

# **Wasserhaushaltsregelungen – vielfältige Möglichkeiten bei komplexen Anforderungen an den automatisierten Betrieb von Stauanlagen**

*Swantje Dettmann, Ute Theobald und Stephan Theobald*

## **Zusammenfassung**

Der sichere Betrieb von Stauanlagen unter Einhaltung zahlreicher, teils konträrer Anforderungen hinsichtlich Stromerzeugung, Schifffahrt, Hochwasserschutz und ökologischer Aspekte stellt für die Betreiber eine komplexe Aufgabe dar, bei der das Wartpersonal zunehmend durch automatisierte Wasserhaushaltsregelungen unterstützt wird. Für die Erstellung von Wasserhaushaltsregelungen in Struktur und Parametern wurde von den Autoren über die Jahre ein umfassendes Simulationstool entwickelt, welches Wasserbau und Regelungstechnik verbindet. Dieses, an einer Vielzahl von Flusssystemen erprobte Werkzeug, verknüpft 1D-HN-Modelle der Stauräume mit regelungstechnischen Bausteinen und ermöglicht so die Anpassung von lokalen Wasserhaushaltsregelungen an die jeweiligen spezifischen Gegebenheiten und Anforderungen sowie die Erstellung von übergeordneten Steuerungsstrukturen für Stauhaltungsketten mit unterschiedlichsten Zielsetzungen. Während lokale automatisierte Wasserhaushaltsregelungen bereits heute einen wesentlichen Beitrag zum sicheren Betrieb von Stauanlagen leisten, ist ein koordinierter Betrieb einer Stauhaltungskette durch eine übergreifende Steuerung noch eher unüblich, obwohl allein dieser es ermöglicht, komplexe Betriebsziele wie beispielsweise die Vergleichmäßigung eines unruhigen Abflussgeschehens oder unterschiedliche Strategien zur Stromerzeugung weitestgehend umzusetzen.

Als konkrete Beispiele werden in dieser Publikation die Aspekte Regelleistung, Abflussvergleichmäßigung sowie ein Trainingssimulator herausgegriffen. Am unteren Lech sind die lokalen Wasserhaushaltsregelungen für den Abruf von Regelleistung ausgelegt, wie anhand von Betriebsdaten vorgestellt wird. Für den oberen Inn haben die Autoren ein übergeordnetes System zur Abflussvergleichmäßigung entwickelt, welches basierend auf Abflüssen an weit oberstrom gelegenen Pegeln eine Prognose zur Abflussentwicklung durchführt und durch gezielte Ausnutzung von Bewirtschaftungsräumen in zwei Inn-Stauhaltungen den nach unterstrom abgegebenen Abfluss gegenüber dem Zufluss wesentlich glättet. Des Weiteren wurde für die Donau ein Trainingssimulator aufgebaut, welcher durch die Kopplung des Simulationssystems aus HN-Modell und Regelungsstrukturen (ggf. auch der realen speicherprogrammierbaren Steuerung SPS) mit einer zur Warte identischen Oberfläche ein mächtiges Werkzeug darstellt, um das Prozessverständnis für das Gesamtsystem der Stauhaltungskette zu verbessern, die Auswirkung von Interaktionen zu analysieren und die eigene Fahrweise zu überprüfen.

Automatische Wasserhaushaltsregelungen stellen demnach nicht nur ein Werkzeug dar, das Wartpersonal im Alltag und in komplexen Situationen zu entlasten, sondern bieten darüber hinaus auch neue Möglichkeiten für effektive Betriebsweisen.

## **1 Einführung**

An zahlreichen Flüssen in Deutschland, Europa und weltweit wurden hauptsächlich zur regenerativen Stromerzeugung durch Wasserkraft und zur Schiffbarmachung Staustufen resp. Staustu-

fenketten errichtet. Der sichere Betrieb dieser Stauanlagen mit Einhaltung zahlreicher, teils konträrer Anforderungen hinsichtlich Stromerzeugung, Schifffahrt, Hochwasserschutz und ökologischer Aspekte stellt für die Betreiber eine komplexe Aufgabe dar, bei der eine Unterstützung des Bedienpersonals durch automatisierte, lokale Wasserhaushaltsregelungen heutzutage üblich ist. Darüber hinaus gehende Möglichkeiten wie ein koordinierter Betrieb einer Stauhaltungskette durch eine übergreifende Steuerung werden jedoch eher selten eingesetzt, obwohl Betriebsziele wie beispielsweise die Beruhigung eines stark variierenden Abflussgeschehens mit lokalen Regelungen allein in der Regel nicht umzusetzen sind.

