



Hartmut Linke (Autor)

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

Hartmut Linke

Wasserbewirtschaftung von
Binnenschiffahrtsgewässern auf Basis
einer modellgestützten Vorhersage
des Systemverhaltens



Cuvillier Verlag Göttingen

<https://cuvillier.de/de/shop/publications/2240>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentzsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,
Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: <https://cuvillier.de>

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 Rechen-technik 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 Zeltlingen 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.

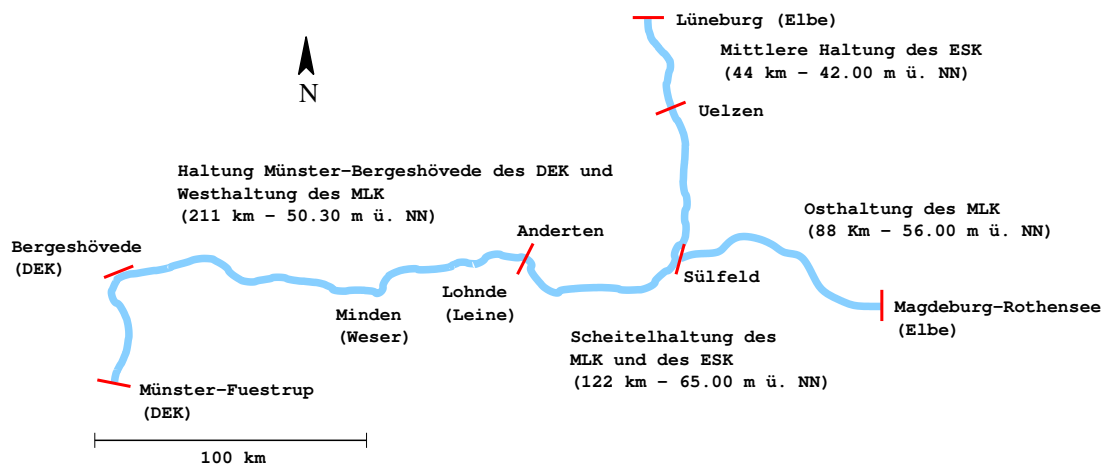


Abbildung 1.1: Das Kanalsystem Mittellandkanal/Elbe-Seitenkanal

Der Wasserstand in den einzelnen Haltungen des Kanalsystems unterliegt stärkeren täglichen Schwankungen, die vor allem durch Schleusungsvorgänge infolge des Schiffsverkehrs verursacht werden. Neben Wasserverlusten durch Schleusungsvorgänge und nicht vollständig schließende Schleusentore (ca. 80 % der Gesamtverluste) werden weitere Verluste durch Versickerung, Verdunstung sowie Entnahmen für landwirtschaftliche Zwecke verursacht. Der Beitrag natürlicher Zuflüsse zur Wasserbilanz der Scheitelhaltung des Kanalsystems Mittellandkanal/Elbe-Seitenkanal ist vernachlässigbar. Die in einer Haltung entstehenden Wasserverluste werden daher durch Entnahmen aus den benachbarten, tieferliegenden Haltungen des Kanalsystems ersetzt, wobei der Mittellandkanal zur Kompensation von Verlusten an die Umgebung (Verdunstung, Versickerung) in Minden aus der Weser gespeist wird. Zur Bereitstellung der benötigten Wassermenge waren die Kanalisierung der Mittelweser sowie der Bau der Eder- und Diemeltalsperre erforderlich [Deh50]. In Zeiträumen mit starken Niederschlägen kann die Abgabe von Wasser an die den Kanal querenden Flüsse erforderlich sein. Bei lang anhaltendem, starkem Wind aus westlicher bzw. östlicher Richtung entsteht in der Westhaltung des Mittellandkanals eine deutliche Schrägstellung des Wasserspiegels. Zur zielgerichteten Beeinflussung des Wasservorrats in den Haltungen des Kanalsystems stehen insgesamt fünf Pumpwerke und sieben größere Entlastungsanlagen zur Verfügung.

