungen) des ASCE-Benchmark-Kanals nach CLEMMENS, KACEREK, GRAWITZ u. a. 1998 sowie anhand von Meßdaten eines Bewässerungskanal-systems mit acht Stauhaltungen in Arizona, USA. Untersuchungen im Frequenzbereich zeigen daß das ID-Modell das Verhalten im niederfrequenten Bereich recht gut abbildet, Resonanzerscheinungen bei höheren Frequenzen werden jedoch nicht abgebildet. Die kleinste Resonanzfrequenz kann anhand der Wellenlaufzeit abgeschätzt werden:

$$T_R \approx \frac{L}{V_0 - C_0} + \frac{L}{V_0 + C_0} \quad (4.21)$$

Diese Resonanzen treten insbesondere bei durchgestauten Haltungen auf, da die sich stromaufwärts bewegenden Wellen ($V_0 - C_0$) in einer freien Fließstrecke stark gedämpft werden.

4.2.4 Übertragungsmatrix und IDZ-Modell

LITRICO und FROMION 2004c merken an, daß in vielen Veröffentlichungen lineare Modelle aus den SAINT-VENANT-Gleichungen unter der Voraussetzung gleichförmiger Strömungsbedingungen abgeleitet werden. Diese Voraussetzung entspricht jedoch nicht der Realität, da der Einfluß des Staubereichs, siehe Abbildung 4.2, vernachlässigt wird. Das von SCHUURMANS, CLEMMENS, DIJKSTRA u. a. 1999 unter Berücksichtigung des Einflusses des Staubereichs abgeleitete ID-Modell, siehe Abschnitt 4.2.3, beschreibt das Systemverhalten im niederfrequenten Bereich gut, die dort angegebenen Modellparameter (Totzeiten) können jedoch durch eine Erweiterung des Ansatzes besser approximiert werden.

Es wird angenommen, daß die Stauhaltung unter stationären Bedingungen in eine freie Fließstrecke mit gleichförmiger Strömung und den Staubereich unterteilt werden kann. Die Wasserspiegellinie in der freien Fließstrecke ist parallel zur Gerinnesohle (Normalwasserstand H_n), im Staubereich wird sie durch die Tangente am Ende der Stauhaltung (Oberwasser Wehr $\xi = L$) angenähert. Unter diesen Voraussetzungen kann die Beziehung (4.14) approximiert werden

durch

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} h(0, s) \\ h(L, s) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \hat{p}_{11}(s) & \hat{p}_{12}(s) \\ \hat{p}_{21}(s) & \hat{p}_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q(0, s) \\ q(L, s) \end{bmatrix} \\ \hat{p}_{11}(s) &= \frac{1}{\hat{A}_u s} + \hat{p}_{11\infty} \\ \hat{p}_{12}(s) &= - \left(\frac{1}{\hat{A}_u s} + \hat{p}_{12\infty} \right) e^{-\hat{\tau}_u s} \\ \hat{p}_{21}(s) &= \left(\frac{1}{\hat{A}_d s} + \hat{p}_{21\infty} \right) e^{-\hat{\tau}_d s} \\ \hat{p}_{22}(s) &= - \frac{1}{\hat{A}_d s} - \hat{p}_{22\infty} \end{aligned} \quad (4.22)$$

die die Abhängigkeit der Wasserstände (Abweichung von den stationären Werten) am oberen und unteren Ende der Haltung vom Zufluß und Abfluß (Abweichung von den stationären Werten) im Bildbereich der LAPLACE-Transformation beschreibt.

LITRICO und FROMION 2004a, LITRICO und FROMION 2004c geben Berechnungsvorschriften für die Parameter der Übertragungsmatrix an.

Der für eine Reglerbemessung wesentliche Wasserstand am unteren Ende der Haltung ergibt sich damit zu

$$h(L, s) = \left(\frac{1}{\hat{A}_d s} + \hat{p}_{21\infty} \right) e^{-\hat{\tau}_d s} q(0, s) - \left(\frac{1}{\hat{A}_d s} + \hat{p}_{22\infty} \right) q(L, s). \quad (4.23)$$

Die Übertragungsfunktion $\frac{h(L, s)}{q(0, s)}$ ist ein I-T_t-T_D-Glied („integrator-delay-zero“: IDZ).

LITRICO und FROMION 2004a interpretieren die Elemente $\hat{p}_{ij}(s)$ der Übertragungsmatrix (4.22) im Frequenzbereich. Im niederfrequenten Bereich dominieren die I-Anteile und (4.22) kann durch einfache I-T_t-Modelle („integrator-delay“: ID) approximiert werden. Im hochfrequenten Bereich ergibt sich P- bzw. P-T_t-Verhalten. Das Modell beschreibt damit nicht die Schwingungsmodi des Systems. Dies ist nach LITRICO und FROMION 2004b für die Auslegung einfacher PI-Regler auch nicht notwendig, da PI-Regler ohnehin die Schwingungsmodi nicht aktiv regeln können und zusätzliche Filter eingesetzt werden.

LITRICO und FROMION 2004a vergleichen die Approximation (4.22) mit den durch numerische Lösung bestimmten Werten nach LITRICO und FROMION 2002a anhand von zwei Testkanälen (ASCE) mit jeweils acht Haltungen. Sowohl im niederfrequenten als auch im höherfrequenten Bereich ergibt sich eine gute Übereinstimmung. Die BODE-Diagramme des IDZ-Modells stimmen bis auf die fehlenden Schwingungsmodi weitgehend mit denen des Kompletmodells nach LITRICO und FROMION 2002a überein. Im Zeitbereich werden Sprungantworten des IDZ-Modells mit einem einfachen ID-Modell und einer exakten HN-Simulation verglichen. Hier gibt das IDZ-Modell insbesondere die schnell abklingenden Anteile der Übergangsvorgänge deutlich besser wieder.

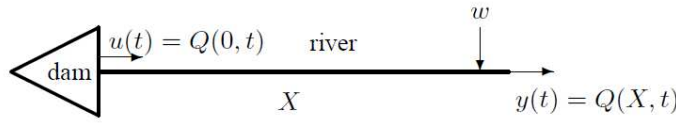


Abbildung 4.3: Modellansatz Wellengleichung.

4.2.5 Diffusive Wellengleichung

LITRICO und GEORGES 1999a, LITRICO und POMET 2003 untersuchen Modellansätze für den Zusammenhang zwischen Zufluß in und den Abfluß aus einem Flußabschnitt nach Abbildung 4.3 auf der Basis der diffusiven Wellengleichung

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \Theta(Q, \xi) \frac{\partial Q}{\partial \xi} - E(Q, \xi) \frac{\partial^2 Q}{\partial \xi^2} = 0 \quad (4.24a)$$

$$Q(0, t) = u(t) \quad \lim_{\xi \rightarrow \infty} \frac{\partial Q(\xi, t)}{\partial \xi} = 0 \quad (4.24b)$$

Dabei bezeichnet $\Theta(Q, \xi)$ die Wellengeschwindigkeit (celerity) und $E(Q, \xi)$ die Diffusion, die bei gegebener Gerinnegeometrie und unter Vernachlässigung eines eventuellen Staubereichs als Funktionen des Abflusses Q , sowie der Geometrie- und Hydraulikparameter angegeben werden können. Die quasi-lineare PDGL (4.24a) ist eine Vereinfachung der SAINT-VENANT-Gleichungen unter Vernachlässigung der Trägheitsterme, d. h. der ersten beiden Summanden in der Impulsgleichung (4.1b), und gilt unter der Voraussetzung langsam veränderlicher Abflüsse. Differentiation der Massenbilanzgleichung (4.1a) nach der Ortsvariablen und der Impulsgleichung (4.1b) nach der Zeit ermöglicht die Elimination des Wasserstands und führt auf die PDGL 2. Ordnung (4.24a). LITRICO und GEORGES 1999a geben Berechnungsvorschriften für die Koeffizienten der diffusiven Wellengleichung (4.24a) aus den Geometrie- und Hydraulikparametern an.

Die Randbedingungen (4.24b) ergeben sich aus der angenommenen großen Länge des Flußabschnitts. Die seitlichen Zuflüsse bzw. Entnahmen $w(t)$ in Abbildung 4.3 werden zunächst vernachlässigt und erst nach der Modellumformung beim Reglerentwurf (siehe Abschnitt 8.2.2) einbezogen.

Wird die PDGL (4.24a) in der Umgebung eines konstanten Referenzabflusses Q_r linearisiert, so ergibt sich die HAYAMI-Gleichung mit konstanten Koeffizienten Θ_r , E_r . Eine LAPLACE-Transformation bezüglich t führt auf eine Randwertaufgabe in ξ , die unter Auswertung der Randbedingungen (4.24b) die Übertragungsfunktion

$$F_H(s) = \frac{\delta Q(\xi, s)}{\delta Q(0, s)} = \frac{Y(s)}{U(s)} = e^{\frac{\Theta_r - \sqrt{\Theta_r^2 + 4E_r s}}{2E_r} \xi} \quad (4.25)$$

liefert. Nach Rücktransformation in den Zeitbereich kann die Impulsantwort durch die Impul-

santwort eines linearen Systems 2. Ordnung mit Totzeit (P-T₂-T_t)

$$F_{2r}(s) = \frac{G(Q_r)e^{-s\tau(Q_r)}}{1 + S(Q_r)s + P(Q_r)s^2} \quad (4.26)$$

approximiert werden, wobei für die Parameter $G(Q_r)$, $\tau(Q_r)$, $S(Q_r)$ und $P(Q_r)$ durch Abgleich der Momente der Übertragungsfunktionen (4.25) und (4.26), d. h. TAYLOR-Entwicklung und Abgleich der Koeffizienten, analytische Ausdrücke erhalten werden. LITRICO und GEORGES 1999a geben auch hier Berechnungsvorschriften für die Koeffizienten an. Damit wird insbesondere im praktisch wichtigen niederfrequenten Bereich eine gute Approximation gewährleistet. Die Rücktransformation in den Zeitbereich wird dazu nicht explizit benötigt.

Gleichung (4.26) beschreibt eine Familie linearer Modelle in Abhängigkeit vom Parameter Q_r , die in einem nichtlinearen Modell zusammengefaßt werden kann, siehe LITRICO und POMET 2003:

$$\begin{aligned} \dot{\zeta}_1(t) &= -\frac{S(\zeta_2(t))}{P(\zeta_2(t))}\zeta_1(t) - \frac{1}{P(\zeta_2(t))}\zeta_2(t) + \frac{1}{P(\zeta_2(t))}u(t) \\ \dot{\zeta}_2(t) &= \zeta_1(t) \\ y(t) &= \zeta_2(t - \tau(\zeta_2(t))) \end{aligned} \quad (4.27a)$$

Das nichtlineare Modell (4.27a) mit zustandsabhängiger (abflußabhängiger) Totzeit $\tau(\zeta_2(t))$ berücksichtigt langsam veränderliche Abflüsse. Eine Linearisierung um einen konstanten Abfluß $y(t) = \zeta_2(t) = Q_r$ ergibt wieder das lineare Modell (4.26). Ein Vorteil dieses Modells besteht darin, daß analytische Ausdrücke für die Abhängigkeit der Modellparameter von den physikalischen Parametern (Geometrie, Rauigkeit) des Systems angegeben werden können. Ein simulativer Vergleich ergibt eine deutlich verbesserte Übereinstimmung mit dem Modell auf Basis der diffusiven Wellengleichung (4.24a) als das linearisierte HAYAMI-Modell (4.25).

In Abschnitt 8.2.2 werden die Ergebnisse eines nichtlinearen IMC-Reglerentwurfs mit diesem Modell dargestellt.

BENAYACHE, BESANÇON und GEORGES 2008 transformieren die Totzeit τ an den Systemeingang und entwerfen mittels exakter Linearisierung einen nichtlinearen Regler, siehe Abschnitt 8.2.

4.2.6 Muskingum-Ansatz

In der Hydrologie werden vereinfachte Modellansätze verwendet, die den Zusammenhang zwischen dem Zufluß in und dem Abfluß aus einem Flußabschnitt beschreiben. Ein Beispiel hierfür ist das MUSKINGUM-Modell, siehe z. B. TODINI 2007

$$\frac{dV}{dt} = Q_{in} - Q_{out} \quad (4.28)$$

$$V = k\varepsilon Q_{in} + k(1 - \varepsilon)Q_{out} \quad (4.29)$$

Die Modellparameter k (Zeitkonstante) und ε (dimensionslos) können entweder aus Meßdaten oder aus geometrischen Daten des Stauraums bestimmt werden. Mit einer geeigneten Diskretisierung ergibt sich die übliche Darstellung als Differenzgleichung

$$Q_{out}^{k+1} = c_1 Q_{in}^{k+1} + c_2 Q_{in}^k + (1 - c_1 - c_2) Q_{out}^k \quad (4.30a)$$

$$c_1 = \frac{-2k\varepsilon + \Delta T}{2k(1 - \varepsilon) + \Delta T}, \quad c_2 = \frac{2k\varepsilon + \Delta T}{2k(1 - \varepsilon) + \Delta T} \quad (4.30b)$$

Die Modellerweiterung nach MUSKINGUM-CUNGE besteht in zeit- bzw. abflußabhängigen Modellparametern k und ε . TODINI 2007 diskutiert hierdurch mögliche Verletzungen der Massenbilanz und entsprechende Gegenmaßnahmen. Simulationsrechnungen zeigen eine gute Übereinstimmung mit einem HN-Modell.

Nach ACKERMANN 1999 sind hydrologische Modelle des Typs MUSKINGUM-CUNGE nicht in der Lage, den Effekt eines künstlichen Aufstaus zu erfassen.

4.2.7 Inkrementelles Volumenbilanzmodell

SEATZU 1999a, SEATZU 1999c beschreibt, wie ausgehend von der transzendenten Übertragungsmatrix (4.14) ein inkrementelles Volumenbilanzmodell für eine Stauhaltungskette erhalten wird. Hierzu werden die Vektoren der Wasserstände, Durchflüsse und Volumina eingeführt

$$\mathbf{h} = \begin{bmatrix} h_{UW,1} \\ h_{OW,1} \\ h_{UW,2} \\ \vdots \\ h_{OW,n} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{q} = \begin{bmatrix} q_{zu,1} \\ q_{zu,2} \\ \vdots \\ q_{zu,n} \\ q_{ab,n} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{v} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

$h_{UW,i}$ ist der Unterwasserstand am Oberliegerwehr der Haltung i , $h_{OW,i}$ der Oberwasserstand, $q_{zu,i}$ der Zufluß in die Haltung i ($q_{zu,i} = q_{ab,i-1}$) und v_i das inkrementelle Volumen (die Volumenvariation) mit $\dot{v}_i = q_{zu,i} - q_{ab,i}$. Sämtliche Größen sind als Abweichungen von den Werten im Referenzpunkt der Linearisierung der SAINT-VENANT-Gleichung zu verstehen, insbesondere ist daher v_i nicht das Wasservolumen in der Stauhaltung.

Die transzendente Übertragungsmatrix (4.14) liefert im Bildbereich die Beziehung

$$\begin{bmatrix} h_{UW,i}(s) \\ h_{OW,i}(s) \end{bmatrix} = \frac{1}{s} \tilde{\mathbf{A}}(s) \begin{bmatrix} q_{zu,i}(s) \\ q_{zu,i+1}(s) \end{bmatrix}$$

Hierbei wird angenommen, daß alle Elemente der Matrix einen I-Anteil besitzen. Linearisierung der Wehrkennlinien ergibt die Beziehungen

$$q_i = \gamma_i h_{W,i} + \delta_{1,i} h_{OW,i} + \delta_{2,i} h_{UW,i+1} \quad (4.32)$$

wobei angenommen wird, daß der Wehrabfluß von der Wehrstellung h_W , dem Oberwasser- und dem Unterwasserpegel abhängt (unterströmte Wehre, ansonsten ist $\delta_{2,i} = 0$).

Nach einigen Umformungen wird die transzendente Modellgleichung des inkrementellen Volumenmodells

$$s\mathbf{v}(s) = \mathbf{A}(s)\mathbf{v}(s) + \mathbf{B}(s)\mathbf{h}_W(s) \quad (4.33)$$

erhalten. Approximation der transzendenten Übertragungsmatrix durch eine TAYLOR-Entwicklung

$$\tilde{\mathbf{A}}(s) \approx \tilde{\mathbf{A}}(0) + s \frac{d}{ds} \tilde{\mathbf{A}} \Big|_{s=0}$$

führt schließlich auf

$$s\mathbf{v}(s) = \mathbf{A}\mathbf{v}(s) + \mathbf{B}\mathbf{h}_W(s) \quad \text{im Bildbereich} \quad (4.34a)$$

$$\dot{\mathbf{v}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{v}(t) + \mathbf{B}\mathbf{h}_W(t) \quad \text{im Zeitbereich} \quad (4.34b)$$

mit konstanten Matrizen \mathbf{A} und \mathbf{B} und der gebrochen-rationalen Übertragungsmatrix

$$(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B} \quad (4.35)$$

In einer ganzen Reihe von Veröffentlichungen werden basierend auf dem inkrementellen Volumenbilanzmodell (4.34) diverse Regelungsansätze entwickelt und getestet, siehe Abschnitt 6.5.2.

4.2.8 Diskretisierung der Saint-Venant-Gleichungen

CHAPUIS und SACHS 1996 und CHAPUIS 1998 geben einen Diskretisierungsansatz zur Vereinfachung der SAINT-VENANT-Gleichungen an. Dabei werden die SAINT-VENANT-Gleichungen zunächst in der Umgebung einer stationären Lösung linearisiert und die sich daraus ergebenden linearen PDGLn 1. Ordnung örtlich mit einem Verfahren 1. Ordnung diskretisiert (Linienmethode). Damit wird ein lineares Zustandsraummodell hoher Ordnung ($2n + 1$ für n Diskretisierungsintervalle) mit den Zustandsgrößen Wasserstand und Durchfluß in bzw. zwischen den Diskretisierungsintervallen erhalten. In CHAPUIS und SACHS 1996 wird dieses Modell mit einer Vereinfachung auf Basis der transzendenten Übertragungsmatrix sowie einem HN-Modell verglichen, siehe Abschnitt 4.2.2.

Die im Abschnitt 7.5 dargestellten MPC-Ansätze von GLANZMANN und SIEBENTHAL 2004; HUG-GLANZMANN, SIEBENTHAL, GEYER u. a. 2005; SACHS, GLANZMANN und SIEBENTHAL 2005 basieren auf diesem Modell.

4.3 Regelungstechnische Modellansätze

In diesem Abschnitt sollen Modellansätze auf der Basis linearer Differentialgleichungen in Kombination mit isolierten statischen Nichtlinearitäten und Totzeitblöcken dargestellt werden. Dies entspricht den klassischen regelungstechnischen Blockschaltbildern.

Im einfachsten Fall läßt sich eine Stauhaltung als reiner Speicher (Integrator) mit der Differenz aus Zu- und Abfluß als Eingang beschreiben,

$$\frac{dh(t)}{dt} = \frac{Q_{zu}(t) - Q_{ab}(t)}{A_S} \quad (4.36)$$

beispielsweise im Modell von KÜHNE 1975, Gleichung (5.8). Hierbei bleibt insbesondere die Laufzeit unberücksichtigt.

4.3.1 ID-Modell

Eine Erweiterung des Modellansatzes (4.36) sind ID-Modelle², siehe beispielsweise OVERLOOP, SCHUURMANS, BROUWER u. a. 2005, LITRICO, MALATERRE, BAUME u. a. 2007.

$$\frac{dh(t)}{dt} = \frac{Q_{zu}(t - T_t) - Q_{ab}(t)}{A_S} \quad (4.37)$$

A_S ist die Speicherfläche des eingestauten Anteils der Stauhaltung. Durch die Totzeit T_t wird die Laufzeit und die die Retentionszeit berücksichtigt, siehe Abschnitt 5.1.3. Wird hier der Abfluß zeitverzögert nachgeführt $Q_{ab}(t) = Q_{zu}(t - T_t)$, so liefert das Modell einen konstanten Wasserstand. Dies entspricht (bei unterschiedliche Lauf- und Retentionszeiten) nicht der Realität, siehe NEUMÜLLER und BERNHAUER 1969.

Dieser Modellansatz wird oftmals als „greybox“-Modell im regelungstechnischen Sinne, d. h. als ein Ansatz aufgrund einer vereinfachenden physikalischen Betrachtung (hier: Volumebilanz) des Systems mit experimentell zu identifizierenden Parametern, angegeben. In Abschnitt 4.2.3 wird das gleiche Modell durch schrittweise Vereinfachung und Linearisierung der SAINT-VENANT-Gleichungen erhalten, wobei die Parameter A_S und T_t aus den Geometrie- und Hydraulikdaten der Stauhaltung und dem Referenzabfluß der Linearisierung bestimmt werden können.

4.3.2 Lineare parameter-variante Modelle

Aufgrund der Nichtlinearität des Prozesses und der SAINT-VENANT-Gleichungen gelten vereinfachte (lineare) Modellansätze immer nur in einem gewissen Arbeitsbereich, beispielsweise in der Umgebung einer bestimmten stationären Lösung. Will man mit vereinfachten Modellansätzen das Systemverhalten in einem größeren Arbeitsbereich beschreiben, so kann man die Parameter des vereinfachten Modellansatzes von externen Parametern, dem Systemzustand oder dem Arbeitspunkt abhängig machen. BOLEA, BLESA und PUIG 2007 untersuchen Möglichkeiten zur Gewinnung derartiger linearer parameter-varianten Modellansätze (LPV) am Beispiel eines P-T_t-T₁-Ansatzes

$$\Delta h(t + \tau(u)) + T(u) \frac{d\Delta h(t + \tau(u))}{dt} = K(u) \Delta u(t) \quad (4.38)$$

bzw. eines äquivalenten zeitdiskreten Modells. Δy ist der Wasserstand am stromab gelegenen Ende der Haltung und Δu die Wehröffnung im Zufluß (als Abweichung vom Arbeitspunkt (u, y)). Die Modellparameter Totzeit $\tau(u)$, Zeitkonstante $T(u)$ und Verstärkung $K(u)$ sind vom Arbeitspunkt abhängig.

Anhand physikalischer Betrachtungen, d. h. letztlich durch Vereinfachung der SAINT-VENANT-Gleichungen, kann die funktionale Abhängigkeit der Modellparameter vom Arbeitspunkt u

²ID („integrator delay“): Integrator-Totzeit I-T_t

bestimmt werden. Hierzu werden stationäre Lösungen ($K(u)$) und Wellenlaufzeiten ($\tau(u)$) herangezogen. Für $T(u)$ ist eine solche Ableitung nicht möglich, daher wird ein Vielfaches der Totzeit angenommen.

Alternativ können die Parameter des Modells (4.38) an unterschiedlichen Arbeitspunkten u_i identifiziert werden (multi-Modell). Die Abhängigkeit der Parameter ist durch die unterschiedlichen Parameterwerte für die u_i beschrieben. Ein Fuzzy-Ansatz liefert eine situationsabhängige Wichtung der lokalen Modelle, so daß ein „weiches“ Umschalten zwischen den lokalen Modellen gewährleistet ist.

Als dritte Variante wird die Abhängigkeit der Modellparameter vom Arbeitspunkt mittels eines expliziten Modellansatzes der Form

$$K(u) = \theta_0 + \theta_1 u + \theta_2 u^2$$

und anschließender Identifikation der Ansatzparameter θ_i untersucht.

Für das untersuchte Beispielsystem liefern alle drei Ansätze weitgehend identische Abhängigkeiten der Modellparameter vom Arbeitspunkt. Ergebnisse, die einen Vergleich der vereinfachten Modelle mit dem ursprünglichen Modell auf Basis der SAINT-VENANT-Gleichungen ermöglichen, werden von den Autoren nicht angegeben.

4.3.3 Identifikation der Modellstruktur

In der Arbeit MARENBACH, BETTENHAUSEN und CUNO 1995 wird versucht, den Prozeß der Modellerstellung durch eine automatisierte Suche der Modellstruktur zu unterstützen. Mit einem kombinierten Ansatz aus Genetic Programming und Parameteroptimierung werden selbstorganisierend dynamische Prozeßmodelle generiert und parametrisiert. Ziel ist dabei, den Modellfehler für vorgegebene Szenarien unter Berücksichtigung der Modellkomplexität zu minimieren. Damit hängt das Ergebnis dieses Prozesses wesentlich von der Auswahl dieser Szenarien und der Auswahl der Blöcke für den „Modellbaukasten“ ab. In der Arbeit MARENBACH, BETTENHAUSEN und CUNO 1995 wird die Nachbildung des Oberwasserpegels der Stauhaltung Bad Säckingen mit einem Modell aus linearen Übertragungsgliedern beschrieben. Nach wenigen Generationen des Genetic Programming-Verfahrens wird ein dynamisches Modell mit einem Totzeit-Block im Zuflußzweig erhalten

$$H(s) = \frac{Q_{zu}(s)e^{-sT_{t1}} - Q_{ab}(s)}{s}$$

Die beste Modellanpassung wird schließlich mit einer zusätzlichen Aufschaltung des gefilterten Signals erhalten

$$H(s) = \frac{Q_{zu}(s)e^{-sT_{t1}} - Q_{ab}(s)}{s} + \frac{Ks(Q_{zu}(s)e^{-sT_{t2}} - Q_{ab}(s))}{(1 + sT_1)(1 + sT_2)}$$

Der Aufwand ist mit 500 Generationen je 50 Individuen recht hoch, da jeweils eine Modellstruktur generiert und der Parametersatz angepaßt werden muß.

4.3.4 Einfache Modellansätze für Bewässerungskanäle

In einer Reihe von Beiträgen befassen sich WEYER 2001; WEYER 2002; WEYER 2003; WEYER 2006; OOI, KRUTZEN und WEYER 2005 und EURÉN und WEYER 2007 mit der Modellbildung und unterschiedlichen Ansätzen zur Reglerbemessung (siehe Abschnitte 5.3.3, 6.4) für Bewässerungskanäle (Haughton Main Channel in Australien).

Ausgangspunkt für die in WEYER 2001 beschriebene Modellbildung ist die Volumenbilanz für eine einzelne Haltung

$$\frac{dh_i(t)}{dt} = c_1 h_{W,i-1}^{3/2}(t - T_t) - c_2 h_{W,i}^{3/2}(t) \quad (4.39)$$

Dabei wird zum einen vorausgesetzt, daß der Wasserstand h_i am stromab gelegenen Ende der Haltung proportional dem Stauvolumen ist – das ist für Bewässerungskanäle mit rechteckförmigem Querschnitt näherungsweise gültig. Zum anderen werden überströmte Wehre mit vollkommenem Überfall angenommen. $h_{W,i-1}$ und $h_{W,i}$ bezeichnen die Überfallhöhen über die stromauf bzw. stromab gelegenen Wehre.

Die Koeffizienten c_1, c_2 werden nicht aus geometrischen Daten der Haltung und der Wehrkennlinien bestimmt, sondern zusammen mit der Totzeit T_t anhand von Meßdaten identifiziert. Hierzu werden Sprungantworten (sprungförmige Änderung des Zuflusses) und binäre Signale (Rechteckschwingungen im Zufluß) für eine 900 m lange Haltung des Kanals ausgewertet. Die Modellverifikation ergibt eine recht gute Übereinstimmung mit den experimentellen Daten, wobei aufgrund der Modellstruktur der Einfluß von Wellenbewegungen nicht abgebildet werden kann. Aus den identifizierten Parametern ergibt sich die aus physikalischen Überlegungen zu erwartende Relation $c_1 \approx -c_2$.

Eine deutliche Verbesserung der Modellanpassung wird durch einen Ansatz dritter Ordnung

$$\frac{d^3 h_i(t)}{dt^3} + a_1 \frac{d^2 h_i(t)}{dt^2} + a_2 \frac{dh_i(t)}{dt} = c_1 h_{W,i-1}^{3/2}(t - T_t) - c_2 h_{W,i}^{3/2}(t) \quad (4.40)$$

erzielt, der durch die Reihenschaltung eines Integrators und eines schwach gedämpften Schwingungsglieds zur Beschreibung der Wellenbewegungen motiviert wird. Die Restquadratsumme sinkt hierbei auf ca. 30% des Wertes für den Ansatz erster Ordnung (4.39).

Die Modellansätze werden durch weitere Experimente bei größerem Abfluß sowie für eine längere Haltung (3200 m) des Kanals überprüft.

In EURÉN und WEYER 2005; EURÉN und WEYER 2007 werden die oben beschriebenen Ansätze auf weitere Wehrtypen wie überströmte Wehre mit unvollkommenem Überfall und unterströmte Wehre erweitert. Zudem werden die Parameter für längere Haltungen (6.5 km) des Coleambally Main Channels in Australien angepaßt.

Ergebnisse eines Vergleich mit Modellen auf der Basis der SAINT-VENANT-Gleichungen werden in OOI, KRUTZEN und WEYER 2005 vorgestellt. Für die Parameter des hydraulisch-numerischen Modells werden neben den Geometriedaten zum einen Tabellenwerte und zum anderen anhand von Meßdaten angepaßte Werte für den MANNING-Faktor und die Wehrekoeffizienten verwendet. Die numerische Lösung erfolgt mit dem PREISSMANN-Verfahren. Die Ergebnisse zeigen, daß die Modellanpassung (im Sinne der kleinsten Fehlerquadrate für den Oberwasserstand $h_i(t)$) für das vereinfachte Modell 3. Ordnung (4.40) nahezu ebenso gut ist

wie für das HN-Modell mit angepaßten Parametern. Das Modell 1. Ordnung (4.39) ist in einigen Fällen besser als das HN-Modell mit Tabellenwerten. Es wird die Eignung der vereinfachten Modelle für den Regelungsentwurf hervorgehoben, während die HN-Modelle dann von Vorteil sind, wenn keine Datenreihen zur Parameteridentifikation vorliegen. Zudem liefert ein HN-Modell nicht nur den hier betrachteten Oberwasserstand, sondern die gesamten Ortsprofile und Zeitverläufe.

OOI und WEYER 2003 bestimmen die Modellparameter für (4.39) anhand von Simulationsrechnungen mit einem HN-Modell. Dieser Ansatz ist motiviert durch die Tatsache, daß in der Praxis oftmals nicht genug Meßdaten vorliegen und Identifikationsexperimente aufwendig oder z. B. bei im Bau befindlichen Kanalsystemen unmöglich sind. Auch hier werden aus Sprungantworten und Simulationsexperimenten mit binären Eingangssignalen die Parameter c_i , die Totzeiten τ_i und die Wellenfrequenzen bestimmt. Die Parameterermittlung an sich ist nicht aufwendig, läßt sich jedoch nicht automatisieren.

4.4 Identifikation

LITRICO und GEORGES 1997b, LITRICO und GEORGES 1997a geben ein Verfahren zur Identifikation der Parameter der diffusiven Wellengleichung (4.24a) und der seitlichen Zu- bzw. Abflüsse für ein System nach Abbildung 4.3 an. Die PDGL (4.24a) wird numerisch mit einem impliziten CRANK-NICHOLSON-Verfahren diskretisiert, wobei zunächst der Diffusionsterm ($\frac{\partial^2 Q}{\partial \xi^2}$) vernachlässigt und nur die kinematische Wellengleichung betrachtet wird. Die verfahrensbedingte numerische Diffusion wird dabei so adaptiert, daß sie den Diffusionsterm der ursprünglichen Gleichung (4.24a) approximiert.

Für die Abflußabhängigkeit der Parameter wird der Ansatz

$$\Theta(Q) = \alpha_0 Q^{\beta_0}, \quad E(Q) = \alpha_1 Q^{\beta_1} \quad (4.41)$$

gewählt, und die Parameter $\alpha_{0/1}$, $\beta_{0/1}$ werden anhand von Meßdaten mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate bestimmt.

Zur Identifikation der seitlichen Zu- bzw. Abflüsse wird vorausgesetzt, daß diese örtlich konzentriert sind und nur in die Randbedingungen zwischen zwei Kanal- bzw. Flußabschnitten eingehen. Zudem wird angenommen, daß die Zu- bzw. Abflüsse zeitlich konstant sind oder der Zeitverlauf bis auf die Amplitude bekannt ist. Die Amplitude kann dann wieder anhand von Meßdaten mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate bestimmt werden. Die Identifikation der Parameter und der Zu- bzw. Abflüsse wird alternierend wiederholt bis eine Abbruchschranke erreicht ist.

Es wird gezeigt, daß die Abflüsse bei einer endlichen Beobachtungsdauer nicht identifizierbar sind, wenn sich das System nicht im stationären Zustand befindet.

Das Verfahren wird anhand von Simulationsergebnissen sowie Realdaten eines 21.5 km langen Flußabschnitts validiert.

4.5 Modellierung des Wehrabflusses³

LITRICO, MALATERRE, BAUME u. a. 2008 betrachten die unterlagerte Regelung des Wehrabflusses. Üblicherweise wird der Wehrabfluß als Stellgröße im Regelkreis der Wasserstandsregelung betrachtet. In einem unterlagerten Regelkreis wird dann mit der Wehrstellung dieser Wehrabfluß eingestellt. In vielen Fällen ist dies keine Regelung, sondern es wird anhand der inversen Wehrkennlinie die notwendige Wehrstellung berechnet und als Vorwärtssteuerung eingestellt. Dabei wird nicht berücksichtigt, daß es sich hierbei um eine *statische* Kennlinie handelt. Wird die Wehrstellung verändert, so verändern sich aufgrund der Streckendynamik sofort (verzögerungsfrei) der Ober- und Unterwasserstand und damit der Abfluß über das Wehr. Durch eine (näherungsweise) Einbeziehung der Streckendynamik kann insbesondere bei großen Abtastzeiten die Genauigkeit der unterlagerten Abflußregelung verbessert werden. Streng genommen ist dies keine Frage des Modellansatzes, sondern der Diskretisierung der kontinuierlichen Modellgleichungen.

Im speziellen werden in LITRICO, MALATERRE, BAUME u. a. 2008 unterströmte Wehre und vergleichsweise große Abtastzeiten von bis zu 60 min untersucht. Es wird die übliche Berechnung der Wehrstellung mittels statischer Wehrkennlinie verglichen mit einer Berechnung anhand der Charakteristiken sowie einer Berechnung anhand eines IDZ-Modells (4.23). Die beste Übereinstimmung mit dem vorgegebenen Abfluß innerhalb des Tastschritts wird mit dem IDZ-Modell in Verbindung mit der nichtlinearen Wehrkennlinie erzielt. Die Untersuchungen werden an einem HN-Simulationsmodell (SIC) mit einer Diskretisierung von 60 s und 200 m durchgeführt. Leider gehen die Autoren nicht auf die Frage der Anzahl der Verstellbewegungen ein.

LITRICO, BELAUD und FROMION 2007 untersuchen die Stabilität von automatischen (hydro-mechanischen) Wehren, die ohne externe Antriebe lediglich durch den Ober- und Unterwasserstand bewegt werden. In der Praxis treten oftmals Oszillationen im Wasserstand auf, die durch die Verkopplung der Wehrdynamik mit den Dynamiken der angrenzenden Haltungen begründet sind. Dies wird durch eine Analyse im Frequenzbereich untersucht.

Zunächst werden mittels LAPLACE-Transformation der linearisierten SAINT-VENANT-Gleichungen die transzendenten Übertragungsmatrizen (siehe (4.14) der Kanalhaltungen bestimmt. Die Übertragungsmatrix des Gesamtsystems ergibt sich durch Einbeziehung der ebenfalls linearisierten Wehrgleichungen. Die für die Stabilitätsanalyse wesentlichen Pole der Übertragungsmatrix können durch die Lösung einer transzendenten Gleichung gewonnen werden. Dies ist im allgemeinen Fall nur mit numerischen Verfahren möglich, für praktisch relevante Spezialfälle geben die Autoren geschlossene Lösungen an. Die Ergebnisse werden an einem Simulationsbeispiel verifiziert.

BELAUD, LITRICO, GRAAFF u. a. 2008 untersuchen einen ähnlichen Wehrtyp für unterschiedliche Durchflußbedingungen, leiten ein mathematisches Modell ab und verifizieren dieses Modell anhand von Messungen an einem Versuchsaufbau.

³Zu diesem Thema wurde nicht gezielt recherchiert.

5 Klassische regelungstechnische Ansätze

In diesem Kapitel sollen Verfahren und Ideen zur Wasserstandsregelung vorgestellt werden, die auf den klassischen regelungstechnischen Ansätzen mit ein- und mehrschleifigen Regelungsstrukturen basieren.

5.1 Abflußregelung, Stauzielregelung, OW/Q-Regelung

In diesem Abschnitt sollen die wesentlichen dezentralen Regelungsstrukturen für die Wasserstandsregelung von Flußstauhaltungen basierend u. a. auf KÜHNE 1975, THEOBALD 1998b, BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU 2006 und weiteren Veröffentlichungen dargestellt werden.

5.1.1 Stauraum-Kenngrößen: Retentions- und Laufzeit

Zur Charakterisierung der dynamischen Eigenschaften von Stauhaltungen werden in der Literatur die Kenngrößen Retentionszeit und Laufzeit verwendet. **Anmerkung:** in der Literatur zu Bewässerungskanalssystemen wird die Retentionszeit nicht erwähnt.

Betrachtet man die Wasserspiegellinien für zwei verschiedene konstante Durchflüsse mit der Vorgabe, daß in beiden Fällen im Oberwasser am Wehr die gleiche Wasserstandshöhe vorliegt, so ergibt sich für beide Fälle ein bestimmtes Stauraumvolumen. Die Differenz der beiden Volumina bezeichnet man als *Retentionsvolumen* der Stauhaltung. Die *Retentionszeit* T_R ergibt sich dann als Quotient aus der Volumendifferenz und der Durchflußdifferenz

$$T_R = \frac{\Delta V}{\Delta Q}. \quad (5.1)$$

Die Retentionszeit ist vom Durchfluß abhängig.

Als *Laufzeit* T_L bezeichnet man die Zeitspanne, nach der eine Zuflußänderung aus dem Oberlieger eine Wasserstandsänderung im Oberwasser des Wehres bewirkt. Die Laufzeit ist von Durchfluß und Wasserstand abhängig und nimmt grundsätzlich mit zunehmendem Durchfluß ab.

