

Hartmut Linke

**Wasserbewirtschaftung von
Binnenschiffahrtsgewässern auf Basis
einer modellgestützten Vorhersage
des Systemverhaltens**



Cuvillier Verlag Göttingen

Dissertation

Wasserbewirtschaftung von Binnenschiffahrtsgewässern auf Basis einer modellgestützten Vorhersage des Systemverhaltens

zur Erlangung des akademischen Grades Doktoringenieur
(Dr.-Ing.)

vorgelegt der
Fakultät für Informatik und Automatisierung der
Technischen Universität Ilmenau von

Dipl.-Ing. Hartmut Linke

im Juni 2005

Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Horst Puta, TU Ilmenau
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Oliver Sawodny, Universität Stuttgart
Dr.-Ing. Werner Siebert, Bundesanstalt für Wasserbau Karlsruhe

Eingereicht: 28. Juni 2005
Verteidigt am: 02. Dezember 2005
Verfahrensnummer: IA 149

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2006
Zugl.: (TU) Ilmenau, Univ., Diss., 2005
ISBN 3-89873-837-4

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2006
Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen
Telefon: 0551-54724-0
Telefax: 0551-54724-21
www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2006
Gedruckt auf säurefreiem Papier

ISBN 3-86537-837-4

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem Einsatz eines modellbasierten prädiktiven Regelungsverfahrens zur optimierten Bewirtschaftung von Binnenwasserstraßen. Das primäre Ziel der Wasserbewirtschaftung besteht darin, die Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt zu garantieren. Dies erfordert die Beachtung zum Teil sehr restriktiver Grenzwerte für den lokalen Wasserstand (Untiefen, Durchfahrtshöhe unter Brücken). Im Gegensatz zu typischen regelungstechnischen Problemstellungen besteht die Aufgabe der Wasserbewirtschaftung nicht in der Einhaltung eines Sollwertes für den Wasserstand, sondern in der gezielten Ausnutzung des durch die Wasserstandsgrenzwerte definierten Sollwertbereiches zur Umsetzung zusätzlicher Bewirtschaftungsanforderungen (Minimierung der Betriebskosten, Wasserkraftnutzung, Hochwasserschutz, Ökologie).

Das Verfahren der modellbasierten prädiktiven Regelung ist für das betrachtete Anwendungsgebiet besonders geeignet, da der zulässige Bereich für die Prozeßgrößen bei diesem Verfahren mittels Beschränkungen auf eine sehr direkte Weise zu berücksichtigen ist. Die Ableitung der Steuerentscheidungen erfolgt durch Lösen eines Optimalsteuerungsproblems auf Basis einer modellgestützten Vorhersage des zukünftigen Prozeßverhaltens. In Erweiterung bestehender optimierungsbasierter Ansätze zur Wasserbewirtschaftung wird zur Beschreibung der Prozeßdynamik ein strukturtreues Modell auf Basis der Saint-Venant-Gleichungen eingesetzt. Zur numerischen Lösung dieses hyperbolischen partiellen Differentialgleichungssystems wird ein Finite-Volumen-Verfahren (Godunov-Methode) genutzt. Mit diesem Modellansatz sind hochdimensionale Optimierungsprobleme verbunden, deren Lösung unter Echtzeitbedingungen mit einem speziell angepaßten Verfahren der sequentiellen quadratischen Programmierung (SQP) erfolgt. In der Arbeit werden weitere Realisierungsaspekte wie die Kalibrierung des Prozeßmodells, die Bestimmung des aktuellen Zustandes sowie die Auswirkungen einer direkten Berücksichtigung ökonomischer Kriterien im Gütefunktional (z. B. Pumpkosten) auf die im geschlossenen Kreis entstehende Bewirtschaftungsstrategie angesprochen.

Nach umfangreichen simulativen Tests wird das entwickelte prädiktive Regelungsverfahren seit September 1998 erfolgreich zur Bewirtschaftung des Mittellandkanals und des Elbe-Seitenkanals eingesetzt. Eine Simulationsstudie für drei Stauhaltungen der Unteren Mosel belegt mit einer deutlichen Dämpfung von Abflußwellen sowie einer leichten Erhöhung des Ertrages aus der Wasserkraftnutzung die Vorzüge einer koordinierten Bewirtschaftung von Stauhaltungen gegenüber dem Einsatz lokaler Regler.