1.1.2 Mosel

Die Mosel ist mit einer Länge von 520 km der größte Nebenfluß des Rheins. Ihre Quelle liegt in den französischen Vogesen auf einer Höhe von 735 m über dem Meeresspiegel. Das Einzugsgebiet der Mosel besitzt eine Größe von 28000 km² und wird durch die Vogesen, die Ardennen, die Eifel und den Hunsrück begrenzt. Der Ausbau der Mosel auf einer Länge von 270 km wurde 1956 von den Anrainerstaaten Frankreich, Luxemburg und BR Deutschland vertraglich vereinbart. Im Zeitraum von 1958 bis 1964 wurden zusätzlich zur schon bestehenden Staustufe Koblenz 13 neue Staustufen errichtet (internationale

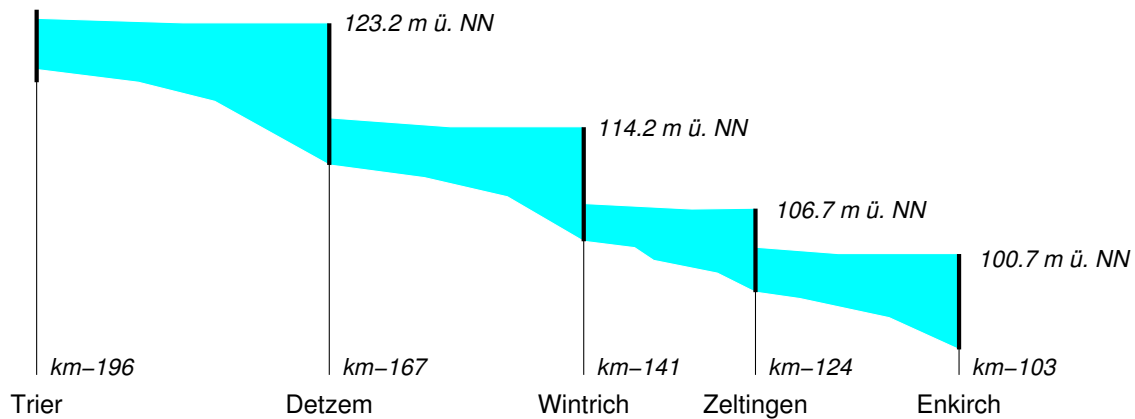


Abbildung 1.2: Die Moselstaustufen Detzem - Enkirch

Ausbaustrecke). Weiterhin bestehen auf französischem Gebiet 14 Staustufen mit einer Gesamtlänge von 124 km, die zwischen 1958 und 1979 realisiert wurden. Seit 1990 erfolgt eine Anpassung der Fahrrinne an die gewachsenen Bedürfnisse der Schifffahrt (Länge und Abladetiefe der Schiffseinheiten). Weiterhin ist eine Erhöhung der Transportkapazität durch den Bau von je einer zweiten Schleuse an den Staustufen geplant [WAST99].

1.2 Aufgaben und bisherige Ansätze zur Bewirtschaftung von Flußstaustufen und Schifffahrtskanälen

1.2.1 Allgemeine Anforderungen an den Betrieb von Binnenwasserstraßen

Durch die Kanalisierung von Flüssen mittels Staustufen wird im Gegensatz zu einfachen Flußregulierungsmaßnahmen eine weitgehende Unabhängigkeit der Schifffahrt von der aktuellen Wasserführung des Flusses erreicht. Weiterhin kommt es im eingestauten Bereich zu einer Verringerung der Fließgeschwindigkeit, so daß die Bergfahrten der Schiffe erleichtert werden. Nachteilig wirkt sich jedoch der Zeitverlust infolge der Schleusungen aus. Aus Sicht der Schifffahrt ist eine möglichst geringe Anzahl von Staustufen in Verbindung mit der Begradigung des Flußlaufes von Vorteil, wobei hieraus resultierende, negative Auswirkungen auf die natürliche Flußlandschaft bei der Ausbauplanung zu berücksichtigen sind (Änderung der Fließgeschwindigkeit, Beeinflussung des Grundwasserspiegels sowie der Pflanzen- und Tierwelt in der Umgebung des Flusses).