Ausgehend von in der Praxis beobachteten Abflaufaufteilungen an Staustufenketten mit reiner Stauzielregelung betrachten NEUMÜLLER und BERNHAUER 1969 grundsätzliche Zusammenhänge zwischen der Zufluß- und Abflußganglinie einer Stauhaltung und dem Wasserstand am Oberwasser des Stauwehres (Stauziel). Anhand von Volumenbilanzen wird gezeigt, daß beim

Übergang zwischen zwei stationären Zuständen der Abfluß dem Zufluß mit einer Zeitverzögerung t_{soll} folgen muß, die sich aus der Steigung der Beckeninhaltslinie $V(Q)$ ergibt. **Anmerkung:** den Begriff „Retentionszeit“ gebrauchen die Autoren nicht.

Die Autoren zeigen, daß für die gebräuchliche Abflußregelung mit konstantem Stauziel die Relation zwischen Zufluß- und Abflußganglinie vom Verhältnis der Laufzeit T_L (Quotient aus Länge der Stauhaltung und absoluter Schwallgeschwindigkeit) zum Sollwert der Zeitverschiebung (also $\frac{T_L}{T_R}$) abhängt. Sind die beiden Zeiten etwa gleich, so folgt der Abfluß zeitversetzt dem Zufluß, bei kleinen Laufzeiten ($\frac{T_L}{T_R} < 1$) ergibt sich ein asymptotisches Verhalten und bei großen Laufzeiten ($\frac{T_L}{T_R} > 1$) ein Überschwingen mit der Gefahr der Abflußaufsteilung. Die Relation $\frac{T_L}{T_R}$ einer Stauhaltung hängt vom Durchfluß ab und kann mit steigendem Durchfluß sowohl zu- als auch abnehmen.

An einem physikalischen Modell einer Stauhaltung werden die theoretischen Betrachtungen verifiziert. Die Autoren empfehlen eine Modifikation der Betriebsvorschriften unter Einbeziehung dieser Ergebnisse.

5.1.2 Regelungsstrukturen

Bei der **Abflußregelung** wird der Abfluß dem Zufluß zeitversetzt und ohne Berücksichtigung von Wasserstandsänderungen nachgeführt. Damit stellt die Abflußregelung keine Regelung, sondern eine Vorwärtssteuerung (Steuerung in offener Wirkungskette) dar. Aus Bilanzbetrachtungen bei sprungförmiger Änderung des Zuflusses ergibt sich, daß bei einer einfachen Abflußregelung der Abfluß der Staustufe dem Zufluß mit einer Zeitverzögerung (Totzeit) entsprechend der Retentionszeit T_R folgen muß, damit im stationären Zustand wieder der ursprüngliche Wasserstand erreicht wird.

Stauzielregelung bedeutet, daß der Wasserstand am Referenzpunkt – meist dem Oberwasserstand der Staustufe – auf einem vorgegebenen Wert, dem Stauziel gehalten wird. Dabei wird die Relation von Zufluß zu Abfluß nicht berücksichtigt, so daß im Fall einer großen Laufzeit $T_L > T_R$ das Störverhalten des Regelkreises, d. h. die Reaktion des Oberwasserstandes auf eine Zuflußänderung, (starkes) Überschwingen aufweist. Es kann zu einer Aufsteilung des Abflusses gegenüber dem Zufluß kommen, da der Regler erst nach der Laufzeit T_L auf eine Zuflußänderung reagieren kann. Der Fall $T_R > T_L$ ist in dieser Hinsicht weniger kritisch, siehe beispielsweise THEOBALD 1997, THEOBALD 1998b.

Eingesetzt werden meist klassische PI-Regler mit der Reglerübertragungsfunktion nach (5.12) und $T_D = 0$. Ein zusätzlicher D-Anteil würde zu meist unerwünschten stärkeren Beanspruchungen des Stellglieds führen, wogegen die erreichbare Verringerung der Ausregelzeit zweitrangig ist. Regler ohne I-Anteil sind nur bedingt geeignet, wie eine qualitative Betrachtung der Streckeneigenschaften zeigt: Die aus Wehrsteuerung, Wehr und Stauhaltung bestehende Regelstrecke mit der Eingangsgröße (Stellgröße) Sollabfluß und der Ausgangsgröße (Regelgröße) Wasserstand am Referenzpunkt besitzt I-Charakter. Ein P-Regler garantiert zwar ein ausreichendes Führungsverhalten (keine bleibende Regelabweichung bei sprungförmiger Änderung der Führungsgröße), das hier wesentliche Störverhalten bei Störungen nahe dem Streckeneingang (wie z. B. Zuflußänderungen) ist jedoch inakzeptabel, da bei sprungförmiger Änderung der Störgröße eine bleibende Regelabweichung auftreten würde.

Bei der **OW/Q-Regelung** wird der Sollabfluß einer Stauhaltung mit Kenntnis des Zuflusses in die Stauhaltung und des Wasserstands am Referenzpunkt ermittelt. Eine Zuflußänderung wird dabei über den Vorwärtssteuerungsanteil direkt als Abflußänderung, eine Wasserstandsänderung über den Regler ebenfalls als Abflußänderung bei der Abflußsteuerung berücksichtigt. Beide Anteile zusammen ergeben den Sollabfluß. Im regelungstechnischen Sprachgebrauch handelt es sich hierbei um einen einschleifigen Regelkreis mit Störgrößenaufschaltung auf das Stellglied. Abweichend von Abbildung 5.9 greift die Störgröße hier nahe dem Streckeneingang ein.

Abbildung 5.1 zeigt das Blockschaltbild einer OW/Q-Regelung. Der Block „Abflußverteiler“ umfaßt sowohl die Verteilung des Sollabflusses z. B. auf mehrere Wehrfelder als auch die Ansteuerung des Wehres selbst.

Für die Auswahl des Reglers gilt das oben gesagte. Aus Bilanzbetrachtungen bei sprungförmiger Änderung des Zuflusses (der Störgröße) läßt sich ableiten, daß die Störung zeitversetzt mit einer der Retentionszeit entsprechenden Totzeit auf das Stellglied zu schalten ist

$$G_{Z,OW/Q}(s) = e^{-sT_R} \quad (5.2)$$

Als sinnvoll erweist sich eine zusätzliche Tiefpaßfilterung der Störgröße, beispielsweise mit einem T_2 -Glied

$$G_{Z,OW/Q}(s) = e^{-sT_t} \frac{1}{(1 + sT_{F,1})(1 + sT_{F,2})} \quad \text{mit } T_t + T_{F,1} + T_{F,2} = T_R. \quad (5.3)$$

Damit wird eine Glättung und Vergleichmäßigung des Sollabflusses erreicht. Im praktischen Einsatz ist die Abflußabhängigkeit der Retentionszeit geeignet zu berücksichtigen. Die Parameter T_R , $T_{F,1}$ und $T_{F,2}$ sind simulativ am Modell bzw. während des Einfahrens am Prozeß so anzupassen, daß eine gewisse Dämpfung von Zuflußwellen erreicht wird. Die deutliche Redukti-

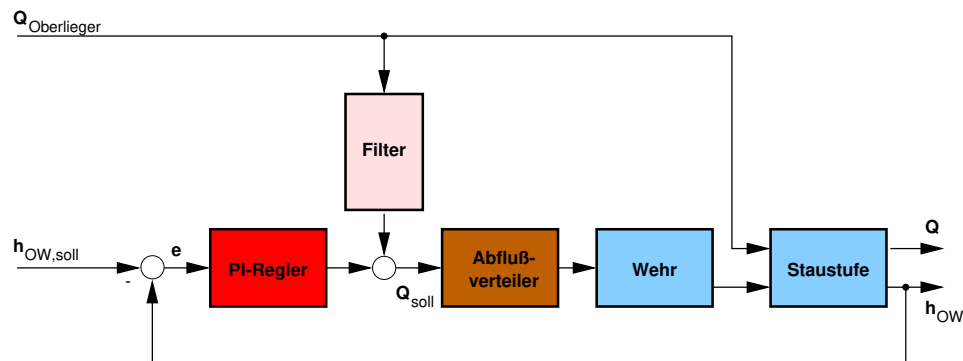


Abbildung 5.1: OW/Q-Regelung.

on von Abflußschwankungen durch den Einsatz einer OW/Q-Regelung gegenüber einer reinen Stauzielregelung wird in NESTMANN und THEOBALD 1994 simulativ an einem Gesamtmodell der Staustufenkette des Neckar gezeigt.

Bei der beispielsweise von THEOBALD 1998b untersuchten **Wasserstandsregelung mit Antizipation** erfolgt im Unterschied zur OW/Q-Regelung die Aufschaltung des Zuflusses nicht auf

das Stellglied, sondern auf die Führungsgröße. Um eine Verfälschung des stationären Verhaltens des Regelkreises zu vermeiden, muß die Aufschaltung nachgebend realisiert werden, also im stationären Zustand verschwinden.

OW/Q-Regelung und Wasserstandsregelung mit Antizipation sind strukturell äquivalent, da das Filter zur Störgrößenaufschaltung so bemessen werden kann, daß die durch die Antizipation bewirkte Änderung der Führungsgröße exakt die gleiche Wirkung am Stellglied hat wie die direkte Aufschaltung der zeitversetzten Störgröße bei der OW/Q-Regelung. Das Übertragungsverhalten des Filters (D-T_t-T₁-Verhalten)

$$G_{Z,A1}(s) = \frac{e^{-sT_R}}{G_R(s)} = e^{-sT_R} \frac{sT_I}{k_p(1 + sT_I)} \quad (5.4)$$

besitzt schon die geforderten Eigenschaften.

Weitergehende Bilanzbetrachtungen führen zu dem Ergebnis, daß eine Berücksichtigung der Laufzeit T_L sinnvoll ist. Dies führt auf eine Filterübertragungsfunktion

$$G_{Z,A2}(s) = K_A (e^{-sT_R} - e^{-sT_L}) \quad (5.5)$$

mit dem (zusätzlich zu bemessenden) Absenkungsfaktor K_A und ebenfalls nachgebendem Übertragungsverhalten. Auch hier ist eine zusätzliche Tiefpaßfilterung wie in Gleichung 5.3 sinnvoll.

Abbildung 5.2 zeigt das Blockschaltbild einer Wasserstandsregelung mit Antizipation. Im praktischen Einsatz ist die Abflußabhängigkeit von Retentions- und Laufzeit geeignet zu berücksichtigen.

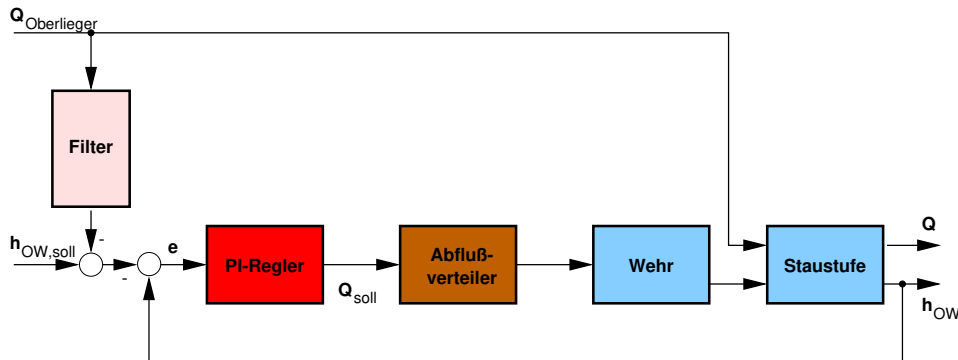


Abbildung 5.2: Wasserstandsregelung mit Antizipation.

Zur Kombination der positiven Eigenschaften von OW/Q-Regelung und Antizipation schlägt THEOBALD eine **A/Q-Regelungsstruktur** vor, siehe THEOBALD 1998b, bei der die zeitversetzte Zufluß sowohl auf das Stellglied als auch gefiltert mit $G_{Z,A2}(s)$ auf die Führungsgröße geschaltet wird.

5.1.3 Untersuchungen an einem I-T_t-Modell

KÜHNE 1975 untersucht und vergleicht verschiedene Regelungsstrukturen an einem vereinfachten I-Modell einer Stauhaltung. Ausgehend von der Volumenbilanzgleichung

$$\frac{dV}{dt} = Q_{zu}(t) - Q_{ab}(t) \quad (5.6)$$

ergibt sich unter der Annahme

$$dV = A \cdot dH$$

die Speichergleichung zur Beschreibung der Regelstrecke:

$$\frac{dH}{dt} = \frac{1}{A}(Q_{zu}(t) - Q_{ab}(t)) \quad (5.7)$$

mit A [m²] – Speicheroberfläche,
 H [m] – Wassertiefe,
 Q_{zu} [m³/s] – Zufluß in den Speicher / Stauhaltung,
 Q_{ab} [m³/s] – Abfluß aus dem Speicher / Stauhaltung.

Betrachtet man die Abweichungen h , q_{zu} , q_{ab} von einem stationären Zustand oder Arbeitspunkt H_0 , $Q_{zu,0} = Q_{ab,0}$, so erhält man mit

$$\frac{dH(t)}{dt} = \frac{dh(t)}{dt} = \frac{1}{A}(q_{zu}(t) - q_{ab}(t)) \quad (5.8)$$

ein I-Modell der Strecke. Dieses läßt sich um eine Totzeit T_t erweitern zu einem I-T_t-Modell (ID: „integrator delay“)

$$\frac{dh(t)}{dt} = \frac{1}{A}(q_{zu}(t - T_t) - q_{ab}(t)) \quad (5.9)$$

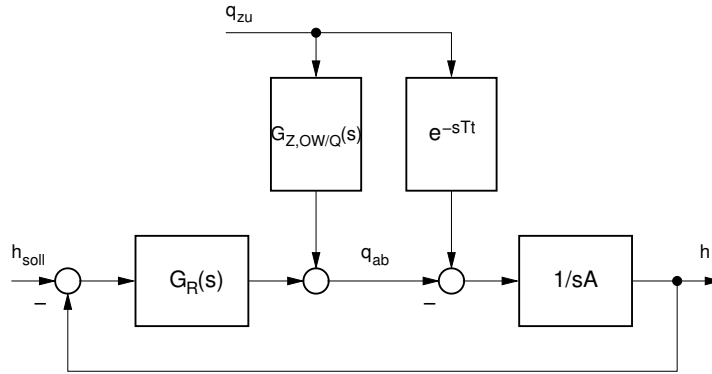
Damit hat man ein Streckenmodell erhalten, das sich zum einen theoretisch über eine Vereinfachung der SAINT-VENANT-Gleichung ableiten läßt, siehe Abschnitt 4.2.3. Zum anderen bildet das Modell (5.9) im Gegensatz zu (5.8) Retentions- und Laufzeiteffekte zumindest ansatzweise ab. Die Laufzeit stimmt offensichtlich mit der Totzeit T_t im Modell (5.9) überein. Die Retentionszeit kann man bei vorausgesetzter idealer Regelung

$$\frac{dh(t)}{dt} = 0 \implies q_{ab}(t) = q_{zu}(t - T_t)$$

über die Betrachtung einer sprungförmigen Änderung des Zuflusses um ΔQ ermitteln:

$$\begin{aligned} q_{zu}(t) &= \Delta Q \sigma(t) \\ q_{ab}(t) &= q_{zu}(t - T_t) = \Delta Q \sigma(t - T_t) \\ \Delta V &= \int_0^\infty (q_{zu}(t) - q_{ab}(t)) dt = \int_0^{T_t} (q_{zu}(t) - q_{zu}(t - T_t)) dt = T_t \Delta Q \end{aligned}$$

Damit gilt für das I-T_t-Modell $T_L = T_R = T_t$ und für das I-Modell $T_L = T_R = 0$. Das I-T_t-Modell kann Effekte, die sich aus dem Unterschied zwischen Lauf- und Retentionszeit ergeben, nicht nachbilden.


 Abbildung 5.3: Blockschaltbild OW/Q-Regelung mit I-T_t-Modell.

KÜHNE 1975 setzt für das I-Modell einen PI-Regler an, der um eine proportionale Störgrößenaufschaltung des Zuflusses erweitert wird. Dies soll im folgenden für das I-T_t-Modell nachvollzogen werden. Hierbei wird die Wassertiefe $H(t)$ als Wasserstand am Referenzpunkt (Oberwasserstand) interpretiert. Zudem wird eine ideale Realisierung des Abflusses Q_{ab} durch ein verzögerungsfreies Wehr angenommen. Die in den folgenden Rechnungen verwendeten Zahlenwerte stammen von einem Kanalmodell aus SCHUURMANS, BOSGRA und BROUWER 1995 mit $A = 4330 \text{ m}^2$ und $T_t = 302 \text{ s}$.

Die LAPLACE-Transformation der Modellgleichung (5.9) ergibt bei vorausgesetzten verschwindenden Anfangsbedingungen, d. h. stationärem Zustand für $t = 0$:

$$h(s) = \frac{1}{sA} \left(q_{zu}(s)e^{-sT_t} - q_{ab}(s) \right). \quad (5.10)$$

Mit der Übertragungsfunktion des PI-Reglers

$$G_R(s) = K_I \frac{1 + sT_N}{s}$$

und dem Filter $G_{Z,OW/Q}(s)$ zur Störgrößenaufschaltung ergibt sich aus dem Blockschaltbild 5.3

$$q_{ab}(s) = G_R(s) (h(s) - h_{soll}(s)) + G_{Z,OW/Q}(s)q_{zu}(s).$$

Mit (5.10) und $q_{zu} = 0$ erhält man die Führungsübertragungsfunktion

$$\frac{h(s)}{h_{soll}(s)} = \frac{K_I(1 + sT_N)}{As^2 + K_I(1 + sT_N)} \quad (5.11a)$$

sowie mit (5.10) und $h_{soll} = 0$ die Störübertragungsfunktionen

$$\frac{q_{ab}(s)}{q_{zu}(s)} = \frac{K_I(1 + sT_N)}{As^2 + K_I(1 + sT_N)} e^{-sT_t} + \frac{As^2}{As^2 + K_I(1 + sT_N)} G_{Z,OW/Q}(s) \quad (5.11b)$$

$$\frac{h(s)}{q_{zu}(s)} = \frac{s}{As^2 + K_I(1 + sT_N)} \left(e^{-sT_t} - G_{Z,OW/Q}(s) \right) \quad (5.11c)$$

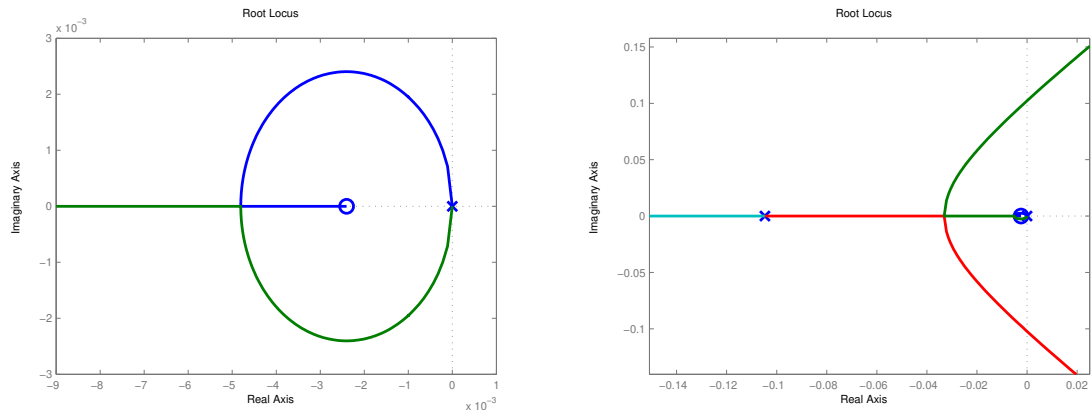


Abbildung 5.4: OW/Q-Regelung: Wurzelortskurve I-T_t-Modell mit PI-Regler (links) und mit zusätzlichen Streckenzeitkonstanten (rechts).

Zunächst soll eine einfache Stauzielregelung ohne Störgrößenaufschaltung betrachtet werden, d. h. $G_{Z,OW/Q}(s) = 0$.

Anhand der Störübertragungsfunktion $\frac{h(s)}{q_{zu}(s)}$ wird die Notwendigkeit des I-Anteils im Regler deutlich: mit einem P-Regler $G_R(s) = K_P$ erhalte man bei sprungförmiger Störung (Zufluß) eine bleibende Regelabweichung $\frac{1}{1+K_P}$. Mit einem PI-Regler verschwindet dagegen die Regelabweichung asymptotisch.

Aus der Führungsübertragungsfunktion (5.11a) und unabhängig von der Störgrößenaufschaltung erhält man die Wurzelortskurve nach Abbildung 5.4 (links). Der Regelkreis mit PI-Regler ist strukturstabil. Für kleine Reglerverstärkungen ergibt sich Schwingungsverhalten, für große Reglerverstärkungen aperiodisches Verhalten des geschlossenen Kreises. Dies zeigt eine Unzulänglichkeit des I-T_t-Modells: K_I kann beliebig groß gewählt werden. Ergänzt man das Streckenmodell um eine kleine Trägheitszeitkonstante, die beispielsweise eine Wehrdynamik approximiert, dann erkennt man anhand der zugehörigen Wurzelortskurve in Abbildung 5.4 (rechts), daß der Kreis für große K_I instabil wird.

Die bestätigt man anhand des BODE-Diagramms der offenen Kette in Abbildung 5.5.

Den zur Führungsübertragungsfunktion gehörigen Frequenzgang des geschlossenen Kreises zeigt Abbildung 5.6. Da die Störübertragungsfunktion (5.11b) zwischen Zufluß und Abfluß ohne Störgrößenaufschaltung bis auf den Totzeitterm exakt mit der Führungsübertragungsfunktion übereinstimmt, erhält man den gleichen Amplitudenfrequenzgang wie in Abbildung 5.6 (oben). Wird der PI-Regler im Hinblick auf gutes Führungsverhalten entworfen, so ist dadurch ein entsprechend schlechtes Störverhalten des Kreises bedingt. Zudem ist die Kreisverstärkung in einem bestimmten Frequenzbereich größer als 1 (in Abbildung 5.6 hervorgehoben).

Durch die serielle Verkopplung der Störübertragungsfunktionen in einer Stauhaltungskette kann es daher zu einer Verstärkung des Störsignals in diesem Frequenzbereich und damit zu einer Aufsteilung des Abflusses kommen. Das ist in Abbildung 5.7 (links) für eine sprungförmige Zuflußänderung in eine Kette aus fünf identischen Stauhaltungen dargestellt. Dies ist in gewis-

5.1 Abflußregelung, Stauzielregelung, OW/Q-Regelung

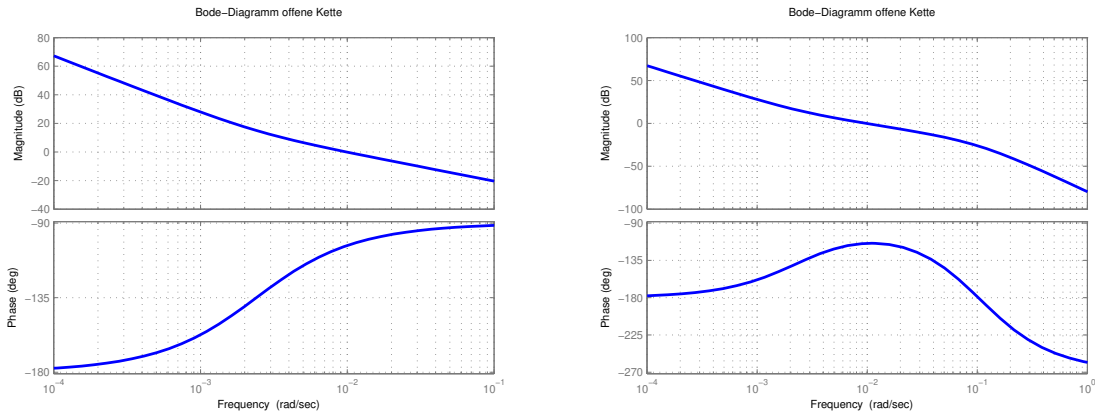


Abbildung 5.5: OW/Q-Regelung: BODE-Diagramm der offenen Kette aus I-T_t-Modell mit PI-Regler (links) und mit zusätzlichen Streckenzeitkonstanten (rechts).

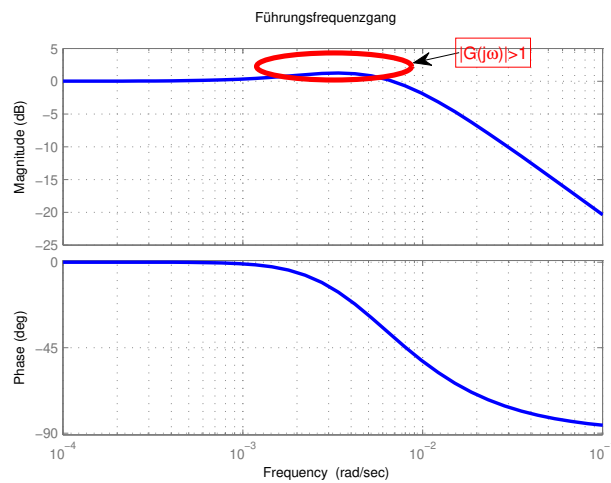


Abbildung 5.6: OW/Q-Regelung: Führungsfrequenzgang des geschlossenen Kreises für I-T_t-Modell mit PI-Regler.

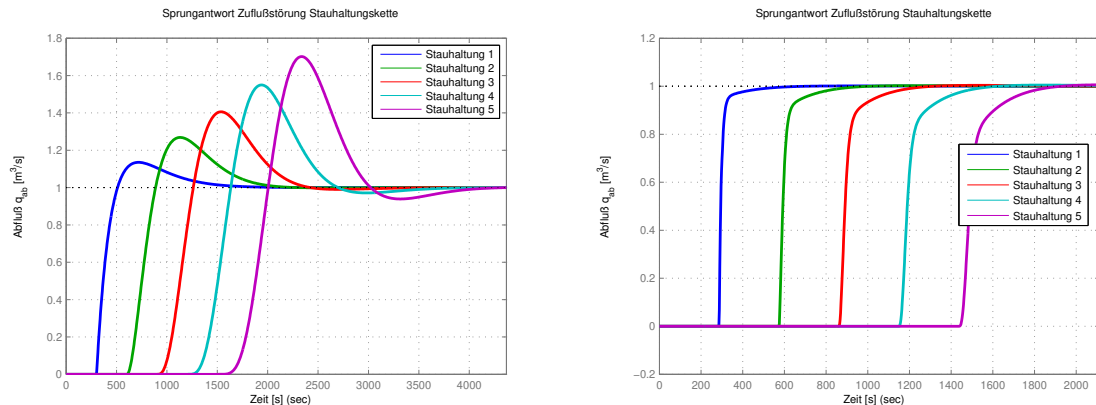


Abbildung 5.7: OW/Q-Regelung: Sprungantwort auf eine Zuflußänderung für eine Stauhaltungskette ohne (links) und mit (rechts) Störgrößenaufschaltung.

sem Sinne ein „worst case“, da in diesem Fall die kritischen Frequenzbereiche übereinstimmen.

Wird der Regelkreis durch eine Störgrößenaufschaltung des Zuflusses auf den Abfluß gemäß Abbildung 5.3 ergänzt, so vereinfacht sich für $G_{Z,OW/Q} = e^{-sT_t}$ die Störübertragungsfunktion (5.11b) zu einem reinen Totzeitglied, der Abfluß folgt dem Zufluß bis auf eine Zeitverschiebung von T_t exakt. Da KÜHNE 1975 ein reines I-Modell der Stauhaltung verwendet, wird dort die Störgröße proportional ohne Zeitverzögerung aufgeschaltet. Unter realen Bedingungen wird man den exakten Wert der Totzeit nicht kennen, daher ist in Abbildung 5.8 der Störfrequenzgang für eine 5%-ige Abweichung $G_{Z,OW/Q} = e^{-s0.95T_t}$ und einer zusätzlichen Filterung mit einem Tiefpaß dargestellt. Auch im nieder- und mittelfrequenten Bereich ist nun die Verstärkung nicht größer als 1, und in der Stauhaltungskette gibt es keine Verstärkung des Störsignals bzw. Abflubaufteilung, siehe Abbildung 5.7 (rechts).

Mit den Führungs- und Störübertragungsfunktionen (5.11) können beispielsweise Sprung- oder Impulsantworten des Systems bestimmt werden. Nach Rücktransformation in den Zeitbereich lassen sich Überschwingweiten, Einschwingzeiten und ähnliche Kenngrößen in Abhängigkeit von den Regler- und Streckenparametern bestimmen, siehe KÜHNE 1975. Diese können zur Reglerparametrierung, aber auch direkt zur Abschätzung des Verhaltens des Regelkreises in Sondersituationen, wie z. B. Turbinenschnellschluß mit einem zusätzlichen Störeingang an der Summationsstelle vor dem Streckenintegrator, genutzt werden.

5.1.4 Bemerkungen zur „string instability“

In der Literatur zur Abstandsregelung von Fahrzeugkolonnen finden sich gelegentlich Hinweise, daß das dort beobachtete Phänomen der „string instability“ auch bei Staustufenketten auftreten könne. Wird der Fahrzeugabstand innerhalb der Kolonne durch lokale Regelalgorithmen für die Einzelfahrzeuge geregelt, dann kann auch bei stabilen lokalen Regelkreisen eine Verstärkung von Störungen in der Kolonne auftreten. Dies führt dann zu Abstandsschwingungen,

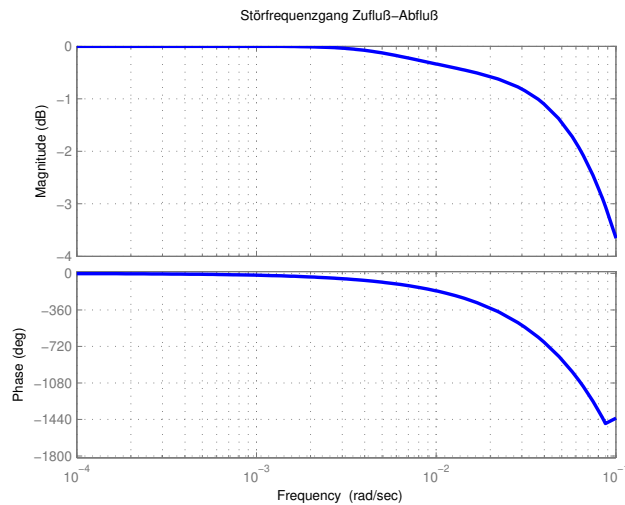


Abbildung 5.8: OW/Q-Regelung: Störfrequenzgang des geschlossenen Kreises für I-T_t-Modell mit PI-Regler und Störgrößenaufschaltung.

deren Amplitude mit dem Abstand vom Führungsfahrzeug zunimmt und im Grenzfall einer unendlich langen Kolonne zur Instabilität.

Eine solche „string instability“ läßt sich unter sehr allgemeinen Voraussetzungen für die lokalen Regelkreise nachweisen und kann durch Modifikation der lokalen Regelkreise allein nicht verhindert werden. Abhilfe ist nur durch Einbeziehung von (globalen) Informationen über vorausfahrende Fahrzeuge, beispielsweise das unmittelbar vorausfahrende und das Führungsfahrzeug möglich. Eine hinreichende Bedingung für die Stabilität der Kolonne kann mit dem Frequenzgang der lokalen Regelkreise formuliert werden:

$$\max_{\omega} |G_i(j\omega)| \stackrel{!}{<} 1, \quad i = 1, \dots, n$$

Wenn diese Ergebnisse auf die Regelung von Staustufenkette übertragbar sind, dann bedeutet das, daß eine Aufteilung von Abflußwellen in der Kette prinzipiell nicht durch eine Verbesserung der lokalen OW/Q-Regler zu verhindern ist. Die Einbeziehung von Informationen über die stromauf gelegenen Haltungen und des Zuflusses in die Kette in die lokale Regelung ist zwingend notwendig. Im Rahmen der Literaturrecherche wurde jedoch keine Veröffentlichung gefunden, die sich detailliert mit der Anwendung auf Staustufenketten befaßt.

5.2 Regelungsstrukturen für Bewässerungskanalssysteme

5.2.1 Klassifikation von Regelungsstrukturen

MALATERRE, ROGERS und SCHUURMANS 1998 klassifizieren Regelungsstrukturen für Bewässerungskanäle. Hierzu werden zunächst die Regel-, Meß- und Stellgrößen identifiziert. Da die

Regelung der eigentlichen Zielgröße, der Wasserentnahmen durch die Nutzer des Bewässerungssystems schwer zu realisieren ist, werden in den meisten Fällen Wasserstände geregelt. Hinsichtlich der Position an einer Haltung wird dabei die Regelung des Wasserstands am stromab gelegenen Ende der Haltung („downstream level“), am stromauf gelegenen Ende der Haltung („upstream level“) und an Zwischenpositionen unterschieden. Als ein großer Vorteil der Regelung des Wasserstands am stromauf gelegenen Ende der Haltung wird die dabei mögliche Nutzung des abflußabhängigen Retentionsvolumens zur schnellen Reaktion, beispielsweise auf einen erhöhten Wasserbedarf, hervorgehoben. Die Ufergestaltung des Kanals (Deich) muß jedoch für eine solche Bewirtschaftung geeignet sein. Bei einer Regelung des Wasserstands am stromab gelegenen Ende der Haltung wächst dagegen das Retentionsvolumen mit zunehmendem Abfluß, was zu einer Überkompensation von Durchflußschwankungen führt.

Stellgrößen können zum einen die Wehrstellungen selbst und zum anderen die zu realisierenden Abflüsse sein. Im zweiten Fall ist durch eine unterlagerte Abflußregelung – entweder durch einen zusätzlichen PID-Regler oder vereinfacht als Vorwärtssteuerung unter Nutzung der inversen Wehrkennlinie – die entsprechende Wehrstellung zu realisieren. Dies gestattet einerseits die entkoppelte (und damit vereinfachte) Betrachtung der Regelkreise, andererseits bleibt die eventuell nicht zu vernachlässigende Dynamik der Abflußregelung dabei oft unbeachtet.

Ein weiteres Kriterium ist die Zuordnung von Stell- und Regelgrößen, die insbesondere beim Einsatz von Eingrößenregelungen von Bedeutung ist. Die Regelgröße einer Haltung kann sowohl durch die Stellgröße des Oberliegerwehres („distant downstream control“) als auch durch die Stellgröße des Wehres der Haltung selbst („local upstream control“) beeinflusst werden. Der Vorteil der erstgenannten Zuordnung besteht darin, daß sowohl Wasserstand als auch Wasservolumen oder Abfluß geregelt werden können. Die zweitgenannte Regelungsstruktur kann nur bei unterkritischen Abflüssen unter den Restriktionen des Rückstaueffekts im Staubereich eingesetzt werden und eignet sich nicht zur Abflußregelung.

Weiterhin werden die Regelungen hinsichtlich der Regelkreisstrukturen (Regelung, Vorwärtssteuerung, Störgrößenaufschaltung etc.) und des Entwurfsverfahrens (Ein- oder Mehrgrößenregelungen) klassifiziert. Nach diesem Schema werden ca. 40 publizierte Regelungen für Bewässerungskanäle bewertet.

CANTONI, WEYER, LI u. a. 2007 geben als bevorzugte Regelungsstruktur die Regelung des Wasserstands am stromab gelegenen Ende einer Haltung (Regelgröße) durch Änderung des Oberliegerzufflusses (Stellgröße) an („distant downstream control“). Nachteilig ist hier die Verzögerung (Totzeit) zwischen dem Stelleingriff und der Reaktion der Regelgröße, die die erreichbare Regelgüte begrenzt. Die Verwendung des Abflusses aus der Haltung als Stellgröße ist für eine einzelne Haltung von Vorteil, führt jedoch bei einer Kette von Stauhaltungen zu starken Schwankungen der Wasserstände und damit zu erhöhten Wasserverlusten. Ziel der Regelung ist die Sollwertfolge, die Störungsunterdrückung sowie das Vermeiden der örtlichen Ausbreitung und Verstärkung von Regelabweichungen entlang der Stauhaltungskette.

Das gesamte Regelungssystem ist hierarchisch aufgebaut: von der oberen (Überwachungs-) Schicht werden unter Berücksichtigung des Bedarfs und der Netzwerkkapazität Sollwerte für die Wasserstände bereitgestellt. Die untere (Regelungs-)Schicht hat die Aufgabe, die Einhaltung dieser Sollwerte auch unter dem Einfluß von Störungen zu gewährleisten.

5.2.2 Dezentrale PI-Regler ohne und mit Entkopplung

WAHLIN und CLEMMENS 2002 untersuchen dezentrale PI-Regler ohne und mit Entkopplung am ASCE-Benchmark-Kanal nach CLEMMENS, KACERER, GRAWITZ u. a. 1998. Der lokale (dezentrale) PI-Regler einer Haltung regelt den Wasserstand am stromab gelegenen Ende mit dem Zufluß in die Haltung als Stellgröße („distant downstream control“). In einer als Typ I bezeichneten Entkopplungsstruktur wird die Stellgröße des lokalen Reglers einer Haltung proportional auf den Ausgang des Reglers der stromaufwärts gelegenen Haltung geschaltet. Damit werden die Stellgrößen aller stromaufwärts gelegenen Haltungen modifiziert. Beim Entkopplungstyp II erfolgt die Aufschaltung entgegengesetzt, d. h. stromab.

In den Simulationsrechnungen zeigt sich, daß durch die Entkopplungsstrukturen – insbesondere bei Einsatz von Typ I oder Typ I und II – die Regelgüte gegenüber einer reinen PI-Regelung signifikant verbessert werden kann. Ein zum Vergleich getesteter heuristischer Algorithmus (CARDD) ist in den meisten Gütemaßen eine Größenordnung schlechter als der PI-Regler. Lediglich die Abflußglättung ist vergleichbar oder besser.

