

Christian Bouillon & Stephan Theobald

Modellansatz zur Koordinierung zukünftiger Steuerungsmaßnahmen in einem Talsperren-Verbundsystem

Model approach to coordinate future control actions in a reservoir system

Die optimale Bewirtschaftung von Talsperren-Verbundsystemen stellt aufgrund ihrer Dimension und den zum Teil widersprüchlichen Bewirtschaftungszielen eine besondere Herausforderung dar. Darüber hinaus ist aufgrund des schwankenden natürlichen Wasserdargebots und -nachfrage ein stetiger Anpassungsprozess erforderlich. Die in diesem Artikel angewendete Methode basiert auf dem Konzept der modellbasierten prädiktiven Regelung (MPC) und ermöglicht mit einem eingebetteten Optimierungsverfahren die vorausschauende Planung der zukünftigen Talsperrenabgaben in einem Verbundsystem. Das Verfahren orientiert sich dabei an den prognostizierten Randbedingungen hinsichtlich der hydrologischen Situation und des Wasserbedarfs anhand von Vorhersagedaten. Vor dem Hintergrund der Echtzeitbewirtschaftung und der damit verbundenen Sicherstellung kurzfristiger Bewirtschaftungsziele werden praxisrelevante Optimierungsszenarien vorgestellt, um die Vorteile einer koordinierten Steuerung der Talsperren hervorzuheben. Die Entscheidungsfindung beruht auf der Definition eines multikriteriellen Optimierungsproblems und unterschiedlich gewichteter Teilziele. Für die Bewertung des Optimierungsmodells und der aus den Bewirtschaftungszielen abgeleiteten Zielfunktion werden unter anderem einheitliche Wertemaßstäbe und Gütekriterien herangezogen, um die Vergleichbarkeit der Lösungsalternativen und Modellergebnisse zu erleichtern.

Schlagerwörter: Talsperrensteuerung, Verbundbewirtschaftung, Modellbasierte prädiktive Regelung, Multikriterielle Optimierung, Entscheidungsfindung

Optimal reservoir system management is particularly challenging because of the dimension of large water systems and conflicting management objectives. Additionally, such systems require a continuous adjustment process due to fluctuating natural water supply and demand. The method presented in this study is based on Model Predictive Control (MPC) and allows an anticipatory planning of the outflows in a reservoir system with the help of an embedded optimization procedure. This process relies on prognosed framework conditions for the hydrological situation and water demand on the basis of forecast data. Against the background of real-time reservoir system management and the associated ensuring the achievement of short-term management goals, practice-relevant optimization scenarios are presented to point out the advantages of a coordinated control of the reservoirs. Decision-making is based on the definition of a multi-objective optimization problem and differently weighted subgoals. Consistent standard values and quality criteria are used to assess the optimization model and the target function derived from the management objectives as well as to facilitate comparability of alternative solutions and model results.

Keywords: reservoir operation, reservoir system management, model predictive control, multi-objective optimization, decision making

1. Einleitung

Talsperrensysteme leisten einen wichtigen Beitrag für die Daseinsvorsorge und haben allein aufgrund der wachsenden Weltbevölkerung einen großen gesellschaftlichen Nutzen. In Folge der sich verändernden Rahmenbedingungen und Anforderungen unterliegt die Bewirtschaftung von Talsperrensystemen daher einem stetigen Anpassungsprozess (WCD, 2000). Talsperren gelten als wichtige Infrastrukturanlagen und nehmen im Bereich des Nutz- und Schutzwasserbaus eine Schlüsselrolle ein. Hierzu zählen die Aufgaben Wasserversorgung und Bewässerung, Hochwasserschutz, Energieerzeugung, Abflussregulierung und Einhaltung von Mindestwasserabgaben sowie der touristische Nutzen. Die strategische Aufgabe von Speichersystemen besteht darin, einen kurz- bzw. langfristigen Ausgleich zwischen dem natürlichen Wasserdargebot und den Nutzungsanforderungen zu schaffen. Der sichere und für den jeweiligen Bestimmungszweck optimierte Betrieb von Talsperren stellt im Bewirtschaftungsmanagement eine besondere Herausforderung dar. Im Fokus steht dabei eine effektive und nachhaltige Verwendung der gegebenen Ressourcen, wobei immer die Betriebssicherheit innerhalb der physikalischen Grenzen sichergestellt werden muss. Verbund-

systeme gewährleisten unter diesen Gesichtspunkten sowohl bei kurz-, als auch bei langfristigen Zielen eine höhere Sicherheit, indem Synergieeffekte und Kompromisslösungen durch eine koordinierten Bewirtschaftungsansatz genutzt werden können (ANGHILERI et al., 2013; MARQUES & TILMANT, 2013).

Der optimale Betrieb von Talsperrensystemen stellt aufgrund ihrer großen Dimension, der zum Teil konkurrierenden Ziele sowie der Unsicherheiten in den zu modellierenden Prozessen hohe Anforderungen an das verwendete Optimierungsverfahren (LABADIE, 2004; RANI UND MOREIRA, 2009; AHMAD et al., 2014; LIN & RUTTEN, 2016). Mathematische Optimierungstechniken zielen zumeist auf die Optimierung von Betriebsregeln ab, die in der Regel eine mittel- bis langfristige Geltungsdauer haben. Im täglichen Betrieb werden dabei idealisierte und für gewöhnlich von einer saisonalen Füllstandentwicklung abhängige Wasserabgaben definiert, sodass die Bedürfnisse auf lange Sicht so gut wie möglich befriedigt werden. Kurzfristig können jedoch Nachteile für einzelne Nutzungen auftreten. Zudem zeigen Studien, wie ANAND et al. (2011) oder FICCHI et al. (2015), dass die Methode der reaktiven und dezentralen Steuerung einzelner Talsperren auf Grundlage von festen Betriebsregeln ohne Verwendung von

Zuflussprognosen die Interaktion mehrerer Talsperren in einem Verbundsystem nicht ausreichend abbilden kann. Bedingt durch die zumeist ineffiziente Bewirtschaftung des gespeicherten Wassers ist die Notwendigkeit gegeben, mit Hilfe von aktuellen Zuflussprognosen eine adaptive und koordinierte Betriebsstrategie zu entwickeln, um so die Abgaben aus den Talsperren an die variablen Randbedingungen und Ziele bedarfsgerecht anzupassen (RÖTZ & THEOBALD, 2016).

Um den Anforderungen einer komplexen und adaptiven Bewirtschaftung gerecht zu werden, haben aufgrund der fortschreitenden Entwicklung der Rechen- und Systemleistung in den letzten Jahren die Verfahren der Echtzeitsteuerung nach dem Prinzip der modellbasierten prädiktiven Regelung (*Model Predictive Control, MPC*) an Bedeutung gewonnen. Diese leistungsstarke und effiziente Methode stützt sich auf die Anwendung der simulationsbasierten Optimierung und hat sich insbesondere für komplexe Steuerungsprobleme in Verbindung mit wasserbaulichen Anlagen erwiesen (SCHWANENBERG et al., 2014; VAN LOENEN et al., 2014; RÖTZ & THEOBALD, 2016). Das Konzept von MPC kombiniert die Vorteile der Simulation sowie der mathematischen Optimierung zur Lösung eines multikriteriellen Entscheidungsproblems, welches sich aus den vielschichtigen Nutzungsanforderungen ableitet. Während die Optimierung Steuerungsalternativen für die Wasserabgaben aus den Talsperren identifiziert, ist es Aufgabe der Simulation in einem regelbaren Speichersystem, die Dynamik der Speicher- und Transportprozesse und somit die Gesamtreaktion des Verbundsystem adäquat abzubilden. Unter diesen Gesichtspunkten können im Rahmen der täglichen Entscheidungsfindung Handlungsalternativen ermittelt werden, um vorausschauend eine koordinierte Abgabestrategie unter Einhaltung der nutzungsabhängigen Zielvorgaben abzuleiten.

Ziel der Studie ist es, die Vorteile einer operationellen Verbundbewirtschaftung mit dem Ansatz der modellbasierten Mehrzieloptimierung unter Anwendung von MPC darzulegen. Die Untersuchungen basieren auf einem generalisierbaren Modellkonzept, welches durch eine ausreichende Flexibilität gekennzeichnet ist und aus diesem Grund auf unterschiedlich strukturierte Talsperrensysteme übertragbar ist. Ausgehend von einem generellen Konzept zur Entwicklung eines Entscheidungsmodells werden in einem akademischen Anwendungsfall für ein betrachtetes Verbundsystem praxisrelevante Anwendungsbeispiele bzw. Optimierungsszenarien vorgestellt. Der Fokus liegt hier auf der mathematischen Abstraktion der verbal formulierten Bewirtschaftungsziele in Form einer Zielfunktion sowie der Prozessmodellierung mit Blick auf die Leistungsfähigkeit des Verfahrens. Durch die wiederholte Anwendung des Optimierungsmodells werden Einflussgrößen auf die Optimierung bewertet, um auf dieser Grundlage eine robuste Modelllösung zu identifizieren. Hierbei besteht die Motivation darin, anhand von einheitlichen Wertemaßstäben ein allgemein verständliches Vorgehen zur Bewertung eines multikriteriellen Planungsproblems darzulegen.

2. Grundlagen

2.1 Modellbasierte prädiktive Regelung

Das Konzept der modellbasierten prädiktiven Regelung (MPC) ist ein modernes Regelungsverfahren für die off- bzw. online Steuerung von wasserwirtschaftlichen Prozessabläufen unter Berücksichtigung einer Vielzahl an Randbedingungen sowie physikalischen Einschränkungen (VAN OVERLOOP, 2006). Das Prinzip

von MPC zeichnet sich dadurch aus, Echtzeit-Informationen und Abflussprognosen zu nutzen, um im laufenden Betrieb mit Hilfe der Simulation das zukünftige Verhalten eines wasserwirtschaftlichen Systems abzubilden. Insbesondere bei großräumigen Gewässersystemen kann dadurch eine adaptive und dynamische Bewirtschaftung realisiert werden. Die vorausschauende Arbeitsweise, die frei konfigurierbare Anzahl von Stell- und Regelgrößen sowie der gewichtete Ansatz der Mehrzieloptimierung ermöglichen es, die systemweite Leistung im Rahmen einer koordinierten Verbundbewirtschaftung zu verbessern (NEGENBORN et al., 2009).

Die Grundlage für die MPC-Regelung ist die Nutzung eines zeitdiskreten, dynamischen Prozessmodells, um für einen definierten Zeitraum das Verhalten relevanter Zustandsgrößen in einem zu regelnden System vorherzusagen (vgl. Gl. 1).

$$x^k = f(x^{k-1}, u^k, d^k) \quad (\text{Gl. 1})$$

Hierin bezeichnet x^k den Vektor des Systemzustandes, u^k den Vektor der Stellgrößen bzw. der Entscheidungsvariablen des Optimierungsproblems und d^k den Vektor der Randbedingungen bzw. der Störgrößen, die von außen auf das betrachtete System einwirken und bspw. prognostizierte Zuflüsse zum Modellsystem darstellen. Der Index des prognostizierten Zeitschrittes $k = 1, \dots, T$ schreibt den endlichen Vorhersagehorizont. Die Länge von T entspricht in der Regel dem Zeitfenster der verfügbaren Vorhersagedaten, deren Qualität ein wesentliches Kriterium für die Anwendung von MPC darstellt.