Bei der Bewirtschaftung von Flußstaustufen sind verschiedene, teilweise konkurrierende Zielsetzungen zu beachten. Es bestehen Anforderungen bezüglich

- der Schifffahrt,

- der Nutzung des Wasserkraftpotentials,
- der Bereitstellung von Brauchwasser,
- des Hochwasserschutzes sowie
- ökologischer Gesichtspunkte.

Für Schifffahrtskanäle stehen die Nutzung als Transportweg und die Bereitstellung von Brauchwasser im Vordergrund, wobei die weiteren für Staustufen bestehenden Anforderungen auch anzutreffen sind. So wird z. B. in der Westhaltung des Mittellandkanals überschüssiges Wasser zur Energieerzeugung (Turbine in Minden zur Weser) genutzt. Die Aufnahme von Hochwasser aus kleineren, den Kanal querenden Flüssen (Rodenburger Aue in die Westhaltung des Mittellandkanals) sowie von Wasser aus Feuchtgebieten in der Umgebung eines Kanals (Osthaltung des Mittellandkanals) sind Beispiele für die letztgenannten Nutzungsanforderungen. Sofern der Wasserbedarf eines Schifffahrtskanals nicht durch natürliche Zuflüsse in die höchstgelegene Kanalhaltung gedeckt werden kann, ist die Minimierung der Kosten für die Bereitstellung des erforderlichen Betriebswassers für die Schleusen eine wesentliche Bewirtschaftungsanforderung.

Das primäre Ziel der Wasserbewirtschaftung besteht sowohl für Flußstauhaltungen als auch für Schifffahrtskanäle darin, die *Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt* zu garantieren. Hieraus resultieren zum Teil sehr restriktive Grenzwerte für den *lokalen* Wasserstand, durch die eine ausreichende Abladetiefe bzw. Durchfahrthöhe unter Brücken gesichert wird.

Bei Flußstauhaltungen wird der zulässige Bereich für den lokalen Wasserstand auf vom aktuellen Zuflußgeschehen abhängige Vorgaben für den Wasserstand an bestimmten Positionen (z. B. im Oberwasser der Staustufe) abgebildet, die im allgemeinen durch einen Sollwert sowie zulässige Abweichungen von diesem Sollwert definiert sind. Das aus dem Toleranzband um den Sollwasserstand resultierende und somit für die Bewirtschaftung verfügbare Stauvolumen ist für sekundäre Aufgaben, wie beispielsweise die Glättung des Abflusses oder die Maximierung des Ertrages aus der Wasserkraft, nutzbar. Bei Hochwasser ist durch Absenken des Stauzieles eine Verringerung des Wasserstandes im eingestauten Bereich oberhalb der jeweiligen Staustufe zu erreichen. Die hiermit verbundene Abgabe von Stauvolumen ist so vorzunehmen, daß eine Aufsteilung des Abflusses (d. h. die Erhöhung des Abflusses aus dem Stauraum im Vergleich zum Zufluß) infolge der Stauzieländerung vermieden wird. Eine wirkungsvolle Dämpfung der Hochwasserwelle ist allein durch die Bewirtschaftung des verfügbaren Stauvolumens nicht möglich. Negative Einflüsse des Staustufenbetriebs auf die Umgebung des Flusses (Grundwasserspiegel) bzw. dessen Ufer werden durch eine möglichst langsame Änderung der Wasserspiegellage reduziert. Hierzu können Grenzwerte für die Änderungsgeschwindigkeit des Stauziels festgelegt werden.