5.2.3 Stabilitätsanalyse für dezentrale Regelung von Stauhaltungsketten

GUENOVA WELZ, LITRICO, FROMION u. a. 2005 untersuchen die Frage, ob durch die Verkopplung der Regelkreise bei dezentraler Regelung des Wasserstands der Stauhaltungen in einer Kette die Stabilität des Gesamtsystems beeinträchtigt werden kann. Unter relativ allgemeinen Annahmen für die sich aus der Übertragungsmatrix (4.16) ergebenden Übertragungsfunktionen in einer „distant downstream control“-Struktur wird mittels Singulärwertanalyse gezeigt, daß eine dezentrale Regelung mit und ohne Entkopplung genau dann stabil ist, wenn die lokalen Regelkreise stabil sind. Eine zusätzliche Entkopplung der lokalen Regelkreise durch eine proportionale Aufschaltung des Abflusses auf die Stellgröße des Oberlieger-Regelkreises kann die Regelgüte verbessert werden. Eine vollständige Entkopplung ist aufgrund der Streckentotzeit nicht realisierbar, da eine negative Totzeit erforderlich wäre.

Anmerkung: Diese Aussagen gelten für das linearisierte System mit abflußunabhängigen Parametern.

5.2.4 PI-Regler mit Stellgröße Wehrstellung

BURT, MILLS, KHALSA u. a. 1998 berichten über Schwierigkeiten bei der Einstellung von PI-Reglern, die offensichtlich mit der Wahl der Wehrstellung als Stellgröße zusammenhängen. Da der PI-Regler die absolute Wehrstellung als Stellsignal liefert, ist eine genaue Messung der absoluten Wehrstellung notwendig. Dies kann durch eine PI-Regler in Geschwindigkeitsform vermieden werden, da in diesem Fall das vom Regler generierte Stellsignal die offenbar einfacher zu messende Änderung der Wehrstellung ist. Ein weiterer Punkt der Untersuchungen hängt offenbar ebenfalls mit der Wahl der Wehrstellung als Stellgröße zusammen: die durch Tuning anhand von HN-Simulationsrechnungen gewonnenen Reglerparameter hängen von den Wehrparametern ab. Daher führen die Autoren einen Korrekturfaktor ein, der eine Entkopplung der Regler- von den Wehrparametern bewirkt. Der Korrekturfaktor ist für jedes Wehr anhand

einer Simulation bei stationären Strömungsverhältnissen zu bestimmen. Beide Probleme lassen sich offensichtlich mit der Wahl des Wehrabflusses als Stellgröße umgehen.

5.2.5 Störgrößenaufschaltung bei geplanten Wasserentnahmen

LIU, FEYEN, MALATERRE u. a. 1998 geben einen Algorithmus zur Berechnung der aufzuschaltenden Korrekturwerte bei geplanten Wasserentnahmen in Bewässerungssystemen an. Bei der Bewirtschaftung von Bewässerungssystemen wird zwischen geplanten („scheduled offtakes“) und ungeplanten Entnahmen unterschieden. Die vorab in Zeitverlauf und Durchfluß bekannten geplanten Entnahmen können in Form einer Störgrößenaufschaltung oder Vorsteuerung in der Regelung berücksichtigt werden. Es ist jedoch nicht ausreichend, ein Korrektursignal nur auf den von der Störung betroffenen lokalen Regler zu geben, vielmehr müssen bei einer „distant downstream control“-Regelungsstruktur auch alle stromauf gelegenen lokalen Regler entsprechend beaufschlagt werden. Die notwendigen Korrekturwerte können mit dem Algorithmus CLIS berechnet werden.

5.3 Ein- und mehrschleifige Regelungen

5.3.1 PID-Regler, Störgrößenaufschaltung, Kaskadenregelung

Der PID-Regler mit der Übertragungsfunktion

$$G_R(s) = k_p \left(1 + \frac{1}{sT_I} + sT_D \right) \quad (5.12)$$

ist der Standard-Regler in der klassischen Regelungstechnik. Der I-Anteil bewirkt bei Strecken mit Ausgleich (P-Strecken) eine verschwindende Regelabweichung bei sprungförmiger Änderung der Führungsgröße bzw. sprungförmiger Störung am Streckenausgang. Über den D-Anteil reagiert der Regler schon auf eine Änderung der Regelabweichung, wenn diese noch keine große Amplitude aufweist. Ein D-Anteil verstärkt jedoch ein eventuell vorhandenes Meßrauschen.

In den meisten Fällen wird die Implementierung des Regelalgorithmus in zeitdiskreter Form erfolgen (quasi-kontinuierlicher PID-Regler). Hierbei gibt es unterschiedliche Realisierungen des I- und D-Anteils, beispielsweise

$$\begin{aligned} U(z) &= k_p \left(1 + \frac{\Delta T}{2T_I} \frac{z+1}{z-1} + \frac{T_D}{\Delta T} \frac{z-1}{z} \right) E(z) \\ u(k) &= u(k-1) + c_2 e(k) + c_1 e(k-1) + c_0 e(k-2) \\ c_2 &= k_p \left(1 + \frac{\Delta T}{2T_I} + \frac{T_D}{\Delta T} \right), \quad c_1 = k_p \left(-1 + \frac{\Delta T}{2T_I} - \frac{2T_D}{\Delta T} \right), \quad c_0 = k_p \frac{T_D}{\Delta T}. \end{aligned} \quad (5.13)$$

Wenn das Stellglied selbst I-Verhalten besitzt, dann empfiehlt sich statt des „Positionsalgorithmus“ (5.13) der „Geschwindigkeitsalgorithmus“

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) = c_2 e(k) + c_1 e(k-1) + c_0 e(k-2). \quad (5.14)$$

Es sind zahlreiche Entwurfsverfahren zur Ermittlung der Reglerparameter entwickelt worden, die wesentlichen sind

- heuristische Einstellregeln mit Grobmodell der Regelstrecke
- Reglerentwurf anhand der Frequenzgangs der offenen Kette („loopshaping“)
- Vorgabe des P-N-Bildes des Regelkreises
- Parameteroptimierung des Reglers

Die letztgenannten Verfahren erfordern ein Streckenmodell.

Störgrößenaufschaltung

Ist die wesentliche Störgröße im Regelkreis meßbar, so kann durch eine Störgrößenaufschaltung nach Abbildung 5.9 die Wirkung auf die Regelgröße näherungsweise kompensiert werden. Hierzu ist bei Störgrößenaufschaltung auf das Stellglied die Übertragungsfunktion

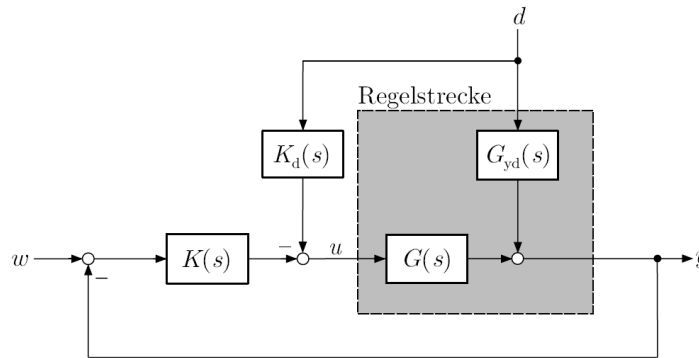


Abbildung 5.9: Störgrößenaufschaltung auf das Stellglied (LUNZE 2006).

$$K_d(s) = \frac{G_{yd}(s)}{G(s)} \quad (5.15)$$

zu wählen. Alternativ kann die Aufschaltung auf den Reglereingang mit

$$\bar{K}_d(s) = \frac{G_{yd}(s)}{K(s)G(s)} \quad (5.16)$$

erfolgen, was einer (nachgebenden) Sollwertverschiebung entspricht. In vielen Fällen werden die Übertragungsglieder $K_d(s)$ bzw. $\bar{K}_d(s)$ nicht realisierbar sein, in diesen Fällen fordert man zumindest statische Invarianz für $s \rightarrow 0$.

Kaskadenregelung

Ein praktisch wichtiger Spezialfall der Regelung mit Hilfsregelgröße ist eine Kaskadenregelung nach Abbildung 5.10. Der Regler $K_2(s)$ des äußeren Kreises liefert den Sollwert für den aus dem Regler $K_1(s)$ und der Teilstrecke $G_1(s)$ bestehenden inneren Regelkreis. Letzterer wird auf Schnelligkeit und gutes Störverhalten entworfen. Die Strecke des äußeren Kreises besteht

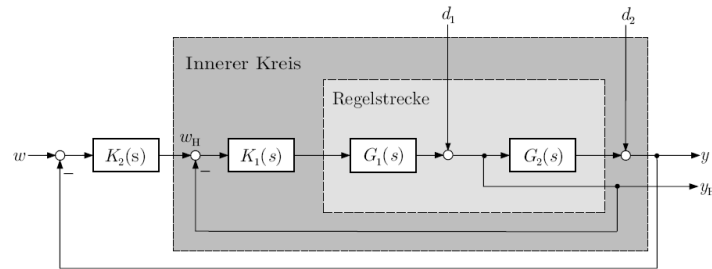


Abbildung 5.10: Kaskadenregelung (LUNZE 2006).

aus dem inneren Regelkreis und der Teilstrecke $G_2(s)$. Der Regler $K_2(s)$ wird so entworfen, daß ein gutes Führungsverhalten gewährleistet ist.

Bei der in Abbildung 5.1 dargestellten OW/Q-Regelung handelt es sich um eine Kaskadenstruktur: der (äußere) OW/Q-Regler gibt einen Sollabfluß vor, der vom inneren Regelkreis mittels Abflußverteiler, Turbinendurchflußregelung und Wehrsteuerung umgesetzt wird. Die Staustufe mit den Eingangsgrößen Zufluß und Abfluß und der Ausgangsgröße Wasserstand am Referenzpunkt entspricht der Teilstrecke $G_2(s)$ in Abbildung 5.10.

Kombination von Regelung und Vorsteuerung

Abbildung 5.11 zeigt eine Kombination von Regelung und Vorsteuerung in einer Zwei-Freiheitsgrade-Struktur, die die Vorzüge einer Regelung mit denen einer Steuerung in offener Wirkungskette verbindet. Die Stellgröße u setzt sich aus dem vorsteuernden Anteil u_V und dem Anteil u_R der Rückführung zusammen. Die Vorsteuerung wird so entworfen, daß die Strecke möglichst schnell der Führungsgröße w nachgeführt wird. Die Regelung kompensiert die Störung d sowie die Wirkung von Modellunsicherheiten.

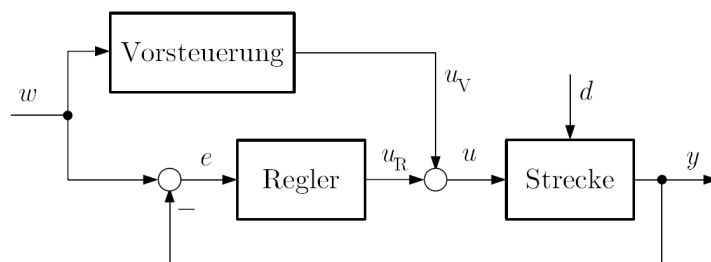


Abbildung 5.11: Kombination von Regelung und Vorsteuerung: Zwei-Freiheitsgrade-Struktur (LUNZE 2006).

Regler	Reglerparameter	
P: $G_R(s) = k_P$	$k_P = \frac{1}{k_S} \frac{T}{T_t}$	$k_P = 0.5k_{krit}$
PI: $G_R(s) = k_P(1 + \frac{1}{sT_I})$	$k_P = \frac{0.9}{k_S} \frac{T}{T_t}, T_I = 3.33T_t$	$k_P = 0.45k_{krit}, T_I = 0.85T_{krit}$

Tabelle 5.1: Einstellregeln nach ZIEGLER-NICHOLS (LUNZE 2006).

5.3.2 Einstellregeln für PID-Regler

In der regelungstechnischen Literatur existiert eine ganze Reihe von Einstellregeln für PID-Regler, die die Parameterfestlegung anhand von Experimenten mit der Regelstrecke bzw. dem geschlossenen Regelkreis gestatten. Diese Herangehensweise hat den Vorteil, daß kein Modell der Regelstrecke benötigt wird. Es müssen jedoch Experimente an der Strecke möglich sein.

Einstellregeln nach Ziegler-Nichols

Beispielhaft sollen hier die Einstellregeln nach ZIEGLER-NICHOLS angegeben werden.

Viele Regelstrecken mit aperiodischer Übergangsfunktion kann man näherungsweise mit einem P-T₁-T_t-Ansatz beschreiben:

$$G(s) = \frac{k_S}{1 + sT} e^{-sT_t} \quad (5.17)$$

Zur Ermittlung der Streckenparameter k_S , T und T_t ist die Sprungantwort der Strecke aufzu-

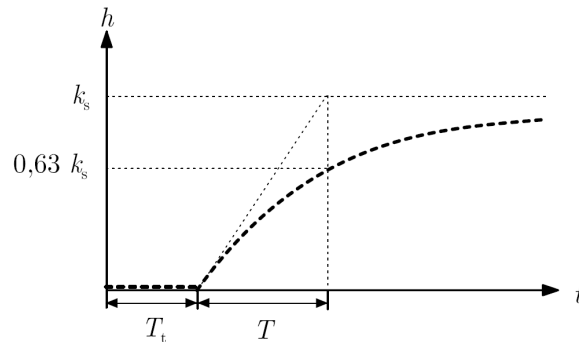


Abbildung 5.12: Übergangsfunktion eines P-T₁-T_t-Gliedes (LUNZE 2006).

nehmen, siehe Abbildung 5.12. Alternativ ist eine Bemessung anhand der kritischen Verstärkung k_{krit} des über eine reine P-Rückführung geschlossenen Regelkreises und der zugehörigen Schwingungsdauer T_{krit} möglich.

Die Einstellregeln nach Tabelle 5.1 sind empirisch auf schnelles Einschwingen und mäßiges Überschwingen ausgelegt.

Das ATV-Verfahren

Die Experimente zur Aufnahme der Sprungantwort der Strecke bzw. der kurzzeitige Betrieb des Regelkreises im grenzstabilen Bereich) sind für die Einstellung von Wasserstandsregelungen nur mit sehr großem Aufwand realisierbar. Die ATV¹-Methode (siehe z. B. LITRICO, MALATERRE, BAUME u. a. 2007) ersetzt diese Experimente durch einen kurzzeitigen Betrieb des Regelkreises mit einem Zweipunkt-Regler

$$u(t) = \begin{cases} u_{ZP} & \text{falls } e(t) > 0 \\ -u_{ZP} & \text{falls } e(t) < 0 \end{cases} \quad (5.18)$$

Für die betrachteten Regelstrecken stellt sich eine Dauerschwingung der Regelgröße mit der Amplitude y_{ZP} und der Periodendauer der Schwingung an der Stabilitätsgrenze T_{krit} ein. Für die kritische Verstärkung gilt die Abschätzung

$$k_{krit} = \frac{4u_{ZP}}{\pi y_{ZP}} \quad (5.19)$$

Damit können die Einstellregeln nach Tabelle 5.1 angewandt werden.

LITRICO, MALATERRE, BAUME u. a. 2007 beschreiben eine Anwendung der ATV-Methode zum automatischen Einstellen von PI-Reglern für die Wasserstandsregelung von Bewässerungskanälen. Basierend auf einem einfachen Streckenmodell der Stauhaltung (I-T_t: Integrator mit Totzeit) werden angepaßte Einstellregeln entwickelt. Das ATV-Verfahren wird im Simulationssystem SIC implementiert. Das SCADA-Interface des Simulators ermöglicht den Test der Regler im Echtzeitsteuerungssystem an realen Bewässerungskanälen.

Der Zweipunktregler wird so eingestellt, daß sich eine Amplitude der Dauerschwingung des Wasserstands von wenigen Zentimetern ergibt. Für den Einschwingvorgang der Dauerschwingung reichen schon zwei bis vier Zyklen aus.

Mit dieser Vorgehensweise können PI-Regler mit einem vergleichsweise geringen Eingriff vollautomatisch eingestellt werden. In LITRICO, MALATERRE, BAUME u. a. 2007 werden sowohl Simulationsergebnisse als auch Meßwerte aus dem Bewässerungskanalssystem Gignac (Frankreich) dargestellt.

5.3.3 Reglerentwurf anhand der Frequenzgangs der offenen Kette

Beim Reglerentwurf anhand der Frequenzgangs der offenen Kette (sog. „loopshaping“) werden die Güteforderungen an den geschlossenen Regelkreis in Forderungen an den Frequenzgang der offenen Kette

$$G_0(s) = G_R(s)G(s)$$

übersetzt. Die Reglerstruktur und die Reglerparameter werden dann so gewählt, daß diese Forderungen erfüllt sind. Beispielsweise kann man den offene Kette durch ein I-T₁-Glied approximieren und die Dynamikforderungen an den geschlossenen Regelkreis in Kenngrößen des Amplituden- oder Phasengangs wie

¹ATV: auto tune variation

- Schnittpunkt des Amplitudengangs mit der 0 dB-Achse
- Amplitudenrand: Verstärkungsreserve der offenen Kette bei Phasenwinkel -180°
- Phasenrand: Phasenreserve der offenen Kette bei Durchgang des Amplitudengangs durch die 0 dB-Achse

ausdrücken.

Bemessung von PI-Reglern mit Tiefpaß anhand des I-T_t-Modells

In mehreren Arbeiten untersuchen WEYER 2002; OOI und WEYER 2003; MAREELS, WEYER, OOI u. a. 2005; OOI und WEYER 2007; OOI und WEYER 2008a erweiterte PI-Regler (PIL-Struktur)

$$G_R(s) = \frac{K_R(1 + sT_N)}{sT_N} \frac{1}{1 + sT_f} \quad (5.20)$$

zur dezentralen Regelung des Wasserstands in Bewässerungskanälen. Mit dem zusätzlichen Tiefpaß soll eine niedrige Verstärkung im Bereich der Wellenfrequenz erreicht werden. Regelgröße ist der Wasserstand am stromab gelegenen Ende der Haltung, Stellgröße der mittels Wehr beeinflussbare Oberliegerzufluß. Die Struktur wird erweitert durch eine Störgrößenaufschaltung des Abflusses aus der Haltung, wobei auch hier eine Tiefpaßfilterung vorgesehen ist. Als besonderer Vorteil dieses dezentralen Ansatzes wird hervorgehoben, daß im Vergleich zu einem zentralen Regelungsansatz die Anforderungen an das Kommunikationsnetz deutlich geringer sind.

Die Bemessung der Regler erfolgt anhand einfacher I-T_t-Modelle nach Gleichung (4.39) der einzelnen Haltungen. Die Parameter dieser Modelle werden auf der Basis von Simulationsrechnungen mit einem HN-Modell (SAINT-VENANT-Gleichungen) ermittelt. Das Tuning der Reglerparameter erfolgt mittels Bemessungsregeln und vorgegebenem Phasenrand, die in OOI und WEYER 2007; OOI und WEYER 2008a im Detail angegeben sind. In WEYER 2002 wird ein Amplitudenrand von 6 dB und ein Phasenrand von 45° sowie eine Reglerverstärkung von -14 dB bei der Wellenfrequenz als Einstellregel angegeben. Für die Störgrößenaufschaltung wird der Abfluß aus der Haltung mit einem BUTTERWORTH-Filter (Tiefpaß mit Grenzfrequenz bei der halben Wellenfrequenz) und einem Verstärkungsfaktor von $0.75c_{i+1}/c_i$ gefiltert.

In OOI und WEYER 2003 werden Testergebnisse für ein reales Bewässerungssystem, zwei Haltungen des Haughton Main Channel, Australien und in OOI und WEYER 2007; OOI und WEYER 2008a Ergebnisse für fünf Haltungen des Coleambally Channel Number 6, New South Wales, Australien vorgestellt.

In CANTONI, WEYER, LI u. a. 2007 werden weitere Ergebnisse von Untersuchungen im Frequenzbereich vorgestellt, insbesondere zum Einfluß einer zusätzlichen Aufschaltung des Abflusses aus der Haltung (Störgrößenaufschaltung). Die Ausbreitung von Störungen in einer Kette von Stauhaltungen kann durch dezentrale lineare Regleransätze nicht vollständig verhindert werden.

Bemessung von PI-Reglern mit Tiefpaß anhand der approximierten Übertragungsmatrix

LITRICO, FROMION, BAUME u. a. 2005 beschreiben detailliert die Bemessung von PI-Reglern mit zusätzlichem Tiefpaßfilter 2. Ordnung

$$G_R(s) = \frac{K_R(1 + sT_N)}{sT_N} \frac{1}{1 + 2D_fT_f s + T_f^2 s^2} \quad (5.21)$$

anhand von approximierten Übertragungsmatrizen der SAINT-VENANT-Gleichungen. Gemäß der in den Abschnitten 4.2.1–4.2.2 vorgestellten Methode werden die SAINT-VENANT-Gleichungen um einen stationären Referenzabfluß Q_0 linearisiert. Die transzendente Übertragungsmatrix (4.14) kann mit dem Verfahren nach LITRICO und FROMION 2002a numerisch bestimmt werden. Die Übertragungsfunktionen $p_{21}(L, s)$, $p_{22}(L, s)$ zwischen Zu- und Abfluß und Wasserstand am stromab gelegenen Ende der Haltung können hier durch einfache P-T₁-T_t-Glieder approximiert werden.

Die Reglerverstärkung K_R wird so gewählt, daß für den Referenzabfluß ein vorgegebener Amplitudenrand eingehalten wird. Die Nachstellzeit T_R wird anschließend zur Verbesserung des Störverhaltens angepaßt und liegt im Bereich der 2. . . 5-fachen Systemtotzeit. Robuste Reglereinstellungen werden erhalten, indem die Bemessung für unterschiedliche stationäre Abflüsse wiederholt wird mit dem Ziel, im gesamten Abflußbereich eine vorgegebene Stabilitätsreserve (Amplitudenrand minimal 2 dB) zu gewährleisten.

Die Regler werden zunächst simulativ an einem HN-Modell (SIC) getestet und dann an einem Testkanal in Portugal experimentell validiert. Die Ergebnisse zeigen, daß mit dem Entwurfsverfahren robuste Regler entworfen werden können. Die mit dem linearisierten Modell prognostizierten Stabilitätsprobleme bei niedrigen Abflüssen werden im Experiment bestätigt.

Bemessung von PI-Reglern anhand des ID-Modells

SCHUURMANS, HOF, DIJKSTRA u. a. 1999 bemessen PI-Regler für die dezentrale Wasserstandsregelung von Bewässerungskanälen, wobei eine „distant downstream control“-Struktur eingesetzt und die Dynamik der Stauhaltung mit einem ID-Modell (4.19) nach Abschnitt 4.2.3 beschrieben wird.

Zunächst werden die Modellparameter des ID-Modells (4.19) in einem relevanten Bereich des Referenzabflusses bestimmt. Zusätzlich werden die kleinste Resonanzfrequenz und die zugehörige Verstärkung ermittelt. Mit diesen Größen wird der Regler so parametrisiert, daß für alle Parameterkonstellationen ein Phasenrand von mindestens 45° gewährleistet ist.

In einer Stauhaltungskette sind die Regelkreise verkoppelt, da die Stellgröße des Regelkreises (Zufluß in die Stauhaltung) als Störgröße im Regelkreis des Oberliegigers wirkt (Änderung des Abflusses). Eine Entkopplung der Regelkreise kann durch eine zusätzliche Aufschaltung auf die Stellgröße des Oberliegigers erreicht werden. Eine exakte dynamische Entkopplung ist nicht realisierbar (negative Totzeit), daher wird die Entkopplung mit einem P-Glied (Verstärkung 1) auf den stationären Zustand beschränkt. Eine ebensolche Entkopplung bzw. Störgrößenaufschaltung wird für meßbare (bekannte) Wasserentnahmen realisiert.

Die Realisierung des Reglers erfolgt in zeitdiskreter Form, die Autoren bestimmen die notwendige Abtastzeit anhand von Dynamik-Kenngrößen des Modells.

Der PI-Regler ohne und mit Entkopplungen wird an einem Modellkanal getestet. Erwartungsgemäß kann die Regelgüte durch die Entkopplung deutlich verbessert werden.

LITRICO und FROMION 2006d, LITRICO, FROMION und BAUME 2006 nutzen ebenfalls ein ID-Modell zum Entwurf eines PI-Wasserstandsreglers für eine Stauhaltung in „distant downstream control“-Struktur. Die Anforderungen an die Regelung werden als Maximalwert der Regelabweichung und die zugehörige Beruhigungszeit bei sprungförmiger Änderung der Störgröße (Wasserentnahme) formuliert. Diesen Güteforderungen im Zeitbereich lassen sich Anforderungen an den Amplituden- und Phasenrand des Frequenzgangs der offenen Kette zuordnen. Die Autoren geben analytische Bemessungsvorschriften für die Reglerparameter in Abhängigkeit von den Modellparametern und den Güteforderungen an. Der resultierende Phasenrand kann aufgrund der ID-Struktur auch als Stabilitätsreserve bezüglich einer Vergrößerung der Systemtotzeit interpretiert werden. Ein robuster Reglerentwurf wird durch die Einbeziehung der Abflußabhängigkeit der Modellparameter erreicht.

LITRICO, FROMION und BAUME 2006 gehen auf weitere Details ein. So wird bei zeitdiskreter Realisierung die Abtastzeit in Abhängigkeit von den Dynamikparametern gewählt. Durch eine möglichst große Abtastzeit soll eine Reduktion der Anzahl der Verstellbewegungen der Aktoren (Wehre) erreicht werden.

Die Reglerbemessung wird an ausgewählten Stauhaltungen des ASCE-Benchmark-Kanals CLEMMENS, KACEREK, GRAWITZ u. a. 1998 verifiziert, wobei die HN-Simulation mit SIC erfolgt.

5.3.4 Erweiterte PI-Ansätze zur Wasserstands- und Abflußregelung

GULLHAMN 2004 untersucht eine Erweiterung der PI-Struktur („Override Selector feedback Control“) mit der ein Kompromiß zwischen der Einhaltung des Wasserstands und der Dämpfung der Abflußwellen erreicht werden soll. Hierzu wird eine PI-Wasserstandsregler und ein Abflußregler kombiniert. Bei großen Regelabweichungen des Wasserstands ist der Wasserstandsregler aktiv, in einem Toleranzband für die Regelabweichung dagegen nur der Abflußregler. Ein stoßfreies Umschalten zwischen den Algorithmen wird durch eine anti-windup-Logik erreicht.

Der Algorithmus wird an einem HN-Modell getestet, bei dem die SAINT-VENANT-Gleichungen um stationäre Wasserstands- und Abflußwerte linearisiert und anschließend mittels finiter Differenzen örtlich diskretisiert werden. An diesem Modell werden Abflußwellen in einer Kaskade von vier Stauhaltungen im Vergleich zu einer OW/Q-Regelung deutlich gedämpft.

5.3.5 Modifikationen zur Vermeidung des Windup-Effekts

Weist die offene Kette I-Anteile, beispielsweise die eines PI(D)-Reglers auf und ist die Amplitude der Stellgröße physikalisch beschränkt, so kann es zu unerwünschten dynamischen Effekten kommen. Wird die Stellgrößenschranke erreicht, dann wird die Regelabweichung im Integrator

des Reglers weiter aufintegriert, ohne daß es zu einer Verstärkung des Stelleingriffs kommt (Windup). Wird in der Folge die Regelabweichung reduziert, so bleibt der Stelleingang solange in der Sättigung, bis durch eine Regelabweichung mit entgegengesetztem Vorzeichen und entsprechender Dauer der Integratorausgang wieder reduziert wird. Dies kann zu Schwingungen der Regelgröße mit großen Amplituden und Periodendauern bis hin zur Instabilität führen.

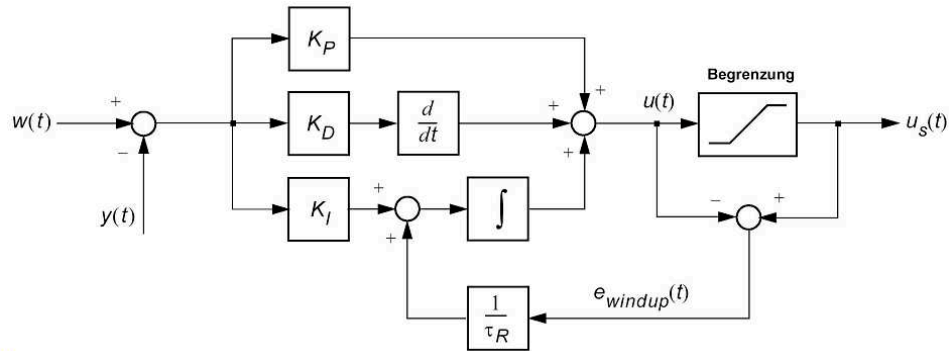


Abbildung 5.13: PID-Regler mit Anti-Windup nach GEERING und SHAFAI 2004.

In Abbildung 5.13 ist eine mögliche Erweiterung der PID-Struktur zur Vermeidung des Windup-Effekts dargestellt. Erreicht die Stellgröße $u_s(t)$ die Beschränkung, so wird durch die Rückführung der Differenz aus unbeschränkter und beschränkter Stellgröße das Eingangssignal des Integrators reduziert. Ein unbegrenztes Anwachsen des Integratorausgangs wird dadurch verhindert.

Im OW/Q-Regelkreis nach Abbildung 5.1 ist die Stellgröße Abfluß beschränkt (minimaler und maximaler Turbinendurchfluß, Endlagen der Wehrsektoren). In Verbindung mit den I-Anteilen der Strecke und des Reglers kann es bei Erreichen der Abflußbegrenzungen, also insbesondere im Niedrig- oder Hochwasserfall zu Windup-Effekten kommen. Dies ist in der Regelungsstruktur zu berücksichtigen.

ZACCARIAN, LI, WEYER u. a. 2004, ZACCARIAN, LI, WEYER u. a. 2007 nennen typische Situationen für das Auftreten von Windup-Effekten in der Wasserstandsregelung von Bewässerungssystemen:

- beim Umschalten von Hand- auf Automatikbetrieb,
- bei sehr großen Wasserentnahmen (Störgrößen großer Amplitude) und
- bei sehr niedrigen Abflüssen.

Die Vermeidung von Windup-Effekten ist aufgrund des grenzstabilen Charakters (I-Verhalten) der Regelstrecke schwierig. Eine globale Stabilisierung des Systems ist mit beschränkten Stellgrößen nicht möglich.

Die Autoren untersuchen anti-windup-Modifikationen ähnlich Abbildung 5.13, wobei der Entwurf im (kontinuierlichen oder zeitdiskreten) Zustandsraum erfolgt. Es wird gezeigt, daß damit auch das Problem des stoßfreien Umschaltens von Hand- und Automatikbetrieb gelöst wird. Anhand von Simulationsstudien wird die Wirksamkeit demonstriert.

5.3.6 Smith-Prädiktor und Modellbasierte Regelung (IMC)

Ein SMITH-Prädiktor nach Abbildung 5.14 ist eine speziell für lineare Regelstrecken mit Totzeiten entwickelte Regulationsstruktur. Der Strecke wird ein Modell parallel geschaltet, und es wird sowohl die Differenz aus Strecken- und Modellausgang als auch der Ausgang des totzeitfreien Modellanteils $\tilde{G}(s)$ zurückgeführt. Damit ergibt sich für die Führungsübertragungsfunktion

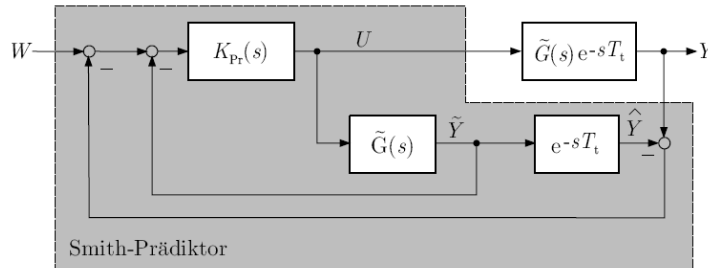


Abbildung 5.14: SMITH-Prädiktor nach LUNZE 2006.

$$G_W = \frac{Y(s)}{W(s)} = \frac{K_{Pr}(s)\tilde{G}(s)}{1 + K_{Pr}(s)\tilde{G}(s)}e^{-sT_t} \quad (5.22)$$

Dies entspricht der Führungsübertragungsfunktion des totzeitfreien Regelkreises mit einer nachgeschalteten Streckentotzeit. Der Regler $K_{Pr}(s)$ kann ohne Berücksichtigung der Totzeit entworfen werden.

In der Simulationsstudie PAPAGEORGIU und MESSMER 1989 wird das Problem der Abflußregelung eines ungestauten Flußabschnitts untersucht. Eine Komponente des Zuflusses am oberen Ende des betrachteten Flußabschnitts ist über ein Stellorgan steuerbar und soll dazu genutzt werden, den Abfluß am unteren Ende des Abschnitts zu regeln.

Hierzu wird zunächst ein Simulationsmodell auf der Basis der SAINT-VENANT-Gleichungen (siehe Abschnitt 4.1) erstellt. Die Analyse von Sprungantworten zeigt P-T_t-T₁-Verhalten, wobei die Totzeiten und Verzögerungszeitkonstanten durchflußabhängig sind und daher mit der Richtung des Eingangssprungs variieren.

Es wird eine zweischleifige Regulationsstruktur untersucht: in der inneren Schleife wird der Zufluß mit dem Stellorgan geregelt, dieser Zufluß ist die Stellgröße des äußeren Regelkreises mit der Regelgröße Abfluß. Für die Regelung in der äußeren Schleife werden ein einfacher PI-Regler mit anti-windup-Modifikation, ein PI-Regler mit SMITH-Prädiktor und ein nichtlinearer umschaltender Regler untersucht und verglichen.

Der PI-Regler wird so bemessen, daß die Vorhaltzeitkonstante des Reglers die Trägheitszeitkonstante der Strecke kompensiert. Für die verbleibende I-T_t-Strecke wird eine Einstellung der Reglerverstärkung mittels Einstellregeln für kurze Beruhigungszeiten und 5% Überschwingen vorgenommen. Aufgrund der Durchflußabhängigkeit der Streckenparameter wird die Reglerverstärkung in Abhängigkeit von der Richtung der Sollwertänderung variiert. Da die Stellgröße beschränkt ist, wird eine anti-windup-Modifikation des PI-Regleralgorithmus (siehe Abschnitt 5.3.5) eingesetzt.

Der nichtlineare umschaltende Regler erweitert den PI-Algorithmus um eine vorsteuernde Komponente: bei (näherungsweise) bekannter Störung in Form eines zusätzlichen Zuflusses am oberen Ende des betrachteten Flußabschnitts wird der Zufluß entsprechend modifiziert. Eine solche Struktur wird als Störgrößenaufschaltung bezeichnet.

Mit dem zusätzlichen Einsatz eines SMITH-Prädiktors wird der Einfluß der Totzeit reduziert.

Die Simulationsergebnisse zeigen eine deutliche Reduktion der Ausregelzeiten bei geringer Vergrößerung des Überschwingens für den umschaltenden Regler und den SMITH-Prädiktor gegenüber dem reinen PI-Regler. Da der SMITH-Prädiktor sehr parameter-sensitiv und entsprechend aufwendig in der Bemessung ist, wird sein Einsatz in der Simulationsstudie PAPAGEORGIU und MESSMER 1989 letztlich nicht befürwortet.

DELTOUR und SANFILIPPO 1998, SANFILIPPO und DELTOUR 1998 beschreiben den Einsatz eines SMITH-Prädiktors in der Wasserstandsregelung für ein Bewässerungskanalsystem. Es wird eine „distant downstream control“ Regelungsstruktur eingesetzt, d. h. mit der Stellgröße Oberliegerzufluß wird die Regelgröße Wasserstand am stromab gelegenen Ende der Haltung beeinflusst. Es wird ein einfaches zeitdiskretes Modell der Regelstrecke der Form

$$G(z) = \frac{K_1 z^{-\tau}}{1 - z^{-1}} + \frac{K_2 z^{-\tau}}{1 - D_2 z^{-1}} \quad (5.23)$$

mit einer Totzeit von τ Abtastschritten und einer Parallelschaltung eines Integrators und eines P-T₁-Glieds betrachtet. Die Parameter K_1 , K_2 , D_2 und τ werden an die Abflußverhältnisse adaptiert. Hierzu wird mittels HN-Simulation für stationäre Strömungsverhältnisse das in der Haltung gespeicherte Wasservolumen in Abhängigkeit vom Durchfluß und vom Wasserstand am stromab gelegenen Ende der Haltung ermittelt. DELTOUR und SANFILIPPO 1998 geben Bestimmungsgleichungen für die Modellparameter aus (5.23) aus diesen Abhängigkeiten an.

Zur Kompensation der Totzeit wird im Regelkreis ein SMITH-Prädiktor in der Standardstruktur nach Bild 5.14 eingesetzt. SANFILIPPO und DELTOUR 1998 vergleichen anhand eines Kanalsystems mit drei Haltungen die Regelgüte einer dezentralen Regelung mit SMITH-Prädiktor mit einer Zustandsregelung nach Abschnitt 6.4.

LITRICO, GEORGES und TROUVAT 1998, LITRICO und GEORGES 1999b verwenden einen SMITH-Prädiktor zur Regelung des Abflusses in einem ungestauten Flußabschnitt, siehe Abbildung 4.3. Es wird ein lineares System 2. Ordnung mit Totzeit (P-T₂-T_t) nach Gleichung (4.26) eingesetzt. Die aus dem unbekanntem Referenzabfluß resultierende Modellunsicherheit wird durch einen in der robusten Regelung üblichen multiplikativen Ansatz erfaßt:

$$F(s) = (1 + \Delta(s)) \frac{e^{-s\tau}}{(1 + sT_1)(1 + sT_2)}, \quad \text{mit } |\Delta(j\omega)| \leq L(\omega), \forall \omega \quad (5.24)$$

L ist eine Schranke für die Modellunsicherheit.

Der SMITH-Prädiktor wird über eine Inversion der Übertragungsfunktion des totzeitfreien Modells entworfen. Der resultierende Nullstellenüberschuß wird durch ein Tiefpaßfilter kompensiert. Die freien Parameter des Filters werden hier im Sinne eines robusten Entwurf zur Minimierung einer gewichteten Norm der Empfindlichkeitsfunktion genutzt.