Während der MPC-Regelung wird ausgehend von dem aktuellen Systemzustand $x^{(k-1)}$ durch die Vorhersage (Prädiktion) die entsprechende Wirkung einer Stellgrößenfolge auf die Ziel- bzw. Regelgrößen des Systems bestimmt. Aufgabe der Optimierung ist es dabei, die im gesamten Vorhersagezeitraum ermittelte Abweichung zwischen Regelgröße und einer Zielvorgabe unter einer zulässigen Variation der Stellgrößen zu minimieren. In der praktischen Anwendung wird lediglich das Ergebnis des ersten Stellschrittes an das System übergeben. Mit dem Weiterverschieben des Zeithorizontes um $k + 1$ wird dann die gesamte Prozedur bestehend aus Prädiktion und Optimierung wiederholt, indem der neue Systemzustand als Anfangsbedingung sowie aktualisierte Vorhersagedaten als neue Randbedingung übernommen werden. Durch dieses Prinzip des zurückschreitenden Zeithorizontes ist der Anwender im operationellen Talsperrenbetrieb in der Lage kontinuierlich auf eine veränderte Abflussvorhersage zu reagieren und Unsicherheiten in der Vorhersage zu berücksichtigen.

Das Prozessmodell muss in der Lage sein, das Systemverhalten für die ausgewählte Steuerungsstrategie im Detail zu simulieren und spezielle hydraulische Effekte über das gesamte Abflussspektrum darzustellen. Neben einer möglichst exakten Talsperrenbilanzierung müssen für eine hohe Modellgenauigkeit insbesondere die zeitlichen Zusammenhänge zwischen Steuerungseingriff und zugehöriger Auswirkung auf das Fließverhalten und den entsprechenden Zustandsgrößen erfasst werden. Dabei sind die Laufzeiten der Talsperrenabgaben (Translation) und die Form der Welle (infolge Retention) für flussabwärts gelegene Gerinnestationen möglichst realitätsnah abzubilden. Zugleich ist eine zuverlässige Anwendung des Modellsystems mit stabilen Simulationen und das Kriterium einer hohen Rechenperformance (kurze Laufzeit)

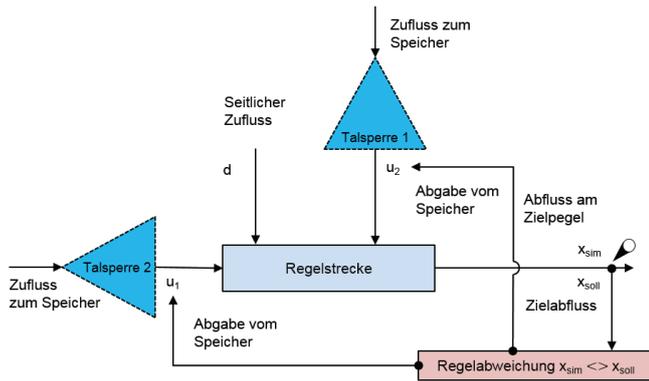


Abbildung 1
 Konzept der Regelung am Beispiel einer Abflussregulierung für ein Verbundsystem mit zwei Talsperren.
Control concept using the example of a discharge control for a reservoir system with two reservoirs.

zu gewährleisten (RÖTZ, 2016). Abbildung 1 zeigt hierzu das Beispiel einer Abflussregulierung für einen Zielpegel im Unterlauf von zwei parallel angeordneten Talsperren. Aufgabe der Optimierung ist es, innerhalb eines geschlossenen Regelkreises die Talsperrenabgaben u_1 und u_2 über eine endliche Anzahl von zukünftigen Stellbewegungen so zu bestimmen, dass an einem Zielpegel die Regelabweichung zwischen dem Simulationsergebnis x_{sim} und einem definierten Zielabfluss x_{soll} im gesamten Vorhersagezeitraum minimal wird.

Hierzu wird das Optimierungsproblem in eine Ziel- bzw. Strafkostenfunktion J (cost function) überführt, um die Regelungsgüte in Form einer quadratischen Abstandsfunktion für das vorgegebene Ziel zu quantifizieren (vgl. Gl. 2). Der berechnete Zielfunktionswert stellt dabei das Optimalitätskriterium für den Grad der Zielerreichung dar.

$$\min \sum_{k=1}^T J(x^k, u_j^k) = \min \sum_{k=1}^T [x_{sim}^k(u_j^k) - x_{soll}^k]^2 \quad (Gl. 2)$$

Das Optimierungsproblem besteht aus j Entscheidungsvariablen, die sich aus der Anzahl der Talsperren und Zeitschritte ergibt. Eine Strafkostenfunktion für die Regelgröße x wird im Optimierungsmodell als weiche Nebenbedingungen (*soft constraints*) behandelt. Somit ist eine Verletzung der Nebenbedingung bei der Generierung einer Lösung vorübergehend erlaubt, jedoch entstehen dabei Kosten, die im weiteren Verlauf bei der Generierung neuer Lösungen minimiert werden müssen. Physikalische Zwänge des Systems, wie die Leistungsfähigkeit der Ablassorgane, werden im Gegensatz dazu als harte Nebenbedingungen (*hard constraints*) aufgefasst und grenzen den Lösungs- bzw. Entscheidungsraum des Optimierungsproblems ein. Der Optimierungsalgorithmus sorgt durch seine vorausschauende Arbeitsweise dafür, dass alle Nebenbedingungen respektiert werden und dass auf zukünftige Abweichungen zu den Zielvorgaben sowie auf vorhergesagte Verletzung der Grenzwerte reagiert wird. In einem iterativen Lösungsprozess werden dazu verschiedene Steuerstrategien „simuliert“, bis der Algorithmus sich nah genug (Abschätzung auf Grundlage von verschiedenen Abbruchkriterien) an ein Minimum annähert (Abb. 2).

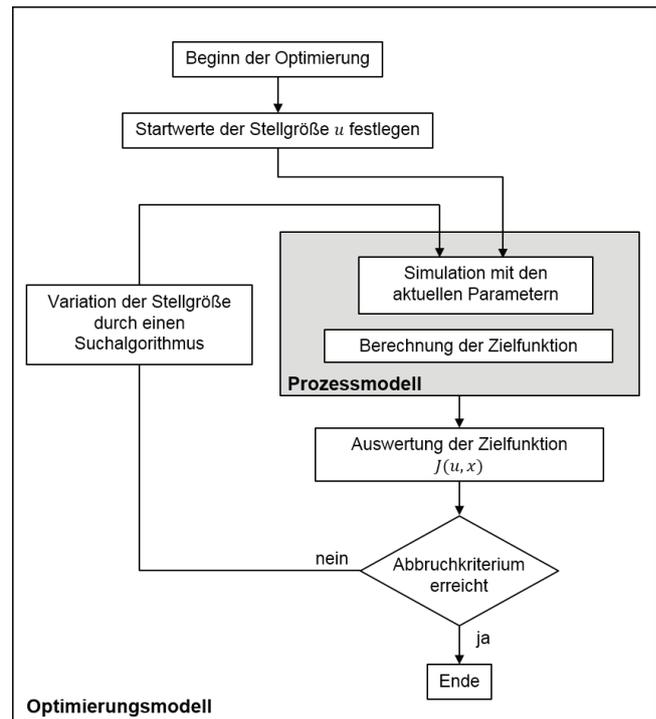


Abbildung 2
 Schematischer Ablauf der Optimierung.
Schematic sequence of the optimization process.

Eine echtzeitfähige Implementierung von MPC, bei der es besonders auf niedrige Rechenzeiten ankommt, kann mit dem vorzeitigen Abbruch der Optimierung beispielsweise durch das Erreichen einer maximalen Anzahl an Iterationen ermöglicht werden (GRAICHEN, 2015). Die ermittelte Stellgrößenfolge ist dann in der Regel eine (numerisch) suboptimale Lösung des betrachteten Optimierungsproblems. Nach Ablauf der Optimierung hat demzufolge der Anwender des Modells im Rahmen der Entscheidungsfindung eine Bewertung der Ergebnisse vorzunehmen. Hierzu dienen in erster Linie die ermittelte Stellgrößenfolge und die simulierten Zielgrößen. Des Weiteren eignen sich dafür auch Qualitätsindikatoren (z. B. Gütekriterien), um insbesondere im Fall der Mehrzieloptimierung die Vergleichbarkeit der Lösungsalternativen zu erleichtern.

2.2 Methoden der Mehrzieloptimierung

Bei der Lösung realer Optimierungsprobleme ist es oftmals erforderlich gleichzeitig mehrere Ziele zu berücksichtigen. Gegenstand der Mehrzieloptimierung ist daher die rationale Entscheidungsfindung bei multikriteriellen Planungsproblemen, wie sie bei der Bewirtschaftung von Mehrzweckspeicher-Verbundsystemen zwangsläufig auftreten. Konkurrierende Ziele können räumlich verteilt vorliegen, indem die Einhaltung von Stauzielvorgaben an den Talsperren und gleichzeitig Einhaltung von Abflussvorgaben innerhalb der Gewässerstrecke anzustreben ist. Im Zusammenhang mit der multikriteriellen Optimierung wird auch der Begriff der Pareto-Optimierung verwendet (DOMSCHKE et al., 2015). Das Konzept basiert darauf mehrere Zielfunktionen gleichzeitig zu optimieren. Hierbei ist in der Regel das Problem gegeben, dass sich die Bewirtschaftungsziele gegenseitig widersprechen und daher einen Zielkonflikt beschreiben. Dies hat zur Konsequenz, dass für jede Zielfunktion eine individuelle Optimallösung existiert, die aber hinsichtlich aller Zielfunktionen nicht in

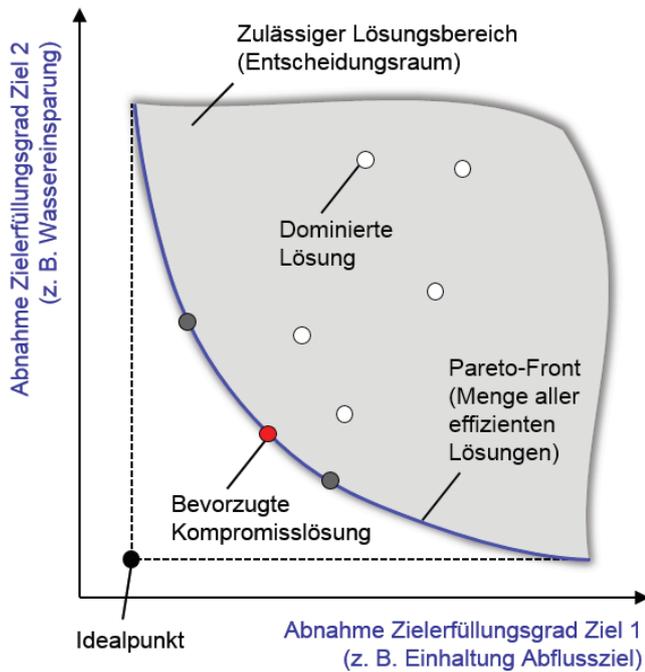


Abbildung 3
Prinzip der Pareto-Optimierung am Beispiel eines Minimierungsproblems.
The Pareto principle using the example of a minimization problem.

einem Idealpunkt zusammenfallen. Die Lösung eines Zielkonfliktes erfordert daher immer eine Auswahl bzw. Eingrenzung mehrerer spezieller Lösungen durch den Bearbeiter eines Problems.