Für Kanalhaltungen wird ein Betriebswasserstand definiert, welcher in Abhängigkeit vom Ausbauzustand des Kanals um einen definierten Wert über- bzw. unterschritten werden darf (z. B. um 10 bis 15 cm beim Mittellandkanal bzw. beim Main-Donau-Kanal). Die vollständige Ausnutzung dieses Toleranzbandes ist nicht für jede Kanalhaltung erwünscht und wird gegebenenfalls durch die Festlegung weiterer Beschränkungen für den mittleren

Wasserstand (Volumeninhalte) verhindert. In Analogie zu Flußstauhaltungen sind zusätzliche Bewirtschaftungsziele durch die aktive Beeinflussung des Wasserstandes innerhalb des zulässigen Bereiches umsetzbar. Ein wesentliches Ziel der Bewirtschaftung von Schifffahrtskanälen besteht in der Minimierung der Betriebskosten, die bei Scheitelkanälen durch die Bereitstellungskosten für die zum Betrieb der Schleusen erforderliche Wassermenge bestimmt werden. Daher wird schon in der Planungsphase eines Kanals versucht, natürliche Zuflüsse zur Speisung der Scheitelhaltung zu nutzen (z. B. die Lippe für das westdeutsche Kanalsystem [RZ03]). Sofern es nicht gelingt, auf diese Weise den Wasserbedarf eines Kanals vollständig zu decken, muß das bei Schleusungsvorgängen in der höhergelegenen Haltung entstehende Wasserdefizit durch Zurückpumpen ersetzt werden. Für die hierzu errichteten Pumpwerke bestehen aufgrund der Höhe der bereitzustellenden elektrischen Leistung und des zur Aufrechterhaltung der Betriebsbereitschaft notwendigen Mindestbedarfs an elektrischer Energie separate Lieferverträge mit den örtlichen Energieversorgern. Das wesentliche Potential für eine kostenoptimale Betriebsführung besteht in der Ausnutzung der meist zweigeteilten Tarifstruktur mit unterschiedlichem Elektroenergiearbeitspreis innerhalb eines Hoch- und eines Niedertarifabschnitts. Die Ausnutzung dieser Tarifstruktur durch eine geeignete Bewirtschaftungsstrategie erfordert eine hinreichende Speicherkapazität in der Scheitelhaltung. Während diese beim Mittellandkanal/Elbe-Seiten-Kanal aufgrund der Länge der Scheitelhaltung gegeben ist, wurde am Main-Donau-Kanal direkt neben der Scheitelhaltung ein Speicherbecken mit einer Kapazität von ca. 2 Mio. m³ errichtet [WASN05]. Die Wartungs- und Unterhaltskosten für die Pumpwerke und Entlastungsanlagen werden durch eine gleichmäßige Betriebsweise mit wenigen An- und Abfahrvorgängen günstig beeinflusst.

1.2.2 Ansätze zur lokalen Bewirtschaftung von Flußstauhaltungen

Zur Bewirtschaftung von Staustufen sind prinzipiell zwei Vorgehensweisen üblich. Bei der *Stauzielregelung* wird der Staustufenabfluß so beeinflusst, daß der Wasserstand an einer vorgegebenen Referenzposition (Oberwasser der Staustufe, Wendepiegel) sich in einem Toleranzband um den Sollwert (Stauziel) befindet. Demgegenüber erfolgt bei der *Abflußregelung* eine zeitversetzte Weitergabe des Zuflusses in die Stauhaltung, so daß diese Betriebsweise aus regelungstechnischer Sicht eine Steuerung in offener Wirkungskette und keine Regelung darstellt. Die Stauzielregelung wird im allgemeinen in einer kaskadierten Form ausgeführt, um die unterschiedliche Dynamik von Stauraum und Einrichtungen zur Abflußbeeinflussung sowie die Nichtlinearität der Stellorgane zu berücksichtigen. Durch einen Pegelregler wird aus der Differenz zwischen Stauziel und aktuellem Wasserstand ein Abflußsollwert bestimmt, der nachfolgend durch den Abflußregler auf die verfügbaren Stellorgane verteilt wird. Beim Einsatz eines konventionellen Reglers in der äußeren Schleife kann in Abhängigkeit von der Stauraumcharakteristik eine Aufsteilung des Abflusses entlang einer Stauhaltungskette auftreten. Dieses in der Praxis unerwünschte Verhalten wird durch verschiedene Erweiterungen, die als Störgrößenaufschaltung auf das Stellglied bzw. die Führungsgröße zu interpretieren sind, unterdrückt [The98].