LITRICO, GEORGES und TROUVAT 1998, LITRICO und GEORGES 1999b vergleichen den robusten SMITH-Prädiktor mit einem robust entworfenen digitalen Regler in RST-Struktur, sowie

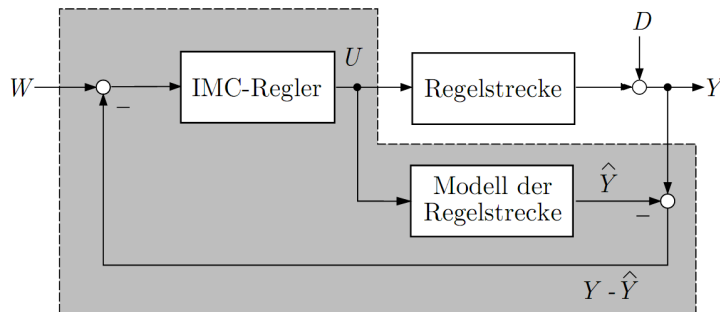


Abbildung 5.15: Struktur des IMC-Regelkreises nach LUNZE 2006.

einem PID-Regler, der so entworfen wird, daß die Pole der Übertragungsfunktion des geschlossenen Kreises gewissen Robustheitsforderungen genügen. Testbeispiel ist das Modell eines 20 km langen Flußabschnitts. **Anmerkung:** Dieses eine und einfache Beispiel gestattet lediglich eine Illustration und erste Wertung der Entwurfsverfahren, leider fehlen weitere Untersuchungen.

Der SMITH-Prädiktor kann als Spezialfall der modellbasierten Regelung (IMC: „internal model control“) betrachtet werden. Die Struktur eines IMC-Regelkreises ist in Abbildung 5.15 dargestellt: ein Modell der Regelstrecke wird mit dem Stellsignal beaufschlagt und die Differenz aus Meßsignal und Modellausgang wird zurückgeführt. Der IMC-Regler kann als Vorwärtssteuerung entworfen werden, da im störungsfreien Fall das rückgeführte Signal verschwindet. Da eine exakte Modellinversion in den meisten Fällen aufgrund nicht-minimalphasiger Modellanteile oder Polüberschuß nicht zu realisieren ist, wird eine näherungsweise Modellinversion unter Einsatz entsprechender Tiefpaßfilter verwendet.

5.3.7 Reglerbemessung mittels Parameteroptimierung

Wenn die Güteforderungen an das geregelte System durch ein mathematisches Gütefunktional, beispielsweise die quadratische Regelfläche

$$J = \int_0^{\infty} e^2(t) dt$$

beschrieben werden können, so läßt sich der Reglerentwurf – hier für einen PID-Regler nach (5.12) – als Parameteroptimierungsaufgabe formulieren:

$$\min_{K_R, T_V, T_N} \left\{ J = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \right\}$$

Für einfache Systeme, beispielsweise lineare Regelstrecken mit gebrochen-rationaler Übertragungsfunktion der offenen Kette, kann der Zusammenhang zwischen den Reglerparametern und dem Gütefunktional analytisch beschrieben werden. In allen anderen Fällen läßt sich diese Abhängigkeit nur numerisch mittels Simulationsrechnungen an einem Prozeßmodell (hier vorzugsweise ein strukturtreues Modell auf der Basis der Saint-Venant-Gleichungen) ermitteln. Eine Optimierung direkt am Prozeß ist grundsätzlich ebenfalls möglich, wird aber in

den meisten Fällen aufgrund des hohen Zeitaufwandes und der Störeinflüsse (u. a. mangelnde Reproduzierbarkeit) ausscheiden.

Zur Approximation des Gütefunktional werden die Simulationsergebnisse für mehrere Szenarien mit den Zeithorizonten $[t_{0,i}, t_{f,i}]$ gewichtet zusammengefaßt

$$\sum_{i \in \{\text{Szenarien}\}} w_i \int_{t_{0,i}}^{t_{f,i}} e^2(t) dt \longrightarrow \min_p$$

Mit einem (iterativ arbeitendem) Optimierungsalgorithmus werden die Parameter p optimiert, wobei für jede Parametereinstellung die Simulationsrechnungen zu wiederholen sind.

Die Optimierung erfolgt bezüglich der Parameterwerte, die Regelungsstruktur bleibt unverändert. Für die Parameter sind sinnvolle Starteinstellungen vorzugeben.

Das Ergebnis, d. h. die ermittelten optimalen Parametereinstellungen hängt damit ganz wesentlich von der Auswahl der Szenarien und deren Wichtigung ab. Es müssen daher alle wesentlichen Betriebssituationen durch diese Szenarien abgedeckt werden.

Effektive numerische Optimierungsverfahren benötigen Ableitungsinformationen der Gütefunktion. Da die Gütefunktion nur numerisch bestimmt werden kann, sind die Ableitungen meist nicht direkt verfügbar und müssen (numerisch aufwendig) über finite Differenzen bestimmt werden. Oftmals ist aufgrund der numerischen Berechnung die Abhängigkeit der Gütefunktion von den Parametern nicht im mathematischen Sinne glatt oder das Modell selbst weist Schalt- oder Sprungbedingungen auf. Daher werden in vielen Fällen numerisch weniger effektive ableitungsfreie Optimierungsverfahren, wie z. B. das Simplex-Verfahren nach NELDER/MEAD oder evolutionäre Algorithmen eingesetzt.

Einsatz der Parameteroptimierung zur Bemessung von OW/Q-Reglern

THEOBALD 1998b, THEOBALD, CELAN und NESTMANN 2002 verwenden optimierungsbasierte Ansätze zur Parametrierung von OW/Q-Reglern. Geeignete Szenarien werden mit einem HN-Modell (KASSMO) simuliert und hinsichtlich der Einhaltung der Wasserstandsvorgaben, der Verstärkung von Zuflußschwankungen und des Stellaufwands der Aktoren (Wehre, Turbinen) bewertet.

Im Teilkriterium zur Bewertung der Einhaltung der Wasserstandsvorgaben wird die Verletzung eines vorgegebenen Toleranzbandes h_{tol} hinsichtlich Amplitude und Dauer der Verletzung „bestraft“:

$$J_h = \sum_{i \in \mathcal{V}} \int_{t_{0,i}}^{t_{1,i}} (h_{OW} - h_{OW,soll})^2 dt \cdot \sqrt[3]{t_{1,i} - t_{0,i}}, \quad (5.25)$$

mit $|h_{OW} - h_{OW,soll}| > h_{tol} \forall t_{0,i} \leq t \leq t_{1,i}$

\mathcal{V} ist die Menge der Verletzungsereignisse.

Im Teilkriterium zur Bewertung des Abflusses wird die Überhöhung des Abflusses gegenüber dem Zufluß für jedes Einzelereignis eines relevanten Extremums in der Zuflußganglinie bewertet. Hierzu wird der Extremwert $q_{zu,ext,i}$ des Zuflusses für das Ereignis i bestimmt und im Kriterium

die Über- bzw. Unterschreitung dieses Wertes im Abfluß „bestraft“ (hier dargestellt für ein Zuflußmaximum):

$$J_q = \sum_{i \in \mathcal{E}} \int_{t_{0,i}}^{t_{1,i}} (q_{ab}(t) - q_{zu,ext,i})^2 dt, \quad \text{mit } q_{ab}(t) \geq q_{zu,ext,i} \quad \forall t_{0,i} \leq t \leq t_{1,i} \quad (5.26)$$

Alternativ wird die Abweichung der Abflußganglinie von der zeitversetzten Zuflußganglinie quadratisch bewertet. Durch Minimierung dieses Teilziels wird im günstigsten Fall eine exakte Weitergabe des Zuflusses erreicht, das Teilkriterium (5.26) liefert dann keinen Beitrag mehr.

Zur Bewertung des Stellaufwands wird die Anzahl der Verstellschritte der Aktoren (Wehre, Turbinen) herangezogen:

$$J_S = \sum_i n_{stell,i} \quad (5.27)$$

Zusätzlich wird noch eine eventuelle Richtungsumkehr der Verstellung eines Aktors innerhalb eines vorgegebenen Zeitintervalls bewertet.

Dieses mehrkriterielle Optimierungsproblem wird durch gewichtete Summation der Teilkriterien in ein einkriterielles Optimierungsproblem überführt

$$J = \alpha_h J_h + \alpha_q J_q + \alpha_S J_S \quad (5.28)$$

und anschließend numerisch gelöst.

THEOBALD 1998b beschreibt den Einsatz genetischer Algorithmen zur numerischen Lösung der resultierenden Optimierungsaufgabe. **Anmerkung:** Die HN-Simulation ist Bestandteil der Zielfunktionsberechnung, und es ist davon auszugehen, daß die Abhängigkeit der Teilkriterien von den Optimierungsvariablen (Reglerparametern) nicht glatt im mathematischen Sinn ist. Daher müssen ableitungsfreie Optimierungsverfahren zum Einsatz kommen.

THEOBALD 1998b beschreibt die Anwendung der Parameteroptimierung für Stauhaltungen am Rhein mit Kraftwerksbetrieb sowie am Neckar. THEOBALD, CELAN und NESTMANN 2002 erwähnen diverse erfolgreiche Anwendungen an Stauhaltungen der Flüsse Neckar, Rhein, Wolga und Donau.

Optimierungsbasierte Reglerbemessung für ein Bewässerungskanalssystem

BAUME, MALATERRE und SAU 1999 beschreiben eine optimierungsbasierte Bemessung von Reglerparametern für ein Bewässerungskanalssystem mit fünf Stauhaltungen. Der Oberwasserstand an den Wehren wird mit PI-Reglern geregelt, Stellgrößen sind dabei die jeweiligen Oberliegerzuflüsse der Haltungen. Das Gütekriterium bewertet sowohl die quadratische Regelabweichung als auch den Stellaufwand.

$$\sum_{i \in \{\text{Szenarien}\}} \sum_{j \in \{\text{Haltungen}\}} \int_{t_{0,i}}^{t_{f,i}} (e_j^2(t) + u_j^2(t)) dt \longrightarrow \min_p \quad (5.29)$$

Die Szenarien für die Wasserentnahme aus den Haltungen und den Gesamtdurchfluß werden auf der Basis von Meßwerten für einen Horizont von sieben Tagen vorgegeben, die für drei Durchflußniveaus wiederholt werden. **Anmerkung:** Die Autoren verwenden die etwas unglückliche

Bezeichnung „global optimization of local controllers“ für die Verwendung eines auf die gesamte Stauhaltungskette bezogenen Gütekriteriums zur Bemessung der lokalen Regler.

Das Optimierungsproblem umfaßt zehn Optimierungsparameter (zwei PI-Reglerparameter für fünf Haltungen) und wird mit dem Simplex-Verfahren nach NELDER/MEAD numerisch gelöst. Obwohl eine mehrstufige Optimierung eingesetzt wird (zunächst ein Parametersatz für alle Regler, dann Einstellungen für die einzelnen Haltungen), werden ca. 500 Simulationläufe zur Lösung benötigt.

Das Verfahren wird simulativ an mehreren Stauhaltungsketten mit unterschiedlichen dynamischen Eigenschaften getestet.

Parameteroptimierung für PI-Regler mit Multi-Modell-Ansatz

OVERLOOP, SCHUURMANS, BROUWER u. a. 2005 beschreiben eine optimierungsbasierte Bemessung von robusten dezentralen PI-Reglern auf der Basis von Multi-Modellen. Für jede Haltung innerhalb einer Kaskade eines Bewässerungskanalansystems werden mehrere ID-Modelle nach Gleichung (4.37) gebildet, die sich durch den Nominalabfluß unterscheiden. Ähnlich Gleichung (5.29) wird die Gütefunktion

$$\sum_{i \in \{\text{Modelle}\}} w_i \sum_{k=0}^{\infty} \left((\mathbf{e}^k)^T \mathbf{Q} \mathbf{e}^k + (\mathbf{u}^k)^T \mathbf{R} \mathbf{u}^k \right) \quad (5.30)$$

hinsichtlich der Reglerparameter minimiert. Dabei sind \mathbf{e}^k die zeitdiskrete Regelabweichungen und \mathbf{u}^k die zeitdiskreten Stellsignale für die Regelkreise aller Stauhaltungen. Die Auswertung der Gütefunktion und die Gradientenberechnung erfolgt mithilfe einer LYAPUNOV-Gleichung, damit sind effektive ableitungsbehaftete Optimierungsverfahren zur Minimierung von (5.30) einsetzbar.

Die so ermittelten Reglerparameter berücksichtigen das Verhalten des Gesamtsystems (lokale Wasserstandsabweichungen und Abflußdämpfung) und sind robust hinsichtlich Abflußänderungen. Die dezentralen PI-Regler werden als Fallback-Lösung bei Ausfall der zentralen Steuerung eingesetzt. Eine zusätzliche Tiefpaß-Filterung der Regelabweichung

$$e_f^k = F_c e_f^{k-1} + (1 - F_c) e^k, \quad F_c - \text{Filterparameter}$$

(hier als PIF-Regler bezeichnet) unterdrückt Resonanzwellen, die insbesondere in kurzen oder flachen Haltungen bei kleinem Abfluß auftreten.

In OVERLOOP, SCHUURMANS, BROUWER u. a. 2005 werden Simulationsergebnisse mit unterschiedlichen HN-Simulatoren für mehrere Bewässerungskanalansysteme mit bis zu 14 Haltungen angegeben.

Filterbasierter Regler

In der Diplomarbeit STEFFEN 1999 wird auf der Grundlage von Frequenzbereichsbetrachtungen ein filterbasierter Regleransatz für Staustufenketten erarbeitet. Die Störungen im Regelkreis

werden in durch die Regelung unterdrückbare und (aufgrund des begrenzten Volumens der Staustufen) nicht unterdrückbare Anteile zerlegt.

Die Parameteranpassung und -optimierung der verschiedenen Filterkomponenten erfolgt anhand von (bewerteten) Szenarienrechnungen mit einem HN-Grobmodell der Stauhaltungskette und einem geeigneten Optimierungsverfahren (Evolutionäre Strategie).

5.4 Fuzzy-basierte Regelungskonzepte

Abflußregelung der Staustufen der österreichischen Donau

Die u. a. in RAUSCHENBACH 1998 und ALLMER 1999 beschriebene Abflußregelung der Staustufen an der österreichischen Donau stellt aufgrund der Anforderungen in Bezug auf Hochwasserschutz und Elektroenergieerzeugung und die komplexe Dynamik der Stau- und Retentionsräume eine herausfordernde regelungstechnische Aufgabe dar. Die Wehrbetriebsordnung gibt in Abhängigkeit vom Betriebszustand unterschiedliche Regelgrößen (u. a. Oberwasser- und Wendepiegel), Sollvorgaben und Gütemaße vor. Die Anwendung einer Fuzzy-basierten Zuordnung der Regelalgorithmen zu den Betriebszuständen und eine Fuzzy-adaptive Parameteranpassung der Regler liefert stabiles Regelungsverhalten im gesamten Abflußbereich mit stoßfreien Übergängen zwischen den Betriebszuständen. Eine koordinierte Führung der Staustufen ist zur Berücksichtigung weitergehender Güteforderungen unerlässlich.

Die in diesem Zusammenhang entwickelte SIMULINK-Modellbibliothek ILM-RIVER mit den Modulen RIVER-MOD zur Modellierung von Flußabschnitten und RIVER-CON zur Einbindung von Regelalgorithmen (PID- und Fuzzy-Regler sowie koordinierte Führung von Kaskaden) wird in RAUSCHENBACH und WERNSTEDT 1999, RAUSCHENBACH 2005 vorgestellt.

Details der Anforderungen an die hard- und softwaretechnische Realisierung sind in ALLMER, PFISTERER, SMOLAK u. a. 2000 aufgeführt. Hier wird insbesondere der Sicherheitsaspekt einer zentralen Prozeßführung mit unbesetzten Kraftwerkswarten diskutiert.

RAUSCHENBACH und WERNSTEDT 2006 beschreiben die Einbettung der mehrkriteriellen Entscheidungsfindung in eine nachhaltige Ressourcenbewirtschaftung. Die Bewirtschaftungsaufgabe wird zunächst als mehrkriterielles Optimierungsproblem formuliert, wobei die Teilkriterien die Bewirtschaftungsziele hinsichtlich der Schifffahrt, der Energieerzeugung und des Hochwasserschutzes mathematisch fassen. Die Teilkriterien werden über eine gewichtete Summation zu einer skalaren Zielfunktion einer einkriteriellen Optimierungsaufgabe zusammengefaßt. Die Wichtungsfaktoren werden situationsabhängig adaptiert, dabei wird die Situationserkennung und die resultierende Änderung der Teilgewichtungen über ein Fuzzy-System realisiert.

Abflußregler mit Fuzzy-Logik

CHAPUIS 1998 entwickelt einen Fuzzy-basierten Abflußregler, der den Abflußverteiler, die Wehr- und Turbinensteuerung umfaßt. Die Güteforderungen und Beschränkungen werden zunächst als Optimierungsaufgabe formuliert. Viele der Nebenbedingungen führen auf logische Ausdrücke, die nur mittels diskret-wertiger Variablen in ein Optimierungsproblem einbezogen

werden können, siehe Abschnitt 7.2. Der Lösungsaufwand für reale Problemstellungen wird als deutlich zu groß eingeschätzt. Zudem bietet der Fuzzy-basierte Ansatz als heuristisches Lösungsverfahren neben dem geringen Rechenaufwand die Möglichkeit, unscharfes und unsicheres (auch widersprechendes) Wissen einzubeziehen und ermöglicht nach Ansicht des Autors eine verständliche Erklärung der Lösungsfindung sowie eine erleichterte Dokumentation.

Das Prinzip des Fuzzy-basierten Abflußreglers besteht darin, daß eine vom Pegelregler vorgegebene Abflußänderung von dem Abflußorgan (Klappe, Segment, Turbine) ausgeführt wird, das verschiedene Auswahlkriterien (Einsatzpräferenz, Nutzverfügbarkeit, Bewegungszustand, Vorlauffehler, kumulative Einsatzzeit) am besten erfüllt. Es werden geeignete Fuzzy-Kriterien für die Auswahl eines Abflußorgans definiert und die Bewertungsvorschriften in Fuzzy-Regelbasen umgesetzt. Zudem sind Kriteriengewichtungsfaktoren und Operatoren für die Entscheidungsfindung zu wählen. Die vorgegebene Abflußänderung für das so ausgewählte Abflußorgan wird dann in einem untergeordneten Regelkreis, der nicht Bestandteil des Abflußreglers ist, realisiert.

CHAPUIS 1998 testet den Fuzzy-basierten Abflußregler simulativ und zeigt, daß dieser insbesondere in speziellen Betriebssituationen (Turbinennotschluß, Übergang zwischen verschiedenen Abflußorgangruppen) zu geringeren Abflußfehlern führt als eine konventionelle Lösung. Der Fuzzy-basierte Abflußregler wird in das Leitsystem der Fa. Rittmeyer integriert und an einer Pilotanlage getestet.

6 Mehrgrößenregelungen

6.1 Zustandsregler

Ein Zustandsregler ist eine proportionale Rückführung aller (zunächst als meßbar vorausgesetzter) Zustandsgrößen über eine Verstärkungsmatrix \mathbf{R} , siehe Abbildung 6.1. Die Systemmatrix des geschlossenen Kreises ergibt sich zu

$$\mathbf{A}_R = \mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{R}$$

Die Zustandsrückführung soll zunächst das System nach einer Anfangsstörung $\mathbf{x}(0) \neq \mathbf{0}$ in die Ruhelage $\mathbf{x} = \mathbf{0}$ zurückführen.

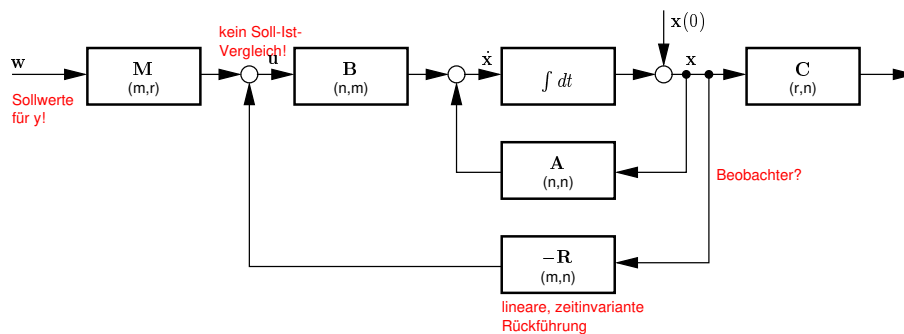


Abbildung 6.1: Zustandsregler.

Die Verstärkung des Vorfilters \mathbf{M} (Führungsgrößenverstärker) wird so bemessen, daß im stationären Zustand für konstante Sollwerte $\mathbf{w} = \text{const.}$ Sollwertfolge und damit stationäre Genauigkeit garantiert ist.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{y}(t) = \mathbf{w} \tag{6.1}$$

$$\mathbf{M} = \left(\mathbf{C}(\mathbf{B}\mathbf{R} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B} \right)^{-1} \tag{6.2}$$

Dabei wird vorausgesetzt, daß die inversen Matrizen existieren, also insbesondere, daß die Anzahl m der Eingangsgrößen gleich der Anzahl r der Ausgangsgrößen ist.

Weitere Forderungen an die Regelung wie die Stabilität des Kreises, genügende Schnelligkeit und hinreichende Dämpfung sind durch die Wahl der Rückführmatrix \mathbf{R} zu erfüllen.

Bei der Reglerbemessung durch **Polvorgabe** werden die Eigenwerte der Systemmatrix des geschlossenen Kreises (die Eigenwerte der Regelung)

$$\text{EW} \{ \mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{R} \} = \lambda_{R\nu}, \quad \nu = 1, \dots, n$$

als Entwurfsparameter vorgegeben. Mit entsprechenden numerischen Verfahren wird eine Rückführmatrix \mathbf{R} bestimmt, die diese Forderung erfüllt. Durch geeignete Auswahl der Eigenwerte können die Güteforderungen an die Regelung erfüllt werden. Bedingt u. a. durch die in jedem praktischen System vorhandenen Beschränkungen für die Stellenergie ist die Auswahl nicht völlig beliebig, und es muß ein Kompromiß zwischen den Güteforderungen unter Beachtung der physikalischen Begrenzungen gefunden werden („gemäßigte Linksverschiebung der dominanten Streckeneigenwerte“).

Beim Reglerentwurf durch **Minimierung eines quadratischen Gütemaßes** (RICCATI-Entwurf) wird die Rückführmatrix \mathbf{R} als Lösung eines Optimalsteuerungsproblems gefunden

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (\mathbf{x}(t)^T \mathbf{Q} \mathbf{x}(t) + \mathbf{u}(t)^T \mathbf{S} \mathbf{u}(t)) dt \longrightarrow \min! \quad (6.3)$$

Die Lösung wird mit Hilfe einer algebraischen RICCATI-Gleichung

$$\mathbf{Q} + \mathbf{P} \mathbf{A} + \mathbf{A}^T \mathbf{P} - \mathbf{P} \mathbf{B} \mathbf{S}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} = \mathbf{0} \quad (6.4a)$$

$$\mathbf{R} = \mathbf{S}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \quad (6.4b)$$

bestimmt, hierfür existieren geeignete numerische Verfahren. Die Elemente der Wichtungsmatrizen \mathbf{Q} und \mathbf{S} sind dabei die Entwurfsparameter, durch deren geeignete Auswahl die Güteforderungen an die Regelung unter Berücksichtigung der physikalischen Begrenzungen zu erfüllen sind.

Mit einer rein proportionalen Zustandsrückführung wird eine sprungförmige Störung zu einer bleibenden Regelabweichung für die Ausgangsgrößen führen. Dies kann durch eine zusätzliche I- (oder PI-)Rückführung des Ausgangs kompensiert werden, siehe Abbildung 6.2. Die Bemessung der zusätzlichen Komponenten kann auf die Bemessung einer einfachen Zustandsrückführung für das um die zusätzlichen Integratoren erweiterte System zurückgeführt werden.

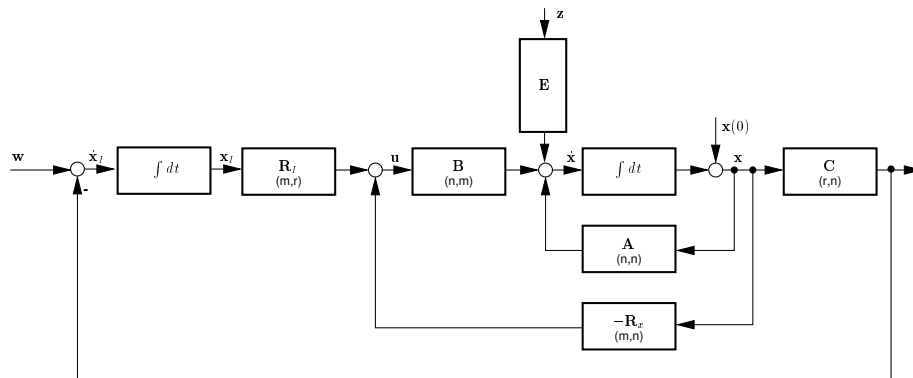


Abbildung 6.2: Zustandsregler mit integraler Ausgangsrückführung.

Eine Alternative ist der Einsatz eines Störgrößenbeobachters in Kombination mit einer Störgrößenaufschaltung, die am Ende des folgenden Abschnitts diskutiert wird.

6.2 Zustandsrekonstruktion: Luenberger-Beobachter und Kalman-Filter

Die Idee des LUENBERGER-Beobachters besteht in einer Rekonstruktion der Zustandsgrößen aus dem Zeitverlauf der Eingangs- und Ausgangsgrößen mit Hilfe eines Parallelmodells und einer Rückführung des Ausgangsfehlers, siehe Abbildung 6.3.

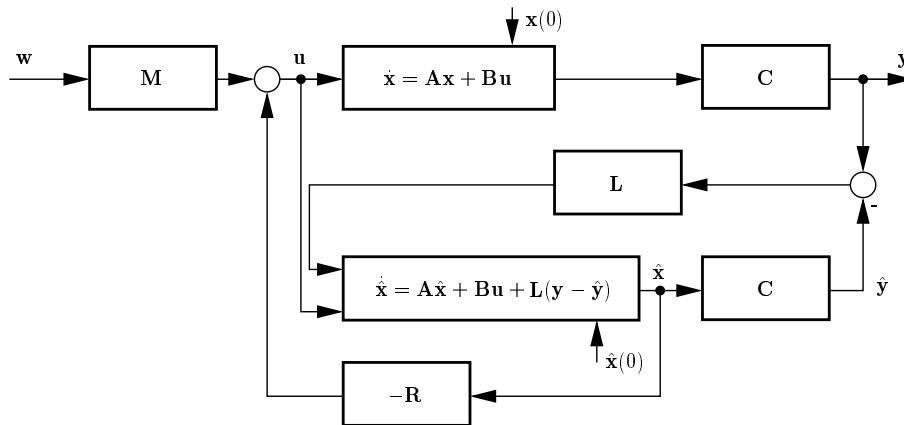


Abbildung 6.3: Zustandsregelkreis mit Beobachter.

Damit ergibt sich die Beobachtergleichung

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{L}(\mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}}) = (\mathbf{A} - \mathbf{L}\mathbf{C})\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{L}\mathbf{y} \quad (6.5)$$

und die Differentialgleichung des Beobachtungsfehlers

$$\dot{\tilde{\mathbf{x}}} = \dot{\mathbf{x}} - \dot{\hat{\mathbf{x}}} = (\mathbf{A} - \mathbf{L}\mathbf{C})\tilde{\mathbf{x}} \quad (6.6)$$

Mit der Beobachtermatrix \mathbf{L} werden die Eigenwerte der Beobachter-Systemmatrix $\mathbf{A} - \mathbf{L}\mathbf{C}$ so festgelegt, daß der Beobachtungsfehler asymptotisch verschwindet

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{0}$$

Dies kann mit den gleichen Verfahren wie bei der Polvorgabe für den Zustandsregler erfolgen. Die Dynamik des Regelkreises wird durch den Beobachter zwar verändert, jedoch werden die Eigenwerte des geschlossenen Kreises nicht verschoben. Somit können die Eigenwerte von Beobachter und Regler unabhängig festgelegt werden (Separationstheorem).

Ein KALMAN-Filter beruht zunächst auf einem völlig anderen Ansatz: es wird angenommen, daß das Systemverhalten durch eine additive Systemstörung der Zustandsgleichung und ein additives Meßrauschen am Ausgang beeinflußt wird. Für diese stochastischen Signale werden bestimmte Eigenschaften vorausgesetzt, und sie werden durch die Kovarianzmatrizen \mathbf{Q} und \mathbf{S} beschrieben. Die Minimierung des Erwartungswerts des Schätzfehlers der Zustandsgrößen liefert eine Struktur identisch dem LUENBERGER-Beobachter und eine RICCATI-Gleichung (6.4a) zur Bestimmung der Matrix \mathbf{L} .

KALMAN-Filter können zur Schätzung von Systemparametern oder von Zustandsgrößen nichtlinearer Systeme erweitert werden.

Sind einige der Zustandsgrößen direkt meßbar, so kann ein **reduzierter Beobachter** entsprechend niedrigerer Ordnung eingesetzt werden.

Ein **Störgrößenbeobachter** ermittelt den Zeitverlauf von nicht direkt meßbaren Störgrößen. Hierzu wird ein Modell der Störgrößendynamik verwendet, dessen Zustände dann über die übliche Beobachterstruktur ermittelt werden. Abbildung 6.4 zeigt das für den Fall additiver (stückweise) konstanter Störgrößen ζ am Streckenausgang

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \quad (6.7)$$

$$\dot{\zeta} = \mathbf{0} \quad (6.8)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \zeta \quad (6.9)$$

Die vom Beobachter ermittelten Werte $\hat{\zeta}$ werden zur Störgrößenaufschaltung auf die Sollwerte

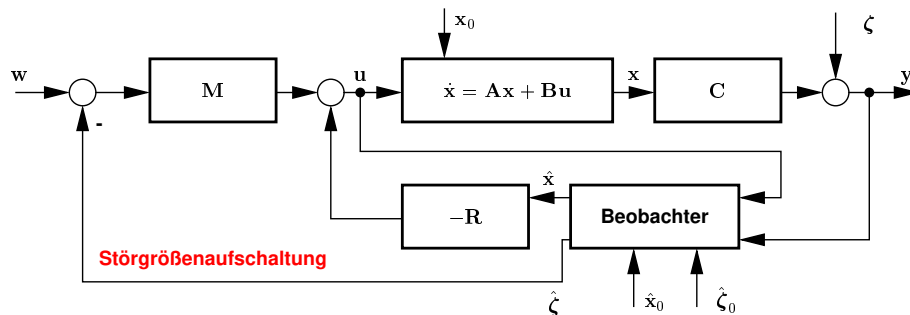


Abbildung 6.4: Störgrößenbeobachter und Störgrößenaufschaltung.

(Sollwertkorrektur) verwendet

$$\mathbf{u} = -\mathbf{R}\mathbf{x} + \mathbf{M}(\mathbf{w} - \zeta) \quad (6.10)$$

Eine solche Regelungsstruktur wird auch als „bias correction“ bezeichnet, und es können – wie bei einem Regler mit I-Anteil – sprungförmige Störgrößen kompensiert werden.

6.3 Zustandsregler für Bewässerungskanalssysteme unter Verwendung eines diskretisierten Modells

Von GARCIA, HUBBARD und DE VRIES 1992 werden Methoden zur Gewinnung konzentriert-parametrischer linearer Zustandsmodelle aus den SAINT-VENANT-Gleichungen sowie der Entwurf von linearen Zustandsreglern untersucht.

Eine Möglichkeit ist die Ortsdiskretisierung. Anhand der Wellengleichung als Vereinfachung der SAINT-VENANT-Gleichungen kann gezeigt werden, daß nur wenige Moden mit hinreichender Genauigkeit approximiert werden und die höheren Moden lediglich die Komplexität des Modells erhöhen, nicht aber die Genauigkeit.

Ein weiterer Ansatz besteht in der Linearisierung der SAINT-VENANT-Gleichungen und einer Entwicklung nach den Eigenfunktionen. Die Schwierigkeit besteht hier darin, daß die Koeffizienten der linearisierten SAINT-VENANT-Gleichungen nur als numerische Werte vorliegen, so daß die Eigenwerte und Eigenfunktionen nur numerisch bestimmt werden können. Zudem lassen sich die für hyperbolische System charakteristischen Totzeiten mit diesem Ansatz nicht gut nachbilden.

Als besonders geeignet erweist sich eine Orts- und Zeitdiskretisierung mit der linearisierten Charakteristikenmethode. Es werden keine Details des Verfahrens angegeben, jedoch die hohe Genauigkeit, insbesondere hinsichtlich der Nachbildung der Spektren und der Randbedingungen hervorgehoben. Im Ergebnis wird ein lineares zeitdiskretes Zustandsmodell erhalten, das um die Dynamik der Wehrverschlüsse (Integratoren) erweitert wird. Die Zustandsgrößen sind der Wasserstand und die Fließgeschwindigkeit sowie die Wehrpositionen, Eingangsgrößen sind die Wehrgeschwindigkeiten.

Dieses konzentriert-parametrische Modell bildet charakteristische Eigenschaften des zugrundeliegenden verteilt-parametrischen Systems nach. Beispielsweise ist ein Mindestzeitintervall zur Zustandsänderung (zwischen zwei stationären Abflußzuständen) notwendig, die durch die Schwallgeschwindigkeit, die Länge und die Anzahl der Haltungen vorgegeben ist. In diesem Sinne ist die Steuerbarkeit eines Kanalsystems eingeschränkt. Die Amplitude der Schwall- und Sunkwellen, die für eine solche Zustandsänderung notwendig sind, ist umgekehrt proportional zur Transitionszeit. Hinsichtlich der Beobachtbarkeit gilt ähnliches: der Mindestzeitraum, für den Messungen der Ausgänge (Wasserstände an den Rändern) vorliegen müssen um eine vollständige Zustandsrekonstruktion zu ermöglichen, ist durch die Schwallgeschwindigkeit und die Länge der Haltungen vorgegeben.

Es wird ein optimaler Zustandsregler entwickelt, und es werden Hinweise zur Wahl der Wichtigkeitsmatrizen (Diagonalmatrizen) gegeben. Zur Zustandsermittlung aus den Meßwerten (Wasserstände an den Wehren) wird ein Beobachter eingesetzt, wobei die Systemstruktur eine Entkopplung der Beobachter für die einzelnen Haltungen ermöglicht.

An einem Modell von drei Haltungen des California Aqueduct wird der Zustandsregler getestet. Das diskretisierte Modell mit vier Abschnitten pro Kanalhaltung hat insgesamt 34 Zustandsgrößen. Die Ergebnisse zeigen, daß mit diesem linearen konzentriert-parametrischen Regelungsansatz das nichtlineare verteilt-parametrische System geregelt werden kann.

MALATERRE 1998 beschreibt eine Anwendung der linear-quadratischen Zustandsregelung für Bewässerungskanalsysteme. Ein Modell auf der Basis der SAINT-VENANT-Gleichungen wird mittels PREISSMANN-Schema örtlich und zeitlich diskretisiert und linearisiert. Hierzu werden keine Details angegeben, es wird jedoch darauf verwiesen, daß mit diesem Ansatz nur subkritische Durchflußzustände betrachtet werden können.

Die Zustandsgrößen des diskretisierten Modells sind die Abweichungen von Wasserstand und Durchfluß von den Nominalwerten. Steuergrößen sind die (Oberlieger-)Zuflüsse in die einzelnen Haltungen sowie die „check gate openings“, Störgrößen die unbekanntes Entnahmen. Die Nominalwerte aller Größen werden simulativ mit einem HN-Modell (SIC) bestimmt.

Der Regler wird durch Lösung eines zeitdiskreten, unbeschränkten, linear-quadratischen Optimalsteuerungsproblems mit endlichem Optimierungshorizont bestimmt (RICCATI-Differenzgleichung nach Abschnitt 6.1). Damit ergibt sich ein explizites lineares Reglergesetz.

Zur Vermeidung bleibender Regelabweichungen wird das System um eine integrale Ausgangsrückführung erweitert.

Es wird das LQ-Optimalsteuerungsproblem mit endlichem Zeithorizont betrachtet, damit ergibt sich ein zeitvariantes Reglergesetz. Offenbar wird diese Berechnung in jedem Abtastschritt des Reglers – analog zu einer modell-prädiktiven Regelung (siehe Abschnitt 7) – wiederholt. Auf mögliche Stabilitätsprobleme wird in MALATERRE 1998 nicht eingegangen.

Die Zustandsgrößen als Wasserstands- und Durchflußwerte in den Gitterpunkten der Diskretisierung sind nicht direkt meßbar. Meßgrößen sind die Wasserstände an beiden Enden aller Haltungen. Daher wird ein KALMAN-Filter zur Zustandsrekonstruktion eingesetzt, siehe Abschnitt 6.2, das um einen Störgrößenbeobachter erweitert wird.

Tuning-Parameter des Regelungsansatzes sind die Bewertungsmatrizen für Zustands- und Steuergrößen im Zielfunktional für die Reglerbemessung, die Wichtungsmatrizen für das KALMAN-Filter sowie der Optimierungshorizont, die sämtlich per trial-and-error bestimmt werden. Der Optimierungshorizont liegt für die simulativ untersuchten Systeme im Bereich von 3...5 h.

Der Regler wird simulativ an zwei unterschiedlichen Systemen mit jeweils acht Haltungen über einen Zeithorizont von 24 h getestet. Das System wird dabei mit einem HN-Modell (SIC) nachgebildet. Die Bewertung erfolgt hinsichtlich mehrerer Kriterien wie absoluter Regelfehler und Stellgrößenänderung (integrated average absolute gate movement, integrated average absolute discharge change). Es werden Führungsgrößenänderungen und Störszenarien betrachtet.

Der Test wird als erfolgreich bewertet, der online-Rechenaufwand ist (verglichen mit einer online-Optimierung) gering. Es wird die Berücksichtigung der Verkopplung der Haltungen und von Laufzeiten hervorgehoben. Für größere Systeme wird eine mögliche Ordnungsreduktion der Zustandsmodelle erwähnt. Beschränkungen können in diesem Ansatz nicht direkt berücksichtigt werden.

6.4 Zustandsregler für Bewässerungskanalsysteme unter Verwendung vereinfachter Modelle

In einer Reihe von Arbeiten WEYER 2003; WEYER 2006; WEYER 2008 wird die Entwicklung und der Test eines linearen Zustandsreglers für ein Bewässerungskanalsystem in Australien (Haughton Main Channel) beschrieben.