Abbildung 3 zeigt hierzu das Prinzip der Pareto-Optimierung am Beispiel eines Minimierungsproblems, welches sich einerseits aus der Wassereinsparung in den Talsperren und zum anderen aus der Einhaltung eines Abflussziels in der unterstrom gelegenen Fließstrecken zusammensetzt. Durch den erforderlichen Zuschuss aus den Talsperren ist zwangsläufig ein Zielkonflikt gegeben. Das Ergebnis ist eine Menge an Kompromisslösungen, die durch den Entscheidungsraum begrenzt wird. Der Teil der zulässigen Lösungsalternativen, die im Sinne der Zielerreichung von Interesse sind, beschreiben die Pareto-Front und werden als effiziente Lösungen bezeichnet. Alle übrigen Punkte im Zielraum bilden die Gruppe der dominierten oder nicht-effizienten Lösungen. Ein Entscheidungsträger muss nun für sich definieren, welche Kompromisse die für ihn besten Lösungen darstellen. Die endgültige Auswahl einer bevorzugten Kompromisslösung ist somit von den Zielpreferenzen des Entscheidungsträgers abhängig und bedarf daher immer einer Entscheidungsfindung (MUSCHALLA, 2006).

Ein weitverbreiteter Ansatz in der Mehrzieloptimierung zur Bestimmung von Lösungsalternativen ist die gewichtete Addition von Teilzielen (Weighting Method). Durch die Kombination einzelner gewichteter Strafkosten entsteht wiederum ein eindimensionales Optimierungsproblem (vgl. Gl. 3).

$$\min \sum_{k=1}^T J(x_i^k, u_j^k) = \min \sum_{i=1}^n \left(\sum_{k=1}^T \omega_i^k \cdot [x_{i,sim}^k(u_j^k) - x_{i,soll}^k]^p \right) \quad (Gl. 3)$$

In diesem Fall kennzeichnet j wiederum die Anzahl der Entscheidungsvariablen, und n die Anzahl unterschiedlicher Bewirt-

schaffungsziele. Dabei wird jedes Teilziel mit unterschiedlichen Zielgewichten ω_i versehen, um in dem Optimierungsmodell eine Priorisierung der angestrebten Ziele zum Ausdruck zu bringen. Die Definition von Gewichtungen kann zu unterschiedlichen Zeitpunkten erfolgen, so dass im Allgemeinen zwischen *a-priori*, *a-posteriori* und *interaktiven* Ansätzen der Entscheidungsfindung zu unterscheiden ist (BRANKE et al., 2008).

Die Schwierigkeit bei multikriteriellen Planungsproblemen ist letztendlich die Festlegung geeigneter Wichtungsfaktoren, da die unterschiedliche Dimension der variablen Zustandsgrößen (Volumina, Abflüsse, etc.) nicht immer sinnvoll auf einer Skala abgebildet werden können. Letztendlich ist eine Optimierung im operationellen Talsperrenbetrieb dann sinnvoll, wenn das Ergebnis zu eindeutigen und in der Praxis umsetzbaren Abgabebestimmungen und Handlungsanweisungen führt. Insofern ist es angemessen, den Bereich effizienter Kompromisslösungen durch eine a-priori Parametrisierung einzugrenzen, um so mit einer klaren Zielvorstellung die Anzahl an Optimierungsläufen zu reduzieren und dadurch den Rechenaufwand möglichst gering zu halten. Zur Lösung von Zielkonflikten können dabei die Ansätze einer lexikographischen Ordnung und der Zieldominanz verwendet werden, die auf einer hierarchischen Reihenfolge der verfolgten Ziele mit abnehmender Wichtigkeit basiert (DOMSCHKE et al., 2015). Die bevorzugte Kompromisslösung ist dann durch einen hohen Zielerreichungsgrad bezüglich des Primärziels gekennzeichnet, wobei gleichzeitig die Nebenziele ein definiertes Anspruchsniveau zu erfüllen haben.

Das Vorgehen einer interaktiven Entscheidungsfindung zeichnet sich dadurch aus, dass der Entscheidungsträger seine Zielvorstellungen in den Entscheidungsprozess mit einbringt und sich bei der Suche einer bevorzugten Kompromisslösung durch eine gezielte Variation von Wichtungsfaktoren selbständig Lösungsalternativen erarbeitet. Des Weiteren kann der Entscheider mit der Anpassung von Parametern im ereignisbezogenen Betrieb kurzfristig auf eine aktuelle Bedarfssituation reagieren und Prioritäten verändern. Allerdings erfordert die interaktive Entscheidungsfindung problemspezifisches Vorwissen des Entscheidungsträgers. Ohne Erfahrungswerte, welche Auswirkungen unterschiedliche Gewichtungen in einem Verbundsystem auf die Optimierung der Talsperrenabgabe haben, kann das Vorgehen bei komplexen Mehrzielproblemen und unübersichtlichen Entscheidungssituationen zu unrealistischen Lösungsalternativen führen. Ausgangspunkt sollte daher eine bei der Entwicklung eines Optimierungsmodells erarbeitete a-priori Festlegung von Wichtungsfaktoren sein, mit der eine erste akzeptable Modelllösung erzielt werden kann.

2.3 Konzept zur Erstellung eines Entscheidungsmodells

Mathematische Simulations- und Optimierungsverfahren, die bei wasserwirtschaftliche Entscheidungsproblemen eingesetzt werden können, zählen im Allgemeinen zu den Methoden der Systemtheorie (*Operations Research*, DOMSCHKE et al., 2015). Die Herausforderung besteht darin, die betrachtete Realität zu abstrahieren und diese in einem sogenannten Entscheidungsmodell (z. B. zur Bewirtschaftung von Talsperren) mit entsprechenden Modelltechniken adäquat abzubilden. Das Vorgehen zur Entwicklung eines solchen Modells kann gemäß Abbildung 4 in sechs Bearbeitungsschritte zusammengefasst werden. Ausgangspunkt für die Entwicklung eines Bewirtschaftungsmodells ist die Problemidentifikation und die verbale Formulierung von

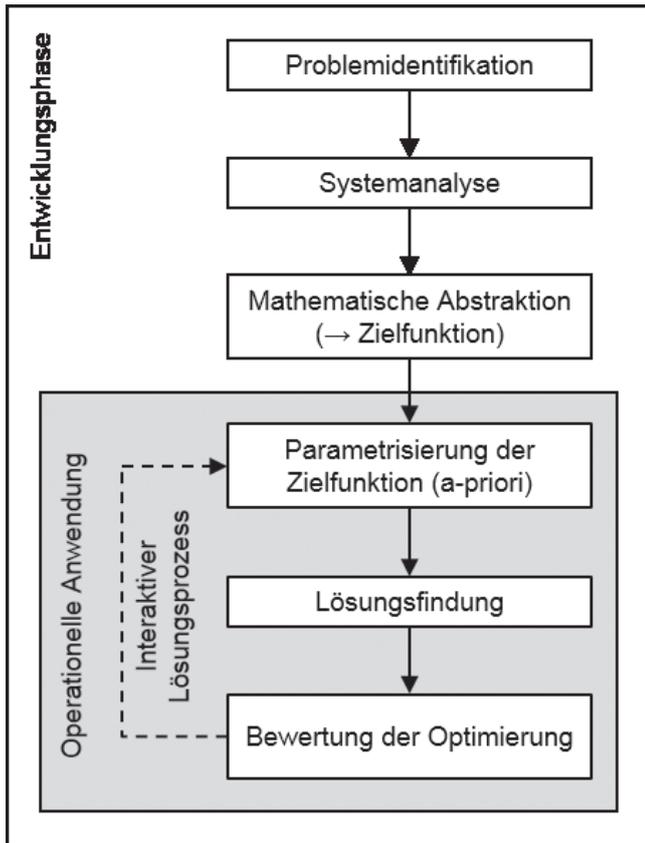


Abbildung 4
Konzept zur Erstellung eines Entscheidungsmodells.
Concept for developing a decision-making model.

Bewirtschaftungszielen sowie eine umfassende Systemanalyse, mit der die Struktur eines Talsperrensystems sowie die Abhängigkeiten zwischen relevanten Systemkomponenten untersucht werden müssen.

Zentrales Element der Entwicklungsphase bildet die mathematische Abstraktion der formulierten Bewirtschaftungsziele in einer Zielfunktion. Hierbei ist festzulegen, welche Systemparameter, z. B. innerhalb eines Speicher- und Fließgewässermodells, in Verbindung mit den optimierenden Talsperrenabgaben stehen und Abgaben beeinflussen oder auslösen. Auf dieser Grundlage ist eine vorläufige (a-priori) Parametrisierung der Zielfunktion und eine Priorisierung der Teilziele durchzuführen. Diese erste akzeptable Modelllösung dient in der Regel als Ausgangspunkt für die Modifizierung der Zielfunktion und dessen Parametrisierung. Dieser Prozess kann sowohl während der Entwicklung eines Bewirtschaftungsmodells, als auch während der operationellen Anwendung bei der täglichen Entscheidungsfindung zur Festlegung einer Abgabestrategie erfolgen. Wesentlicher Bestandteil ist dabei die Bewertung der Optimierung zum Beispiel mit Hilfe von Gütekriterien.

3. Modellkonzeption

3.1 Simulationsverfahren

Die programmtechnische Umsetzung des Verbundsystems in einem Prozessmodell erfolgte mit der Simulationssoftware RTC-Tools (*Real-Time-Control Tools*). Das Programm ist ein

Open-Source-Softwarepaket zur Simulation, Steuerung und Optimierung wasserbaulicher Anlagen und ist für die Abbildung großskaliger wasserwirtschaftlicher Systeme geeignet (SCHWANENBERG & BECKER, 2017). Der Aufbau des Prozessmodells basiert auf einer modularen Funktionsbibliothek, in dem physikalisch-begründete sowie konzeptionelle Ansätze zur Speichermodellierung und zur Beschreibung der Wellentransformation kombiniert werden können. In der Regel wird RTC-Tools als Software-Framework durch die Verknüpfung mit externen Softwarepaketen wie SOBEK oder Delft-FEWS angewendet. Zur mathematischen Optimierung ist in RTC-Tools der Optimierungsalgorithmus IPOPT eingebettet, der zur Lösung nichtlinearer Probleme das Innere-Punkte-Verfahren verwendet (WÄCHTER & BIEGLER, 2006).

3.2 Aufbau des Talsperrensystems

Das Systemmodell des betrachteten Talsperren-Verbundsystems ist im Anwendungsbeispiel durch zwei parallel angeordnete Speicherbecken im Oberlauf des Modellgebietes gekennzeichnet, die den Abfluss in der unterstrom gelegenen Gewässerstrecke regulieren (Abb. 5). Die Abgabe ist unter normalen Betriebsverhältnissen durch die angegebenen oberen und unteren Grenzwerte reglementiert. Insofern ist unter anderem die ökologische Mindestabgabe von $Q_{min} = 6 \text{ m}^3/\text{s}$ sicherzustellen. Die maximale Abflusskapazität steigt bei Überschreitung des Vollstauniveaus durch die Beaufschlagung der Hochwasserentlastung an.