Abstract

This thesis deals with the application of model-based predictive control to the optimal management of inland waterways. The primary objective of the water management is to guarantee safety and facility of the navigation. This requires the adherence of to some extent very restrictive limits for the local water level (shallowness, vertical clearance below bridges). In contrary to general control problems the task of the operational water management consists of an extensive usage of the realizable storage volume, which is defined by these water level limits, for further operating goals (minimization of operating costs, hydropower generation, flood protection, ecology).

A model predictive control algorithm is especially suited for the considered area of application, because constraints of the process variables can be incorporated in a simple and direct manner. The derivation of the control strategy results from the solution of an optimal control problem based on a prediction of the future process behavior. In extension to known optimization based management algorithms in this thesis a deterministic model based on an efficient discretization schema (Godunov-method) for the Saint-Venant-equations is used for the process description. This model approach is connected to large scale optimization problems, which are solved under real-time conditions using a specially tailored sequential quadratic programming algorithm (SQP). Further aspects like e. g. the model calibration, the estimation of the current state of the process model (moving horizon state estimation) and the impact of the direct treatment of economic goals in the cost function on the closed loop performance are discussed.

Subsequent to extensive simulation studies the developed predictive control algorithm is used successfully since September 1998 for the management of the Mittellandkanal and the Elbe-Seitenkanal, a system of two large navigation canals in the northern part of Germany. A simulation study for three reaches of the river Moselle shows the benefits of the coordinated operation of river reservoirs (attenuation of discharge waves, increase of the hydropower generation) compared to the application of local controllers.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Fachgebiet Dynamik und Simulation ökologischer Systeme des Instituts für Automatisierungs- und Systemtechnik der Technischen Universität Ilmenau. Die Entscheidung der Förderalismuskommission, in dieser Stadt am nördlichen Rande des Thüringer Waldes eine Dienststelle der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) einzurichten, darf als Vorbedingung für das Entstehen dieser Arbeit angesehen werden. Die Suche nach Anknüpfungspunkten für eine inhaltliche Zusammenarbeit zwischen der BAW und der TU Ilmenau fand in der Durchführung des Forschungsprojekts *Optimierte Wasserbewirtschaftung des Mittellandkanals und des Elbe-Seitenkanals* ihren Ausdruck. Die entstandene Kooperation konnte später mit Projekten zur Bewirtschaftung von Staustufen der Unteren Mosel fortgesetzt werden.

Für das Angebot zur Mitarbeit an dieser interessanten Forschungsthematik, die stetige Unterstützung während der Anfertigung dieser Arbeit und das mir entgegengebrachte Vertrauen danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Puta ganz herzlich.

Herrn Dr.-Ing. W. Siebert (Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe) danke ich für die Unterstützung in Fragen der Modellierung hydrodynamischer Prozesse, die Bereitstellung von Daten sowie die Übernahme eines Koreferats. Für die Übernahme des weiteren Koreferats danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. O. Sawodny (Universität Stuttgart).

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr.-Ing. E. Arnold für die langjährige bereichernde Zusammenarbeit, für zahlreiche Diskussionen und wertvolle Denkanstöße, die wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beitrugen.

Den Mitarbeitern des Fachgebietes Dynamik und Simulation ökologischer Systeme danke ich für die angenehme Arbeitsatmosphäre, insbesondere Frau Dipl.-Ing. H. Planke, Herrn Dr.-Ing. R. Franke und Herrn Dipl.-Ing. G. Reichl, die mit mir zeitweise ein Arbeitszimmer teilten.

Für die kritische Durchsicht des Manuskripts danke ich Herrn Dipl.-Ing. M. Eichhorn.