Bild 6.5 zeigt eine Haltung eines solchen Kanals mit überströmten Wehren an beiden Enden und der Zuordnung der Variablen.

Mit dem Ansatz

$$Q = ch^{3/2}$$

für den Wehrabfluß Q mit der Überfallhöhe h erhält man aus der Volumenbilanz einer Haltung die Differenzgleichung für den Oberwasserstand y_{i+1}

$$y_{i+1}(kT) = y_{i+1}((k-1)T) + c_1 h_i^{3/2}(kT - \tau_i) + c_3 h_i^{3/2}((k-1)T - \tau_i) + c_2 h_{i+1}^{3/2}((k-1)T) + c_4 h_{i+1}^{3/2}((k-2)T), \quad k = 0, 1, \dots \quad (6.11)$$

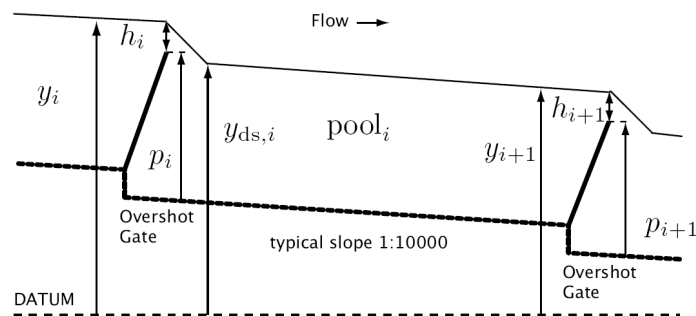


Abbildung 6.5: Haltung eines Bewässerungskanals.

mit der Abtastzeit T (im Modell 2 min) und der durch die Laufzeit bedingten Totzeit τ_i . Die mit c_3 und c_4 bewerteten, um einen Tastschritt verschobenen Terme können für kurze Haltungen vernachlässigt werden.

Die Koeffizienten c_i , $i = 1, \dots, 4$ werden aus Identifikationsexperimenten erhalten, siehe Abschnitt 4.3.

Für ein Kanalsystem mit mehreren Haltungen werden die Modellgleichungen in eine lineare Zustandsdarstellung umgeformt. Als Zustands- und Ausgangsgrößen werden die Abweichungen der Oberwasserstände an den Wehren von den jeweiligen Sollwerten und als Eingangsgrößen die Potenzen $h_i^{3/2}$ der Überfallhöhen gewählt. Zusätzliche Zustandsgrößen sind zur Modellierung der Totzeiten τ_i als ganzzahlige Vielfache der Abtastzeit notwendig. Das Modell wird um Integratoren an den Ausgängen erweitert, die eine integrale Ausgangsrückführung ähnlich Abbildung 6.2 zur Vermeidung bleibender Regelabweichungen ermöglichen. Hochpaßfilter für die Eingangsgrößen werden in Zustandsdarstellung ebenfalls in das Modell integriert. Alle Zustandsgrößen sind meßbar bzw. werden algorithmisch gebildet.

Mit einem LQ-Standardansatz kann für das lineare, zeitdiskrete Zustandsmodell ein RICCATI-Regler entworfen werden. Bei Beschränkung auf diagonale Bewertungsmatrizen sind vier Wichtungparameter pro Kanalhaltung zu bemessen. Die quadratische Bewertung der Zustands- und Eingangsgrößen führt zu einem Kompromiß zwischen der Forderung nach Einhaltung der Sollwerte und dem Stellaufwand. Die zusätzliche Bewertung der hochpaßgefilterten Eingänge soll durch Vermeidung von Stellbewegungen in kritischen Frequenzbereichen die Anregung von Wellen vermeiden. Bekannte Störungen wie z. B. Wasserentnahmen können in einer Vorsteuerung (Störgrößenaufschaltung) berücksichtigt und damit weitgehend kompensiert werden.

Der so entworfene Zustandsregler wird simulativ an einem Modell des Kanalsystems mit vier Haltungen getestet und mit einem dezentralen PI-Regelung (siehe Abschnitt 5.3.2) verglichen. Der zentrale Zustandsregler liefert erwartungsgemäß bessere Resultate als eine dezentrale PI-Regelung, insbesondere hinsichtlich der Dämpfung der Störungsausbreitung. Obwohl im Modell (6.11) die höherfrequenten Dynamikanteile nach (4.40) unberücksichtigt bleiben, werden keine Wellen angeregt und auch höherfrequente Störungen unterdrückt. Als Nachteil wird der deutlich größere Bemessungsaufwand hervorgehoben.

Die zusätzliche Aufschaltung der Störgrößen ist nur bei genauer Kenntnis der Entnahmezeit-

punkte und -mengen sinnvoll.

Zur Vermeidung unnötiger Stellbewegungen wird vor das Stellglied eine Totzone geschaltet, die kleine Wehrbewegungen unterdrückt. Windup-Effekte bei vollständig geschlossenem oder vollständig geöffnetem Wehr werden durch entsprechende Modifikation der Integratoren vermieden. Simulationsrechnungen zeigen, daß die Regelgüte durch diese Modifikationen nicht vermindert wird. Weitere Robustheitsuntersuchungen beziehen sich auf Unsicherheiten in den Wehrkennlinien sowie auf Kommunikationsverzögerungen, da im realen System die Signalübertragung über ein Funknetzwerk mit begrenzter Bandbreite erfolgt. Theoretische Robustheitsbetrachtungen anhand des „structured singular value“ finden sich in WEYER 2006.

In WEYER 2006; WEYER 2008 werden zudem Ergebnisse einer experimentellen Validierung am realen Systems vorgestellt. Es wird hervorgehoben, daß dies nach Kenntnis des Autors die erste Implementierung eines LQ-Mehrgrößenreglers an einem realen Kanalsystems sei. Die betrachteten Haltungen haben Längen von 900 m bis 3200 m, die Abtastzeit beträgt 2 min. Damit ergeben sich Totzeiten von bis zu $\tau_i = 8T$ mit entsprechender Erhöhung der Zustandsdimension. Die praktischen Resultate bestätigen weitgehend die Simulationsergebnisse hinsichtlich Regelgüte und Robustheit.

WEYER 2008 beschreibt eine Ansatz zur Robustheitsanalyse eines linearen (zeitdiskreten) Zustandsreglers hinsichtlich Parametervariationen. Hierzu wird der Modellansatz um Terme erweitert, die die Unsicherheit beschreiben, beispielsweise zusätzliche Totzeiten (unter Verwendung einer PADÈ-Approximation). Eine Singulärwertanalyse zeigt, daß das geregelte System robust ist gegenüber Parametervariationen.

In MAREELS, WEYER, OOI u. a. 2005 werden simulativ Handsteuerung, dezentrale PI-Regler und eine zentrale LQ-Regelung an drei Haltungen des Kanals verglichen. Das Szenario umfaßt auch Sonderfälle wie ein Regenereignis und nicht ausgelöste Entnahmen. Die zentrale LQ-Regelung liefert hierbei die besten Ergebnisse, während die dezentralen PI-Regler während des Regenereignisses und bei größeren Störungen die vorgegebenen Wasserstände nicht einhalten können. Dies führt (bei zu niedrigen Wasserständen) dazu, daß die nötigen Wassermengen zur Bewässerung nicht geliefert werden können bzw. (bei zu hohen Wasserständen) zu Wasserverlusten, insbesondere in der letzten (tiefstgelegenen) Haltung des Kanalsystems. Die automatische Regelung ist insgesamt deutlich besser als eine Handsteuerung.

SANFILIPPO und DELTOUR 1998 nutzen einfache zeitdiskrete Modelle nach Gleichung (5.23) zum Entwurf einer Zustandsrückführung. Für jede Haltung wird ein Modell nach (5.23) ange setzt und mittels PADÈ-Approximation der Totzeit-Terme in eine zeitdiskrete Zustandsdarstellung überführt. Die Zustandsrückführung wird mittels RICCATI-Ansatz entworfen. Da die Zustandsgrößen des Modells nicht meßbar sind, wird ein Beobachter eingesetzt. SANFILIPPO und DELTOUR 1998 vergleichen anhand eines Kanalsystems mit drei Haltungen die Regelgüte dieser Zustandsregelung mit einer dezentralen Regelung mit SMITH-Prädiktor (siehe Abschnitt 5.3.6). Beide Verfahren werden als gleichermaßen geeignet zur Lösung der Regelungsaufgabe bewertet.

6.5 Unvollständige Zustandsrückführung / Ausgangsrückführung

Bei einer vollständigen Zustandsrückführung wird über die Rückführmatrix \mathbf{R} grundsätzlich jede Zustandsgröße auf jeden Eingang zurückgeführt. Wird im Entwurfsverfahren sichergestellt,

daß bestimmte Rückführungen gezielt unterdrückt werden können, so spricht man von einer unvollständigen (oder strukturbeschränkten) Zustandsrückführung. Die Rückführmatrix \mathbf{R} besitzt an vorgegebenen Positionen Nullelemente.

Zur gleichen Klasse gehören die Ausgangsrückführungen, die beispielsweise eingesetzt werden, wenn nicht alle Zustandsgrößen meßbar sind und auf den Einsatz eines Beobachters verzichtet werden soll. Hierbei werden statt der Zustands- die Ausgangsgrößen zurückgeführt. Auch in diesem Fall liegt eine Strukturbeschränkung für die Rückführmatrix vor.

Werden nur Rückführungen je einer Ausgangsgrößen auf genau eine zugeordnete Eingangsgröße zugelassen, so wird im Ergebnis eine dezentrale Regelungsstruktur (Diagonalstruktur bei geeigneter Sortierung der Variablen), bestehend aus einer Menge von Eingrößenregelungen, erhalten. Die Bemessung der Regler erfolgt jedoch am Gesamtmodell des Systems, dies ist der entscheidende Unterschied zu klassischen Eingrößenregelungen.

Wird zur Bemessung des strukturbeschränkten Reglers ein linear-quadratisches Kriterium (6.3) angesetzt, dann besitzt das Optimalsteuerungsproblem keine Lösung in Form einer RICCATI-Gleichung (6.4a). Falls überhaupt eine stabilisierende lineare Rückführung existiert, ist die als Lösung des Optimalsteuerungsproblems gefundene Rückführmatrix i. a. vom Anfangszustand abhängig. Das Optimierungsproblem muß numerisch gelöst werden und kann in vielen Fällen auf die Minimierung der Norm einer geeigneten Übertragungsfunktion im Bildbereich zurückgeführt werden.

Werden Polvorgabemethoden angewandt, so werden i. a. die Eigenwerte des geschlossenen Kreises nicht beliebig verschiebbar sein. Auch hier sind andere Algorithmen anzuwenden als zur Polvorgabe bei vollständiger Zustandsrückführung.

6.5.1 Zentrale und dezentrale PI-Regler auf Basis eines ID-Modells

CLEMMENS und SCHUURMANS 2004 und CLEMMENS und WAHLIN 2004 untersuchen den Einfluß von Kopplungsstrukturen lokaler PI-Regler für Stauketten auf die Regelgüte für das Gesamtsystem. Die Bemessung der Regler erfolgt durch numerische Minimierung eines quadratischen Gütemaßes anhand eines linearen zeitdiskreten Streckenmodells. Für jede einzelne Stauhaltung wird ein ID-Modell (4.37) in zeitdiskreter Zustandsdarstellung angesetzt, wobei die Totzeit als ganzzahliges Vielfaches der Abtastzeit angenommen wird. Durch die Wahl der Zustandsgrößen als zeitverzögerte Werte der Eingangsgröße stehen im Regelalgorithmus die Zustandsgrößen auch ohne einen zusätzlichen Beobachter zur Verfügung.

Zunächst wird eine vollständige Zustandsrückführung mit zusätzlicher I-Rückführung des Ausgangs nach Bild 6.2 realisiert. Die Rückführmatrix dieses zentralen Zustandsreglers für die gesamte Stauhaltungskette kann mittels RICCATI-Entwurf gefunden werden. Dezentrale Regler werden durch gezieltes Nullsetzen einzelner Elemente der Rückführmatrix für das Gesamtsystem gefunden. Da in diesem Fall keine analytische Lösung in Form einer RICCATI-Gleichung existiert, werden numerische Optimierungsverfahren eingesetzt. Werden alle Koppelterme zwischen den Haltungen eliminiert und nur lokale Rückführungen zugelassen, werden auf diesem Wege lokale PI-Regler erhalten. Die Autoren erwähnen nicht, daß die Reglerkoeffizienten im Falle unvollständiger Zustandsrückführungen i. a. vom gewählten Anfangszustand abhängen und allgemeine Stabilitätsaussagen nicht möglich sind. Die Änderungen im Optimalwert des

Gütefunktionalen werden als Maß für den Einfluß der jeweiligen Koppelterme interpretiert. Dabei zeigt sich, daß schon die Verkopplung der Regler der jeweils benachbarten Haltungen einen beträchtlichen Gütegewinn gegenüber einer reinen dezentralen PI-Regelung ergibt.

In CLEMMENS und WAHLIN 2004 werden die Ergebnisse umfangreicher Empfindlichkeitsuntersuchungen vorgestellt. Dabei werden u. a. Reibungskoeffizienten (und damit die Modelltotzeit) variiert sowie Minimalverstellungen der Wehre (Totzonen) eingeführt und anhand der ASCE-Benchmarks (CLEMMENS, KACEREK, GRAWITZ u. a. 1998) verglichen. Dabei zeigt sich, daß eine vollständige Zustandsrückführung deutlich robuster ist als eine lokale PI-Regelung. Ein ähnlicher Effekt läßt sich schon durch eine lokal verkoppelte PI-Regelung erreichen. Die Einführung von Minimalverstellungen für die Wehre führt i. a. nicht zu der damit bezweckten Reduktion der Verstellbewegungen, in vielen Fällen wird sogar das genaue Gegenteil erreicht.

Eine Erweiterung auf Bewässerungskanalsysteme mit Verzweigungen sowie ein Vergleich mit einem zentralen, linearen MPC-Algorithmus (siehe Abschnitt 7.7) wird in WAHLIN und CLEMMENS 2006b beschrieben. Die Einbeziehung der Verzweigungen in das ID-Modell erfolgt durch Abflüßaufteilung am Verzweigungspunkt. Simulationsergebnisse anhand eines HN-Modells des Kanalsystems Salt-River (USA) werden in WAHLIN und CLEMMENS 2006a vorgestellt. Die Ergebnisse sind hier ähnlich wie im Fall ohne Verzweigungen, der dezentrale PI-Regler weist größere Regelabweichungen im Wasserstand auf. Die Autoren betonen die Notwendigkeit einer Vorsteuerung durch Aufschaltung der prognostizierten bzw. vorab bekannten Wasserentnahmen.

6.5.2 Regelungsentwurf mit Volumenbilanzmodell

In einer Reihe von Veröffentlichungen, die auf der Dissertation SEATZU 1999a aufbauen, werden dezentrale und zentrale Regelungen auf der Basis des inkrementellen Volumenbilanzmodells (4.34), siehe Abschnitt 4.2.7 entworfen. Das Ziel der Regelung besteht in einer Stabilisierung des inkrementellen Wasservolumens $\mathbf{v}(t)$ in den Stauhaltungen des Kanalsystems. Im Idealfall bleibt dieses Volumen konstant, unabhängig von Wasserentnahmen und Zuflußschwankungen.

SEATZU, GIUA und USAI 1998, SEATZU 1999b, SEATZU 1999c entwerfen zentrale (vollständige Zustandsrückführung) und dezentrale (strukturbeschränkte oder unvollständige Zustandsrückführung) P- und PI-Zustandsregler mit Frequenzbereichsmethoden, d. h. Minimierung der H_2 -Norm geeigneter Übertragungsmatrizen. Die Funktion der Regelung wird am Modell eines Kanalsystems mit zwei Haltungen demonstriert, die HN-Simulation erfolgt mit SIC.

Der Entwurf zentraler und dezentraler P- und PI-Regler mittels Eigenwert- und Eigenvektorgaben („eigenstructure assignment“) wird von SEATZU 2000 beschrieben. Die Funktion der Regelung wird wiederum am Modell eines Kanalsystems mit zwei Haltungen demonstriert.

Die Zustandsgrößen des Modells, die inkrementellen Wasservolumina in den Haltungen, sind nicht meßbar, SEATZU und USAI 2002 beschreiben einen Beobachter, der das Volumen aus Meßwerten der Pegelstände rekonstruiert. Dieser Beobachter besitzt ebenfalls eine dezentrale Struktur und ordnet sich so in das Gesamtkonzept ein. Zur Bestimmung des inkrementellen Wasservolumens v_i der Stauhaltung i werden nur Meßwerte und Stellsignale genutzt, die der lokalen Regelung dieser Stauhaltung zugeordnet sind.

Anmerkung: Offensichtlich steht bei diesen Arbeiten eher das jeweilige Entwurfsverfahren im Vordergrund und weniger die Lösung einer praktischen Regelungsaufgabe. Die (akademischen) Beispielsysteme, an denen die Entwurfsverfahren getestet werden, lassen keine Aussage zur Eignung in einer realen Anwendung zu.

6.5.3 Ausgangsrückführung für einen Modellkanal

SHIRLEY, LEMOS, NOGUEIRA u. a. 2007 untersuchen eine Ausgangsrückführung zur Wasserstandsregelung eines aus vier Segmenten bestehenden (Modell-)Kanals. Zunächst wird ein orthogonales Kollokationsverfahren (mit 3...7 Kollokationspunkten je Kanalsegment) zur örtlichen Diskretisierung der SAINT-VENANT-Gleichungen eingesetzt. Zur Linearisierung des sich ergebenden gewöhnlichen DGL-Systems machen die Autoren keine Angaben. Das lineare System hat die Wehrstellungen als Eingangsgrößen, die Oberwasserstände als Ausgangsgrößen und berücksichtigt die seitliche Abflüsse (Entnahmen) als Störgrößen. Es wird ein Gütekriterium der Form

$$J = \sum_i \int_0^{\infty} e^{-2\alpha t} \mathbf{g}_i^T(t, \mathbf{R}) \mathbf{Q} \mathbf{g}_i(t, \mathbf{R}) dt \longrightarrow \min_{\mathbf{R}}! \quad (6.12)$$

mit der Wichtungsmatrix \mathbf{Q} und dem Stabilisierungsparameter α numerisch minimiert. \mathbf{g}_i ist die Impulsantwort des Ausgangs bezüglich des Eingangs bzw. der Störgröße i , die von den Elementen der Rückführmatrix \mathbf{R} als Optimierungsvariablen abhängt. Am Beispiel des Modellkanals werden lokale PI-Regler und Mehrgrößen-PI-Regler verglichen.

7 Modell-prädiktive Regelungsansätze

Die Entwicklung (nichtlinearer) modell-prädiktiver Regelalgorithmen ist ein derzeit sehr aktives Forschungsgebiet.

Die bekannten Eigenschaften einer modell-prädiktive Regelung, wie die direkte Berücksichtigung von Nichtlinearitäten und Beschränkungen der Prozeßgrößen sowie die einfache Umsetzbarkeit von Güteforderungen in die Optimalsteuerungsaufgabe zur Berechnung der Steuergrößen, lassen den Einsatz zur Regelung von Staustufen sinnvoll erscheinen.

7.1 Modell-prädiktiver Regler

Die Grundidee der modell-prädiktiven Regelung besteht darin, ein dynamisches Modell des zu regelnden Systems zur Berechnung zukünftiger Werte der Systemzustände zu verwenden, und – basierend auf dieser Prädiktion – geeignete Werte für die Eingangsgrößen vorzugeben. Unter Nutzung von Optimierungsverfahren können im Sinne einer vorgegebenen Zielfunktion optimale Eingangsgrößen berechnet werden, die Eingangs- und Zustandsbeschränkungen genügen.

Das Systemverhalten wird für den gesamten Optimierungshorizont $k = \hat{k}, \dots, \hat{k} + K$ prädiziert, siehe Abbildung 7.1, jedoch werden nur die Eingangsgrößen des ersten Zeitschritts angewandt. Im nächsten Zeitschritt werden Prognose und Optimierung unter Berücksichtigung des aktuellen Systemzustands und mit verschobenem Optimierungshorizont wiederholt.

In der Regel wird zur Lösung der Optimierungsprobleme ein numerisches Verfahren eingesetzt werden müssen, wodurch ein im Vergleich zu Regelalgorithmen der klassischen Regelungstechnik oder auch zu Zustandsreglern deutlich größerer online-Rechenaufwand nötig ist. Sollen Beschränkungen berücksichtigt werden so kann nur für Modelle niedriger Ordnung und einen kurzen Optimierungshorizont (etwa $n \cdot K \leq 10$) das Optimierungsproblem weitgehend offline gelöst werden (explizite modell-prädiktive Regelung).

Ein Standard-Algorithmus für einen modell-prädiktiven Regler ist wie folgt aufgebaut:

Start mit $\hat{k} := 0$

loop

Zustandsschätzung: Ermittlung des aktuellen Zustands $\mathbf{x}^{\hat{k}|\hat{k}}$ mit Meßdaten aus $[\hat{k}-\tilde{K}, \hat{k}]$.

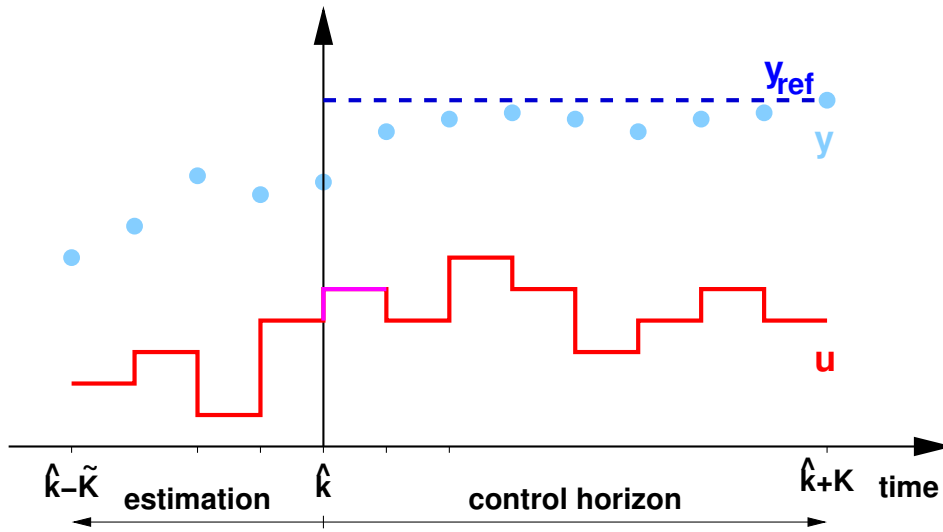


Abbildung 7.1: Modell-prädiktive Regelung: Zeithorizonte für Zustandsschätzung und Optimierung.

Optimalsteuerungsproblem: Berechnung der Lösung $\mathbf{u}^{k|\hat{k}}$, $k = \hat{k}, \dots, \hat{k} + K - 1$ von

$$\min_{\substack{\mathbf{u}^k, k=\hat{k}, \dots, \hat{k}+K-1 \\ \mathbf{x}^k, k=\hat{k}, \dots, \hat{k}+K}} \left\{ J = F(\mathbf{x}^{\hat{k}+K}) + \sum_{k=\hat{k}}^{\hat{k}+K-1} f_0^k(\mathbf{x}^k, \mathbf{u}^k) \right\} \quad (7.1a)$$

$$\mathbf{x}^{k+1} = \mathbf{f}^k(\mathbf{x}^k, \mathbf{u}^k), \quad k = \hat{k}, \dots, \hat{k} + K - 1 \quad (7.1b)$$

$$\mathbf{x}^{\hat{k}} = \mathbf{x}^{\hat{k}|\hat{k}}, \quad (7.1c)$$

$$\mathbf{c}^k(\mathbf{x}^k, \mathbf{u}^k) \leq \mathbf{0}, \quad k = \hat{k}, \dots, \hat{k} + K - 1 \quad (7.1d)$$

$$\mathbf{c}^K(\mathbf{x}^{\hat{k}+K}) \leq \mathbf{0} \left. \right\}. \quad (7.1e)$$

Anwendung von $\mathbf{u}^{\hat{k}|\hat{k}}$.

Verschiebung des Optimierungshorizonts $\hat{k} := \hat{k} + 1$.

end loop

Das Zielkriterium (7.1a) des Optimalsteuerungsproblems bewertet die Zeitverläufe der Zustands- und Steuergrößen. Für rein regelungstechnische Aufgabenstellungen wie die Sollwertfolge werden quadratische Kriterien

$$J = V_f(\mathbf{x}^{\hat{k}+K} - \mathbf{x}_{ref}^{\hat{k}}) + \frac{1}{2} \sum_{k=\hat{k}}^{\hat{k}+K} \|\mathbf{x}^k - \mathbf{x}_{ref}^{\hat{k}}\|_{\mathbf{Q}}^2 + \frac{1}{2} \sum_{k=\hat{k}}^{\hat{k}+K-1} \|\mathbf{u}^k - \mathbf{u}_{ref}^{\hat{k}}\|_{\mathbf{R}}^2 + \frac{1}{2} \sum_{k=\hat{k}}^{\hat{k}+K-2} \|\mathbf{u}^{k+1} - \mathbf{u}^k\|_{\mathbf{R}_D}^2 \quad (7.2)$$

als Erweiterung von (6.3) bevorzugt. Die Wichtungsmatrizen \mathbf{Q} , \mathbf{R} und \mathbf{R}_D bewerten dabei die Abweichung von der Referenztrajektorie bzw. die Variation der Eingangsgrößen und sind

zusammen mit der Länge des Optimierungshorizonts K die wichtigsten Tuning-Parameter des Regelkreises. Im Falle eines quadratischen Gütekriteriums, linearer Modellgleichungen und linearer Beschränkungen kann das Optimalsteuerungsproblem als quadratisches Optimierungsproblem (QP) gelöst werden, für diese Problemklasse existieren effektive numerische Lösungsverfahren.

Die Berücksichtigung realer Kosten oder eines Bewirtschaftungsaufwands im Gütekriterium führt in den meisten Fällen auf nicht-quadratische, sogenannte ökonomische Gütekriterien.

Die Beschränkungen (7.1d), (7.1e) resultieren aus den Beschränkungen der Systemgrößen, beispielsweise begrenzten Stellamplituden.

Unter bestimmten Voraussetzungen an die Formulierung des Optimalsteuerungsproblems läßt sich die Stabilität des mittels des MPC geschlossenen Regelkreises unter Nominalbedingungen nachweisen. Nominalbedingungen sind dabei eine exakte Übereinstimmung des dynamischen Modells mit dem System und Störungsfreiheit.

Von großer praktischer Bedeutung ist die Zulässigkeit der zu lösenden Optimalsteuerungsprobleme. Werden die Beschränkungen zu restriktiv formuliert, dann kann der Fall eintreten, daß es keinen Verlauf der Eingangs- und Zustandsgrößen gibt, der alle Ungleichungsbedingungen (7.1d), (7.1e) erfüllt. Der Algorithmus könnte dann keine Lösung liefern. Dies läßt sich durch ein Aufweichen der Beschränkungen („soft constraints“) vermeiden.

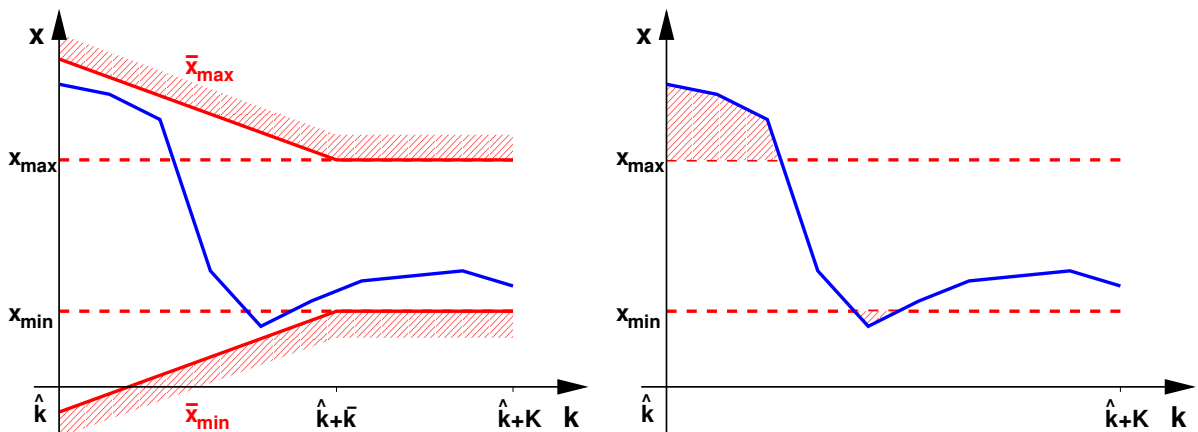


Abbildung 7.2: Aufweichen von Beschränkungen.

Bedingungen für die Robustheit von NMPC-Regelungen, d. h. das befriedigende Verhalten der Regelung beispielsweise bei Modellabweichungen, sind aktueller Forschungsgegenstand.

Aufgrund der nichtlinearen Dynamik einer Stauhaltung und der möglichen großen Amplitudenänderung der wesentlichen Systemgrößen im (durch die Laufzeit bestimmten) Prognosehorizont ist die Verwendung linearer parameteradaptierter Modellansätze wenig erfolgversprechend. Werden hydrodynamische Modelle auf der Basis der SAINT-VENANT-Gleichungen eingesetzt, so ist mit einem erheblichen numerischen Aufwand für die Simulation und die Lösung der nichtlinearen Optimierungsprobleme zu rechnen.

7.2 Modell-prädiktive Regelung hybrider linearer Systeme

Hybride Systeme sind dadurch gekennzeichnet, daß sie neben kontinuierlichen Größen mit zunächst vorausgesetzter linearer Dynamik auch diskret-wertige Eingangs- oder Zustandsgrößen besitzen. Zustandsänderungen der diskret-wertigen Größen können als logische Bedingungen formuliert werden. Diese logischen Bedingungen werden in gemischt-ganzzahlige lineare Ungleichungen umgesetzt, so daß das Gesamtmodell schließlich in Form von zeitdiskreten linearen Zustandsgleichungen und linearen Gleichungs- und Ungleichungsnebenbedingungen mit sowohl kontinuierlichen als auch ganzzahligen Variablen vorliegt (MLD: mixed logic dynamical system). Zur Analyse, Simulation und modell-prädiktiven Regelung können leistungsfähige numerische Verfahren der gemischt-ganzzahligen linearen oder quadratischen Optimierung eingesetzt werden.

Die Formulierung als gemischt-ganzzahliges Optimierungsproblem gestattet die Einbeziehung weiterer Aspekte, wie die Priorisierung von ausgewählten Zielkriterien oder Beschränkungen unter bestimmten (logischen) Bedingungen. Nichtlinearitäten (statische Kennlinien oder -felder) können mittels abschnittweiser linearer Approximation in die Systembeschreibung einbezogen werden.

Die numerisch Lösung eines gemischt-ganzzahligen linearen oder quadratischen Optimierungsproblems erfordert völlig andere Lösungsverfahren als die einer gewöhnlichen linear-quadratischen Optimierungsaufgabe. Trotz großer Fortschritte in der Algorithmenentwicklung ist die Dimension der praktisch lösbaren Probleme limitiert, der Rechenaufwand nimmt insbesondere mit der Anzahl der diskret-wertigen Variablen stark zu. Dies gilt in noch stärkerem Maße für nichtlineare gemischt-ganzzahlige Optimierungsprobleme, die bei einer formalen Übertragung der Vorgehensweise auf nichtlineare Systembeschreibungen zu lösen wären.

In den Arbeiten FERRARI-TRECATE, MIGNONE, CASTAGNOLI u. a. 2000 und MIGNONE 2002 wird der Einsatz eines hybriden linearen Modells zur Abflußsteuerung einer Staustufe beschrieben, wobei auf das in CHAPUIS 1998 beschriebene System Bezug genommen wird. Turbinen, Wehre und Wehrklappen sind die Stellorgane mit denen die Regelgrößen Gesamtabfluß und elektrische Leistung beeinflußt werden. Die Stellorgane werden mittels logischer Eingangsvariablen gesteuert, die das Verhalten von Schrittmotoren mit logischen Zuständen wie „opening“, „closing“, „stop“, „stand-by“ oder „emergency“ und den entsprechenden Zustandsübergängen beschreiben. Mit diesem Modellansatz kann die Dynamik der Stellorgane sehr gut beschrieben werden. Qualitative Entscheidungsregeln wie z. B. Prioritäten der Stellorgane (Maximierung des Turbinendurchflusses etc.) lassen sich vergleichsweise einfach einbeziehen. Nichtlinearitäten, wie z. B. Abflußkennlinien werden mittels abschnittweiser linearer Approximation abgebildet.

Mit einem modell-prädiktiven Ansatz kann eine Abflußregelung umgesetzt werden, wobei online in jedem Zeitschritt ein gemischt-ganzzahliges lineares Optimierungsproblem zu lösen ist. In FERRARI-TRECATE, MIGNONE, CASTAGNOLI u. a. 2000 werden hierzu erste Simulationsergebnisse vorgestellt.

7.3 Zustandsschätzung auf bewegtem Horizont

Durch die Übernahme des aktuellen Systemzustands als Anfangswert in jedem Schritt des MPC-Algorithmus wird der Regelkreis geschlossen, der MPC-Regler kann damit auf Störungen und Modellabweichungen reagieren. Jedoch ist in vielen praktischen Anwendungsfällen nur ein Teil der Zustandsgrößen meßbar, so daß Beobachter oder KALMAN-Filter nach Abschnitt 6.2 eingesetzt werden müssen. Mit dem erweiterten KALMAN-Filter können auch die Zustandsgrößen nichtlinearer Systeme geschätzt werden, jedoch ist die Einbeziehung von Beschränkungen nicht möglich oder führt zu wenig befriedigenden Resultaten. So kann es vorkommen, daß ein KALMAN-Filter physikalisch unmögliche Werte der Zustandsvariablen liefert, wie z. B. negative Durchflußwerte oder Konzentrationen.

Die Zustandsschätzung auf bewegtem Horizont überwindet diese Nachteile, indem die Grundidee der modell-prädiktiven Regelung auf das Zustandsschätzproblem übertragen wird. Die Optimierung erfolgt über einen endlichen Horizont $k = \hat{k} - \bar{K}, \dots, \hat{k}$ (siehe Abbildung 7.1), berücksichtigt Ungleichungsbeschränkungen und liefert den Zeitverlauf der Zustandsgrößen.

$$\min_{\{\hat{\mathbf{x}}^{\hat{k}-\bar{K}|\hat{k}}, \hat{\mathbf{w}}^{k|\hat{k}}, \hat{\boldsymbol{\xi}}^{k|\hat{k}}\}} \sum_{k=\hat{k}-\bar{K}}^{\hat{k}-1} \left[\left(\hat{\mathbf{w}}^{k|\hat{k}} \right)^T \mathbf{Q}^{-1} \hat{\mathbf{w}}^{k|\hat{k}} + \left(\hat{\boldsymbol{\xi}}^{k|\hat{k}} \right)^T \mathbf{S}^{-1} \hat{\boldsymbol{\xi}}^{k|\hat{k}} + \left(\hat{\mathbf{v}}^{k|\hat{k}} \right)^T \mathbf{R}^{-1} \hat{\mathbf{v}}^{k|\hat{k}} \right] + \Gamma \left(\mathbf{x}^{\hat{k}-\bar{K}|\hat{k}} \right) \quad (7.3)$$

unter Berücksichtigung von:

$$\hat{\mathbf{x}}^{k+1|\hat{k}} = \mathbf{f} \left(\hat{\mathbf{x}}^{k|\hat{k}}, \hat{\mathbf{u}}^k, \hat{\boldsymbol{\xi}}^{k|\hat{k}} \right) + \hat{\mathbf{w}}^{k|\hat{k}} \quad (7.4a)$$

$$\mathbf{y}^k = \mathbf{g} \left(\hat{\mathbf{x}}^{k|\hat{k}} \right) + \hat{\mathbf{v}}^{k|\hat{k}} \quad (7.4b)$$

$$\hat{\mathbf{x}}^{k|\hat{k}} \in \mathbf{X} \quad (7.4c)$$

$$\hat{\mathbf{w}}^{k|\hat{k}} \in \mathbf{W} \quad (7.4d)$$

$$\hat{\boldsymbol{\xi}}^{k|\hat{k}} \in \boldsymbol{\Xi}. \quad (7.4e)$$

Die Größen $\hat{\mathbf{w}}$ und $\hat{\mathbf{v}}$ sind die Systemstörung und das Meßrauschen, für die die gleichen Voraussetzungen wie beim KALMAN-Filter gelten. Die Bewertungsfunktion $\Gamma(\cdot)$ für den Zustand zu Beginn des Schätzzeitraums sichert die Konvergenz.

Die numerisch Lösung des Optimalsteuerungsproblems (7.3)–(7.4e) erfordert einen deutlich größeren online-Rechenaufwand als ein Beobachter oder ein KALMAN-Filter.

7.4 Modell-prädiktiver Regler für die Moselstaustufe Trier

In der Dissertation ACKERMANN 1999 und weiteren Veröffentlichungen ACKERMANN, SCHWANENBERG, NATSCHKE u. a. 1997, ACKERMANN, LOUCKS, SCHWANENBERG u. a. 2000 wird die

Entwicklung und Implementierung eines modell-prädiktiven Reglers für die Regelung des Laufwasserkraftwerks der Staustufe Trier vorgestellt.

Aufgrund der Bewirtschaftung der Staustufen der Oberen Mosel variiert der Zufluß in die Staustufe Trier sehr stark. Durch den zu entwickelnden Regelalgorithmus soll der Abfluß soweit vergleichmäßig werden, daß für die Staustufen der Unteren Mosel das Einhalten des Stauziels mit einer Toleranz von ± 5 cm ermöglicht wird.