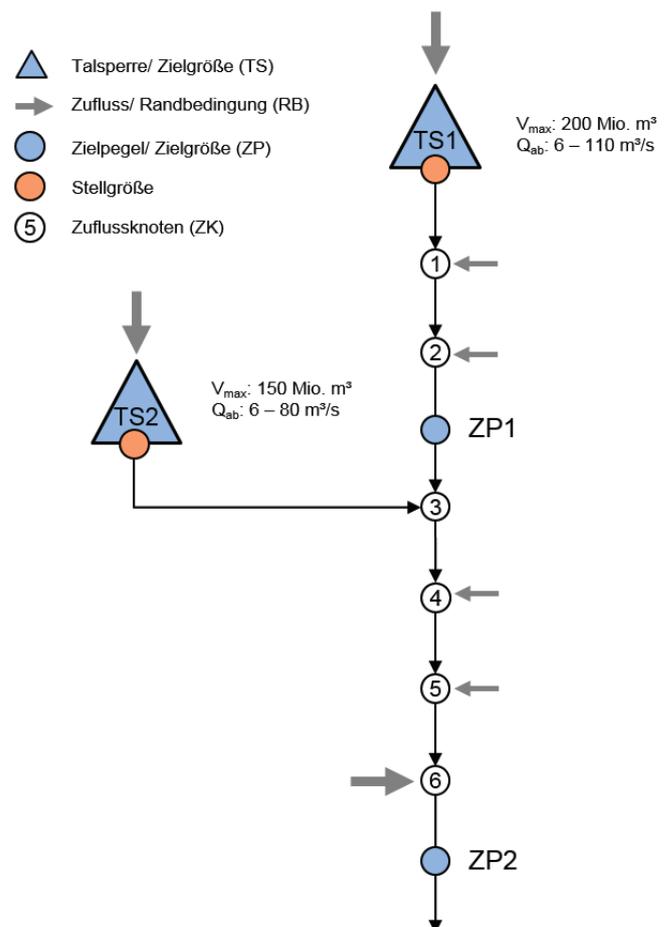


Abbildung 5
Prinzipische Skizze des Talsperren-Verbundsystems.
Schematic diagram of the reservoir system.

Neben den Talsperren (TS) besteht das Speichersystem aus dem Gewässernetz unterstrom der Talsperren.

Die räumliche Untergliederung durch Knotenelemente in einzelnen Flussabschnitten macht es möglich, laterale Zuflüsse aus Zwischeneinzugsgebieten an den Zuflussknoten (ZK) in das Bewirtschaftungskonzept als Stör- bzw. Belastungsgrößen mit einzubeziehen. Das Modellgebiet umfasst neben den von TS1 und TS2 regulierten Zuläufen fünf seitliche Zuflüsse, welche die Abflussverhältnisse im Hauptgewässer nur geringfügig verändern. Lediglich der unterste Zufluss (ZK6) ist durch eine höhere Wasserführung gekennzeichnet. Innerhalb der Gewässerstrecke werden zwei Kontroll- bzw. Zielpegel (ZP) betrachtet, an denen individuelle Abflussvorgaben im Sinne einer Abflussregulierung eingehalten werden sollen. Die Fließlängen zwischen TS1 und ZP1 beträgt ca. 37 km und zu ZP2 ca. 90 km. Die Abgabe aus TS2 erreicht nach 66 km ZP2, wobei nach 20 km eine Überlagerung der abgegebenen Wellen aus TS1 und TS2 stattfindet.

3.3 Speicher- und Fließgewässermodellierung

Die Berechnung der Füllstandsentwicklung für jeden j -ten Speicher erfolgt anhand einer vereinfachten Speichergleichung (vgl. Gl. 4). Der Stauraum wird in diesem Zusammenhang mit Hilfe einer Speicherkennlinie parametrisiert, um zu dem Füllvolumen auch den korrespondierenden Talsperrenwasserstand zu ermitteln.

$$V_j^{k+1} = V_j^k + \Delta t(Q_{zu,j}^{k+1} - Q_{opt,j}^{k+1} - Q_{HWE,j}^{k+1}) \quad (\text{Gl. 4})$$

Der gesuchte Staurauminhalt V_j ergibt sich aus dem Volumen des aktuellen Zeitschrittes, der Differenz aus Zufluss $Q_{zu,j}$ und der Talsperrenabgabe, die sich aus einem kontrollierbaren Abgabeanteil $Q_{opt,j}$ und einem unkontrollierten Überfall $Q_{HWE,j}$ zusammensetzt. Die kontrollierte Abgabe ist als regelbare Stellgröße Bestandteil der Optimierung. Die Gesamtabgabe wird letztendlich als interne Randbedingung an das Fließgewässermodell übergeben.

Das Fließgewässermodell wird zur eindimensionalen hydrodynamischen Berechnung des Wellenablaufs entlang der Gewässerstrecke verwendet. Um das Translations- und Retentionsverhalten abzubilden, wird eine räumliche Unterteilung der Gewässerstrecke in einem kaskadenartigen System bestehend aus Berechnungsknoten (Nodes) und Abschnittselementen (Branches) vorgenommen. Letztere stellen die hydraulische Verbindung zwischen zwei Knotenpunkten dar, an denen der Abfluss mit Hilfe der Kontinuitätsgleichung und dem diffusiven Wellenansatz berechnet wird (vgl. Gl. 5). Letztere ist eine Vereinfachung der hydrodynamischen Bewegungsgleichung (Saint-Venant-Gleichung) unter Vernachlässigung der konvektiven und lokalen Beschleunigungsterme.

$$g \cdot A \frac{\partial h}{\partial x} + g \cdot A(I_E - I_0) = 0 \quad \left| \quad \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (\text{Gl. 5})\right.$$

Die Speicherwirkung wird an den Berechnungsknoten abgebildet, die das abfließende Wasservolumen unter Berücksichtigung der Kontinuitätsgleichung bilanzieren. Die Parametrisierung des Abflussraumes eines Gewässerabschnittes erfolgt anhand eines charakteristischen Querprofils. Die Gewässer- und Vorlandrauheit ergeben sich dabei aus einem Reibungsansatz nach *de Chézy*. Schlussendlich wird durch den vereinfachten Ansatz einer diffusiven Welle der numerische Rechenaufwand reduziert, dennoch werden die wesentlichen Speicher- und Transportvorgänge über das gesamte Abflussspektrum abgebildet (RÖTZ, 2016;

MONTERO et al., 2013). Somit erfüllt das Verfahren eine wesentliche Anforderung des angewandten Regelungskonzeptes und eignet sich für die Anwendung bei der operationellen Entscheidungsfindung.

3.4 Bewertung der Optimierung

Ein multikriterielles Minimierungsproblem umfasst die mathematische Abstraktion der verbal formulierten Bewirtschaftungsziele in einer Zielfunktion sowie die Einhaltung der Restriktionen, die das System in technischer und hydrologischer Hinsicht begrenzen. Mit der Definition einer Zielfunktion ist daher das Erstellen einer funktionalen Beziehung gemeint, die festlegt, welche Systemvariablen des Speicher- und Fließgewässermodells in Verbindung mit den zu optimierenden Talsperrenabgaben stehen und Abgaben beeinflussen oder auslösen. Auf dieser Grundlage wird eine vorläufige (a-priori) Festlegung der Wichtungsfaktoren durchgeführt, wobei im Vorfeld eine Rangfolge der Teilziele mit abnehmender Wichtigkeit von Vorteil ist. Die Güte (Stabilität) einer gefundenen Lösung wird mit Hilfe einer Sensitivitätsanalyse untersucht, indem die Empfindlichkeit der Kompromisslösung gegenüber der Veränderung der Parametereinstellung bewertet wird.

Der Zielfunktionswert gilt als Optimierungskriterium für den Grad der Erreichung der einzelnen Bewirtschaftungsziele. Allerdings ist das Optimierungsergebnis anhand des intern berechneten Gütefunktional J für den Entscheidungsträger nur schwer nachvollziehbar. Daher werden im Zusammenhang mit der Sensitivitätsanalyse zur objektiven Beurteilung der Speicherbewirtschaftung neben der visuellen Analyse einheitliche Bewertungskriterien und Gütemaße verglichen. Als Maß für die Übereinstimmung zwischen simulierter Zielgröße x_{sim} und definiertem Sollwert x_{soll} wird im Wesentlichen als absolutes Gütemaß die Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers (RMSE, vgl. Gl. 6) betrachtet. Zur generellen Einschätzung des Modellverhaltens dient zudem die Effizienz nach Nash & Sutcliffe (NSE, vgl. Gl. 7), welche eine dimensionslose Bewertung der Übereinstimmung abgibt.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{k} \cdot \sum_{k=1}^T (x_{soll}^k - x_{sim}^k)^2} \quad [0, \infty] \quad (\text{Gl. 6})$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{k=1}^T (x_{soll}^k - x_{sim}^k)^2}{\sum_{k=1}^T (x_{soll}^k - \bar{x}_{soll})^2} \quad [-\infty, 1] \quad (\text{Gl. 7})$$

Für den praktischen Einsatz des Modellkonzeptes ist ebenso eine hohe Rechenperformance bzw. geringe Rechenzeit (CPU-Zeit) von Bedeutung, welches von der Effizienz des Simulationsverfahrens, aber auch vom Konvergenzverhalten bei der Lösung des Optimierungsproblems und von der Anzahl der Iterationen abhängig ist. Letztendlich helfen weitere Kenngrößen (z. B. kumulierte Abgabemenge) die Vergleichbarkeit der Optimierungsergebnisse zu erleichtern und durch den wiederholten Modellierungs- und Lösungsprozess das Potential des Optimierungsmodells auszunutzen.

4. Anwendungsbeispiele und Ergebnisse

4.1 Anwendungsbeispiel „Abflussregulierung“

Ist die Gewässerstrecke Teil des Bewirtschaftungskonzeptes, sind an den ausgewählten Pegeln im Unterlauf der Talsperren definierte Abflussvorgaben einzuhalten. Im Allgemeinen bedeutet

das, dass Abgaben aus den Talsperren erhöht oder reduziert werden. Im Falle eines Abflussdefizits ist folglich eine Niedrigwasseraufhöhung durch den Zuschuss aus den Talsperren erforderlich, um beispielsweise konstante Schifffahrtsverhältnisse im Unterlauf der Talsperren zu gewährleisten. Auch für die kurzfristige Entnahme von Brauchwasser aus dem Fluss, bspw. zu Bewässerungszwecken, ist eine Abflussregulierung erforderlich.

Vor diesem Hintergrund beinhaltet das Anwendungsbeispiel der Abflussregulierung die Einhaltung definierter Abflussvorgaben an den betrachteten Zielpegeln. Nach dem sowohl am oberen ZP1 als auch am unteren ZP2 der aktuelle Abfluss vorerst gehalten werden soll, ist in den kommenden Tagen für eine Dauer von 48 Stunden ein erhöhter Wasserbedarf von $Q_{WS,ZP1} = 45 \text{ m}^3/\text{s}$ bzw. $Q_{WS,ZP2} = 80 \text{ m}^3/\text{s}$ einzuhalten. Im Anschluss daran ist wieder eine Absenkung auf das Ausgangsniveau anzustreben. Die angewandte Zielfunktion setzt sich für diesen Bewirtschaftungsfall gemäß Gleichung 8 aus vier verschiedenen Teilzielen zusammen.

$$J = \min \left(\begin{aligned} & \sum_{k=1}^T \omega_1^{k+} \cdot |Q_{ZP1}^k - Q_{soll,ZP1}^k|^2 \quad \text{wenn } Q_{ZP1}^k > Q_{soll,ZP1}^k \\ & + \sum_{k=1}^T \omega_2^{k-} \cdot |Q_{ZP1}^k - Q_{soll,ZP1}^k|^2 \quad \text{wenn } Q_{ZP1}^k < Q_{soll,ZP1}^k \\ & + \sum_{k=1}^T \omega_3^{k+} \cdot |Q_{ZP2}^k - Q_{soll,ZP2}^k|^2 \quad \text{wenn } Q_{ZP2}^k > Q_{soll,ZP2}^k \\ & + \sum_{k=1}^T \omega_4^{k-} \cdot |Q_{ZP2}^k - Q_{soll,ZP2}^k|^2 \quad \text{wenn } Q_{ZP2}^k < Q_{soll,ZP2}^k \end{aligned} \right) \quad (\text{Gl. 8})$$

Dabei wird eine Überschreitung der Sollvorgabe mit ω_i^+ und eine Unterschreitung mit ω_i^- durch unterschiedliche Bestrafungsterme gewichtet. Das Primärziel der Abgabenregelung ist sowohl am ZP1 als auch am ZP2 die Einhaltung der geforderten Wellenscheitel (WS). In diesem Zeitraum wird mit den zeitabhängigen Faktoren $\omega_{i,WS}^{k-} = 10.000$ und $\omega_{i,WS}^{k+} = 10.000$ eine überproportional hohe Zielgewichtung (Zieldominanz) festgelegt, so dass der gewünschte Abfluss im Bereich des Wellenscheitels optimal eingehalten wird. Das vom Nutzer vorgegebene Abflussziel vor und nach der Aufhöhung ist dagegen von geringerer Priorität und

dient der Optimierung lediglich als Orientierungswert, um im Zusammenspiel mit einer geringeren Wichtung ω_1^{k+} bzw. $\omega_2^{k-} = 100$, $\omega_3^{k+} = 50$ sowie $\omega_4^{k-} = 100$ eine willkürliche Abgabenregelung zu vermeiden. Die Wahl der Wichtungsfaktoren basiert dabei auf einem iterativen Lösungsprozess und Bewertung von Gütekriterien bis die Variation der Wichtung auch im hohen Wertebereich keine signifikante Änderung des Ergebnisses bewirkt.