Mein Dank gilt weiterhin dem Freistaat Thüringen für die Unterstützung bei der Anfertigung dieser Arbeit durch ein Stipendium im Rahmen der Landesgraduiertenförderung.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	ix
Symbolverzeichnis	xi
1 Einführung	1
1.1 Untersuchte Binnenwasserstraßen	2
1.1.1 Mittellandkanal/Elbe-Seitenkanal	2
1.1.2 Mosel	3
1.2 Aufgaben und bisherige Ansätze zur Bewirtschaftung	4
1.2.1 Allgemeine Anforderungen an den Betrieb von Binnenwasserstraßen	4
1.2.2 Ansätze zur lokalen Bewirtschaftung von Flußstauhaltungen	6
1.2.3 Bisherige Bewirtschaftungspraxis an den untersuchten Binnenwasserstraßen	7
1.3 Prädiktive Regelung zur Wasserbewirtschaftung von Binnenschiffahrtsgewässern	8
1.4 Ziel der Arbeit	9
1.5 Übersicht über diese Arbeit	10
2 Modellbildung	11
2.1 Modellierung instationärer Strömungsvorgänge	12
2.1.1 Beschreibung instationärer Fließprozesse in Gewässern	13
2.1.2 Numerische Methoden für Erhaltungsgleichungen	15
2.1.3 Godunov-Methode	18
2.1.4 Näherungsweise Lösung von Riemann-Problemen	19
2.1.5 Lösung des Riemann-Problems für die Saint-Venant-Gleichungen	20
2.1.6 Randbedingungen und Diskretisierung	21
2.1.7 Anpassung und Validierung des Prozeßmodells	22
2.2 Modellierung der Steuereinrichtungen	30
2.2.1 Flußkraftwerk	30
2.2.2 Wehr	35
2.2.3 Pumpwerke und Entlastungen	36
3 Modellbasierte prädiktive Regelung	39
3.1 Prädiktiver Regelungsalgorithmus	40
3.2 Berücksichtigung langfristiger Bewirtschaftungsziele	41

3.2.1	Mittellandkanal/Elbe-Seitenkanal	42
3.2.2	Mosel	48
3.3	Stabilität	52
3.4	Vermeidung unzulässiger Problemstellungen	54
3.5	Numerische Lösung des zeitdiskreten Optimalsteuerungsproblems	54
3.5.1	Interior-Point Verfahren	57
4	Zustandsschätzung	61
4.1	Zustandsschätzung auf gleitendem Horizont	61
4.2	Bewertung der Schätzresultate	62
4.3	Mittellandkanal/Elbe-Seitenkanal	63
4.4	Mosel	68
5	Projekt Mittellandkanal/Elbe-Seitenkanal	73
5.1	Parametrierung des prädiktiven Reglers	73
5.2	Umsetzung der Bewirtschaftungsanforderungen in Gütefunktional	74
5.3	Bestimmung von Maschineneinsatzplänen	77
5.4	Simulativer Test des prädiktiven Reglers	78
5.5	Implementierung und praktischer Einsatz des Bewirtschaftungsmoduls	81
6	Simulationsstudie zur Unteren Mosel	87
6.1	Regelungstechnische Struktur	87
6.2	Umsetzung der Bewirtschaftungsanforderungen	88
6.3	Bestimmung des Stauzieles	92
6.4	Simulativer Test des Regelungskonzeptes	93
6.4.1	Vergleichmäßigung des Abflusses	95
6.4.2	Maximierung des Kraftwerksertrages	98
6.4.3	Hochwasser	100
6.4.4	Wehr	103
7	Zusammenfassung und Ausblick	107
	Literaturverzeichnis	111
	Anhang	119
A.1	Simulationsergebnisse für das Mittelwasser - Abflußvergleichmäßigung	120
A.2	Simulationsergebnisse für das Mittelwasser - Ertragsmaximierung	122
A.3	Simulationsergebnisse für das leichte Hochwasser	124

Physikalisch-Technische Symbole und Indizes

Lateinische Symbole

A	benetzter Querschnitt	[m ²]
B	Breite des Wehrkörpers	[m]
Cr	Courant-Zahl	[-]
P	hydrostatischer Druck auf den benetzten Querschnitt	[Pa]
P	Leistung	[W]
Q	Durchfluß	[m ³ /s]
R_H	hydraulischer Radius	[m]
S_f	Reibungsgefälle	[-]
S_ξ	Sohlgefälle	[-]
S_q	Wirkung des seitlichen Zuflusses auf die Impulsbilanz	[m ³ /s ²]
V	Volumen	[m ³]
b	Wasserspiegelbreite	[m]
c	Kostenfaktor	[Kosteneinheit]
g	Erdbeschleunigung	[m/s ²]
h	Wasserstand	[m]
h_f	Fallhöhe	[m]
h_{loss}	Verlusthöhe	[m]
n	Manning-Beiwert	[m ^{1/3} /s]
q	auf die Längeneinheit bezogener seitlicher Zufluß	[m ² /s]
t	Zeit	[s]
u_q	Zuflußgeschwindigkeit	[m/s]
v	Fließgeschwindigkeit	[m/s]
v	Windgeschwindigkeit	[m/s]