Die Prädiktion des Systemverhaltens erfolgt mit einem hochauflösenden HN-Modell, innerhalb des Optimierungsalgorithmus jedoch (zur Reduktion des numerischen Aufwands) mit einem sogenannten „Hybrid-Strömungssimulationsverfahren“. Die Güteforderungen werden in eine Optimalsteuerungsaufgabe mit einem Zeithorizont von mehreren Stunden und einer zeitlichen Diskretisierung des Kraftwerksdurchflusses als Steuergröße von einigen Minuten (der Abtastzeit des modell-prädiktiven Reglers) umgesetzt. Im Gütekriterium wird sowohl die zeitliche Änderung des Abflusses als auch die Einhaltung der Stautoleranzen bewertet. Durch spezielle nichtlineare Bewertungsfunktionen werden dabei z. B. größere Abweichungen vom Stauziel deutlich stärker gewichtet. Da der modell-prädiktive Regler zur Kraftwerksregelung eingesetzt werden soll, ist eine Berücksichtigung des Wehres und anderer Teilkriterien nicht vorgesehen. Es werden Beschränkungen für den Wasserstand und den Turbinendurchfluß in die Optimierungsaufgabe einbezogen. Die Änderungsrate des Abflusses wird nicht hart beschränkt, sondern über die Wahl der Wichtungsfaktoren für die o. g. Teilkriterien weich begrenzt.

Die Zustandsermittlung (in der Arbeit als „Initialisierung“ bezeichnet) erfolgt stark vereinfacht durch die iterative Bestimmung eines solchen zusätzlichen Zuflusses (des „Zuflußdefizits“) in die Stauhaltung, der die Abweichungen der (mit willkürlichen Anfangswerten über einen bestimmten Zeithorizont der unmittelbaren Vergangenheit) simulierten Pegelwerte von den Meßwerten minimiert. Die Dimension der Optimierungsaufgabe zur Zustandsermittlung wird so auf eins reduziert. Leider wird keine Abschätzung zur Auswirkung dieser Einschränkung der Freiheitsgrade auf das Ergebnis der Zustandsermittlung und das Verhalten des geschlossenen Kreises angegeben.

Grundsätzlich bewirkt ein längerer Prognosehorizont eine stärkere Abflußvergleichmäßigung. Der Prognosehorizont wird jedoch durch die Vorhersagbarkeit des Zuflusses in die Stauhaltung Trier auf maximal 6 h begrenzt.

In ACKERMANN, LOUCKS, SCHWANENBERG u. a. 2000 werden Erfahrungen bei der Inbetriebnahme und dem Test des Entscheidungshilfesystems OPRiMA dargestellt. Da durch die verbesserte Regelung Schwankungen des Wasserstands reduziert werden, kann auf die geplante Vertiefung der Fahrrinne verzichtet werden. Der wirtschaftliche Nutzen beträgt dadurch mehrere Millionen Euro.

Mit der in der Arbeit ebenfalls diskutierten und simulativ erprobten *zentralen Regelung mehrerer Staustufen* mit einem modell-prädiktiven Regelalgorithmus werden die Leistungsgrenzen der verfügbaren Rechentechnik erreicht.

In der Dissertation von DETERING 2003 wird eine Erweiterung von OPRiMa beschrieben. Leider gibt der Autor keine Details zum eingesetzten MPC-Algorithmus an.

7.5 Übergeordnete Führung einer Stauhaltungskaskade mittels modell-prädiktiver Regelung

In GLANZMANN und SIEBENTHAL 2004; HUG-GLANZMANN, SIEBENTHAL, GEYER u. a. 2005; SACHS, GLANZMANN und SIEBENTHAL 2005 wird eine übergeordnete Wasserstandsregelung für kaskadierte Flußkraftwerke mittels modell-prädiktiver Regelung beschrieben. Hierzu gibt es zudem eine Patentschrift GLANZMANN, SIEBENTHAL, GEYER u. a. 2004.

Es wird ein Modellansatz nach CHAPUIS 1998 verwendet, siehe Abschnitt 4.2.8. Dabei werden die SAINT-VENANT-Gleichungen zunächst in der Umgebung eines Arbeitspunktes, der durch den ortsabhängigen Abfluß und Wasserstand gegeben ist, mittels TAYLOR-Entwicklung linearisiert. Die resultierende linearen partiellen Differentialgleichungen werden örtlich und zeitlich diskretisiert. Da die Orts- und Zeitdiskretisierung über die COURANT-Bedingung verkoppelt sind, liegt die Zeitschrittweite im Bereich von 1 s. Daher werden mehrere Simulationszeitschritte zu einem Zeitschritt des Differenzgleichungsmodells zusammengefaßt.

Die Zustandsgrößen des resultierenden linearen Differenzgleichungsmodells sind die Wasserstände im Intervallmittelpunkt der Ortsdiskretisierung sowie die Abflüsse an den Intervallgrenzen. Die Parameter des Modells sind durch die Geometriedaten und die Rauigkeiten bestimmt. Das Modell der Stauhaltungskaskade ergibt sich aus den Teilmodellen der einzelnen Haltungen und den Abflußmodellen der Kraftwerke und Wehre. Das Modell wird durch Eingangsintegratoren erweitert, so daß die Änderungen der Kraftwerks- bzw. Wehrabflüsse die Eingangsgrößen darstellen. Ausgangsgrößen sind die Wasserstände an den Konzessionspegeln im Oberwasser der Kraftwerke.

Mit Standardverfahren zur Reduktion linearer Zustandsmodelle (balancierte Modellreduktion) kann die Modelldimension reduziert werden. An einem Beispiel wird gezeigt, daß auch bei Reduktion der Anzahl der Zustandsgrößen auf ca. 30 % die Modellgenauigkeit für den Einsatz im MPC ausreichend ist.

In der Arbeit GLANZMANN und SIEBENTHAL 2004 werden alternative Modellansätze diskutiert:

- Einfache ID-Modelle nach Gleichung (4.39) sind für den Entwurf von PI-Reglern geeignet, bilden aber komplexere Vorgänge, wie die Dämpfung von Abflußwellen, nicht ab.
- Erweiterungen von ID-Modellen, die beispielsweise die Wellenausbreitung und Laufzeiten berücksichtigen, wären prinzipiell geeignet, erfordern jedoch Identifikationsexperimente, die im laufenden Kraftwerksbetrieb praktisch nicht durchführbar sind.
- Gleiches gilt für allgemeine systemtechnische Modellansätze, wie z. B. ARX-Modelle. Der fehlende Zusammenhang zwischen Modellparametern und physikalischen Daten erfordert ebenfalls Identifikationsexperimente.

Da Wasserstandsmessungen nur für die Oberwasserpegel vorliegen, wird zur Zustandsermittlung ein KALMAN-Filter eingesetzt. Aufgrund der Systemstruktur kann für jede Haltung ein separater KALMAN-Filter angesetzt werden, damit reduziert sich die Dimension und die Einschwingzeit.

Im Gütekriterium für den modell-prädiktiven Regleransatz werden die Abweichung der Wasserstände von den Vorgaben am Konzessionspegel sowie die Abflußänderungen quadratisch bewertet. Es werden Ungleichungsbeschränkungen für die Abflußänderung sowie für die maximalen

Abweichungen der Wasserstände von den Vorgaben berücksichtigt. Da die Ungleichungen für die Wasserstände u. U. nicht einzuhalten sind und in diesem Fall das Optimalsteuerungsproblem keine zulässige Lösung besitzen würde, werden diese Ungleichungen mit Schlupfvariablen erweitert. Durch geeignete Einbeziehung der Schlupfvariablen in das Gütekriterium wird erreicht, daß bei Existenz einer zulässigen Lösung die harten Ungleichungsbeschränkungen wirksam sind. Die Stabilität des MPC-Kreises wird durch eine entsprechende Bewertung der Zustandsgrößen am Ende des Optimierungshorizonts gesichert.

Der Regler wird simulativ an einem Modell der Stauhaltungskaskade der Unteren Aare (Schweiz) mit fünf Kraftwerken getestet. Die HN-Simulation erfolgt mit FLORIS. Die Abtastzeit für den MPC beträgt 72 s bei einem Optimierungshorizont von 50 Zeitschritten (1 h). Das Optimierungsproblem wird mit einem Standard-QP-Solver (CPLEX) gelöst, die Rechenzeit beträgt ca. 8.6 s. Die Simulationsergebnisse für die Szenarien

- sinusförmige Störung (Amplitude $30 \text{ m}^3/\text{s}$) am Zufluß bei niedrigem Abfluß ($200 \text{ m}^3/\text{s}$) und höherem Abfluß ($1000 \text{ m}^3/\text{s}$)
- Turbinenschnellschluß bei niedrigem Abfluß
- Hochwasserereignis (rampenförmige Zuflußänderung von $200 \text{ m}^3/\text{s}$ auf $300 \text{ m}^3/\text{s}$ innerhalb 1 h)

zeigen, daß die Stauzieltoleranzen von $\pm 2 \text{ cm}$ an den Konzessionspegeln zur wirksamen Dämpfung von Abflußwellen genutzt werden können. Die Regelgüte ist signifikant besser als die von konventionellen PI-Reglern. Empfindlichkeitsuntersuchungen bezüglich der Ortsdiskretisierung und weiterer Modellparameter zeigen die Robustheit des Ansatzes.

SETZ, HEINRICH, ROSTALSKI u. a. 2008 erweitern diesen Ansatz auf Staustufenketten mit Schiffsverkehr in zweierlei Hinsicht: zum einen werden durch Schleusungen bedingte Störungen in das interne Modell des MPC einbezogen und zum anderen wird die Forderung nach Reduktion der Stellbewegungen explizit berücksichtigt.

Die Einbeziehung der Schleusungswassermengen erfolgt direkt in die SAINT-VENANT-Gleichungen, die Vorhersagen der Schleusungszeitpunkte und -wassermengen erfolgt anhand der Schleusenbetriebszeiten.

Zur Berücksichtigung der Anzahl der Stellbewegungen wird anstelle des Turbinendurchflusses die Änderung des Turbinendurchflusses Δq_T als Eingangsgröße des um Eingangsintegratoren erweiterten Modells betrachtet. Die in der praktischen Realisierung zur Reduktion der Anzahl der Stellbewegungen oftmals verwendete Idee des Totbands wird auf den MPC übertragen. Es werden nur solche Änderungen des Turbinendurchflusses zugelassen, die betragsmäßig einen bestimmten Wert Δq_B überschreiten, ansonsten bleibt der Turbinendurchfluß unverändert. Dies kann mit BOOLSchen Variablen δ_1, δ_2 als Ungleichungsbeschränkung formuliert werden:

$$\begin{aligned} \Delta q_B \cdot \delta_1 + \Delta q_{T,\min} \cdot \delta_2 &\leq \Delta q_T \leq -\Delta q_B \cdot \delta_2 + \Delta q_{T,\max} \cdot \delta_2 \\ \delta_1 + \delta_2 &\leq 1, \quad \delta_1, \delta_2 \in \{0, 1\}. \end{aligned} \tag{7.5}$$

Das Optimalsteuerungsproblem wird damit zum gemischt-ganzzahligen quadratischen Optimierungsproblem. Da mit dem Ansatz (7.5) je Zeitschritt und Turbine zwei BOOLSche Variable zu berücksichtigen sind, ist ein sehr starker Anstieg des Rechenaufwands zu erwarten. Daher

werden in SETZ, HEINRICH, ROSTALSKI u. a. 2008 Möglichkeiten zur Reduktion dieses Aufwands untersucht, beispielsweise wird für den gesamten Optimierungshorizont nur eine einzige Stellbewegung zugelassen und die Beschränkung (7.5) nur für den ersten Zeitschritt im Optimierungshorizont berücksichtigt. **Anmerkung:** Aufgrund der Arbeitsweise des MPC sind dennoch in jedem Zeitschritt Stellbewegungen möglich, wenn in jedem Optimierungslauf die eine zugelassene Stellbewegung im ersten Zeitschritt erfolgt.

Die Simulationsuntersuchungen erfolgen wieder an der Stauhaltungskaskade der Unteren Aare. Bei einer Abtastzeit von 6 min wird ein Optimierungshorizont von 2.5 h verwendet – dies entspricht der Laufzeit einer Durchflußstörung durch das System. Es werden Szenarien mit konventionellen PI-Reglern und MPC, ohne und mit Schleusungsprognosen sowie ohne und mit Totband verglichen. Erwartungsgemäß ist die Einhaltung des Stauziels bei Berücksichtigung von Schleusungsprognosen deutlich besser. Die Autoren machen keine Angabe zur Art der Prognose, offenbar werden die in der Simulation exakt bekannten zukünftigen Schleusungsvorgänge verwendet. Durch die Berücksichtigung des Totbandes im MPC-Ansatz kann die Anzahl der Stellbewegungen deutlich reduziert werden und liegt in der gleichen Größenordnung wie bei einem konventionellen PI-Regler mit Totband.

7.6 Prädiktive Regelung für Bewässerungskanalssysteme

Prädiktive Regelung ist eine vereinfachte Form der modell-prädiktiven Regelung, bei der insbesondere keine Ungleichungsrestriktionen berücksichtigt werden. Bei Verwendung eines linearen Prozeßmodells und eines quadratischen Zielkriteriums mit endlichem Optimierungshorizont kann das Optimierungsproblem analytisch gelöst werden. Damit ist der online-Rechenaufwand sehr gering.

Die prädiktive Regelung wurde in verschiedenen Formen zeitlich vor der modell-prädiktiven Regelung entwickelt. Die oftmals eingesetzte Variante GPC („generalized predictive control“) verwendet ein lineares zeitdiskretes Prozeßmodell mit einem zusätzlichen stochastischen Störeingang (CARIMA).

7.6.1 Lokaler prädiktiver Regler mit Muskingum-Modell

In GÓMEZ, RODELLAR, VEA u. a. 1998, MANTECÓN, GÓMEZ und RODELLAR 2002 wird ein einfacher prädiktiver Regler für eine lokale Regelung eines Bewässerungskanals beschrieben. Regelgröße ist der Wasserstand am stromab gelegenen Ende der Haltung, Stellgröße der über das Oberliegerwehr gesteuerte Zufluß in die Haltung.

Zunächst wird ein HN-Modell abgeleitet: für den nicht gestauten Bereich der Haltung wird ein Charakteristiken-Ansatz für die SAINT-VENANT-Gleichungen verwendet, der Staubebereich der Haltung wird unter Berücksichtigung der geringeren Strömungsgeschwindigkeit gesondert angesetzt. Dieses Simulationsmodell wird zum Einsatz im prädiktiven Regelalgorithmus stark vereinfacht. Hier kommt ein lineares Differenzgleichungsmodell zum Einsatz, dessen Koeffizienten mittels Identifikation oder physikalischer Modellierung erhalten werden. Die Autoren

geben hierzu keine Details an. Für den nicht eingestauten Bereich der Haltung wird ein MUSKINGUM-Ansatz (4.30a) als besonders geeignet angesehen. Für den eingestauten Bereich wird eine einfache Massenbilanz angesetzt.

Im prädiktiven Regelalgorithmus wird die Steuergröße so bestimmt, daß nach einer vorgegebenen Anzahl von Abtastschritten die Regelgröße den Sollwert erreicht. Damit wird auf die explizite Formulierung eines Optimierungskriteriums und eventueller weiterer (Ungleichungs-)Beschränkungen verzichtet.

Der Algorithmus wird simulativ am HN-Modell getestet, wobei die Einbindung in die SIMULINK-Simulationsumgebung von MANTECÓN, GÓMEZ und RODELLAR 2002 im Detail diskutiert wird.

7.6.2 Lokaler prädiktiver Regler mit linearem Differenzgleichungsmodell

RUIZ C. Und RAMIREZ L. 1998 identifizieren die Parameter linearer zeitdiskreter Modellsätze (Differenzgleichungen) anhand eines HN-Modells (drei Stauhaltungen Maricopa Stanfield Bewässerungskanalsystem, Arizona, USA). In Simulationsexperimenten werden den stationären Signalen stochastische Signale (PRBS-Folgen) überlagert. Für jede einzelne Stauhaltung wird eine „distant downstream control“-Struktur vorgegeben. Die resultierenden linearen Differenzgleichungen sind 3. Ordnung. In das Prozeßmodell gehen Prognosen der nichtsteuerbaren Eingänge (hier des Abflusses der Stauhaltung) ein.

In einem Zielkriterium werden die Abweichung des Wasserstands vom Referenzwert sowie die Änderungsraten der Stellgröße (Zufluß vom Oberlieger) über einen Prognose- bzw. Optimierungshorizont quadratisch bewertet, wobei der Eingangsterm zeitvariant bewertet werden kann. Die Lösung des resultierenden unbeschränkten quadratischen Optimierungsproblems führt auf ein lineares Gleichungssystem zur Bestimmung des aktuellen Stellschritts. Dieses kann offline gelöst werden, so daß der prädiktive Regelalgorithmus explizit in Differenzgleichungsform (RST-Polynome) dargestellt werden kann.

Der prädiktive Regelalgorithmus wird an dem o. g. HN-Modell getestet. Die Simulationsergebnisse zeigen, daß die Verkopplung der lokalen Regelkreise, die Wirkung von Stellgrößenbeschränkungen und die Einbeziehung geplanter Wasserentnahmen weiter untersucht werden müssen.

SAWADOGO, FAYE, MALATERRE u. a. 1998 verwenden einen ähnlichen Ansatz und testen ihn an einem simulierten Kanalsystem mit vier Stauhaltungen. Die linearen Differenzgleichungen sind hier 2. Ordnung bei einer Abtastzeit von 10 min. Als HN-Simulator kommt SIC zum Einsatz.

SAWADOGO, FAYE, BENHAMMOU u. a. 2000 erweitern den Ansatz um eine Modelladaption. Die Parameter des linearen Differenzgleichungsmodells werden online mit der rekursiven Methode der kleinsten Fehlerquadrate an Meßwerte bzw. Ausgaben des HN-Simulationsmodells adaptiert. Der Algorithmus wird simulativ an einem Kanalsystem mit acht Stauhaltungen getestet, für die HN-Simulation kommt SIC zum Einsatz.

AKOUZ, BENHAMMOU, MALATERRE u. a. 1998, AKOUZ, BENHAMMOU, MALATERRE u. a. 1999 testen einen lokalen prädiktiven Regelalgorithmus an einem Teilsystem mit zwei (AKOUZ, BENHAMMOU, MALATERRE u. a. 1999) bzw. drei (AKOUZ, BENHAMMOU, MALATERRE u. a. 1998)

Stauhaltungen des ASCE-Benchmark-Kanalsystems nach CLEMMENS, KACEREK, GRAWITZ u. a. 1998. Die simulierten Szenarien werden anhand einer Reihe von Gütekriterien, wie z. B. die maximale absolute Regelabweichung der Wasserstände, die integrale absolute Regelabweichung, die integrale absolute Durchflußänderung etc. bewertet.

PAGÈS, COMPAS und SAU 1998 entwickeln ebenfalls einen prädiktiven Regler auf der Basis linearer Differenzgleichungsmodelle und berichten von der geplanten Einführung zur Wasserstandsregelung von zwölf Stauhaltungen der Rhône. Erste Tests zeigten eine deutliche Überlegenheit gegenüber einem traditionellen PID-Regler. **Anmerkung:** Leider geben die Autoren hierzu keine Einzelheiten an. Gleiches gilt für die im Beitrag erwähnte Mehrgrößenregelung für den Einsatz im Hochwasserfall.

7.7 Weitere MPC-Ansätze

7.7.1 Modell-prädiktiver Regler für einen Experimentalkanal

SILVA, BOTTO, FIGUEIREDO u. a. 2007 berichten über Testergebnisse eines modell-prädiktiven Reglers für einen Experimentalkanal der Universität Évora (Portugal) mit vier Haltungen und einer Gesamtlänge von 145 m. Die unterströmten Wehre sind automatisiert und werden mit einem SCADA-System überwacht und gesteuert. Der MPC-Algorithmus ist in MATLAB (MPC-Toolbox) implementiert.

Das im MPC eingesetzte Prozeßmodell beruht auf einer Linearisierung und Diskretisierung (PREISSMANN-Schema) der SAINT-VENANT-Gleichungen und der Wehrkennlinien. Damit ergibt sich ein lineares zeitdiskretes Modell mit den Zustandsgrößen Wasserstand und Abfluß im Diskretisierungsgitter. Das quadratische Gütekriterium bewertet die Abweichungen des Wasserstands und der Eingänge (Wehrabflüsse) von Referenzwerten, die aus der stationären Lösung berechnet werden, sowie die Änderung der Wehrabflüsse. Beschränkungen der Stellgrößen werden erwähnt, aber nicht mathematisch formuliert.

Anhand von Experimenten am Kanal wird der MPC-Algorithmus mit einer dezentralen PI-Regelung (UMPIC: upstream water level monovariable PI controller) verglichen. Die Regelungen werden hinsichtlich verschiedener Gütemaße (IAE: integral absolute error, MAE: maximum absolute error, IAW: integral gate movement etc.) bewertet. Der MPC-Algorithmus hält die Wasserstandsvorgaben deutlich besser ein, allerdings teilweise auf Kosten einer erhöhten Beanspruchung der Stellglieder. Die Regelgüte des MPC verbessert sich deutlich, wenn Prognosen der Wasserentnahmen im Modell berücksichtigt werden.

7.7.2 Modell-prädiktive Regelung eines Hochwasserentlastungssystems

BARJAS BLANCO, WILLEMS, DE MOOR u. a. 2008 berichten über die Entwicklung eines MPC-basierten Reglers zur Steuerung eines Hochwasserentlastungssystems am Fluß Demer (Belgien). Das untersuchte Teilsystem besteht aus einem Flußabschnitt und einem Speicher, der zur Hochwasserentlastung eingesetzt werden soll. Derzeit werden die zugehörigen Wehre mit 3-Punkt-Reglern angesteuert, und das Ziel der Untersuchungen besteht darin, zu zeigen, welche

Verbesserungen durch eine aufwendigere Steuerstrategie zu erzielen sind. Die Autoren heben hervor, daß für den geplanten Einsatz ein nichtlineares Modell notwendig ist, da (im Unterschied zur gewöhnlichen Wasserstandsregelung) im Hochwasserfall die komplette nichtlineare Dynamik des Systems angeregt wird.

Zunächst wird ein vereinfachtes nichtlineares, zeitdiskretes, dynamisches Reservoirmodell an einem HN-Modell (InfoWorks) validiert. Leider werden bis auf die Abtastzeit von 1 h keine Details des Modells angegeben. Das Gütekriterium ist quadratisch, wobei einige Terme situationsabhängig angepaßt werden. Es werden lineare Beschränkungen, insbesondere für die Wasserstände und die Aktoren (Verstellgeschwindigkeit der Wehre) berücksichtigt. Das nichtlineare Optimierungsproblem wird über eine Folge von quadratischen Optimierungsproblemen näherungsweise gelöst, so daß eine Abtastzeit von 15 min erreicht werden kann.

Für den simulativen Test wird angenommen, daß der Zufluß im Prädiktionshorizont exakt bekannt ist. Erwartungsgemäß ist die Regelgüte des MPC deutlich besser als die der derzeit eingesetzten 3-Punkt-Regler.

7.7.3 Modell-prädiktive Regelung für den Roten Fluß

THAI 2005 berichtet über die Entwicklung eines Modells des Flußsystems des Roten Flusses (Vietnam). Es wird ein numerisches Verfahren zur numerischen Integration der SAINT-VENANT-Gleichungen entwickelt, bei dem die Ortsableitung durch finite Differenzen ersetzt und das resultierende System gewöhnlicher Differentialgleichungen mit einem geeigneten Solver (hier einem BDF-Mehrschrittverfahren DAESOL) integriert werden (Linienmethode). Damit kann die numerische Lösung der SAINT-VENANT-Gleichungen als grob auflösendes HN-Modell in Optimierungsalgorithmen eingebunden werden.

Dies wird in einem ersten Ansatz zur Bestimmung der Reibungskoeffizienten (MANNING-Faktoren) anhand von Meßdaten ausgenutzt. Zur Bestimmung des unbekanntem Anfangszustands des Systems (Anfangswerte von Wasserstand und Abfluß auf dem Gitter der Ortsdiskretisierung) wird über die Lösung einer gewöhnlichen DGL ein stationärer Zustand bestimmt. In einem zweiten Ansatz wird das diskretisierte Modell zur Berechnung optimaler Steuerungen für ein Hochwasserszenario herangezogen. Steuergröße ist der Abfluß aus einem Reservoir, das Ziel besteht in der Minimierung des Abflußscheitelwertes an einem Referenzpunkt im Flußsystem. Die numerische Lösung des nichtlinearen, beschränkten Optimalsteuerungsproblems erfolgt mit MUSCOD II. Weitere Einsatzmöglichkeiten, wie z. B. die nichtlineare modell-prädiktive Regelung oder die optimale Positionierung zusätzlicher Pegelmeßstellen, werden in der Arbeit THAI 2005 nur kurz erwähnt.

7.7.4 Modell-prädiktiver Regler mit ID-Modell

WAHLIN 2004 testet einen linearen modell-prädiktiven Regler auf der Basis einfacher ID-Modelle (4.37) am ASCE-Benchmark-Kanal nach CLEMMENS, KACEREK, GRAWITZ u. a. 1998. Für jede Haltung des Kanalsystems wird ein ID-Modell aufgestellt, wobei die Modellparameter anhand von HN-Simulationen gewonnen werden. Die Modellgleichungen werden in eine

zeitdiskrete Zustandsgleichung des Gesamtsystems überführt. Zustandsgrößen sind die (zeitverzögerten) Zuflüsse der Haltungen, die im Regelungssystem ohne Beobachter verfügbar sind. Im Gütekriterium wird die Abweichung der Wasserstände von den jeweiligen Sollwerten und die Änderungsraten der Wehrdurchflüsse quadratisch bewertet. Es werden Stellgrößenbeschränkungen für die Wehrdurchflüsse und ihre Änderungsraten sowie Beschränkungen für die Wasserstände der Haltungen berücksichtigt. Eine exakte Umsetzung der Minimalwerte für die Wehrverstellungen (als Totzone vom Typ II bezeichnet) in Beschränkungen würde auf ein gemischt-ganzzahliges Optimierungsproblem (BOOLSche Variable: keine Verstellung im aktuellen Zeitschritt oder Verstellung größer als Minimalwert) führen. Daher werden diese Beschränkungen durch ein nachträgliches Runden der Optimierungsergebnisse approximiert. Tuning-Parameter des MPC-Algorithmus sind neben den Wichtungsmatrizen im Gütekriterium der Prognosehorizont, der hier auf der Basis der Laufzeit einer Zuflußstörung durch das Gesamtsystem gewählt wird.

Der MPC-Algorithmus wird in MATLAB implementiert und an das Simulationssystem SOBEK angebunden. Die Bewertung und der Vergleich mit einem zentralen PI-Regelalgorithmus (siehe Abschnitt 6.5) erfolgt anhand der in CLEMMENS, KACEREK, GRAWITZ u. a. 1998 vorgegebenen Szenarien und Bewertungsfunktionen. Dabei erweist sich der MPC als effizientes Verfahren, die Unterschiede zur PI-Regelung sind allerdings nicht signifikant. Bei Berücksichtigung der Minimalverstellungen der Wehre treten unerwünschte Oszillationen im Wasserstand auf. Die Regelgüte wird limitiert durch den verwendeten Algorithmus zur Prognose der Wasserentnahmen (basierend auf dem ID-Modell). Verbesserungspotential wird im Prognosealgorithmus und im verwendeten Prozeßmodell gesehen, da das einfache ID-Modell Änderungen der Dynamik (Speichervolumen) bei größeren Durchflußvariationen nicht korrekt abbildet.

Eine Erweiterung auf Bewässerungskanalsysteme mit Verzweigungen wird in WAHLIN und CLEMMENS 2006b beschrieben. Die Einbeziehung der Verzweigungen in das ID-Modell erfolgt durch Abflaufaufteilung am Verzweigungspunkt. Simulationsergebnisse anhand eines HN-Modells des Kanalsystems Salt-River (USA) werden in WAHLIN und CLEMMENS 2006a vorgestellt. Die Ergebnisse sind hier ähnlich wie im Fall ohne Verzweigungen. Die Autoren betonen die Notwendigkeit einer Vorsteuerung durch Aufschaltung der prognostizierten bzw. vorab bekannten Wasserentnahmen.

7.7.5 Modellbasierter Prädiktivregler zur Abflußvergleichmäßigung

Im Anhang der Dissertation CHAPUIS 1998 beschreibt der Autor einen modellbasierten Prädiktivregler zur Abflußvergleichmäßigung einer einzelnen Stauhaltung auf Basis einer durch örtliche Diskretisierung der linearisierten SAINT-VENANT-Gleichungen gewonnenen Zustandsbeschreibung, siehe Abschnitt 4.2.8. Das Ziel der Abflußvergleichmäßigung wird als Minimierung der maximalen Einschnitt-Abflußänderung im Prognosehorizont formuliert:

$$\max_{k \in [\hat{k}, K-1]} |q_{ab}^{k+1} - q_{ab}^k| \longrightarrow \min! \quad (7.6)$$

Zudem sind die Toleranzgrenzen für den Oberwasserpegel einzuhalten

$$h_{OW,min} \leq h_{OW}^k \leq h_{OW,max}, \quad k = \hat{k}, \dots, \hat{k} + K \quad (7.7)$$

und zum Ende des Optimierungshorizonts ist der Referenzpegel $h_{OW,Ziel}$ zu erreichen

$$h_{OW}^{\hat{k}+K} = h_{OW,Ziel}. \quad (7.8)$$

Optimierungsvariable ist der Abfluß der Stauhaltung q_{ab}^k , $k = \hat{k}, \dots, \hat{k} + K$, das Optimierungsproblem ist linear. Der Autor geht nicht auf Probleme ein, die durch Optimierungsprobleme ohne zulässige Lösung entstehen können.

Die Zustandsgrößen (Wasserstand und Durchfluß in den Punkten des Diskretisierungsgitters) sind nicht meßbar. Zur Zustandsermittlung wird ein KALMAN-Filter (siehe Abschnitt 6.2) eingesetzt. Zur Wahl der Wichtungsmatrizen (Kovarianzmatrizen der Systemstörung \mathbf{Q} und des Meßrauschens \mathbf{S}) werden keine Angaben gemacht.

Der modellbasierter Prädiktivregler wird simulativ mit einem PI-Regler verglichen. Insbesondere in Niedrigwassersituationen mit schlecht gedämpfter Stauraumdynamik zeigt sich eine deutlich größere Dämpfung des Pegel- und Abflußverlaufs. Je kleiner der Prädiktionshorizont K gewählt wird, desto besser wird der Pegel gedämpft, aber desto größer sind die dazu erforderlichen Abflußänderungen.

7.8 MPC unter Einbeziehung von Unsicherheiten

7.8.1 Multi-Modell-MPC für ein Entwässerungskanalsystem

In OVERLOOP, SCHUURMANS und BROUWER 2003 wird ein MPC-Ansatz zur Wasserstandsregelung eines Entwässerungskanalsystems untersucht. Es wird ein auf den Volumenbilanzen der Teilsysteme basierendes lineares Zustandsmodell des Gesamtsystems mit der Abweichung des Wasserstands vom Sollwert im jeweiligen Teilsystem sowie deren Integral als Zustandsgrößen, ein quadratisches Zielkriterium und lineare Beschränkungen angesetzt. Das resultierende quadratische Optimierungsproblem wird online mit einem Interior-Point QP-Solver gelöst. Der Optimierungshorizont beträgt 24 h und wird durch die Verfügbarkeit von zuverlässigen Niederschlagsvorhersagen bestimmt.

Der zum Vergleich untersuchte konventionelle lokale Regler wird nur insoweit spezifiziert, daß ein Toleranzband für den lokalen Wasserstand vorgegeben ist und bei Über- oder Unterschreitung der Toleranzgrenzen die Pumpstationen bzw. Schleusentore sukzessive zu- bzw. abgeschaltet werden.

Die Regelalgorithmen werden simulativ an einem HN-Modell (SOBEK) eines Entwässerungskanalsystems in den Niederlanden (drei Teilsysteme mit einer Gesamtlänge von 447 km) untersucht. Als besonderer Vorteil des MPC-Ansatzes wird die direkte Berücksichtigung von Beschränkungen und von niederschlagsbedingten Zuflußprognosen hervorgehoben.

In OVERLOOP, WEIJS und DIJKSTRA 2008 wird der entwickelte Ansatz deutlich erweitert. Das zugrundeliegende Modell ist ein einfacher ID-Ansatz nach (4.37), der um einen zusätzlichen Zuflußterm zur Einbeziehung des Niederschlagsabflusses erweitert wird. Simulativ werden ein PI-Regler, ein PI-Regler mit Störgrößenaufschaltung (jeweils mit Anti-Windup-Modifikation bei Erreichen des maximal möglichen (gepumpten) Abflusses) sowie ein linearer MPC verglichen.

Wesentlich ist die Einbeziehung der aus den Wasserstandsvorgaben resultierenden Zustandsbeschränkungen in das Optimalsteuerungsproblem. Da eine Verletzung dieser Beschränkungen in bestimmten Situationen nicht zu verhindern ist, muß das Optimierungsproblem mittels Schlupfvariablen so erweitert werden, daß in jedem Fall eine zulässige Lösung existiert.

Das untersuchte Szenario ist ein Worst-Case-Fall mit sehr großem, als bekannt angenommenem niederschlagsbedingtem Zufluß. Erwartungsgemäß liefert der MPC-Ansatz aufgrund der Einbeziehung des prognostizierten Systemverhaltens die geringste Verletzung des zulässigen Bereichs für den Wasserstand.

Die Einbeziehung der Unsicherheit in den niederschlagsbedingten Zuflußprognosen gelingt über ein multi-Modell-Ansatz. Zunächst werden auf der Basis von Niederschlagsvorhersagen und einem Niederschlags-Abluß-Modell mehrere Zuflußprognosen für den Optimierungshorizont des MPCs sowie die zugehörigen Eintretenswahrscheinlichkeiten ermittelt. Aus diesen Prognosen werden exemplarisch ein minimaler, ein durchschnittlicher und ein maximaler Zuflußverlauf ausgewählt. Das Prozeßmodell im MPC wird so erweitert, daß diese drei Prognosen berücksichtigt werden, wobei der Stelleingriff jedoch identisch ist. **Anmerkung:** Mit diesem Ansatz wird nicht berücksichtigt, daß im nächsten Abtastschritt der MPC eine erneute Optimierung mit eventuell veränderten Prognosen liefert. Das Ergebnis wird daher (zu) konservativ sein.

In der Zielfunktion wird das „Risiko“ einer Abweichung vom Sollwert unter Einbeziehung der Eintretenswahrscheinlichkeiten abgeschätzt. Durch die Modellerweiterung ergibt sich ein entsprechender Mehraufwand für die numerische Lösung des Optimierungsproblems.

Praktische Resultate oder closed-loop-Simulationsergebnisse werden nicht angegeben. Die Autoren heben jedoch hervor, daß dieses Modell der Risikobewertung und Entscheidungsfindung dem Vorgehen des Bedienpersonals entspricht.

7.8.2 Bewirtschaftung eines Energieversorgungssystems

NOLDE, UHR und MORARI 2008 beschreiben einen Ansatz zur direkten Einbeziehung stochastischer Größen in das Optimierungsproblem eines modell-prädiktiven Reglers. Es wird die mittelfristige Bewirtschaftung eines Energieversorgungssystems, bestehend aus Wasserkraftwerken mit den entsprechenden Speichern und Wärmekraftwerken, mit einem Optimierungshorizont von mehreren Monaten betrachtet. Dabei ist die Volumenbilanz der Wasserspeicher mit stochastischen Zuflußkomponenten und die Energiebilanz, d. h. die Abdeckung des ebenfalls stochastischen Energiebedarfs zu berücksichtigen. Das Optimierungsproblem besteht in der Minimierung der Energiekosten unter den gegebenen Restriktionen.

Kontinuierliche stochastische Optimierungsprobleme können nur in Ausnahmefällen gelöst werden. Daher werden die stochastischen Variablen diskretisiert, d. h. es werden endlich viele Realisierungen betrachtet, die die ursprüngliche Verteilung möglichst gut approximieren. Mit einer speziellen Dekompositionstechnik kann das Optimierungsproblem gelöst werden.

Aufgrund des stochastischen Ansatzes kann nicht garantiert werden, daß das Optimierungsproblem in jedem Fall eine zulässige Lösung besitzt. Es sind Realisierungen der Zufallsgrößen möglich, für die der Energiebedarf nicht gedeckt werden kann oder der maximal zulässige Abfluß überschritten wird. Das Optimierungsproblem ist daher mit entsprechenden Schlupfvariablen zu erweitern.

Im Gegensatz zu einem reinen stochastischen Optimierungsansatz wird beim MPC nur der Anfangsabschnitt der optimalen Trajektorie realisiert und dann die Optimierung mit verschobenem Zeithorizont wiederholt.

8 Verteilt-parametrische, nichtlineare und stochastische Regelungsansätze

8.1 Verteilt-parametrische Regelungsansätze

8.1.1 Randsteuerung mittels Riemann-Invarianten

In HALLEUX, PRIEUR, CORON u. a. 2003 leiten die Autoren ein stabilisierendes Reglergesetz für eine Steuerung mittels Randeingriff ab. Ein Kanalabschnitt wird mit den SAINT-VENANT-Gleichungen beschrieben, wobei vereinfachend der reibungsfreie Fall mit einem rechteckförmigen Kanalquerschnitt sowie ohne Sohlgefälle angenommen wird. Die Steuerung erfolgt mittels unterströmter Wehre an den Enden des Kanalabschnitts.

Mit diesen Vereinfachungen können die Charakteristiken analytisch über einem Standardansatz zur Lösung hyperbolischer partieller Differentialgleichungen bestimmt werden. Mittels Koordinatentransformation wird das Modell in den RIEMANN-Invarianten formuliert.

Es werden sehr allgemeine Stabilitätsbedingungen abgeleitet. Darauf aufbauend können Reglergesetze bestimmt werden, die das System stabilisieren. Es handelt sich dabei um rein lokale Reglergesetze, d. h. die Wehrstellung wird ausschließlich aus dem lokalen Wasserstand (im Ober- bzw. Unterwasser) ermittelt, weitere Meßgrößen sind nicht erforderlich. Gleichung (8.1) gibt ein solches Reglergesetz für den Fall überströmter Wehre an.

Die Ergebnisse werden anhand von Simulationsrechnungen verifiziert und auf zwei in Reihe befindliche Kanalabschnitte erweitert. Die Bedeutung dieses Ansatzes besteht weniger in der praktischen Anwendbarkeit als im Nachweis der Existenz stabilisierender lokaler Reglergesetze für den Randeingriff.