Das Ergebnis der Verbundbewirtschaftung zeigt Abbildung 6. Die linke Darstellung beinhaltet dabei die Steuerungssequenzen der optimierten Talsperrenabgaben und das daraus hervorgehende kumulierte Abgabevolumen. Im rechten Bild ist die Systemreaktion an den betrachteten Zielpegeln zusammen mit den jeweiligen Zielvorgaben dargestellt. Der Zufluss zum Modell oberhalb des zweiten Kontrollpegels (ZK6, Abb. 6) zeigt zudem, dass in den nächsten Stunden keine Abflusserhöhung aus dem seitlichen Einzugsgebiet zu erwarten ist. Die Simulation basiert auf einem Steuerungsintervall von 10 Stunden. Die Bewirtschaftungsstrategie der Talsperren für den Vorhersagezeitraum von 160 Stunden wird demzufolge in 16 Stellschritte unterteilt. Zum aktuellen Zeitpunkt T_0 sind die Talsperren im Initialzustand annähernd zur Hälfte mit Wasser gefüllt, so dass keine Kapazitätsbeschränkungen zu erwarten sind. Im Ergebnis werden die Zielvorgaben im Bereich des Wellenscheitels sehr gut wiedergeben.

Die Einhaltung der priorisierten Bewirtschaftungsziele ist das Resultat einer hohen Wichtung, wobei sich Werte von $RMSE_{WS,ZP1} = 0,2 \text{ m}^3/\text{s}$ und $RMSE_{WS,ZP2} = 0,4 \text{ m}^3/\text{s}$ ergeben. Auch der geforderte Eintrittszeitpunkt der Wellen wird durch die Interaktion der optimierten Talsperrenabgaben sehr gut abgebildet. In der Zeit vor und nach der Welle wird durch die geringe Wichtung am ZP1 bewusst eine Unterschreitung in Kauf genommen, um so auf eine Reduzierung der Abgabemengen im Sinne der Wasserersparnis hinzuwirken. Dagegen zeugt der NSE als Gütemaß, welcher die Einhaltung der Zielvorgaben über die gesamte Vorhersage bewertet. Ein Wert von $NSE_{ZP1} = 0,71$ kennzeichnet hierbei einer akzeptablen Grad der Zielerreichung. Die geforderten Abflüsse am ZP1 führen jedoch dazu, dass die Zielvorgabe am ZP2 vor

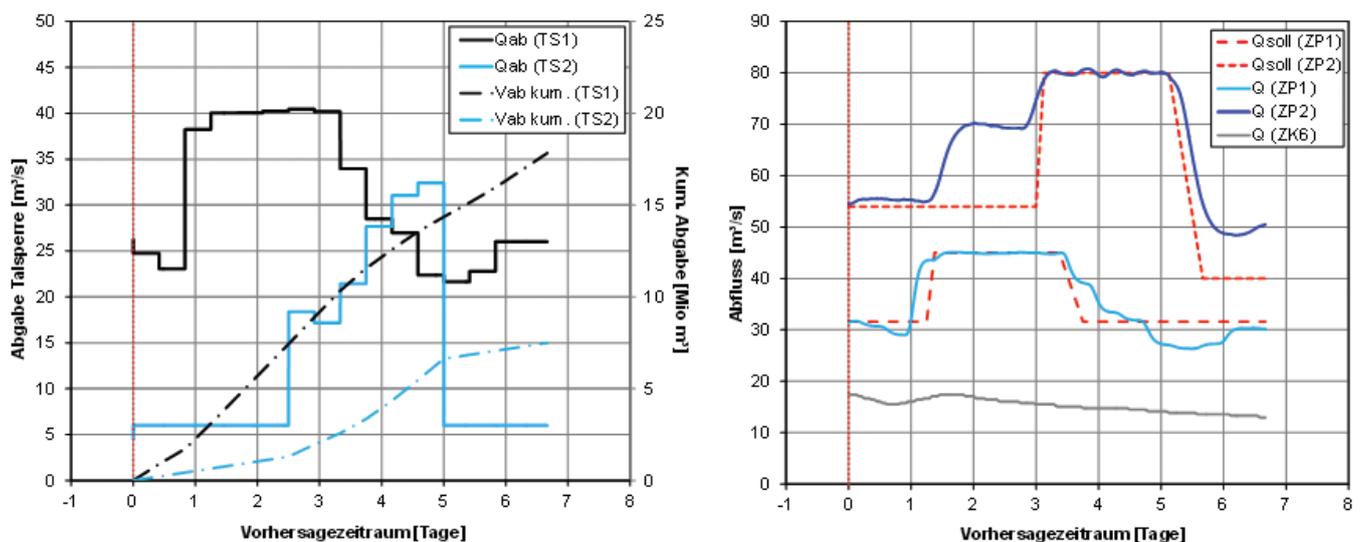


Abbildung 6
Ergebnis der Optimierung für den Anwendungsfall 1 „Abflussregulierung“ an zwei Zielpegeln im Unterlauf der Talsperren.
Result of the optimization for application example 1 of discharge control at two locations in the river reach.

der eigentlichen Welle überschritten wird. Folglich ist über den gesamten Vorhersagezeitraum eine geringe Übereinstimmung zur Zielvorgabe festzustellen ($NSE_{ZP2} = 0,62$). Der Zuschuss aus den Talsperren beträgt insgesamt $V_{ab,ges} = 25,3$ Mio. m^3 . Der Bedarf wird dabei mit etwa 70 % ($V_{ab,TS1} = 17,8$ Mio. m^3) aus TS1 und 30 % ($V_{ab,TS2} = 7,5$ Mio. m^3) aus TS2 gedeckt. Diese Mengenaufteilung wird in erster Linie durch den geforderten Abfluss am ZP1 hervorgerufen. Da das notwendige Volumen nur von TS1 bereitgestellt werden kann, muss die Abgabe nach ca. 20 Stunden für etwa 2 1/2 Tage vom Ausgangsniveau auf ca. $Q_{ab,TS1} = 40$ m^3/s erhöht werden. Dieser Anstieg führt wenige Stunden später auch am ZP2 zu einer Abflusserhöhung, so dass der Abfluss von der eigentlichen Zielvorgabe abweicht. Im Mittel werden aus TS1 über den gesamten Vorhersagezeitraum etwa $\bar{Q}_{ab,TS1} = 32$ m^3/s abgegeben. Somit weist die Bilanz der TS1 bei einem mittleren Zufluss von $\bar{Q}_{zu,TS1} = 4,7$ m^3/s ein Defizit von $\Delta V_{ab,TS1} = 15,6$ Mio. m^3 auf. Demgegenüber wird die Abgabe aus TS2 erst nach 2 1/2 Tagen über die Mindestabgabe von $Q_{ab,TS2} = 6$ m^3/s kurzfristig gesteigert, um den Scheitelabfluss am ZP2 zusätzlich zu stützen. Im Mittel beträgt die Abgabe aus TS2 $\bar{Q}_{ab,TS2} = 13,5$ m^3/s und führt bei einem mittleren Zufluss von $\bar{Q}_{zu,TS2} = 5,7$ m^3/s zu einem Defizit von ca. $\Delta V_{ab,TS2} = 4,5$ Mio. m^3 .

Abbildung 7 zeigt das Ergebnis der Sensitivitätsanalyse zur Empfindlichkeit der Lösung gegenüber einer Veränderung der Wichtungskoeffizienten.

Hierzu wurden separate Optimierungsrechnungen in Verbindung mit einer systematischen Variation der Zielgewichte $\omega_{i,WS}^{k+}$ bzw. $\omega_{i,WS}^{k-}$ im Wertebereich von 500 bis 10.000 durchgeführt. Die Auswertung basiert letztendlich auf unterschiedlichen Bewertungskriterien, die in Korrelation zur Zielgewichtung aufgetragen sind. Die Kriterien betrachten zum einen die kumulierten Talsperrenabgaben für TS1 und TS2 und zum anderen die Güte für die Zielerreichung im Bereich des Wellenscheitels ($RMSE_{WS}$). Als Qualitätskriterium für die Rechenperformance ist zudem die benötigte Rechenzeit für den Lösungsprozess (CPU-

Zeit) dargestellt. Die Gegenüberstellung von ausgewählten Bewertungskriterien bietet dem Bearbeiter des Optimierungsproblems eine mögliche Entscheidungsgrundlage um eine Zielfunktion entsprechend seiner individuellen Zielvorstellungen zu parametrisieren. Danach zeigt sich, dass eine bessere Einhaltung der Wellenscheitel mit einer erhöhten Abgabe aus TS1 korrespondiert. Auffällig ist auch die hohe Rechenperformance, die sich mit zunehmender Wichtung einstellt. Für den geschilderten Anwendungsfall wurde am Ende der Untersuchung die Zielgewichtung mit $\omega_{i,WS}^{k+}$ bzw. $\omega_{i,WS}^{k-} = 10.000$ als akzeptable und robuste Modelllösung eingestuft (rote Markierung in Abb. 7). Dieses Ergebnis stellt nach der Bewertung aller Kriterien einen geeigneten Kompromiss für den Bewirtschaftungsfall dar. Eine weitere Erhöhung der Zieldominanz führt lediglich zu geringfügigen Veränderungen in den Ergebnissen.