Für die Erstellung von Wasserhaushaltsregelungen in Struktur und Parametern wird von den Autoren seit Jahren an einer Vielzahl von Flusssystemen ein umfassendes Simulationstool eingesetzt und stets weiterentwickelt, welches Wasserbau und Regelungstechnik verbindet.

## 2 Methoden und Werkzeuge: Kopplung von Fließgewässermodellierung und Wasserhaushaltsregelungen

Zur Berechnung der Strömungsverhältnisse in Fließgewässern wird für vielfältige Fragestellungen ein eindimensionales, instationäres hydrodynamisch-numerisches (HN-) Verfahren verwendet, das eine vielfach erprobte Eigenentwicklung ist und die Modellierung auch von verzweigten und vermaschten Flusssystemen sowie Poldern, Wehren, Kraftwerken etc. ermöglicht.

Über viele Jahre wurden von den Autoren bei der Bearbeitung zahlreicher Stauanlagen unterschiedliche Arten von lokalen Wasserhaushaltsregelungen mit den erforderlichen Strukturen und Komponenten entwickelt, die in Matlab/Simulink in Form einer Toolbox gepflegt werden. Neben Standardfunktionen wie Totzeitgliedern und PT1-Gliedern etc. sind darin auch komplexe Industrieregler sowie zahlreiche Eigenentwicklungen enthalten, zudem können bei Bedarf individuelle Regelungsmodule für einzelne Stauhaltungen erstellt werden. Das 1-D-HN-Modell der zu untersuchenden Einzelstauhaltung oder Stauhaltungskette wird in Matlab/Simulink eingebunden und mit den erforderlichen Regelungsbausteinen gekoppelt, so dass Wechselwirkungen zwischen

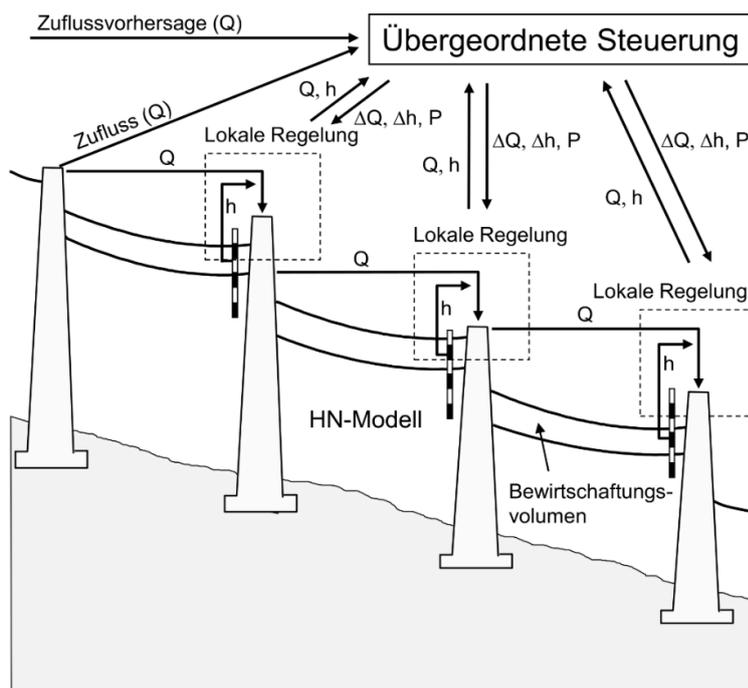


Abb. 1 Stauhaltungskette mit übergeordneter Steuerung

den hydraulischen Zuständen (Wasserstände, Zu- und Abfluss) und dem Agieren der Wasserhaushaltsregelung analysiert werden können.

Bei Aufgabenstellungen, die über die Möglichkeiten von lokalen Wasserhaushaltsregelungen hinausgehen, können individuell angepasste, übergeordnete Steuerungskonzepte konzipiert und simulationstechnisch erprobt werden. Diese basieren i.d.R. auf einem zweistufigen Konzept, bei dem die lokale Regelung durchgängig aktiv und stets als Rückfallebene verfügbar ist. Durch ein übergeordnetes Modul werden die Vorgaben

der lokalen Regelung (Sollabfluss bzw. Sollleistung) mittels Änderungen des Sollabflusses  $\Delta Q$  und Sollwasserstands  $\Delta h$  bzw. durch Vorgabe einer Leistungsänderung  $\Delta P$  beeinflusst. Zur Umsetzung dieser Änderungen sind in den betreffenden Stauhaltungen Bewirtschaftungsräume erforderlich, innerhalb derer der Wasserstand variieren darf. Abb. 1 zeigt schematisch eine Stauhaltungskette mit übergeordneter Steuerung und lokalen Regelungen sowie deren Kommunikationswegen.