In [GH93] wird im Zusammenhang mit einer größeren Distanz zwischen der Pegelmeßeinrichtung, die im betrachteten Fall am Anfang des Zulaufkanals zum Wasserkraftwerk

installiert ist, und dem Stellglied ein ungenügendes dynamisches Verhalten des Regelkreises bei Nutzung eines PI-Reglers festgestellt. Daher wird in dieser Arbeit, ausgehend von einem einfachen Modell des Zulaufkanals, eine zusätzliche Zustandsrückführung vorgeschlagen, durch die eine deutlich verbesserte Dämpfung der sonst zu beobachtenden Wasserspiegelschwankungen zu erreichen ist. Die Zustandsgrößen beschreiben die Wasserspiegeldifferenz zwischen den Endpunkten des Zulaufkanals sowie den dort vorherrschenden mittleren Durchfluß und müssen mittels eines Beobachters bestimmt werden.

In den letzten Jahren wurden für Bewässerungskanäle [CdNB99] und Flußstauhaltungen [dHB02] nichtlineare Regelungskonzepte erarbeitet, bei denen die Dynamik des Stauraums auf Basis der quasilinearen Form der Saint-Venant-Gleichungen im Entwurfsprozeß berücksichtigt wird. Die Stabilität des Reglers wird in beiden Fällen durch Konstruktion einer Lyapunov-Funktion bzw. unter Nutzung von Riemann-Invarianten nachgewiesen. Bei beiden Ansätzen handelt es sich jedoch um proportional wirkende Regler, so daß Erweiterungen zur Vermeidung einer bleibenden Regelabweichung bei Störungen am Eingang der Regelstrecke notwendig sind.

Die optimale Aufteilung der Abflußvorgaben des Stauzielreglers auf die vorhandenen Stalleinrichtungen wird in [Cha98] untersucht. In dieser Arbeit wird ein Fuzzy-Auswahlkonzept entwickelt, durch das in einem mehrkriteriellen Entscheidungsprozeß die Festlegung der jeweils geeigneten Abflußorgane erfolgt. Durch Berücksichtigung verschiedener Kriterien, wie z. B. Einsatzpräferenz, Verfügbarkeit, aktueller Arbeitspunkt und Stillstandszeit, sind eine schonende Betriebsweise, eine Erhöhung des Ertrages aus der Wasserkraftnutzung sowie ein verbessertes Verhalten beim Übergang zwischen verschiedenen Betriebsarten erreichbar.

1.2.3 Bisherige Bewirtschaftungspraxis an den untersuchten Binnenwasserstraßen

Zur Bewirtschaftung der Stauhaltungen an der Unteren Mosel existiert eine Verwaltungsvorschrift [VV97], in der sowohl Vorgaben für jede einzelne Staustufe als auch Maßnahmen zur Koordination der gesamten Stauhaltungskette hinterlegt sind. Das einzuhaltende Stauziel im Oberwasser jeder Staustufe wird in tabellarischer Form in Abhängigkeit vom Durchfluß festgelegt, wobei dieser Wert um 5 cm über- bzw. unterschritten werden darf. Der Wechsel zwischen verschiedenen Stauzielen ist in der Regel mit einer maximalen Geschwindigkeit von 10 cm/h vorzunehmen und wird für die gesamte Stauhaltungskette von einer zentralen Leitwarte koordiniert. Eine Hysterese für den Durchfluß ($\pm 20 \text{ m}^3/\text{s}$) sowie eine Sperrzeit für die Rückführung auf das ursprüngliche Stauziel verhindern häufige Wechsel zwischen den Stauzielen. Weiterhin sind im Unterwasser der Staustufe starke Schwankungen des Wasserstandes sowie ein Unterschreiten des hydrostatischen Staupegels der stromabwärts gelegenen Staustufe zu vermeiden. Die Stauzielregelung wird bei Abflüssen unterhalb des Sättigungsdurchflusses der Laufwasserkraftwerke durch den Kraftwerksbetreiber durchgeführt. Oberhalb des Sättigungsdurchflusses bzw. bei Ausfall des Kraftwerkes wird unter Verantwortung der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung die Wehranlage zur Regelung des Stauziels genutzt.