Die nachfolgende Untersuchung zeigt den Einfluss der Steuerungszeitschrittweite, welche die Anzahl der Stellgrößen bzw. der Optimierungsvariablen einer Bewirtschaftungsstrategie festlegt. Abbildung 8 zeigt, dass bis zu einer Stellschrittweite von 0,5 bis 5 Stunden annähernd ähnliche Ergebnisse erzielt werden. Diese lassen eine geringe Talsperrenabgabe, eine bessere Zielerreichung und eine hohe Rechenperformance erkennen. Letztere ist durch Rechenzeiten von unter 10 Sekunden gekennzeichnet, die für 100 Iterationen als Abbruchbedingung benötigt werden. Der Grund für die hohe Rechenperformance ist das schnelle Konvergenzverhalten der Optimierung, da eine kleine Stellschrittweite mit einer größeren Anzahl von Optimierungsvariablen korrespondiert und eine variable Talsperrensteuerung erlaubt, die den Verlauf der geforderten Zielvorgabe besser abbilden kann. Ab einer Stellschrittweite von 5 Stunden ist eine stetige Zunahme der abgegebenen Wassermenge festzustellen. Dies resultiert aus der vergleichsweise statischen Abgaberegulierung. Infolge der geringen Anzahl an Stellschritten muss die Abgabe aus beiden Talsperren früher erhöht werden um den Wasserbedarf an den Zielpegeln möglichst zeitgenau zu decken. Darüber hinaus nimmt auch die Güte der Zielerreichung ab, was aus ei-

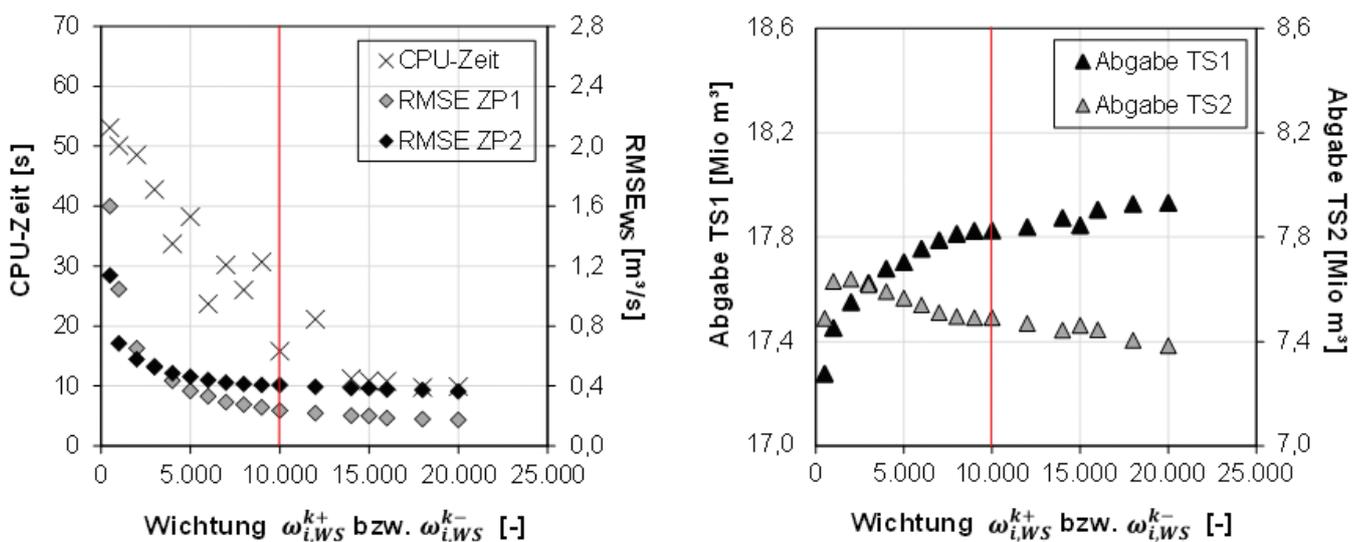


Abbildung 7

Sensitivitätsanalyse zur Wichtung für die Einhaltung des Wellenscheitels und Bewertung der Optimierung auf Basis verschiedener Bewertungskriterien (V_{ab} , $RMSE_{WS}$, CPU-Zeit).
 Sensitivity analysis on the weighting factors for keeping the target level of the discharge peak and evaluation of the optimization according to different criteria (V_{ab} , $RMSE_{WS}$, CPU-time).

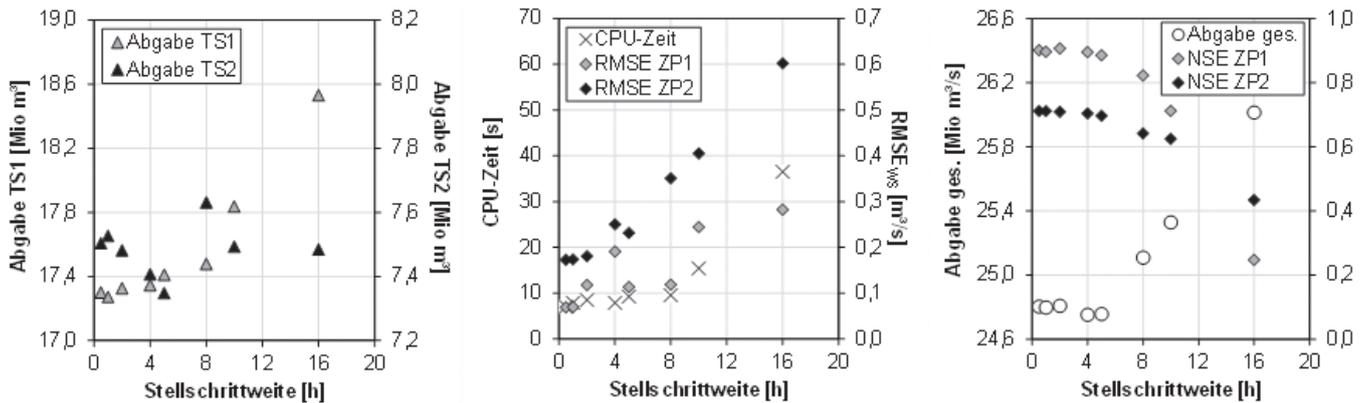


Abbildung 8
 Ergebnis der Optimierung für den Anwendungsfall 1 „Abflussregulierung“ an zwei Zielpegeln im Unterlauf der Talsperren.
 Result of the optimization for application example 1 of discharge control at two locations in the river reach.

nem Anstieg im $RMSE_{WS}$ für die Übereinstimmung im Bereich des Wellenscheitels und einer Abnahme des NSE für die Einhaltung der gesamten Zielvorgabe hervorgeht.

4.2 Anwendungsbeispiel „Koordinierte Mengenbewirtschaftung“

In einem Verbundsystem ist zur Sicherung verschiedener Nutzungsanforderungen immer eine effektive Abgabeverteilung zwischen den Talsperren in Betracht zu ziehen. Prinzipiell besteht die Möglichkeit, das Gesamtvolumen an gespeichertem Wasser als Summe zu bewirtschaften. Dies bedeutet, dass die Volumina in den Talsperren nicht als unabhängige Einzelzustände, sondern als eine Zustandsgruppe betrachtet werden. Dennoch ist zu entscheiden, wie ein benötigter Zuschuss im Fall einer Bedarfsdeckung (z. B. Schifffahrt, Bewässerung, etc.) auf die jeweiligen Abgaben der Speicherbecken aufzuteilen ist. Im ereignisbezogenen Betrieb ist diese Entscheidung neben der Zweckbestimmung grundsätzlich auch vom aktuellen Füllstand abhängig. Daher ist unter Umständen auch die Notwendigkeit gegeben bestimmte Talsperren bei der Abgabenplanung zu entlasten. Im Folgenden werden zwei methodische Lösungswege aufgezeigt, die eine koordinierte Mengenbewirtschaftung umsetzen. Die Verbundbewirtschaftung hat dabei die Aufgabe eine Abflusserhöhung im Unterlauf zu realisieren. Im Gegensatz zum vorangegangenen Anwendungsbeispiel wird dazu lediglich der untere Zielpegel ZP2 betrachtet, der unter dem direkten Einfluss beider Talsperren steht. ZP1 ist nicht Bestandteil der Bewirtschaftung. Ziel ist es, eine bewusste Erhöhung der Talsperrenabgaben hervorzurufen, um daraufhin die Aufteilung der jeweiligen Abgaben zu untersuchen. Für die folgenden Anwendungsbeispiele wird zudem die Annahme einer dynamischen Talsperrensteuerung getroffen und ein Steuerungsintervall von 4 Stunden festgelegt.

4.2.1 Begrenzung der Talsperrenabgabe

Ein Ansatz um Einfluss auf die Verteilung der Abgabemengen zu nehmen ist die Begrenzung der Talsperrenabgaben. In Anbetracht der allgemeinen Vorgaben für die Betriebsauslässe ist es dem Optimierungsalgorithmus bisher freigestellt einzelne Stellgrößen der Bewirtschaftungsstrategie zwischen den definierten Mindest- und Maximalabgabewerten anzupassen. Mit dem Ziel, Einfluss auf die Abgaben zu nehmen, werden die zu optimierenden Talsperrenabgaben sowohl als Stell-, als auch als Regelgröße

betrachtet. Mit der Definition einer Sollvorgabe können je nach Wichtung das zeitliche Verhalten und der Wertebereich der Stellgrößenfolge gezielt beeinflusst werden. Mit Hilfe der Optimierung kann der Entscheidungsträger in dieser Situation den Bedarf aus der jeweils anderen Talsperre und dessen zeitlichen Verlauf der Abgabestrategie ermitteln.

Die Zielfunktion für das beschriebene Optimierungsproblem ist in Gleichung 9 dargestellt und umfasst insgesamt sechs Bestrafsterme.

$$J = \min \left(\begin{aligned} & \sum_{k=1}^T \omega_1^{k+} \cdot |Q_{ZP2}^k - Q_{soll,ZP2}^k|^2 && \text{wenn } Q_{ZP2}^k > Q_{soll,ZP2}^k \\ & + \sum_{k=1}^T \omega_2^{k-} \cdot |Q_{ZP2}^k - Q_{soll,ZP2}^k|^2 && \text{wenn } Q_{ZP2}^k < Q_{soll,ZP2}^k \\ & + \omega_3 \cdot \sum_{k=1}^T (|Q_{ab,TS1}^k - Q_{ab,TS1}^{k-1}| - 5 \text{ m}^3/\text{s})^2 \\ & + \omega_4 \cdot \sum_{k=1}^T (|Q_{ab,TS2}^k - Q_{ab,TS2}^{k-1}| - 5 \text{ m}^3/\text{s})^2 \\ & + \omega_5^+ \cdot \sum_{k=1}^T |Q_{ab,TS1}^k - Q_{ab,soll,TS1}^k|^2 && \text{wenn } Q_{ab,TS1}^k > Q_{ab,soll,TS1}^k \\ & + \omega_6^+ \cdot \sum_{k=1}^T |Q_{ab,TS2}^k - Q_{ab,soll,TS2}^k|^2 && \text{wenn } Q_{ab,TS2}^k > Q_{ab,soll,TS2}^k \end{aligned} \right) \quad (Gl. 9)$$

Gemäß der Problemstellung ist in diesem Anwendungsfall lediglich die Abflussregulierung am ZP2 vorgesehen, wobei hier die Wichtungsfaktoren ω_1^+ und ω_2^- das Einhalten der definierten Abflussvorgabe gewährleisten. Insbesondere die überproportional hohe Wichtung $\omega_{1,WS}^{k+}$ bzw. $\omega_{2,WS}^{k-} = 10.000$ sichert die Einhaltung der temporär geforderte Abflussaufföhrung. Aufgrund von vorangegangenen Untersuchungen, die bei kleinem Steuerungsintervall sprunghafte Änderungen zwischen den einzelnen Stellschritten offenbart haben, wird mit den Faktoren ω_3 bzw. $\omega_4 = 1.000$ ein abrupter Übergang zwischen den einzelnen Stellschritten vermieden. Als Richtwert wird hierbei eine Änderungsrate von $\Delta Q_{ab} = 5 \text{ m}^3/\text{s}$ sowohl für TS1 als auch für TS2 definiert. Mit den Wichtungen ω_5^+ bzw. $\omega_6^+ = 100$ wird letztendlich eine Überschreitung einer vom Nutzer angestrebten Talsperrenabgabe $Q_{ab,soll}$ bestraft. Mit einem Stellschrittintervall von 4 Stunden umfasst die Talsperrenabgabe im Vorhersagezeitraum 40 Stellschritte.