In CORON, D'ANDRÉA-NOVEL und BASTIN 1999 wird eine Entropiefunktion eingeführt, die die Abweichung des Systems von einer Gleichgewichtslage (stationärer Wasserstand und Abfluß) bewertet. Es wird gezeigt, daß diese Entropie für das Reglergesetz eine LYAPUNOV-Funktion darstellt, das System also stabilisiert wird. Allerdings läßt sich keine asymptotische Stabilität zeigen, dies gelingt mit einem erweiterten Ansatz für eine strenge LYAPUNOV-Funktion, siehe CORON, D'ANDRÉA-NOVEL und BASTIN 2007.

In HALLEUX und BASTIN 2002 wird ein ähnlicher Ansatz zur Ableitung eines Reglergesetzes für überströmte Wehre verwendet. Für die Wehrkennlinie (normierte Kanalbreite)

$$Q(L, t) = k(H(L, t) - u)^m$$

ergibt sich das lokale Reglergesetz zu

$$u = H(L, t) - \left(\frac{(\bar{Q} + e_v) H(L, t)}{k} \right)^{\frac{1}{m}} \quad \text{mit } e_v = 2 \frac{1 - \gamma}{1 + \gamma} \left(\sqrt{gH} - \sqrt{g\bar{H}} \right) \quad (8.1)$$

dabei bezeichnen H den orts- und zeitabhängigen Wasserstand, Q den ebenfalls orts- und zeitabhängigen Abfluß, \bar{H} und \bar{Q} die zugehörigen stationären Werte, u die einzustellende Wehrhöhe und $\gamma \geq 0$ einen Tuning-Parameter.

Auch hier kann die Stabilität des geschlossenen Kreises bewiesen werden. Die Regelung wird simulativ an einer Kaskade von sieben Staustufen am Fluß Sambre (Belgien) gezeigt.

Eine Erweiterung auf Gerinnemodelle mit Reibungsterm und seitlichen Zuflüssen ohne Einfluß auf die Momentenbilanz, d. h. SAINT-VENANT-Gleichungen mit Inhomogenitäten, wird in PRIEUR, WINKIN und BASTIN 2005 vorgestellt. Unter gewissen Voraussetzungen an die Inhomogenitäten können wiederum lokale Reglergesetze, d. h. Wehrabflüsse nur in Abhängigkeit vom Oberwasserstand am Wehr abgeleitet werden, die das System stabilisieren.

Mit dem gleichen Ansatz kann ein Steuergesetz zur Aufschaltung einer bekannten Zuflußstörung auf den Abfluß einer Stauhaltung bestimmt werden, siehe BASTIN, CORON, NOVEL u. a. 2005. Dieses hat die Form einer unendlichen Reihe und beinhaltet Zuflußwerte aus Zeitpunkten der Vergangenheit. Auch hier läßt sich Stabilität nachweisen.

LI 2008 betrachtet die Stabilisierung einer Kette von Stauhaltungen mit einem ähnlichen Ansatz. Auch hier wird eine dezentrale stabilisierende Lösung mit einer entsprechenden LYAPUNOV-Funktion gefunden.

8.1.2 Weitere verteilt-parametrische Ansätze

LITRICO und FROMION 2006a zeigen, wie mit Frequenzbereichsmethoden die Einschränkungen der auf den RIEMANN-Invarianten basierenden Ansätze (reibungsfreie Kanäle mit rechteckförmigem Querschnitt und gleichförmige Strömung) überwunden werden können. Für die linearisierten SAINT-VENANT-Gleichungen eines Kanalabschnitts wird die transzendente Übertragungsmatrix im LAPLACE-Bereich (siehe Gleichung (4.14)) abgeleitet. Mittels NYQUIST-Kriterium werden anschließend notwendige und hinreichende Stabilitätsbedingungen für die Eingangs-Ausgangs-Stabilität des randgesteuerten hyperbolischen Systems formuliert.

8.2 Nichtlineare Regelungsansätze

In diesem Abschnitt sollen (nicht modell-prädiktive) Regelungsansätze aufgeführt werden, die auf einem nichtlinearen Modell des Systems mit konzentrierten Parametern, d. h. einem nichtlinearen Differentialgleichungssystem, aufbauen. Auch dies ist ein aktueller Forschungsschwerpunkt in der Regelungstechnik, so daß hier zukünftig weitere Arbeiten zu erwarten sind.

8.2.1 Exakte Linearisierung

Unter einer exakten Linearisierung versteht man eine i. a. nichtlineare Transformation der Eingangsgrößen eines nichtlinearen Systems, die im Ergebnis einen linearen Zusammenhang zwischen den neuen Eingängen und den Ausgängen (exakte Eingangs-Ausgangs-Linearisierung) oder den Zustandsgrößen (exakte Zustandslinearisierung) ergibt. Dies stellt eine Form der Modellinversion dar.

BENAYACHE, BESANÇON und GEORGES 2008 beziehen sich auf einen Ansatz von LITRICO und POMET 2003 und approximieren die SAINT-VENANT-Gleichungen unter Nutzung der diffusiven Wellengleichung, einer nichtlinearen gewöhnlichen Differentialgleichung 2. Ordnung, schließlich durch ein nichtlineares Differentialgleichungssystem mit zustandsabhängiger Eingangstotzeit τ nach Gleichung (8.2).

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{\zeta}_1(t) \\ \dot{\zeta}_2(t) \end{bmatrix} &= \mathbf{A}(\zeta_2(t)) \begin{bmatrix} \zeta_1(t) \\ \zeta_2(t) \end{bmatrix} + \mathbf{B}(\zeta_2(t))u(t - \tau(\zeta_2(t))) \\ y(t) &= \zeta_2(t) \end{aligned} \quad (8.2)$$

Dabei bezeichnet ζ_2 den Durchfluß am stromab gelegenen Ende der Haltung, ζ_1 dessen Zeita-bleitung und die Eingangsgröße u ist der Zufluß in die Haltung vom Oberlieger. Der Unterschied zum Modell (4.27a) nach LITRICO und POMET 2003 besteht in der Transformation der Totzeit vom Modellausgang an den Modelleingang. Die Voraussetzungen und Einschränkungen werden (bis auf angenommenen rechteckförmigen Kanalquerschnitt) nicht diskutiert. Es wird kein Vergleich von Simulationsergebnissen mit den SAINT-VENANT-Gleichungen angegeben.

Anhand des Modells (8.2) wird mittels exakter Linearisierung ein nichtlinearer Regler entworfen, mit dem eine Stabilisierung des Systems erreicht wird. Kernstück ist eine Prognose des Zustands $\zeta_2(t+\delta)$. Es werden Simulationsergebnisse für eine 10 km langen Kanalhaltung angegeben, wobei die Systemsimulation mittels numerischer Lösung der SAINT-VENANT-Gleichungen erfolgt. Diese zeigen, daß der Regler Sollwertfolge und Störunterdrückung gewährleistet. Für die Ermittlung der Ableitung des Abflusses ζ_1 wird ein Beobachter vorgeschlagen.

8.2.2 Nichtlinearer IMC-Regler

LITRICO und POMET 2003 beschreiben einen IMC-Reglerentwurf auf der Basis des nichtlinearen Modells nach Abschnitt 4.2.5, das aus der diffusiven Wellengleichung abgeleitet wird. Zur Berücksichtigung der Zuflüsse bzw. Entnahmen $w(t)$ gemäß Abbildung 4.3 wird die Ausgangsgleichung in (4.27a) erweitert zu

$$y(t) = \xi_2(t - \tau(\xi_2(t))) + w(t).$$

Analog zur IMC-Reglerstruktur im linearen Fall (siehe Abbildung 5.15 in Abschnitt 5.3.6) wird die Differenz aus gemessenem Ausgang und Modellausgang vom Sollwert abgezogen und auf den Regler (Filter) zurückgeführt. Es wird ein lineares Filter 1. Ordnung verwendet, so daß nur ein Parameter anzupassen ist. Der entworfene nichtlineare IMC-Regler wird simulativ mit einem linearen IMC-Regler nach LITRICO 2002 verglichen und zeigt eine deutlich verbesserte Regelgüte, was auf die im Modell berücksichtigt Abflußabhängigkeit der Totzeit zurückgeführt wird.

8.3 Stochastische Modellansätze

Mehrkriterielle stochastische Optimierung für die Hochwassersteuerung

Insbesondere bei der Lösung von Steuerungsproblemen für Staustufen(-kaskaden) im Hochwasserfall werden Modelle mit stochastischen Komponenten und entsprechende Entscheidungsalgorithmen eingesetzt. Beispielsweise betrachten KARBOWSKI und MAGIERA 2007 das Wassermanagement eines Einzelreservoirs als mehrkriterielles stochastisches Optimalsteuerungsproblem, bei dem neben dem Erwartungswert auch die Varianz des Gütekriteriums berücksichtigt wird. In der Simulationsstudie werden unterschiedliche Lösungsverfahren verglichen, die Dimension der resultierenden Optimierungsprobleme und der Rechenaufwand zu ihrer Lösung ist beträchtlich.

Lineare stochastische Optimierung für ein Reservoirsystem

SEIFI und HIPEL 2001 betrachten die Wasserbewirtschaftung eines Reservoirsystems über einen langen Planungshorizont als stochastisches Lineares Optimierungsproblem. Stochastische Komponenten sind zum einen der Zufluß in das Reservoirsystem und zum anderen der variable Bedarf an Elektrizität und Wasser. Es wird ein angepaßter Optimierungsalgorithmus für das resultierende große deterministische Optimierungsproblem entwickelt und am Beispiel des Reservoirsystems der Großen Seen (USA/Kanada) simulativ getestet.

Vergleich deterministischer und stochastischer Optimierungsstrategien für Reservoirsystem

PHILBRICK und KITANIDES 1999 untersuchen für einfache Reservoirsysteme die Unterschiede zwischen deterministischen und stochastischen Optimierungsstrategien. Bewirtschaftungsstrategien auf Basis der deterministischen Optimierung berücksichtigen genau ein (Zufluß-)Szenario für die Prognose des Systemverhaltens und sind für hochdimensionale Modelle und lange Prognosehorizonte geeignet. Bewirtschaftungsstrategien auf Basis der stochastischen Optimierung berücksichtigen den stochastischen Charakter des Zuflüsse, sind jedoch auf einfache Modelle mit wenigen (PHILBRICK und KITANIDES 1999: maximal sieben) Zustandsgrößen begrenzt. Zur Berechnung der optimalen Lösung wird ein Verfahren der stochastischen dynamischen Programmierung eingesetzt. Simulationsrechnungen über einen langen Zeithorizont mit unterschiedlichen Zuflußszenarien zeigen, daß die stochastischen Optimierungsansätze im Mittel bessere Ergebnisse (Mittelwert des Gütekriteriums) liefern. Die Unterschiede treten insbesondere dann zutage, wenn das System nahe der Kapazitätsgrenzen betrieben wird, oder nicht-quadratische Gütekriterien eingesetzt werden. Sehr groß ist auch der Einfluß der stochastischen Kenngrößen (z. B. Autokorrelation) der Zuflüsse.

9 Sonstiges

9.1 Überwachung von Regelungssystemen

Leckerkennung

WEYER und BASTIN 2008 beschreiben ein Verfahren zur Leckerkennung in Bewässerungskanälen. Der Defekt, d. h. die Differenz der gemessenen Komponenten der Volumenbilanz und der Volumenänderung einer Haltung wird aufsummiert. Aus diesem kumulativen Bilanzfehler wird mit einer einfachen Heuristik auf eine Leckage geschlossen. Diese Information kann zur Generierung entsprechender Alarmmeldungen herangezogen werden.

Online-Überwachung der Regelgüte

OOI und WEYER 2005 beschreiben einen Ansatz zur online-Überwachung der Regelgüte von PIL-Reglern (5.20). Dies ist in Systemen mit vielen Regelkreisen und beim Einsatz von automatischen Tuningverfahren von Bedeutung. „Schwergängige“ Regler werden durch die Zeitintervalle bestimmter Vorzeichenrelationen von Steuer- und Regelgröße detektiert. Der Güteindex muß auf den Regelalgorithmus abgestimmt werden, beim online-Einsatz ist eine geeignete Filterung der Daten vorzunehmen. Die Überwachung der Regelgüte wird anhand von Simulationen und ausgewählten Meßreihen demonstriert.

OOI und WEYER 2008b erweitern den Ansatz auf die Erkennung von oszillierenden lokalen Regelkreisen anhand des Zeitverlaufs der absoluten Regelabweichung. Die Parameter der heuristischen Ansätze sind so einzustellen, daß zwischen dem Einschwingverhalten aufgrund von Störungen – hier insbesondere sprungförmiger Änderungen von Entnahmen – und Schwingungen aufgrund fehlerhafter Reglereinstellungen unterschieden wird. Die Überwachung der Regelgüte wird anhand von Simulationen und ausgewählten Meßreihen demonstriert.

CHOY und WEYER 2005, CHOY und WEYER 2008 untersuchen Möglichkeiten zur Rekonfiguration von dezentralen Regelungssystemen für Bewässerungssystemen bei Sensor- oder Aktuatorausfall. Dabei wird vorausgesetzt, daß der Ausfall bekannt ist, die Ausfallerkennung selbst wird nicht betrachtet. Bei einem Ausfall der Wasserstandsmessung am Oberwasser eines Wehres wird ein Beobachter (virtueller Sensor) zur näherungsweisen Ermittlung des Wasserstands eingesetzt. Hierzu wird ein einfaches Volumenbilanzmodell (4.39) der benachbarten Haltungen in Zustandsdarstellung verwendet, wobei die Totzeit mittels PADÈ-Ansatz¹ approximiert wird. Der vom Beobachter berechnete Oberwasserstand ersetzt das ausgefallene Sensorsignal. Bei einem Aktuatorausfall (Wehrantrieb) werden die betroffenen Haltungen zusammengefaßt und

¹PADÈ-Entwicklung 1. Ordnung: $e^{-sT_t} \approx \frac{1-sT_t/2}{1+sT_t/2}$

die Wasserstandsregelung wird vom Oberlieger mit entsprechend verändertem Streckenmodell übernommen. Damit ist in gewissen Grenzen und mit Verlust an Regelgüte ein weiterer Betrieb möglich. Das ausgefallene Wehr limitiert den Durchfluß abhängig von der Lage des Wehrverschlusses. CHOY und WEYER 2008 zeigen anhand von experimentellen Daten die prinzipielle Eignung der Rekonfigurationsstrategien.

Modellbasierte Datenrekonstruktion

DELTOUR, CANIVET, SANFILIPPO u. a. 2005 nutzen eine modellbasierte Datenrekonstruktion („Reconciliation“) zur Sensorüberwachung im Leitsystem eines Bewässerungskanals. Da mit einer zeitlichen Auflösung im Stundenbereich gearbeitet wird, sind einfache (lineare) Volumenbilanzmodelle zur Systembeschreibung geeignet. Die mit dem Modell berechneten Durchflußwerte werden den Meßsignalen gegenübergestellt. Mit statistische Verfahren (u. a. χ^2 -Test) werden Mittelwerte und Streuungen ausgewertet und damit Ausreißer, Sensordrift und Sensorsignalkohärenz erkannt. Mit dem System soll die Wartung der Sensoren erleichtert und verbessert werden. Zudem konnten systematische Meßfehler einzelner Sensoren aufgedeckt werden, die z. B. auf die Einbauposition im Einstaubereich zurückzuführen waren. Die Implementierung in die Leittechnik ist in Vorbereitung.

PENG und BURAS 2000 nutzen einfache Massenbilanzen zur Rekonstruktion nicht verfügbarer Zuflußinformationen für ein aus elf Seen bestehendes Reservoirsystem in Maine, USA. Da für das Einzugsgebiet kein Niederschlags-Abfluß-Modell vorhanden ist, werden fehlende Zuflußdaten durch Meßdaten (Pegelmessung) aus einem geografisch benachbarten Einzugsgebiet unter Berücksichtigung der Flächenunterschiede der Einzugsgebiete approximiert.

10 Zusammenfassung

Der Anwendungshintergrund des Großteils der Arbeiten läßt sich entweder der Wasserbewirtschaftung von Flußstauhaltungen mit dem regionalen Schwerpunkt Mitteleuropa oder der von Bewässerungskanälen mit Schwerpunkten in Frankreich, Australien und den USA zuordnen. Für die Wasserbewirtschaftung von Flußstauhaltungen werden zumeist klassische regelungstechnische Verfahren oder modell-prädiktive Regelungsansätze eingesetzt, während für die Bewirtschaftung von Bewässerungskanälen offenbar sämtliche Ansätze der modernen Regelungstechnik zumindest simulativ getestet werden. Dies steht eventuell auch mit der Größe der wissenschaftlichen „Community“ in Zusammenhang, zudem ist die Anzahl der Projekte im Bewässerungsbereich naturgemäß deutlich größer und gegenwärtig stark ansteigend. Die Kommunikation zwischen den beiden Anwendungsgebieten mit doch ähnlichen Aufgabenstellungen und Herangehensweisen erscheint wenig ausgeprägt.

Bei allen Parallelen zwischen den Regelungsaufgaben sollte jedoch auch wesentliche Unterschiede beachtet werden:

- Die Abflußvariation in einer Flußstaukettenkette ist in der Regel deutlich größer, da hier auch der Hochwasserfall berücksichtigt werden muß. Die entscheidende Voraussetzung vieler Modellansätze – insbesondere der Vereinfachungen und Linearisierungen der SAINT-VENANT-Gleichungen – sind ein konstanter oder langsam veränderlicher Durchfluß.

Dies ist zumindest ein Grund dafür, daß lineare Modelle zum Entwurf von Regelungen für Bewässerungskanäle so häufig und offenbar erfolgreich eingesetzt werden können. Abflußvariationen kleinerer Amplitude können zudem durch einen robusten Regelungsentwurf berücksichtigt werden.

Die Modellparameter wie z. B. Zeitkonstanten und Totzeiten sind abflußabhängig und müssen entsprechend adaptiert werden. Konkrete Realisierungen einer solchen Adaption werden jedoch selten beschrieben.

- Andererseits sind die Stauhaltungen von Bewässerungskanälen oftmals durchgestaut, so daß Wellenreflexionen tendenziell einen größeren Einfluß auf die Regelgüte haben.
- Werden für eine Stauhaltungskette die Wasserstandsregler der Stauhaltungen als Eingrößenregler entworfen, so ist zudem zu beachten, daß die wesentlichen Störgrößen verschieden sind:

Die wesentliche Störgröße der Stauhaltungskette eines Flusses ist der Zufluß in die Kette. Zur Kompensation des Störeinflusses muß der Abfluß aller Stauhaltungen variiert werden, es muß ein Informationsfluß in Strömungsrichtung gewährleistet sein. Hierzu ist die u. a. in der OW/Q-Regelung eingesetzte „upstream control“-Struktur geeignet, bei der der Wasserstand jeder Haltung mit dem Abfluß als Stellgröße beeinflusst wird.

Für Bewässerungskanäle sind die wesentlichen Störgrößen die Wasserentnahmen, die zudem teilweise vorab bekannt sind. Zur Kompensation des Störeinflusses muß der Zufluß aller stromauf des Störeintritts gelegenen Haltungen und der Zufluß in die Kette variiert werden, es muß ein Informationsfluß entgegen der Strömungsrichtung gewährleistet sein. Hierzu ist eine „distant downstream control“-Struktur geeignet, bei der der Wasserstand jeder Haltung mit dem Zufluß als Stellgröße beeinflusst wird.

Die im Ergebnis entworfenen Regelungen werden zumeist an Simulationsmodellen verifiziert, seltener durch experimentelle Arbeiten an einem realen System. Sofern Implementierungen beschrieben werden, die über den experimentellen Status hinausgehen, fehlt zumeist eine detaillierte Darstellung und insbesondere Angaben zur Reglerparametrierung. Dies ist verständlich, da hier das Know-How und die kommerziellen Interessen der Betreiber oder Lieferanten betroffen sind. Es gibt weltweit nur wenige physikalische Kanalmodelle, an denen Regelalgorithmen realitätsnah experimentell untersucht werden können. Noch geringer ist die Anzahl von realen Kanalsystemen, an denen begleitend zum Regelbetrieb experimentelle Arbeiten möglich (und zulässig) sind.

Hinsichtlich der in Abschnitt 1.2 formulierten Ziele der Literaturstudie läßt sich feststellen:

1. Für eine klassische regelungstechnische Herangehensweise existieren eine Reihe von Modellansätzen die die Staustufe als LZI-Glied (z. B. I- oder I-T_t-Glied) beschreiben, siehe Abschnitt 4. Die Parameter können entweder aus einem (vorhandenen, kalibrierten) HN-Modell durch Vereinfachung der SAINT-VENANT-Gleichungen oder mittels Parameterschätzung aus Realdaten oder Simulationsergebnissen von HN-Modellen ermittelt werden. Dabei ist die erstgenannte Methode sicherlich für Kanäle mit regelmäßiger Geometrie und ortsunabhängigen Rauigkeitsparametern besser geeignet als für Flußstauhaltungen. Sollen die Modelle über einen größeren Arbeitsbereich gültig sein, sind die Parameter zu adaptieren.
2. In der recherchierten Literatur wurden nur wenige Hinweise zur Realisierung der untergeordneten Wehrsteuerung oder -regelung gefunden. Insbesondere gibt es keine Ansätze für einen kombinierten Entwurf von Wasserstands- und Wehrregelung, wenn man von der von wenigen Autoren (u. a. WEYER 2001) favorisierten Verwendung der Wehrstellung als Stellgröße im Wasserstandsregelkreis absieht. CHAPUIS 1998 beschreibt einen Fuzzy-basierten Abflußregler, siehe Abschnitt 5.4. Einen hybriden Modellansatz (MLD: mixed logic dynamical system) und einen darauf aufbauenden modell-prädiktiven Regler untersuchen u. a. FERRARI-TRECATE, MIGNONE, CASTAGNOLI u. a. 2000, siehe Abschnitt 7.2.
3. In den meisten Arbeiten zur Wasserstandsregelung wird von einer idealen Realisierung des Abflusses durch die Wehrsteuerung ausgegangen. Bei vorgegebenem Abfluß wird unter Verwendung der Wehrkennlinie die notwendige Wehrstellung ermittelt und in einer Vorwärtssteuerung realisiert. Dynamische Effekte der unterlagerten Steuerung (oder bei Messung des Abflusses und Rückführung auch Regelung) der Wehrstellung werden i. a. vernachlässigt. LITRICO, MALATERRE, BAUME u. a. 2008 untersuchen den Einfluß der Dynamik der Stauhaltung auf den realisierten Abfluß bei großen Abtastzeiten, siehe Abschnitt 4.5.
4. Eine Mehrzielregelung hinsichtlich Wasserstand und Durchfluß ist mit konventionellen Eingrößenregelungen nur ansatzweise zu realisieren. Hier wird in den meisten Fällen ein

Wasserstandsregler entworfen, der dann so eingestellt wird („detuning“), daß auf Kosten der Sollwertfolge eine gewisse Abflußvergleichmäßigung erreicht wird. Dies ist jedoch kein zielgerichteter Entwurf.

Zustandsregler und modell-prädiktive Regler gestatten dagegen schon im Ansatz die Berücksichtigung unterschiedlicher Teilkriterien. In einem Modell einer Stauhaltungskette sind i. a. die (Wehr-)Abflüsse der Staustufen die Eingangsgrößen und die (Ober-)Wasserstände der Staustufen die Ausgangsgrößen. Ein LQ-Ansatz bewertet sowohl die (quadratische) Abweichung der Ausgangs- als auch der Eingangsgrößen und kann durch geeignete Wahl der Wichtungsfaktoren den Einfluß der Teilziele variieren.

5. Hinsichtlich der Einbeziehung von Störgrößen in den Reglerentwurf ist zwischen meßbaren, beobachtbaren, vorhersagbaren und stochastischen Störungen zu unterscheiden. Meßbare Störungen können in vielen Fällen durch eine Störgrößenaufschaltung in Ein- und Mehrgrößenregelungen weitgehend kompensiert werden. Dies wird z. B. bei der OW/Q-Regelung ausgenutzt. Störgrößenbeobachter können eine solche Messung in gewissen Fällen ersetzen, Voraussetzung ist hierbei ein Störgrößenmodell. Modell-prädiktive Regelungen gestatten die explizite Berücksichtigung des prognostizierten Zeitverlaufs von Störgrößen im Optimierungsproblem zu Berechnung der optimalen Steuerung. Sind nur stochastische Kenngrößen, wie z. B. Parameter der Verteilungsfunktion der Störgröße bekannt, so können robuste Regelungen verwendet werden. Der Einsatz stochastischer Optimierungsverfahren für modell-prädiktive Regelungen ist dagegen an sehr enge Voraussetzungen geknüpft.
6. In den meisten Fällen wird als Führungsgröße ein Stauziel vorgegeben. Für das in Abschnitt 4.2.7 beschriebene inkrementelle Volumenbilanzmodell sind zahlreiche Regelungsverfahren entwickelt worden, siehe Abschnitt 6.5.2. Da das gespeicherte Wasservolumen nicht meßbar ist, muß ein Beobachter eingesetzt werden.

Der Abfluß wird nur in Kombination mit dem Wasserstand als Regelgröße verwendet. Hierbei besteht das Regelziel immer in einer Abflußvergleichmäßigung.

7. Modell-prädiktive Regelungsverfahren gestatten die Einbeziehung mehrerer (auch widersprüchlicher) Zielstellungen in das online zu lösende Optimierungsproblem. Die Schwierigkeit besteht oftmals darin, ein (verbal) formuliertes Ziel in ein mathematisches Zielfunktional und ggf. in Beschränkungen für einen endlichen Prognosehorizont umzusetzen. Dies gilt insbesondere für Ziele, die sich auf eine langfristige Bewirtschaftung des Systems beziehen. Zudem muß das einzusetzende numerische Verfahren berücksichtigt werden. Beispielsweise kann eine Priorisierung von Teilkriterien oder Beschränkungen sehr effektiv als gemischt-ganzzahlige Optimierungsaufgabe formuliert werden, die numerische Lösung ist dann jedoch deutlich (z. T. um Größenordnungen) aufwendiger als die einer einfachen linear-quadratischen Optimierungsaufgabe.
8. Für eine automatisierte Parameteroptimierung werden unterschiedliche Ansätze und Verfahren eingesetzt, siehe Abschnitt 5.3.7. Das einzusetzende numerische Optimierungsverfahren ist für eine offline-Optimierung ohne Echtzeitrestriktionen von geringerer Bedeutung. Wird die Parameteroptimierung unter Verwendung von HN-Simulationen ausgeführt, dann ist die Berechnung von Ableitungen der Zielfunktion oft nur näherungsweise mittels finiter Differenzen möglich. Dies wird oftmals durch Schaltbedingungen im

Simulator („numerisches Rauschen“) erschwert. Das ist jedoch ein Standardproblem in der numerischen Optimierung, für das eine Reihe von Lösungsansätzen existiert.

Literatur

- ACKERMANN, T. (1999). “Optimale Regelung von Fließgewässern”. Diss. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen. S.: 39, 90.
- ACKERMANN, T., D. P. LOUCKS, D. SCHWANENBERG u. a. (2000). “Real-time modeling for navigation and hydropower in the river Mosel”. In: *J. Water Resour. Plng. and Mgmt.* 126.5. S. 298–303. S.: 90, 91.
- ACKERMANN, T., D. SCHWANENBERG, M. NATSCHKE u. a. (1997). “Control strategy for river-power-plants based on optimization”. In: *Operational Water Management*. Hg. von J. C. REFSGAARD und E. A. KARALIS. Rotterdam: A. A. Balkema. S. 285–288. S.: 90.
- AKOUZ, K., A. BENHAMMOU, P.-O. MALATERRE u. a. (1998). “Predictive control applied to ASCE Canal 2”. In: *IEEE Int. Conference on Systems, Man & Cybernetics (SMC'98)*. San Diego, California. S. 3920–3924. URL: <http://canari.montpellier.cemagref.fr/publi.htm>. S.: 95.
- AKOUZ, K., A. BENHAMMOU, P.-O. MALATERRE u. a. (1999). “Predictive control of a portion of ASCE Canal 2”. In: *European Control Conference ECC'99*. Karlsruhe, Germany. S.: 95.
- ALLMER, H. P. (1999). “Combined discharge control of the hydropower plants on the Austrian Danube”. In: *European Control Conference ECC'99*. Karlsruhe, Germany. S.: 73.
- ALLMER, H.-P., M. PFISTERER, A. SMOLAK u. a. (2000). “Aufgaben und Konzeption der Einsatzleitstelle Donau”. In: *45. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium*. Technische Universität Ilmenau. S.: 13, 73.
- ARNOLD, E. und H. LINKE (1999). *Automatische Abfluß- und Stauzielregelung der Unteren Mosel*. Techn. Ber. Fraunhofer Anwendungszentrum Systemtechnik Ilmenau. S.: 18.
- (2001). *Automatische Abfluß- und Stauzielregelung der Unteren Mosel: Abschlußbericht*. Techn. Ber. Ilmenau: Fraunhofer Anwendungszentrum Systemtechnik. S.: 18.
- (2002). “Nonlinear model-predictive control of water level and flow for waterways”. In: *SIAM 50th Anniversary and 2002 Annual Meeting*. Philadelphia. S.: 18.
- (2004). *Optimierung der Bewirtschaftung eines Kanalsystems: Betriebszentrale Minden*. BAW-Kolloquium „Automatisierte Wasser- und Energiebewirtschaftung in staugeregelten Flüssen“. S.: 18.
- ARNOLD, E., H. LINKE und W. SIEBERT (1999). “Ein modell-prädiktives Regelungsverfahren zur optimierten Wasserbewirtschaftung des Mittellandkanals und des Elbe-Seitenkanals”. In: *at - Automatisierungstechnik* 47.9. S. 399–407. S.: 18.
- BARJAS BLANCO, T., P. WILLEMS, B. DE MOOR u. a. (2008). “Flooding prevention of the Demer river using model predictive control”. In: *17th IFAC World Congress*. Seoul, Korea. S. 3629–3634. S.: 96.
- BASTIN, G., J.-M. CORON, B. D'ANDRÉA NOVEL u. a. (2005). “Boundary control for exact cancellation of boundary disturbances in hyperbolic systems of conservation laws”. In: *44th*

- IEEE Conf. on Decision and Control, and the European Control Conference ECC'05*. Seville. S. 1086–1089. S.: **103**.
- BAUME, J.-P., P.-O. MALATERRE, G. BELAUD u. a. (2005). “SIC: a 1D hydrodynamic model for river and irrigation canal modeling and regulation”. In: *Métodos Numéricos em Recursos Hídricos 7*. Hg. von R. C. VIEIRA DA SILVA. Associação Brasileira de Recursos Hídricos. S. 1–81. URL: <http://canari.montpellier.cemagref.fr/publi.htm>. S.: **28, 29**.
- BAUME, J.-P., P.-O. MALATERRE und J. SAU (1999). “Tuning of PI controllers for an irrigation canal using optimization tools”. In: *Workshop on Modernization of Irrigation Water Delivery Systems*. Phoenix, Arizona. S. 483–500. URL: <http://canari.montpellier.cemagref.fr/publi.htm>. S.: **71**.
- BAUME, J.-P., J. SAU und P.-O. MALATERRE (1998). “Modeling of irrigation channel dynamics for controller design”. In: *IEEE Int. Conference on Systems, Man & Cybernetics (SMC'98)*. San Diego, California. S. 3856–3861. URL: <http://canari.montpellier.cemagref.fr/publi.htm>. S.: **30, 33**.
- BELAUD, G., X. LITRICO, B. DE GRAAFF u. a. (2008). “Hydraulic modeling of an automatic upstream water level control gate for submerged flow conditions”. In: *J. Irrig. and Drain. Engrg.* 134.3. S. 315–326. URL: <http://xlitrico.free.fr/publications.htm>. S.: **45**.
- BENAYACHE, Z., G. BESANÇON und D. GEORGES (2008). “A new nonlinear control methodology for irrigation canals based on a delayed input model”. In: *17th IFAC World Congress*. Seoul, Korea. S. 2544–2549. S.: **38, 104**.
- BOLEA, Y., J. BLESÁ und V. PUIG (2007). “LPV modelling and identification of an open canal for control”. In: *European Control Conference ECC'07*. Kos, Greece. S.: **41**.
- BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU (1999). *INSTA: Dokumentation*. Karlsruhe. S.: **29**.
- (2002). *Abfluß- und Stauzielregelung Mosel: Gutachten über die Abfluß- und Stauzielregelung der Stauhaltung Detzem*. BAW-Nr. 3.01.06424.01. S.: **19**.
- (2004). *Tätigkeitsbericht der Bundesanstalt für Wasserbau*. URL: http://www.baw.de/vip/publikationen/Taetigkeitsberichte/Taetigkeitsbericht_2004. S.: **6**.
- (2006). *Anfrage zu einer Literaturstudie über die Parametrisierung von Reglern der automatisierten Abfluss- und Stauzielregelung (ASR)*. S.: **6, 9, 10, 46**.
- BURT, C. M., R. S. MILLS, R. D. KHALSA u. a. (1998). “Improved proportional-integral (PI) logic for canal automation”. In: *J. Irrig. and Drain. Engrg.* 124.1. S. 53–57. S.: **57**.
- CANTONI, M., E. WEYER, Y. LI u. a. (2007). “Control of Large-Scale Irrigation Networks”. In: *Proceedings of the IEEE* 95.1. S. 75–91. S.: **14, 26, 56, 63**.
- CHAPUIS, J. (1998). “Modellierung und neues Konzept für die Regelung von Laufwasserkraftwerken”. Diss. ETH Zürich. URL: <http://control.ee.ethz.ch/index.cgi?page=publications&action=details&id=1738>. S.: **13, 29, 33, 40, 73, 74, 89, 92, 98, 109**.
- CHAPUIS, J. und R. SACHS (1996). “Modelling of rivers for level control”. In: *MATHMOD - IMACS Symposium on Mathematical Modelling*. Vienna, Austria. S. 377–382. URL: <http://control.ee.ethz.ch/index.cgi?page=publications&action=details&id=1095>. S.: **27, 33, 40**.
- CHOY, S. und E. WEYER (2005). “Reconfiguration schemes to mitigate faults in automated irrigation channels”. In: *44th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference ECC'05*. Seville, Spain. S.: **106**.
- (2008). “Reconfiguration schemes to mitigate faults in automated irrigation channels”. In: *Control Engineering Practice* 16. S. 1184–1194. S.: **106, 107**.