Griechische Symbole

α	Wandneigung (Trapezprofil)	[-]
η	Wirkungsgrad	[-]
λ	charakteristische Geschwindigkeit	[m/s]
μ	Überfallbeiwert (Wehr)	[-]
ψ	Kontraktionsbeiwert (Wehr)	[-]
ξ	Ortskoordinate	[m]
ϕ	Winkel zwischen Windrichtung und der Ausdehnung des Fließgewässers	[°]

ρ	Dichte	$[\text{kg}/\text{m}^3]$
τ	Schubspannung durch den Einfluß des Windes	$[\text{m}/\text{s}^2]$

Indizes

a	Luft
w	Wasser
el	elektrisch
OW	Oberwasser
UW	Unterwasser
tur	Turbine
gen	Generator
stz	Stauziel
hs	hydrostatischer Staupegel

1 Einführung

Verfahren der prädiktiven Regelung berechnen die Steuergrößen durch Lösen eines Optimalsteuerungsproblems unter Nutzung einer modellgestützten Vorhersage des zukünftigen Prozeßverhaltens. Sowohl aus technologischer Sicht bestehende Beschränkungen für die Prozeßgrößen als auch Güteforderungen können dadurch auf eine direkte und verständliche Weise in die Bestimmung der Steuerstrategie einbezogen werden. Diese Eigenschaften begründen die Aufmerksamkeit, die prädiktive Regelungsverfahren seit ersten Entwicklungen zu Beginn der siebziger Jahre bis in die heutige Zeit erfahren. Aufgrund des hohen Berechnungsaufwandes zur Bestimmung der Steuergrößen war der Einsatz dieses Regelungsverfahrens zunächst auf relativ langsame Prozesse und vereinfachte (lineare) Modelle des Prozeßverhaltens beschränkt. Auf vielen industriellen Anwendungsgebieten ist inzwischen eine weitere Steigerung von Effizienz und Produktqualität bei gleichzeitiger Verminderung der Umweltbelastung nur durch die vollständige Ausnutzung des zulässigen Arbeitsbereiches der Prozesse sowie die optimale Gestaltung von Übergangsvorgängen zwischen verschiedenen Prozeßabschnitten zu erreichen. Hieraus resultiert die Notwendigkeit zur Verwendung nichtlinearer Prozeßmodelle im prädiktiven Regler, wobei der Einsatz nichtlinearer prädiktiver Regler in der Praxis durch die rasante Entwicklung der Rechnentechnik in zunehmenden Maße ermöglicht wird. Sowohl die theoretische Fundierung nichtlinearer prädiktiver Regler als auch Implementierungsaspekte, wie z. B. die Entwicklung effizienter Optimierungsverfahren, sind ein Gebiet aktueller Forschung. Ein Überblick über industrielle Anwendungen prädiktiver Regler wird in ([QB96], [QB00], [QB03]) gegeben.

Seit dem Ende des 19. Jahrhunderts wurde in Deutschland durch die Kanalisierung und Regulierung von Flüssen und die Anlage von Schiffahrtskanälen ein leistungsfähiges Netz von Binnenwasserstraßen aufgebaut, das eine Länge von ca. 6500 km besitzt. Der im Vergleich zu anderen Verkehrsträgern wesentliche Vorteil der Binnenschifffahrt besteht in der kostengünstigen Beförderung von Massengütern. Im Jahr 2000 wurde durch die Binnenschifffahrt eine Transportleistung von 66.5 Mrd. tkm erbracht [BMV01]. Dies entspricht einem Anteil von ca. 13% an der gesamten Transportleistung. In der verstärkten Beförderung von Containern werden Chancen für eine zukünftige Entwicklung der Binnenschifffahrt gesehen. Zur Erschließung dieses Wachstumspotentials wird an der Beseitigung von Engpässen im Wasserstraßennetz sowie dem Aufbau leistungsfähiger Schnittstellen zu den anderen Verkehrsträgern (kombinierter Verkehr) gearbeitet. Obwohl für die Binnenschifffahrt im Vergleich mit anderen Verkehrsträgern ein unterproportionales Wachstum prognostiziert wird, ist absolut von einer Steigerung des Transportaufkommens um 27% bis zum Jahr 2015 auszugehen (Vergleichsjahr 1997). Um den steigenden Anforderungen an die Transportkapazität der Binnenwasserstraßen gerecht werden zu können, ist vielfach