Das Ergebnis der Verbundbewirtschaftung ist für den beschriebenen Anwendungsfall in Abbildung 9 dargestellt. Das linke Bild zeigt neben der kumulierten Abgabemenge die optimierten

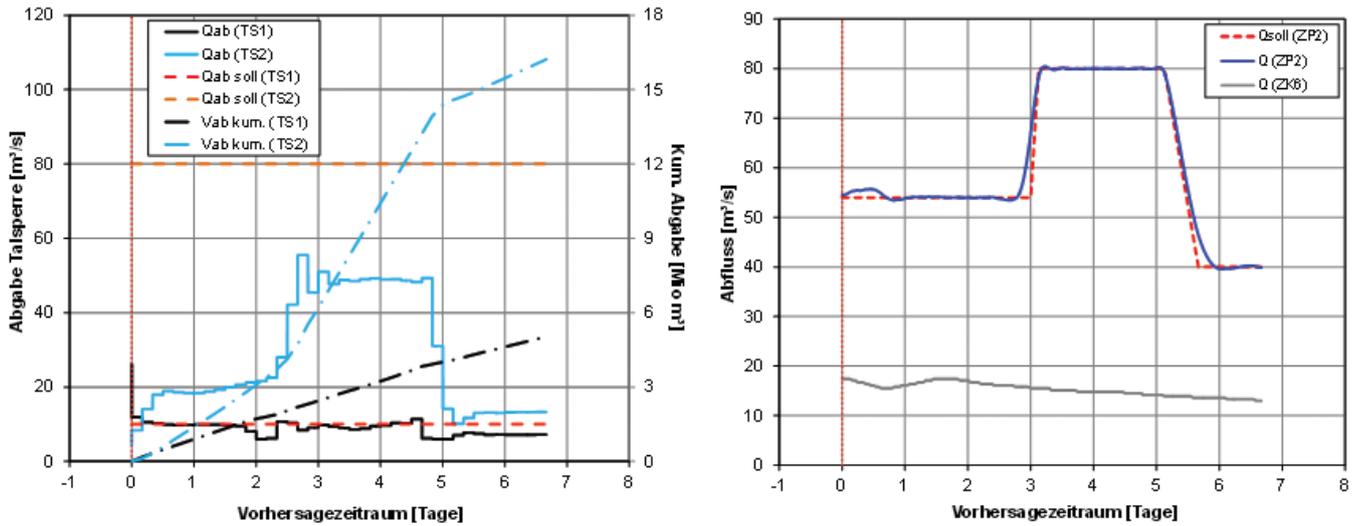


Abbildung 9

Ergebnis der Optimierung für den Anwendungsfall 2 „Mengenbewirtschaftung – Begrenzung der Talsperrenabgabe“.

Result of the optimization for the management of the water quantity between the reservoirs by con-straining the reservoir release (application example 2).

Talsperrenabgaben sowie die definierten Sollvorgaben, die den Betriebsauslass regulieren. Gemäß der Sollvorgabe für den Auslass aus TS1 ist eine Überschreitung von $Q_{ab, soll, TS1} = 10 \text{ m}^3/\text{s}$ zu vermeiden. Währenddessen unterliegt die Abgabe aus TS2 keiner Restriktion und darf maximal $Q_{ab, soll, TS2} = 80 \text{ m}^3/\text{s}$ betragen. Im rechten Bild ist der Abflussverlauf am ZP2 dargestellt an dem in den kommenden Tagen mit der definierten Zielvorgabe ein Bedarf von bis zu $Q_{soll, ZP2} = 80 \text{ m}^3/\text{s}$ angekündigt ist.

Im Ergebnis erfüllt die prädierte Abgabestrategie die Einhaltung der Zielvorgabe am für TS1 90 km bzw. für TS2 66 km entfernten Zielpegel ($NSE_{ZP2} = 0,98$; $RMSE_{ZP2} = 1,92 \text{ m}^3/\text{s}$). Durch die kurze Stellschrittweite werden insbesondere Wellenan- und -abstieg der Abflussaufhöhung auf $Q_{soll, ZP2} = 80 \text{ m}^3/\text{s}$ zeitgenau wiedergeben. Der Zuschuss wird hierfür mit insgesamt $V_{ab, TS2} = 16,2 \text{ Mio. m}^3$ überwiegend von TS2 bereitgestellt, da die Abgabe aus TS1 durch die Nebenbedingung eingeschränkt ist. Im Verlauf ist ersichtlich, dass nahezu alle Stellgrößen den definierten Grenzwert von $Q_{ab, soll, TS1} = 10 \text{ m}^3/\text{s}$ einhalten, wobei die einzelnen Stellschritte nur phasenweise an den Sollwert heranreichen. Somit werden durchschnittlich $\bar{Q}_{ab, TS1} = 8,7 \text{ m}^3/\text{s}$ aus TS1 abgelassen, so dass der aktuelle Stauinhalt bei einem vorhergesagten mittleren Zufluss von $Q_{zu, TS1} = 4,7 \text{ m}^3/\text{s}$ nur leicht absinkt. Insgesamt werden für diesen Bewirtschaftungsfall $V_{ab, ges} = 21,3 \text{ Mio. m}^3$ Wasser abgegeben.

4.2.2 Einhaltung einer Stauzielvorgabe

Ein weiterer Ansatz auf die Verteilung der Abgabemengen einzuwirken, ist die Definition eines Stauziels, welches in den nächsten Tagen möglichst nicht unterschritten werden darf. Die Einhaltung gewisser Füllstände ist zumeist mit den Aspekten der Wasserkraft, der Freizeitnutzung und den ökologischen Anforderungen verbunden. Das Stauziel, welches im operationellen Betrieb individuell vorgegeben werden kann, reduziert im Fall einer zuflussarmen Vorhersage indirekt die entsprechenden Speicherabgaben. Um derartige Kapazitätsbeschränkungen mit in die Bewirtschaftung zu integrieren ist der Füllstand über das Volumen oder dem Wasserstand als separater Kostenfunktionsterm in die

Zielfunktion mit aufzunehmen. Die Zielfunktion für das beschriebene Optimierungsproblem ist in Gleichung 10 dargestellt und umfasst sechs Strafkostenterme.

$$J = \min \left(\begin{aligned} & \sum_{k=1}^T \omega_1^{k+} \cdot |Q_{ZP2}^k - Q_{soll, ZP2}^k|^2 && \text{wenn } Q_{ZP2}^k > Q_{soll, ZP2}^k \\ & + \sum_{k=1}^T \omega_2^{k-} \cdot |Q_{ZP2}^k - Q_{soll, ZP2}^k|^2 && \text{wenn } Q_{ZP2}^k < Q_{soll, ZP2}^k \\ & + \omega_3 \cdot \sum_{k=1}^T (|Q_{ab, TS1}^k - Q_{ab, TS1}^{k-1}| - 5 \text{ m}^3/\text{s})^2 \\ & + \omega_4 \cdot \sum_{k=1}^T (|Q_{ab, TS2}^k - Q_{ab, TS2}^{k-1}| - 5 \text{ m}^3/\text{s})^2 \\ & + \omega_5^- \cdot \sum_{k=1}^T |V_{TS1}^k - V_{TS1, soll}^k|^2 && \text{wenn } V_{TS1}^k < V_{TS1, soll}^k \\ & + \omega_6^- \cdot \sum_{k=1}^T |V_{TS2}^k - V_{TS2, soll}^k|^2 && \text{wenn } V_{TS2}^k < V_{TS2, soll}^k \end{aligned} \right) \quad (\text{Gl. 10})$$

Wie im Anwendungsfall zuvor ist mit den Wichtungsfaktoren ω_1^+ und ω_2^- eine Abflussregulierung am ZP2 vorgesehen. Die Faktoren ω_3 bzw. $\omega_4 = 1.000$ berücksichtigen die definierte Änderungsrate von $\Delta Q_{ab} = 5 \text{ m}^3/\text{s}$ zwischen den einzelnen Stellschritten. Mit den Wichtungsfaktoren ω_5^- und ω_6^- wird bei der Suche nach einer optimalen Abgabestrategie die Unterschreitung des jeweiligen Stauziels bestraft. Zu Beginn der Vorhersage ist TS1 mit ca. $V_{TS1} = 113 \text{ Mio. m}^3$ und TS2 mit ca. $V_{TS2} = 70 \text{ Mio. m}^3$ gefüllt. Neben der Bedarfsdeckung am ZP2 ist gleichzeitig ein Reservolumen von $V_{soll, TS1} = 110 \text{ Mio. m}^3$ sowie von $V_{soll, TS2} = 60 \text{ Mio. m}^3$ sicherzustellen.

Das Ergebnis der Optimierungsrechnung zeigt Abbildung 10. Im linken Bild ist die prognostizierte Füllstandsentwicklung zusammen mit den Stauzielvorgaben und der kumulierten Abgabemenge aufgetragen. Die rechte Darstellung beinhaltet die Zielvorgabe und den simulierten Abflussverlauf am ZP2 sowie die optimierten Abgaben aus TS1 und TS2. Am Ergebnis ist ersichtlich, dass neben der Einhaltung des Wellenscheitels auch eine Unterschreitung der Stauziele bis zum Ende des Vorhersagezeitraumes vermieden wird. In diesem Fall ist eine Wichtung von $\omega_5^-/\omega_6^- = 1$ ausreichend, da die Zielfunktion von der Dimension der Zielgröße, in diesem Fall Kubikmeter, abhängig ist. Eine Abweichung vom Zielwert fällt daher überproportional ins Gewicht.

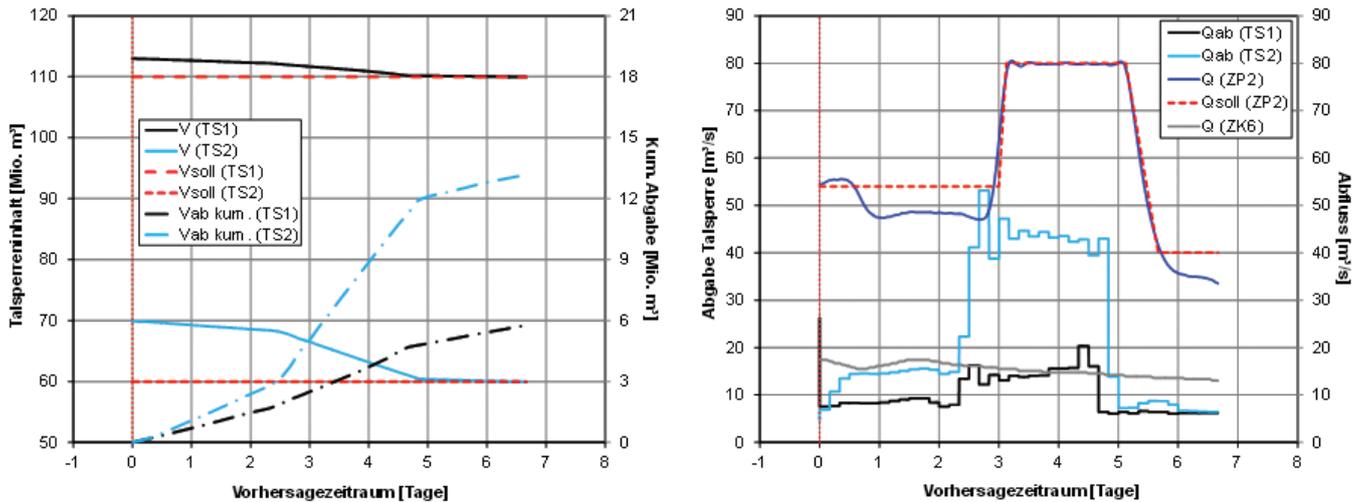


Abbildung 10

Ergebnis der Verbundbewirtschaftung für den Anwendungsfall 3 „Mengenbewirtschaftung – Einhaltung Stauzielvorgabe“

Result of the optimization for the management of the water quantity between the reservoirs by defining a target volume (application example 3).