- CLEMMENS, A. J., E. BAUTISTA, B. T. WAHLIN u. a. (2005). “Simulation of automatic canal control systems”. In: *J. Irrig. and Drain. Engrg.* 131.4. S. 324–335. S.: 29.
- CLEMMENS, A. J., T. F. KACERЕК, B. GRAWITZ u. a. (1998). “Test cases for canal control algorithms”. In: *J. Irrig. and Drain. Engrg.* 124.1. S. 23–30. S.: 15, 35, 57, 65, 84, 96–98.
- CLEMMENS, A. J. und J. SCHUURMANS (2004). “Simple optimal downstream feedback canal controllers: theory”. In: *J. Irrig. and Drain. Engrg.* 130.1. S. 26–34. S.: 83.
- CLEMMENS, A. J. und B. T. WAHLIN (2004). “Simple optimal downstream feedback canal controllers: ASCE test case results”. In: *J. Irrig. and Drain. Engrg.* 130.1. S. 35–46. S.: 83, 84.
- CORON, J.-M., B. D’ANDRÉA-NOVEL und G. BASTIN (1999). “A Lyapunov approach to control irrigation canals modeled by Saint-Venant equations”. In: *European Control Conference ECC’99*. Karlsruhe. S.: 102.
- (2007). “A strict Lyapunov function for boundary control of hyperbolic systems of conservation laws”. In: *IEEE Trans. Automat. Control* 52.1. S. 2–11. S.: 102.
- CUNO, B. (1997). “Anforderungen des automatischen Betriebs an die Modellierung gestauter Flußsysteme”. In: *42. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium*. Bd. 3. Technische Universität Ilmenau. S. 435–440. S.: 13.
- (1998). “Basics and control structures in the automation of hydropower and irrigation chains”. In: *Coordinated operation of a cascade of hydropower plants*. Institute for Water Resources Management, Hydraulic und Rural Engineering, University of Karlsruhe. S.: 13.
- DELTOUR, J.-L., E. CANIVET, F. SANFILIPPO u. a. (2005). “Data reconciliation on the complex hydraulic system of Canal de Provence”. In: *J. Irrig. and Drain. Engrg.* 131. S. 291–297. S.: 107.
- DELTOUR, J.-L. und F. SANFILIPPO (1998). “Introduction of Smith predictor into dynamic regulation”. In: *J. Irrig. and Drain. Engrg.* 124.1. S. 47–52. S.: 68.
- DETERING, M. (2003). “Modellgestützte Regelung von Stauhaltungssystemen und Laufwasserkraftanlagen”. Diss. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen. S.: 91.
- EURÉN, K. und E. WEYER (2005). “System identification of open water channels with undershot and overshot gates”. In: *16th IFAC World Congress*. Prague. S.: 43.
- (2007). “System identification of open water channels with undershot and overshot gates”. In: *Control Engineering Practice* 15.7. S. 813–824. S.: 43.
- FERRARI-TRECATE, G., D. MIGNONE, D. CASTAGNOLI u. a. (2000). *Hybrid modeling and control of a hydroelectric power plant*. Techn. Ber. AUT00-11. Institut für Automatik, ETH Zürich. S.: 89, 109.
- GARCIA, A., M. HUBBARD und J. J. DE VRIES (1992). “Open channel transient flow control by discrete time LQR methods”. In: *Automatica J. IFAC* 28.2. S. 255–264. S.: 78.
- GEERING, H. P. und E. SHAFAI (2004). *Regelungstechnik II*. Vorlesungsmanuskript, Institut für Mess- und Regeltechnik, ETH Zürich. S.: 66.
- GLANZMANN, G. und M. VON SIEBENTHAL (2004). *Supervisory water level control for cascaded river power plants*. Techn. Ber. AUT04-11. Zurich: Automatic Control Laboratory, Swiss Federal Institute of Technology (ETH). URL: <http://control.ee.ethz.ch/index.cgi?page=publications;action=details;id=2248>. S.: 40, 92.
- GLANZMANN, G., M. VON SIEBENTHAL, T. GEYER u. a. (2004). *Supervisory water level and flow control control system for distributed water flow structures*. Patent. US patent ap-

- publication number: 60/605,342. URL: <http://control.ee.ethz.ch/index.cgi?page=publications&action=details&id=1887>. S.: 92.
- GÓMEZ, M., J. RODELLAR, F. VEA u. a. (1998). “Decentralized predictive control of multi-reach canals”. In: *IEEE Int. Conference on Systems, Man & Cybernetics (SMC'98)*. San Diego, California. S. 3885–3890. URL: <http://www.canari.free.fr/smc98/smc98.htm>. S.: 94.
- GUENOVA WELZ, I., X. LITRICO, V. FROMION u. a. (2005). “Stability and performance analysis of classical decentralized control of irrigation canals”. In: *16th IFAC World Congress*. Prague. S.: 57.
- GULLHAMN, E. (2004). “Control of water content and retention in hydropower plant cascades”. Diplomarb. Stockholm: The Royal Institute of Technology. S.: 65.
- HALLEUX, J. DE und G. BASTIN (2002). “Stabilization of St Venant equations using Riemann invariants: application to waterways with mobile spillways”. In: *15th Triennial World Congress*. IFAC. Barcelona, Spain. S.: 102.
- HALLEUX, J. DE, C. PRIEUR, J.-M. CORON u. a. (2003). “Boundary feedback control in networks of open channels”. In: *Automatica J. IFAC* 39.8. S. 1365–1376. S.: 102.
- HUG-GLANZMANN, G., M. VON SIEBENTHAL, T. GEYER u. a. (2005). “Supervisory water level control for cascaded river power plants”. In: *Hydropower Conference 05*. Stavanger, Norway. S.: 40, 92.
- KARBOWSKI, A. und P. MAGIERA (2007). “Optimal control of a water reservoir with expected value-variance criteria”. In: *Optimal Control Appl. Methods* 28.1. S. 3–20. S.: 105.
- KÜHNE, A. (1975). *Flussstauregulierung. Grundsätzliche Betrachtungen mit systemtheoretischen Methoden*. Mitteilung Nr. 13 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der ETH Zürich. S.: 9, 41, 46, 50, 51, 54.
- KRÖNER, D. (1997). *Numerical Schemes for Conservation Laws*. Chichester: John Wiley & Sons. S.: 18.
- LEVEQUE, R. J. (1992). *Numerical methods for conservation laws*. Birkhäuser Verlag. S.: 18.
- LI, L. (2008). “Decentralized boundary control of irrigation canal networks via a strict Lyapunov method”. In: *17th IFAC World Congress*. Seoul, Korea. S. 9970–9975. S.: 103.
- LINKE, H. (2005). “Wasserbewirtschaftung von Binnenschiffahrtsgewässern auf Basis einer modellgestützten Vorhersage des Systemverhaltens”. Diss. Technische Universität Ilmenau. S.: 18, 21, 22, 24.
- LINKE, H. und E. ARNOLD (2000). “Model predictive control of a cascade of river reservoirs”. In: *45th International Scientific Colloquium*. Technische Universität Ilmenau. S. 296–301. S.: 18.
- (2001). *Untersuchung zur Koordination des Kraftwerks- und Wehrbetriebs in einem modellprädiktiven Regelungskonzept: Abschlußbericht*. Techn. Ber. Technische Universität Ilmenau. S.: 18.
- (2002). “Model based control of river reservoirs”. In: *15th IFAC World Congress*. Barcelona. S.: 18.
- LITRICO, X. (2002). “Robust IMC flow control of SIMO dam-river open-channel systems”. In: *IEEE Trans. Control Systems Technology* 10.3. S. 432–437. URL: <http://xlitrico.free.fr/publications.htm>. S.: 104.

- LITRICO, X., G. BELAUD und V. FROMION (2007). “Stability analysis of automatic water level control gates in open-channels”. In: *46th IEEE Conference on Decision and Control*. New Orleans. S. 1591–1596. URL: <http://xlitrico.free.fr/publications.htm>. S.: 45.
- LITRICO, X. und V. FROMION (2002a). “Infinite dimensional modeling of open-channel hydraulic systems for control purposes”. In: *41th IEEE Conf. on Decision and Control*. Las Vegas, Nevada. S. 1681–1686. URL: <http://xlitrico.free.fr/publications.htm>. S.: 30–33, 36, 64.
- (2004a). “Analytical approximation of open-channel flow for controller design”. In: *Applied Mathematical Modelling* 28.7. S. 677–695. URL: <http://xlitrico.free.fr/publications.htm>. S.: 32, 35, 36.
- (2004b). “Frequency modeling of open-channel flow”. In: *J. Hydr. Engrg.* 130.8. S. 806–815. URL: <http://xlitrico.free.fr/#publications>. S.: 32, 36.
- (2004c). “Simplified modeling of irrigation canals for controller design”. In: *J. Irrig. and Drain. Engrg.* 130.5. S. 373–383. URL: <http://xlitrico.free.fr/publications.htm>. S.: 31, 35, 36.
- (2006a). “Boundary control of hyperbolic conservation laws using a frequency domain approach”. In: *Proc. of the 45th IEEE Conference on Decision & Control*. San Diego. S. 5341–5346. URL: <http://xlitrico.free.fr/publications.htm>. S.: 103.
- (2006d). “Tuning of robust distant downstream PI controllers for an irrigation canal pool: (I) Theory”. In: *J. Irrig. and Drain. Engrg.* 132.4. S. 359–368. URL: <http://xlitrico.free.fr/#publications>. S.: 65.
- LITRICO, X., V. FROMION, J.-P. BAUME u. a. (2005). “Experimental validation of a methodology to control irrigation canals based on Saint-Venant equations”. In: *Control Engineering Practice* 13.11. S. 1425–1437. URL: <http://xlitrico.free.fr/publications.htm>. S.: 64.
- LITRICO, X., V. FROMION und J.-P. BAUME (2006). “Tuning of robust distant downstream PI controllers for an irrigation canal pool: (II) Implementation issues”. In: *J. Irrig. and Drain. Engrg.* 132.4. S. 369–379. URL: <http://xlitrico.free.fr/#publications>. S.: 65.
- LITRICO, X. und D. GEORGES (1997b). “Nonlinear identification of an irrigation system with withdrawals”. In: *Int. Workshop on the Regulation of Irrigation Canals, RIC’97*. Marrakech, Marocco. S. 58–67. URL: <http://xlitrico.free.fr/#publications>. S.: 44.
- (1997a). “Nonlinear identification of an irrigation system”. In: *36th IEEE Conf. on Decision & Control CDC’97*. San Diego, CA, USA. S. 852–857. S.: 44.
- (1999a). “Robust continuous-time and discrete-time flow control of a dam-river system. (I) Modelling”. In: *Applied Mathematical Modelling* 23. S. 809–827. URL: <http://xlitrico.free.fr/#publications>. S.: 37, 38.
- (1999b). “Robust continuous-time and discrete-time flow control of a dam-river system. (II) Controller design”. In: *Applied Mathematical Modelling* 23. S. 829–846. URL: <http://xlitrico.free.fr/#publications>. S.: 68.
- LITRICO, X., D. GEORGES und J.-L. TROUVAT (1998). “Modelling and robust control of a dam-river system”. In: *Int. Conference on Systems, Man & Cybernetics (SMC’98)*. San Diego, USA. S. 3862–3867. URL: <http://xlitrico.free.fr/#publications>. S.: 68.
- LITRICO, X., P.-O. MALATERRE, J.-P. BAUME u. a. (2007). “Automatic tuning of PI controllers for an irrigation canal pool”. In: *J. Irrig. and Drain. Engrg.* 133.1. S. 27–37. URL: <http://xlitrico.free.fr/#publications>. S.: 41, 62.

- LITRICO, X., P.-O. MALATERRE, J.-P. BAUME u. a. (2008). “Conversion from discharge to gate opening for the control of irrigation canals”. In: *J. Irrig. and Drain. Engrg.* 134.3. S. 305–314. URL: <http://xlitrico.free.fr/publications.htm>. S.: 45, 109.
- LITRICO, X. und J. B. POMET (2003). “Nonlinear modelling and control of a long river stretch”. In: *European Control Conference ECC'03*. Cambridge, GB. URL: <http://xlitrico.free.fr/publications.htm>. S.: 37, 38, 104.
- LIU, F., J. FEYEN, P.-O. MALATERRE u. a. (1998). “Development and evaluation of canal automation algorithm CLIS”. In: *J. Irrig. and Drain. Engrg.* 124. S. 40–46. URL: <http://canari.montpellier.cemagref.fr/publi.htm>. S.: 58.
- LUNZE, J. (2006). *Regelungstechnik 1*. 5. Aufl. Berlin: Springer. S.: 59–61, 67, 69.
- MALATERRE, P. O. (1998). “PILOTE: linear quadratic optimal controller for irrigation canals”. In: *J. Irrig. and Drain. Engrg.* 124.4. S. 187–194. S.: 79, 80.
- MALATERRE, P.-O. und J.-P. BAUME (1998). “Modeling and regulation of irrigation canals: existing applications and on-going researches”. In: *IEEE Int. Conference on Systems, Man & Cybernetics (SMC'98)*. San Diego, California. S. 3850–3855. URL: <http://canari.montpellier.cemagref.fr/publi.htm>. S.: 14.
- MALATERRE, P.-O., D. C. ROGERS und J. SCHUURMANS (1998). “Classification of canal control algorithms”. In: *J. Irrig. and Drain. Engrg.* 124. S. 3–10. URL: <http://canari.montpellier.cemagref.fr/publi.htm>. S.: 14, 55.
- MANTECÓN, J. A., M. GÓMEZ und J. RODELLAR (2002). “A Simulink-based scheme for simulation of irrigation canal control systems”. In: *Simulation* 78.8. S. 485–493. S.: 94, 95.
- MAREELS, I., E. WEYER, S. K. OOI u. a. (2005). “Systems engineering for irrigation systems: successes and challenges”. In: *16th IFAC World Congress*. Prague. S.: 63, 82.
- MARENBACH, P., K. D. BETTENHAUSEN und B. CUNO (1995). “Selbstorganisierende Generierung strukturierter Prozeßmodelle”. In: *at – Automatisierungstechnik* 43.6. S. 277–288. S.: 42.
- MIGNONE, D. (2002). “Control and estimation of hybrid systems with mathematical optimization”. Diss. ETH Zürich. URL: <http://e-collection.ethbib.ethz.ch/ecol-pool/diss/abstracts/p14520.pdf>. S.: 89.
- NESTMANN, F. und S. THEOBALD (1994). “Numerisches Modell zur Steuerung und Regelung einer Staustufenkette am Beispiel von Rhein und Neckar”. In: *Wasserwirtschaft* 84.2. S. 72–78. S.: 13, 48.
- NEUMÜLLER, M. und W. BERNHAUER (1969). “Stauregelung und Abflußregelung an Laufwasserkraftwerken”. In: *Die Wasserwirtschaft* 10. S. 297–303. S.: 41, 46.
- NOLDE, K., M. UHR und M. MORARI (2008). “Medium term scheduling of a hydro-thermal system using stochastic model predictive control”. In: *Automatica J. IFAC* 44.6. S. 1585–1594. S.: 100.
- OOI, S. K., M. P. M. KRUTZEN und E. WEYER (2005). “On physical and data driven modelling of irrigation channels”. In: *Control Engineering Practice* 13.4. S. 461–471. S.: 29, 43.
- OOI, S. K. und E. WEYER (2003). “Control design for an irrigation channel from physical data”. In: *European Control Conference ECC'03*. S.: 44, 63.
- (2005). “Detection of sluggish control loops in irrigation channels”. In: *Proc. of the 16th IFAC World Congress*. Prague. S.: 106.
- (2007). “Control design for an irrigation channel from physical data”. In: *16th IEEE International Conference on Control Applications*. Singapore. S.: 14, 15, 63.

- OOI, S. K. und E. WEYER (2008a). “Control design for an irrigation channel from physical data”. In: *Control Engineering Practice* 16. S. 1132–1150. S.: 63.
- (2008b). “Detection of oscillatory control loops in irrigation channels”. In: *17th IFAC World Congress*. Seoul, Korea. S. 5500–5505. S.: 106.
- OSHER, S. (1984). “Riemann solvers, the entropy condition, and difference approximations”. In: *SIAM J. Numer. Anal.* 21. S. 217–235. S.: 18.
- OVERLOOP, P. J. VAN, J. SCHUURMANS, R. BROUWER u. a. (2005). “Multiple-model optimization of proportional integral controllers on canals”. In: *J. Irrig. and Drain. Engrg.* 131.2. S. 190–196. S.: 41, 72.
- OVERLOOP, P. J. VAN, W. SCHUURMANS und R. BROUWER (2003). “Model predictive control of canal systems in The Netherlands”. In: *Proceedings USCID Second International Conference on Irrigation and Drainage*. Phoenix, Arizona, USA. S.: 16, 99.
- OVERLOOP, P.-J. VAN, S. WEIJS und S. DIJKSTRA (2008). “Multiple model predictive control on a drainage canal system”. In: *Control Engineering Practice* 16.5. S. 531–540. S.: 99.
- PAGÈS, J. C., J. M. COMPAS und J. SAU (1998). “MIMO predictive control with constraints by using embedded model-based systems”. In: *IEEE Int. Conference on Systems, Man & Cybernetics (SMC'98)*. San Diego, California. S. 3902–3907. URL: <http://www.canari.free.fr/smc98/smc98.htm>. S.: 96.
- PAPAGEORGIOU, M. und A. MESSMER (1989). “Flow control of a long river stretch”. In: *Automatica J. IFAC* 25.2. S. 177–183. S.: 67, 68.
- PENG, C. und N. BURAS (2000). “Practical estimation of inflows into multireservoir system”. In: *J. Water Resour. Plng. and Mgmt.* 126.5. S. 331–334. S.: 107.
- PHILBRICK, C. R. und P. K. KITANIDES (1999). “Limitations of deterministic optimization applied to reservoir operations”. In: *J. Water Resour. Plng. and Mgmt.* 125.3. S. 135–142. S.: 105.
- PRIEUR, C., J. WINKIN und G. BASTIN (2005). “Boundary control of non-homogeneous systems of two conservation laws”. In: *44th IEEE Conf. on Decision and Control and European Control Conference 2005*. Seville. S. 1899–1904. S.: 103.
- RAUSCHENBACH, T. (1998). “Eine allgemeingültige Methode zur Modellierung und optimalen mehrkriteriellen Steuerung von Staustufen und Staustufenkaskaden”. Diss. Technische Universität Ilmenau. S.: 73.
- (2005). “Optimal co-ordinated control of hydropower plants”. In: *16th IFAC World Congress*. Prague. S.: 73.
- RAUSCHENBACH, T. und J. WERNSTEDT (1999). “ILM-RIVER - a general design tool for simulation and control of rivers and hydropower plants”. In: *European Control Conference ECC'99*. Karlsruhe, Germany. S.: 73.
- (2006). “Kybernetische Methoden für die optimale nachhaltige Führung komplexer wasserwirtschaftlicher Systeme”. In: *at - Automatisierungstechnik* 54.11. S. 556–565. S.: 73.
- ROE, P. L. (1981). “Approximate Riemann solvers, parameter vectors, and difference schemes”. In: *J. Comput. Phys.* 43. S. 357–372. S.: 18.
- ROGERS, D. C. und J. GOUSSARD (1998). “Canal control algorithms currently in use”. In: *J. Irrig. and Drain. Engrg.* 124.1. S. 11–15. S.: 15.
- RUIZ C., V. M. und J. RAMIREZ L. (1998). “Predictive control in irrigation canal operation”. In: *IEEE Int. Conference on Systems, Man & Cybernetics (SMC'98)*. San Diego, California. S. 3897–3901. URL: <http://www.canari.free.fr/smc98/smc98.htm>. S.: 95.

- RUIZ-CARMONA, V. M., A. J. CLEMMENS und J. SCHUURMANS (1998). “Canal control algorithm formulations”. In: *J. Irrig. and Drain. Engrg.* 124.1. S. 31–39. S.: 15.
- SACHS, R., G. GLANZMANN und M. VON SIEBENTHAL (2005). “Automatische Stauziel- und Durchflussregulierung einer Flussstaukette”. In: *Bulletin SEV/AES* 96. S. 8–12. URL: <http://www.electrosuisse.ch/display.cfm?id=114127>. S.: 40, 92.
- SANFILIPPO, F. und J. L. DELTOUR (1998). “Comparison between monovaryable controller and multivariable controller”. In: *IEEE Int. Conference on Systems, Man & Cybernetics (SMC'98)*. San Diego, California. S. 3914–3919. URL: <http://www.canari.free.fr/smc98/smc98.htm>. S.: 68, 82.
- SAWADOGO, S., R. M. FAYE, A. BENHAMMOU u. a. (2000). “Decentralized adaptive predictive control of multi-reach irrigation canal”. In: *IEEE Int. Conference on Systems, Man & Cybernetics (IEEE-SMC2000)*. Nashville, Tennessee. S. 3437–3442. URL: <http://www.canari.free.fr/smc98/smc98.htm>. S.: 95.
- SAWADOGO, S., R. M. FAYE, P. O. MALATERRE u. a. (1998). “Decentralized predictive controller for delivery canals”. In: *IEEE Int. Conference on Systems, Man & Cybernetics (SMC'98)*. San Diego, California. S. 3880–3884. URL: <http://www.canari.free.fr/smc98/smc98.htm>. S.: 95.
- SCHUURMANS, J., O. H. BOSGRA und R. BROUWER (1995). “Open-channel flow model approximation for controller design”. In: *Applied Mathematical Modelling* 19.9. S. 525–530. S.: 30, 34, 35, 51.
- SCHUURMANS, J., A. J. CLEMMENS, S. DIJKSTRA u. a. (1999). “Modeling of irrigation and drainage canals for controller design”. In: *J. Irrig. and Drain. Engrg.* 125.6. S. 338–344. S.: 34, 35.
- SCHUURMANS, J., A. HOF, S. DIJKSTRA u. a. (1999). “Simple water level controller for irrigation and drainage canals”. In: *J. Irrig. and Drain. Engrg.* 125.4. S. 189–195. S.: 34, 64.
- SEATZU, C. (1999a). “Decentralized control of open-channel hydraulic systems”. Diss. Italy: Università di Cagliari. S.: 39, 84.
- (1999b). “Design and robustness analysis of decentralized constant volume-control for open-channels”. In: *Applied Mathematical Modelling* 23.6. S. 479–500. S.: 84.
- (1999c). “Robust PI decentralized control law for open-channel hydraulic systems”. In: *European Control Conference ECC'99*. S.: 39, 84.
- (2000). “Decentralized controllers design for open-channel hydraulic systems via eigenstructure assignment”. In: *Applied Mathematical Modelling* 24.12. S. 915–930. S.: 84.
- SEATZU, C., A. GIUA und G. USAI (1998). “Decentralized volume control of open-channels using H_2 norm minimization”. In: *IEEE Int. Conference on Systems, Man & Cybernetics (SMC'98)*. San Diego, California. S. 3891–3896. URL: <http://www.canari.free.fr/smc98/smc98.htm>. S.: 84.
- SEATZU, C. und G. USAI (2002). “A decentralized volume variations observer for open channels”. In: *Applied Mathematical Modelling* 26.10. S. 975–1001. S.: 84.
- SEIFI, A. und K. W. HIPEL (2001). “Interior point method for reservoir operation with stochastic inflows”. In: *J. Water Resour. Plng. and Mgmt.* 127.1. S. 48–57. S.: 105.
- SETZ, C., A. HEINRICH, P. ROSTALSKI u. a. (2008). “Application of model predictive control to a cascade of river power plants”. In: *17th IFAC World Congress*. Seoul, Korea. S. 11978–11983. S.: 93, 94.

- SHIRLEY, P. O., J. M. LEMOS, N. F. NOGUEIRA u. a. (2007). “Model analysis and control of a four segment irrigation canal”. In: *Proc. of the 15th Mediterranean Conference on Control & Automation*. Athens. S.: 85.
- SIEBERT, W. und H.-H. WITTE (2000). “Regelung und Wasserbewirtschaftung der Mosel”. In: 45. *Internationales Wissenschaftliches Kolloquium*. Technische Universität Ilmenau. S.: 19.
- SILVA, P., M. A. BOTTO, J. M. FIGUEIREDO u. a. (2007). “Model predictive control of an experimental water canal”. In: *European Control Conference ECC'07*. Kos, Greece. S.: 96.
- SREEJA, P. und K. GUPTA (2008). “Transfer function formulation of Saint-Venant’s equations for modeling drainage channel flow: an experimental evaluation”. In: *Water Resources Management* 22. S. 1881–1898. S.: 34.
- STEFFEN, T. (1999). “Regelungskonzepte für Staustufenketten”. Diplomarb. Technische Universität Ilmenau. S.: 72.
- THAI, T. H. (2005). “Numerical methods for parameter estimation and optimal control of the Red River network”. Diss. Universität Heidelberg. URL: <http://www.ub.uni-heidelberg.de/archiv/5662>. S.: 29, 97.
- THEOBALD, S. (1997). “Die numerische Simulation als Entwurfswerkzeug bei der Optimierung der Wasserbewirtschaftung an Stauhaltungen mit Pumpspeicherbetrieb”. In: 42. *Internationales Wissenschaftliches Kolloquium*. Bd. 3. Technische Universität Ilmenau. S. 462–467. S.: 13, 47.
- (1998a). “Numerical simulation of automated operation of hydropower plants”. In: *Coordinated operation of a cascade of hydropower plants*. Institute for Water Resources Management, Hydraulic und Rural Engineering, University of Karlsruhe. S.: 13.
- (1998b). “Numerische Simulation von Staustufenketten mit automatisiertem Betrieb”. Diss. Universität Karlsruhe. S.: 9, 13, 46–49, 70, 71.
- (2006). *Automatisierter Betrieb von Staustufen*. DWA-Themen. S.: 13, 27.
- THEOBALD, S., A. CELAN und F. NESTMANN (2002). “Optimization of river system operation for multi-purpose objectives”. In: *Hydro Vision*. Portland, Oregon. S.: 29, 70, 71.
- TODINI, E. (2007). “A mass conservative and water storage consistent variable parameter Muskingum-Cunge approach”. In: *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 4. S. 1549–1592. URL: <http://www.hydrol-earth-syst-sci-discuss.net/4/1549/2007/>. S.: 38, 39.
- WAHLIN, B. T. (2004). “Performance of model predictive control on ASCE test canal 1”. In: *J. Irrig. and Drain. Engrg.* 130.3. S. 227–238. S.: 97.
- WAHLIN, B. T. und A. J. CLEMMENS (2002). “Performance of historic downstream canal control algorithms on ASCE test canal 1”. In: *J. Irrig. and Drain. Engrg.* 128.6. S. 365–375. S.: 57.
- (2006a). “Automatic downstream water-level feedback control of branching canal networks: Simulation results”. In: *J. Irrig. and Drain. Engrg.* 132.3. S. 208–219. URL: <http://xlitrico.free.fr/#publications>. S.: 84, 98.
- (2006b). “Automatic downstream water-level feedback control of branching canal networks: Theory”. In: *J. Irrig. and Drain. Engrg.* 132.3. S. 198–207. URL: <http://xlitrico.free.fr/#publications>. S.: 84, 98.
- WEIYAN, T. (1992). *Shallow water hydrodynamics*. Elsevier Oceanography Series. Elsevier. S.: 18.
- WEYER, E. (2001). “System identification of an open water channel”. In: *Control Engineering Practice* 9.12. S. 1289–1299. URL: <http://www.ee.unimelb.edu.au/staff/ewey/cv.html#Publications>. S.: 43, 109.

-
- (2002). “Decentralised PI control of an open water channel”. In: *15th Triennial World Congress*. IFAC. Barcelona, Spain. S.: 43, 63.
 - (2003). “LQ control of an irrigation channel”. In: *Proc. 42nd IEEE Conf. on Decision and Control*. Bd. 1. Maui, Hawaii. S. 750–755. S.: 43, 80.
 - (2006). “Multivariable LQ control of an irrigation channel: experimental results and robustness analysis”. In: *45th IEEE Conf. on Decision and Control*. San Diego, CA. S.: 43, 80, 82.
 - (2008). “Control of irrigation channels”. In: *IEEE Trans. Control Systems Technology* 16.4. S. 664–675. S.: 80, 82.
- WEYER, E. und G. BASTIN (2008). “Leak detection in open water channels”. In: *17th IFAC World Congress*. Seoul, Korea. S. 7913–7918. S.: 106.
- WSD SÜDWEST (1997). *Abfluß- und Stauzielregelung Mosel, VV-WSD Südwest 22-5: Verwaltungsvorschrift der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Südwest*. S.: 18, 20, 21.
- (1998). *Pflichtenheft: Erneuerung der elektro-, regel- und maschinentechnischen Anlagen des Wehres Detzem, Version 3.0*. S.: 18.
- ZACCARIAN, L., Y. LI, E. WEYER u. a. (2004). “Anti-windup for marginally stable plants applied to open water channels”. In: *5th Asian Control Conference*. Melbourne, Australia. S.: 66.
- (2007). “Anti-windup for marginally stable plants and its application to open water channel control systems”. In: *Control Engineering Practice* 15. S. 261–272. S.: 66.

Weitere Literatur

In diesem Abschnitt werden weitere Arbeiten aufgeführt, die im Rahmen der Literaturrecherche jedoch nicht im Detail ausgewertet wurden.

- BOLEA, Y., V. PUIG, J. BLESÁ u. a. (2005). “LPV vs multi-model PI(D) gain-scheduling applied to canal control”. In: *16th IFAC World Congress*. Prague.
- CASTILLO GARCIA, F., R. RIVAS PEREZ und V. FELIU BATLLE (2008). “Fractional II^α controller combined with a Smith predictor for effective water distribution in a main irrigation canal pool”. In: *Proc. of the 17th IFAC World Congress*. Seoul, Korea. S. 14558–14563.
- CAVALLO, A., A. DI NARDO, M. DI NATALE u. a. (2005). “An optimal Fuzzy approach to automated reservoir management”. In: *16th IFAC World Congress*. Prague.
- CHEN, M.-L. und D. GEORGES (1999). “Nonlinear optimal control of an open-channel hydraulic system based on an infinite-dimensional model”. In: *38th Conference on Decision & Control*. Phoenix, Arizona.
- (2000a). “Discrete-time nonlinear optimal control of an open-channel hydraulic system”. In: *IFAC Conference Control System Design*. Phoenix, Arizona.
 - (2000b). “Nonlinear robust control of an open-channel hydraulic system based on an infinite-dimensional model”. In: *11th IFAC International Workshop Control Applications of Optimization*. Saint-Petersburg, Russia.
 - (2001). “Nonlinear robust state feedback control of an open-channel hydraulic system”. In: *European Control Conference ECC'01*. Phoenix, Arizona.
- CHEN, M.-L., D. GEORGES und L. LEFEVRE (2002). “Infinite dimensional LQ control of an open-channel hydraulic system”. In: *4th Asian Control Conference*. Singapore.
- DOS SANTOS, V., G. BASTIN, J.-M. CORON u. a. (2008). “Boundary control with integral action for hyperbolic systems of conservation laws: stability and experiments”. In: *Automatica J. IFAC* 44.5. S. 1310–1318.
- DOS SANTOS, V. und C. PRIEUR (2008). “Boundary control of open channels with numerical and experimental validations”. In: *IEEE Trans. Control Systems Technology* 16.6. S. 1252–1264.
- DOS SANTOS, V. und Y. TOURÉ (2005). “Irrigation multireaches regulation problem by Internal Model Boundary Control”. In: *44th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference ECC'05*. Seville, Spain.
- DOS SANTOS, V., Y. TOURÉ, E. MENDES u. a. (2005). “Multivariable boundary control approach by internal model, applied to irrigation canals regulation”. In: *16th IFAC World Congress*. Prague.
- DUBROVIN, T., A. JOLMA und E. TURUNEN (2002). “Fuzzy model for real-time reservoir operation”. In: *J. Water Resour. Plng. and Mgmt.* 128.1. S. 76–73.

- DUMUR, D., A. LIBAUX und A. BOUCHER (2001). “Robust control for Basse-Isère run-of-river cascaded hydro-electric plants”. In: *Proc. of the 2001 IEEE Int. Conference on Control Applications*. Mexico City, Mexico. S. 1083–1088.
- DUIVELLA, E., P. CHARBONNAUD, u. a. (2005). “Supervised internal multi-model control of a dam-gallery open-channel system”. In: *44th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference ECC’05*. Seville, Spain.
- FAYE, R. M., F. MORA-CAMINO, S. SAWADOGO u. a. (1998). “An intelligent decision support system for irrigation system management”. In: *IEEE Int. Conference on Systems, Man & Cybernetics (SMC’98)*. San Diego, California. S. 3908–3913. URL: <http://www.canari.free.fr/smc98/smc98.htm>.
- FELIU BATLLE, V., R. RIVAS PEREZ, L. SANCHEZ RODRIGUEZ u. a. (2008). “Robust fractional order PI controller for a main irrigation canal pool”. In: *Proc. of the 17th IFAC World Congress*. Seoul, Korea. S. 15535–15540.
- FIGUEIREDO, J. und M. AYALA BOTTO (2005). “Automatic control strategies implemented on a water canal prototype”. In: *16th IFAC World Congress*. Prague.
- GÓMEZ, M., J. RODELLAR und J. A. MANTECÓN (2002). “Predictive control method for decentralized operation of irrigation canals”. In: *Applied Mathematical Modelling* 26. S. 1039–1056.
- GRIESSE, R. (1999). “Optimale und suboptimale Steuerung der Navier-Stokes-Gleichungen”. Diplomarb. Technische Universität Clausthal.
- GUGAT, M. (2004). *Optimal nodal control of networked hyperbolic systems: evaluation of derivatives*. Techn. Ber. Lehrstuhl II für Angewandte Mathematik, Universität Erlangen-Nürnberg.
- GUGAT, M. und G. LEUGERING (2003). “Global boundary controllability of the de St. Venant equations between steady states”. In: *Ann. Inst. Henri Poincaré, Anal. Non Linéaire* 20.1. S. 1–11.
- GUGAT, M., G. LEUGERING, K. SCHITTKOWSKI u. a. (2001). “Modelling, stabilization and control of flow in networks of open channels”. In: *Online Optimization of Large Scale Systems*. Hg. von M. GRÖTSCHEL, S. O. KRUMKE und J. RAMBAU. Springer. S. 251–270.
- JIRKA, G. H. und C. LANG (2005). *Gerinnehydraulik*. Skriptum, Institut für Hydromechanik, Universität Karlsruhe.
- KOENIG, D., N. BEDJAOUI und X. LITRICO (2005). “Unknown input observers design for time-delay systems application to an open-channel”. In: *44th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference ECC’05*. Seville, Spain.
- LABADIE, J. W. (2004). “Optimal operation of multireservoir systems: state-of-the-art review”. In: *J. Water Resour. Plng. and Mgmt.* 130.2. S. 93–111.
- LI, L. und M. CANTONI (2008). “Distributed controller design for open water channels”. In: *17th IFAC World Congress*. Seoul, Korea. S. 9970–9975.
- LITRICO, X. (2001). “Robust flow control of single input multiple outputs regulated rivers”. In: *J. Irrig. and Drain. Engrg.* 127.5. S. 281–286. URL: <http://xlitrico.free.fr/publications.htm>.
- (2002). “Robust IMC flow control of SIMO dam-river open-channel systems”. In: *IEEE Trans. Control Systems Technology* 10.3. S. 432–437. URL: <http://xlitrico.free.fr/publications.htm>. S.: 104.
- LITRICO, X. und V. FROMION (2002b). “Real-time management of multi-reservoir hydraulic systems using H_∞ optimization”. In: *15th IFAC World Congress*. Barcelona, Spain.

- LITRICO, X. und V. FROMION (2003). “Advanced control politics and optimal performance for an irrigation canal”. In: *European Control Conference ECC'03*.
- (2005). “Design of structured multivariable controllers for irrigation canals”. In: *44th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference ECC'05*. Seville, Spain.
- (2006b). “Boundary control of linearized Saint-Venant equations oscillating modes”. In: *Automatica J. IFAC* 42.6. S. 967–972. URL: <http://xlitrico.free.fr/#publications>.
- (2006c). “ H_∞ control of an irrigation canal pool with a mixed control politics”. In: *IEEE Trans. Control Systems Technology* 14.1. S. 99–111. URL: <http://xlitrico.free.fr/#publications>.
- LITRICO, X., V. FROMION, J.-P. BAUME u. a. (2003). “Modelling and PI control of an irrigation canal”. In: *European Control Conference ECC'03*.
- LITRICO, X., V. FROMION und G. SCORLETTI (2007). “Robust feedforward boundary control of hyperbolic conservation laws”. In: *Networks and Heterogeneous Media* 2.4. S. 715–729. URL: <http://xlitrico.free.fr/publications.htm>.
- LITRICO, X. und D. GEORGES (1999c). “Robust optimal control of a dam-river system with intermediate measurements”. In: *European Control Conference ECC'99*. Karlsruhe, Germany.
- LOBBRECHT, A. H., Y. B. DIBIKE und D. P. SOLOMATINE (2005). “Neural networks and fuzzy systems in model based control of the Overwaard Polder”. In: *J. Water Resour. Plng. and Mgmt.* 131.2. S. 135–145.
- MILTENBURG, I. J. (2008). “Determination of canal characteristics with experimental modeling”. Diplomarb. Delft University of Technology.
- OUARIT, H., L. LEFÈVRE und D. GEORGES (2003). “Robust optimal control of one-reach open-channels”. In: *European Control Conference ECC'03*.
- OVERLOOP, P.-J. VAN (2006). “Model predictive control on open water systems”. Diss. Delft University of Technology.
- PUIG, V., J. QUEVEDO, T. ESCOBET u. a. (2005). “Identification and control of an open-flow canal using LPV models”. In: *44th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference ECC'05*. Seville, Spain.
- RAMIREZ-LUNA, J., J. P. BAUME, B. DE LEÓN-MOJARRO u. a. (1998). “Wave motion stability for coupled canal pool – AMIL gate systems”. In: *IEEE Int. Conference on Systems, Man & Cybernetics (SMC'98)*. San Diego, California. S. 3868–3873. URL: <http://www.canari.free.fr/smc98/smc98.htm>.
- REDDY, J. M. (1990a). “Evaluation of optimal constant-volume control for irrigation canals”. In: *Applied Mathematical Modelling* 14.9. S. 450–458.
- (1990b). “Local optimal control of irrigation canals”. In: *J. Irrig. and Drain. Engrg.* 116.5. S. 616–631.
- (1995). “Kalman filtering in the control of irrigation canals”. In: *Applied Mathematical Modelling* 19.4. S. 201–209.
- (1996). “Design of global control algorithm for irrigation canals”. In: *J. Hydr. Engrg.* 122.9. S. 503–511.
- REDDY, J. M., A. DIA und A. OUSSOU (1992). “Design of control algorithm for operation of irrigation canals”. In: *J. Irrig. and Drain. Engrg.* 118. S. 852–867.

- REDDY, J. M. und R. G. JACQUOT (1999). “Stochastic optimal and suboptimal control of irrigation canals”. In: *J. Water Resour. Plng. and Mgmt.* 125.6. S. 369–378.
- REICHEL, G. und R. SACHS (2002). “Numerische Modellierung, Echtzeit-Simulation und virtuelle Fluss-Systeme als Grundlage für die Bewirtschaftung von Stauräumen und Stauketten”. In: *Int. Symp. Moderne Methoden und Konzepte im Wasserbau*. Zürich.
- RIVAS PÉREZ R. and Prada Moraga, C., J. R. PERÁN GONZÁLEZ und P. I. KOVALENKO (2002). “Robust adaptive predictive control of water distribution in irrigation canals”. In: *15th IFAC World Congress*. Barcelona, Spain.
- SANDERS, B. F. und N. D. KATOPODES (1999). “Control of canal flow by adjoint sensitivity method”. In: *J. Irrig. and Drain. Engrg.* 125.5. S. 287–297.
- SCHUURMANS, J. (1997). “Control of water levels in open channels”. Diss. Delft University of Technology.
- SCHUURMANS, W. (1991). “A model to study the hydraulic performance of controlled irrigation canals”. Diss. Delft University of Technology.
- SHANG, Y., B. WU und L. H. LI (2007). “State and space algorithm of downstream water-level control for multi-pool canals”. In: *Environmental Informatics Archives* 5. S. 431–439.
- STRELKOFF, T. S., J. L. DELTOUR, C. M. BURT u. a. (1998). “Influence of canal geometry and dynamics on controllability”. In: *J. Irrig. and Drain. Engrg.* 124.1. S. 16–22.
- STRELKOFF, T. S. und H. T. FALVEY (1993). “Numerical methods used to model unsteady canal flow”. In: *J. Irrig. and Drain. Engrg.* 119.4. S. 637–655.
- TEEGAVARAPU, R. S. V. und S. P. SIMONOVIC (2000). “Short-term operation model for coupled hydropower reservoirs”. In: *J. Water Resour. Plng. and Mgmt.* 126.2. S. 98–106.
- VAZQUEZ, R. und M. KRSTIC (2005). “A closed-form observer for the channel flow Navier-Stokes system”. In: *44th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference ECC'05*. Seville, Spain.
- VIALA, Y., P.-O. MALATERRE, J.-L. DELTOUR u. a. (2004). “A multivariable approach for the command of Canal de Provence Aix nord water supply subsystem”. In: *USCID Water Management Conference, Water Rights and Related Water Supply Issues*. Salt Lake City, Utah.
- WANG, J., X. YUAN und Y. ZHANG (2004). “Short-term scheduling of large-scale hydropower systems for energy maximization”. In: *J. Water Resour. Plng. and Mgmt.* 130.3. S. 198–205.
- YI, J., J. W. LABADIE und S. STITT (2003). “Dynamic optimal unit commitment and loading in hydropower systems”. In: *J. Water Resour. Plng. and Mgmt.* 129.5. S. 388–398.