Die Wasserbewirtschaftung des Kanalsystems Mittellandkanal/Elbe-Seitenkanal wurde durch das Bedienpersonal auf Basis eines über viele Jahre erworbenen Erfahrungswissens durchgeführt. Ausgehend von Pegelmeßwerten an ausgewählten Positionen entlang der Kanalhaltungen sowie den innerhalb der Betriebszeit erfolgten Schleusungen wurden die Maschineneinsatzpläne für die Pumpwerke so bestimmt, daß zum morgendlichen Betriebsbeginn der Schleusen in jeder Haltung ein Zielwasserstand (Volumeninhalt) erreicht wurde. Die Bewirtschaftungskosten wurden in die Ableitung der Steuerentscheidungen einbezogen, im Vordergrund stand jedoch die Sicherheit der Schifffahrt. In kritischen Prozeßsituationen (starker Wind, Hochwasseraufleitungen) wurde anhand der Geschwindigkeit der Wasserstandsänderung sowie von Informationen zu den relevanten Störgrößen über notwendige Entlastungsmaßnahmen entschieden. Bei der im manuellen Betrieb praktizierten Vorgabe von Sollwerten für den mittleren Wasserstand der Haltungen zu einem bestimmten Zeitpunkt ist jedoch nicht mit der Ausnutzung möglicher Prozeßreserven zu rechnen, da hierdurch die Abhängigkeit der Volumenbilanz von äußeren Einflußgrößen (Störgrößen) ungenügend berücksichtigt wird.

Aufgrund der für die Pumpwerke und Entlastungsanlagen bestehenden Einsatzvorschriften sowie der vorherrschenden Periodik in Bezug auf die Schleusungswassermengen und den Elektroenergiearbeitspreis sind die für die Wasserbewirtschaftung bestehenden Zielsetzungen mittels konventioneller regelungstechnischer Ansätze nicht zu erfüllen.

Ein alternativer Ansatz zum Einsatz eines prädiktiven Reglers würde in der Abbildung des Wissens der Prozeßbetreiber in ein Expertensystem bestehen. Es wäre jedoch zu prüfen, ob durch dieses Konzept die notwendige Flexibilität bei veränderten Rahmenbedingungen im täglichen Betrieb (z. B. Änderungen der Energielieferverträge) sowie im Hinblick auf bauliche Veränderungen des Kanalsystems besteht. So werden z. B. im Rahmen des Verkehrsprojektes „Deutsche Einheit“ Nr. 17 am Mittellandkanal zwischen Hannover und Magdeburg umfangreiche Ausbaumaßnahmen durchgeführt, um den Kanal für 110 m lange Großmotorgüterschiffe und bis zu 185 m lange Schubverbände befahrbar zu machen. Während hieraus resultierende Änderungen der Bewirtschaftungsstrategie aufgrund fehlender Erfahrungen in ein Expertensystem schwer zu integrieren wären, ist für das vorgeschlagene Bewirtschaftungskonzept nur die Anpassung der Daten zur Kanalgeometrie sowie zu den installierten Betriebsmitteln notwendig.

1.3 Prädiktive Regelung zur Wasserbewirtschaftung von Binnenschiffahrtsgewässern

Das primäre Bewirtschaftungsziel besteht für die betrachteten Binnenschiffahrtsgewässer darin, die Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt zu gewährleisten. Zur Vermeidung einer potentiellen Gefährdung der Schifffahrt bzw. der bestehenden Infrastruktur ist es erforderlich, daß sich der Wasserstand entlang des Stauraumes im Inneren eines ortsabhängigen zulässigen Bereiches befindet. Die Grenzwerte für den Wasserstand resultieren aus der Topographie des Stauraumes (Untiefen) sowie aus Brücken, die den Stauraum überspannen (ausreichende Durchfahrtshöhe). Durch die Festlegung eines abflußabhän-