Bedingt durch die Stauzielvorgabe verteilen sich die Abgaben im Verhältnis 30 : 70 auf TS1 und TS2. Dabei werden aus TS1 ca. $V_{ab,TS1} = 5,8$ Mio. m^3 und aus TS2 ca. $V_{ab,TS2} = 13,2$ Mio. m^3 Wasser abgelassen. Im Vergleich zum Anwendungsfall 2 „Begrenzung der Talsperrenabgabe“ entspricht dies einer Reduzierung der Gesamtabgabe um 2,3 Mio. m^3 . Diese Einsparung kompensiert die Optimierung, indem der definierte Abfluss am Zielpegel nicht vollständig gestützt wird. Das Abflussmaximum von $Q_{soll,ZP2} = 80$ m^3/s wird dennoch aufgrund der hohen Bestrafungsterme $\omega_{1,WS}^{k+}$ bzw. $\omega_{2,WS}^{k-} = 10.000$ erfüllt, was sich letztendlich in den geringen $RMSE_{WS,ZP2} = 0,3$ m^3/s widerspiegelt. Die Abweichung vor und nach Abflussaufhöhung wird durch eine deutlich geringere Zielgewichtung ω_1^{k+} bzw. $\omega_2^{k-} = 100$ begünstigt. Die gewählte Parametrisierung ermöglicht daher einen Kompromiss zwischen Abflussregulierung und der Stauzeleinhaltung im Sinne der Wasserersparnis. Die Übereinstimmung mit der Zielwertvorgabe am Kontrollquerschnitt ist mit einem $NSE_{ZP2} = 0,92$ über den gesamten Vorhersagezeitraum dennoch als zufriedenstellend zu bewerten.

5. Zusammenfassung

Die in dieser Studie vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass die Methode der modellbasierten prädiktiven Regelung ein robustes Verfahren ist zukünftige Steuerungsmaßnahmen in einem Verbundsystem und deren Interaktion zu optimieren. Die Ergebnisse lassen einerseits eine hohe bzw. zeitliche Übereinstimmung mit der gewünschten Abflussvorgabe in der unterstrom gelegenen Gewässerstrecke ($RMSE_{WS} \leq 0,4$ m^3/s) erkennen. Darüber hinaus ist eine koordinierte Steuerung und Mengenbewirtschaftung der Talsperren sowohl durch die Begrenzung der Talsperrenabgabe, als auch durch das Einhalten einer Stauzielvorgabe zu realisieren. Dabei ist die a-priori Festlegung von Wichtungsfaktoren anhand einer im Vorfeld definierten Rangfolge und Priorisierung von Bewirtschaftungszielen hilfreich, um mit wenigen Rechenläufen eine gute Kompromisslösung zu erzielen.

Insgesamt zeichnet sich MPC in Kombination mit den implementierten Ansätzen zur Speicher- und Fließgewässermodellierung

durch geringe Rechenzeiten aus (CPU < 60 Sek.). Eine hohe Rechenperformance korrespondiert dabei auch mit einer kurzen Stellschrittweite bzw. einer größeren Anzahl von Optimierungsvariablen. Bedingt durch die kurzen Rechenzeiten besitzt der Entscheidungsträger die Möglichkeit sich interaktiv verschiedene Steuerungsalternativen zu erarbeiten. Durch die Änderung der Zielvorgaben und deren Priorisierung kann im operationellen Betrieb somit kurzfristig eine Anpassung an die aktuelle Bedarfsituation sowie an aktualisierten Zuflussprognosen erfolgen. Im Ergebnis ist mit der optimierten Stellgrößenfolge und den ausgewählten Bewertungskriterien eine Entscheidungsgrundlage gegeben, die einem Betreiber bei der Wahl einer bedarfsorientierten und koordinierten Abgabenplanung effektiv unterstützt.

Summary

The results presented in this study show that the method of model-based predictive control is a robust method for optimizing future control actions and their interaction in a reservoir system. On the one hand, the results show a high overlap with the desired discharge in the downstream river section ($RMSE_{WS} \leq 0.4$ m^3/s). In addition, coordinated control and quantity management of the reservoirs needs to be carried out both by limiting the outflows and by the compliance with a target water level. Using weighting factors stipulated a-priori and based on a pre-defined order and prioritization of management objectives is helpful in order to achieve a good compromise solution with only a few calculation runs.

Overall, MPC, in combination with the implemented modelling techniques for pool and hydraulic routing, is characterized by low computing times (CPU <60 sec.). A high computing performance also corresponds with a short time step of the control variable and a higher number of optimization variables. Due to the short computation time, the decision-maker is able to interactively work out various control alternatives. By changing and prioritizing the set point objectives, the operation of the reservoir can be adjusted in the short term to current requirements and updated inflow forecast. Consequently, the optimized sequence of actuat-

ing variables and selected assessment criteria provide a basis for decision-making, effectively helping the operator to establish a coordinated schedule for reservoir discharge oriented towards actual requirements.

Anschrift der Verfasser

Dipl.-Hydrol. Christian Bouillon
Univ. Prof. Dr.-Ing. Stephan Theobald
Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft
Universität Kassel
Kurt-Wolters-Straße 3
34125 Kassel
christian.bouillon@gmx.de
s.theobald@uni-kassel.de

Literaturverzeichnis

- AHMAD, A.; EL-SHAFIE, A.; RAZALI, S.; MOHAMAD, Z. (2014): Reservoir Optimization in Water Resources. A Review. In: *Water Resour. Manage* 28 (11), S. 3391–3405. DOI: 10.1007/s11269-014-0700-5.
- ANAND, A.; GALELLI, S.; GIULIANI, M.; SAMAVEDHAM, L.; SCHWANENBERG, D. (2011): Coordinating multiple model predictive controllers for water reservoir networks operation. In: 19th International Congress on Modelling and Simulation, Perth, S. 3987–3993, zuletzt geprüft am 13.10.2016.
- ANGHILERI, D.; CASTELLETTI, A.; PIANOSI, F.; SONCINI-SESSA, R.; WEBER, E. (2013): Optimizing Watershed Management by Coordinated Operation of Storing Facilities. In: *J. Water Resour. Plann. Manage.* 139 (5), S. 492–500. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000313.
- BRANKE, J.; DEB, K.; MIETTINEN, K.; SLOWINSKI, R. (Hg.) (2008): *Multi-objective Optimization, Interactive and Evolutionary Approaches*: Springer (Lecture Notes in Computer Science, 5252).
- DOMSCHKE, W.; DREXL, A.; KLEIN, R.; SCHOLL, A. (2015): *Einführung in Operations Research*. 9., überarb. Aufl. Berlin: Springer (Springer-Lehrbuch).
- FICCHI, A.; RASO, L.; DORCHIES, D.; PIANOSI, F.; MALATERRE, P.-O.; VAN OVERLOOP, P.-J.; JAY-ALLEMAND, M. (2015): Optimal Operation of the Multireservoir System in the Seine River Basin Using Deterministic and Ensemble Forecasts. In: *J. Water Resour. Plann. Manage.* 142 (1), S. 5015005. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000571.
- GRAICHEN, K. (2015): *Methoden der Optimierung und optimalen Steuerung*. Hg. v. Fakultät für Ingenieurwissenschaften und Informatik, Universität Ulm. Institut für Mess-, Regel- und Mikrotechnik. Ulm, zuletzt geprüft am 15.09.2016.
- LABADIE, J. (2004): Optimal Operation of Multireservoir Systems. State-of-the-Art Review. In: *J. Water Resour. Plann. Manage.* 130 (2), S. 93–111. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9496(2004)130:2(93).
- LIN, N.; RUTTEN, M. (2016): Optimal Operation of a Network of Multi-purpose Reservoir. A Review. In: *Procedia Engineering* 154, S. 1376–1384. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.504.
- MARQUES, G.; TILMANT, A. (2013): The economic value of coordination in large-scale multireservoir systems. The Parana River case. In: *Water Resour. Res.* 49 (11), S. 7546–7557. DOI: 10.1002/2013WR013679.
- MONTERO, R.; SCHWANENBERG, D.; HATZ, M.; BRINKMANN, M. (2013): Simplified hydraulic modelling in model predictive control of flood mitigation measures along rivers. In: *Journal of Applied Water Engineering and Research* 1 (1), S. 17–27. DOI: 10.1080/23249676.2013.827897.
- MUSCHALLA, D. (2006): *Evolutionäre multikriterielle Optimierung komplexer wasserwirtschaftlicher Systeme*. Dissertation. Technische Universität Darmstadt, Darmstadt. Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft.
- NEGENBORN, R. R.; OVERLOOP, P.-J.; KEVICZY, T.; DE SCHUTTER, B. (2009): Distributed model predictive control of irrigation canals. In: *NHM* 4 (2), S. 359–380. DOI: 10.3934/nhm.2009.4.359.
- RANI, D.; MOREIRA, M. M. (2009): Simulation-Optimization Modeling: A Survey and Potential Application in Reservoir Systems Operation. In: *Water Resources Management* 24 (6), S. 1107–1138. DOI: 10.1007/s11269-009-9488-0.
- RÖTZ, A. (2016): *Ein simulationsbasiertes Entscheidungshilfwerkzeug zur Optimierung der operationellen Talsperrenbewirtschaftung*. Dissertation. Universität Kassel, Kassel. Fachgebiet für Wasserbau und Wasserwirtschaft.
- RÖTZ, A.; THEOBALD, S. (2016): Einsatz simulationsgestützter Modelloptimierung im ereignisbezogenen Talsperrenbetrieb. In: *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 60 (6), S. 368–379. DOI: 10.5675/HyWa_2016,6_2.
- SCHWANENBERG, D.; BECKER, B. (2017): *RTC-Tools Software tools for modelling Real-Time control*. Technical Reference Manual. Hg. v. Deltares, zuletzt geprüft am 24.03.2017.
- SCHWANENBERG, D.; XU, M.; OCHTERBECK, T.; ALLEN, C.; KARI-MANZIRA, D. (2014): Short-term management of hydropower assets of the Federal Columbia River Power System. In: *Journal of Applied Water Engineering and Research* 2 (1), S. 25–32. DOI: 10.1080/23249676.2014.912952.
- VAN LOENEN, A.; XU, M.; ENGEL, R. (2014): Short-Term Optimization of A Canal Network For Navigation And Water Management. In: 11th International Conference on Hydroinformatics (HIC 2014), zuletzt geprüft am 19.09.2016.
- VAN OVERLOOP, P.-J. (2006): *Model predictive control on open water systems*. Amsterdam, Netherlands, Fairfax, VA: Delft University Press; Distributor in the USA and Canada, IOS Press, Inc.
- WÄCHTER, A.; BIEGLER, L. (2006): On the implementation of an interior-point filter line-search algorithm for large-scale nonlinear programming. In: *Math. Program.* 106 (1), S. 25–57. DOI: 10.1007/s10107-004-0559-y.
- WCD (Hg.) (2000): *Dams and development. A new framework for decision-making*. World Commission on Dams. London: Earthscan Publications Ltd, zuletzt geprüft am 16.02.2017.