ein Ausbau der vorhandenen Infrastruktur erforderlich. Die hiermit verbundene Modernisierung der bestehenden Prozeßleittechnik kann zu einer hohen Betriebssicherheit der Binnenwasserstraßen und damit zu einer verbesserten Wettbewerbsfähigkeit der Schifffahrt beitragen. Durch Einsatz moderner regelungstechnischer Konzepte können weitere Ziele (Wasserkraftnutzung, Ökologie) bei der Ableitung der Bewirtschaftungsstrategien angemessen berücksichtigt werden.

In dieser Arbeit wird die Anwendung eines nichtlinearen prädiktiven Regelverfahrens zur Wasserbewirtschaftung von Binnenschiffahrtsgewässern am Beispiel des Kanalsystems Mittellandkanal/Elbe-Seitenkanal sowie der Moselstauufen Detzem, Wintrich und Zeltingen vorgestellt. Ausgangspunkt hierfür war das Forschungsthema „Optimierte Wasserbewirtschaftung des Mittellandkanals und des Elbe-Seitenkanals“, das im Fachgebiet Dynamik und Simulation ökologischer Systeme der Technischen Universität Ilmenau in der Zeit vom 1. Oktober 1995 bis zum 31. August 1998 im Auftrag der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) Karlsruhe bearbeitet wurde. Dabei konnte auf Erfahrungen bei der Anwendung von Methoden der optimalen Steuerung bzw. der repetierenden Optimierung auf dem Gebiet der Wasser- und Landwirtschaft aus vorangegangenen Forschungsprojekten aufgebaut werden [Arn87, Put87]. Zur hinreichend genauen Nachbildung der Prozeßdynamik im prädiktiven Regler ist aufgrund der räumlichen Ausdehnung der betrachteten Binnenschiffahrtsgewässer ein Prozeßmodell mit verteilten Parametern erforderlich. In Verbindung mit der Integration ökonomischer Zielstellungen in das Gütefunktional sowie der Einbeziehung von Beschränkungen für die Prozeßvariablen kann dann eine genaue Berücksichtigung der bestehenden Bewirtschaftungsanforderungen gewährleistet werden.

In den folgenden Abschnitten wird auf die betrachteten Binnenschiffahrtsgewässer sowie hierfür bestehende Bewirtschaftungsanforderungen eingegangen, um darauf aufbauend den Einsatz eines prädiktiven Regelungsverfahrens zur Wasserbewirtschaftung zu motivieren.

1.1 Untersuchte Binnenwasserstraßen

1.1.1 Mittellandkanal/Elbe-Seitenkanal

Das Kanalsystem Mittellandkanal/Elbe-Seiten-Kanal ist mit einer Länge von ca. 430 km ein wichtiger Bestandteil des deutschen Binnenwasserstraßennetzes zur Verbindung der Flußgebiete von Rhein, Ems, Weser und Elbe sowie zur besseren Anbindung des Seehafens in Hamburg an die Binnenwasserstraßen (siehe Abbildung 1.1). Der Mittellandkanal quert als Scheitelkanal die Wasserscheide der Einzugsgebiete von Elbe und Weser. Die Arbeiten an diesem Kanal wurden im Zeitraum vom 1906 bis 1938 durchgeführt, wobei die 174 km lange Westhaltung von Bergeshövede bis Hannover-Anderten schon 1916 vollständig für den Verkehr freigegeben werden konnte. Der Elbe-Seitenkanal zweigt aus der Scheitelhaltung des Mittellandkanals in nördliche Richtung ab und gestattet die Umfahrung des für die Schifffahrt kritischen Elbeabschnitts zwischen Magdeburg und Lauenburg. Dieser Kanal wurde nach einer Bauzeit von acht Jahren 1976 fertiggestellt.