### 3 Lokale Wasserhaushaltsregelungen

#### 3.1 Anforderungen und Lösungen

Als lokale Wasserhaushaltsregelung bezeichnet man ein Regelungsmodul, das unter Berücksichtigung der Wasserstände im Stauraum und des Zuflusses (Oberliegeraufschaltung) den erforderlichen Abfluss an der Stauanlage errechnet, um den Wasserstand nahe am Sollwert zu halten. Mancherorts kommt auch eine Ober-Oberliegeraufschaltung zum Einsatz, Zuflussinformationen von weiter oberstrom werden für lokale Regelungen jedoch nicht verwendet.

Entsprechend der Anforderungen und Konzessionsbedingungen für den jeweiligen Stauraum werden eine geeignete Regelungsstruktur gewählt und Regelungsparameter für diese ermittelt. Häufig bietet es sich an, eine Regelungsstruktur zu wählen, welche die reine Pegelregelung (Stauzielregelung) um eine Oberliegeraufschaltung erweitert, wobei zwischen einer Aufschaltung der Störgröße auf die Stellgröße (OW/Q-Regelung) oder auf die Führungsgröße (Antizipationsregelung) sowie einer Kombination der beiden (A/Q-Regelung) unterschieden werden kann. Auch sonstige Regelungsstrukturen z.B. unter Verwendung von Wendepegeln sind möglich.

Die Regelungsstrukturen werden vor Ort an den Stauanlagen i.d.R. mittels einer SPS umgesetzt, für die vor Aufnahme des realen Betriebs eine Überprüfung der Funktionsweise durch eine Abnahmesimulation empfehlenswert ist. Bei dieser wird die SPS über einen Server an das HN-Modell in Matlab/Simulink gekoppelt, was einen Test der Reaktion der SPS und deren Auswirkungen auf das Abflussgeschehen im Stauraum ermöglicht. Da die Überprüfung im Modell und somit vor einer Installation der SPS auf der Anlage erfolgt, ist selbst bei extremen Testszenarien oder Fehlfunktionen eine Gefährdung von Mensch, Natur und Anlage ausgeschlossen.

Die Autoren haben für zahlreiche Stauanlagen u.a. an Donau, Isar, Lech, Iller, Main und Ruhr Wasserhaushaltsregelungen in Struktur und Parametern entwickelt und somit umfangreiche Erfahrungen und Rückmeldungen aus dem praktischen Betrieb. Je nach Stauraum können die hydraulischen Charakteristika und typischen Abflussgeschehnisse stark variieren, auch die äußeren Randbedingungen und sonstigen Anforderungen müssen bei der Erstellung von Wasserhaushaltsregelungen stets berücksichtigt werden. An schiffbaren Flüssen erzeugen Schleusungen kurzzeitige Wasserstandsschwankungen an den für die Wasserhaushaltsregelung maßgeblichen Pegeln, welche durch entsprechende Bausteine gedämpft und durch geeignete Wahl der Parameter berücksichtigt werden müssen, um dennoch einen ruhigen Abflussverlauf zu erreichen.

Ökologisch sensible Bereiche im Unterwasser von Stauanlagen erfordern einen möglichst gleichmäßigen Abflussverlauf, um Wasserstandsschwankungen in den Flachwasserzonen gering zu halten. Grundsätzlich ist eine Weitergabe von Abflussänderungen, ohne diese zu verstärken, eine häufige Anforderung an die Regelung, was durch den zeitlichen Horizont (Laufzeit der Stauhaltung), der sich aus den Zuflussinformationen ergibt, mit einer lokalen Regelung umsetzbar ist.

Für eine gezielte Vergleichmäßigung von Abflüssen ist eine übergeordnete Steuerung mit Berücksichtigung weiterer Informationen erforderlich.

Auch die baulichen Eigenheiten der Stauanlagen stellen Anforderungen an die Wasserhaushaltsregelung, sei es hinsichtlich der zulässigen Wasserstandsabweichungen oder bezüglich der Abflusskapazitäten einzelner Abflussorgane, welche sogar dazu führen kann, dass einzelne Abflussbereiche nicht ansteuerbar sind. Zusätzlich reduzieren häufige Umlagerungen zwischen einzelnen Abflussorganen (Turbinen, Wehre) durch die meist ungenaue Abflussermittlung die Qualität des Regelungsergebnisses.

Auch Sonderfälle wie z.B. Turbinenschnellschlüsse können durch Simulationen analysiert und geeignete Reaktionen der Wasserhaushaltsregelung ermittelt werden.

### **3.2 Beispiel: Abruf von Regelleistung**

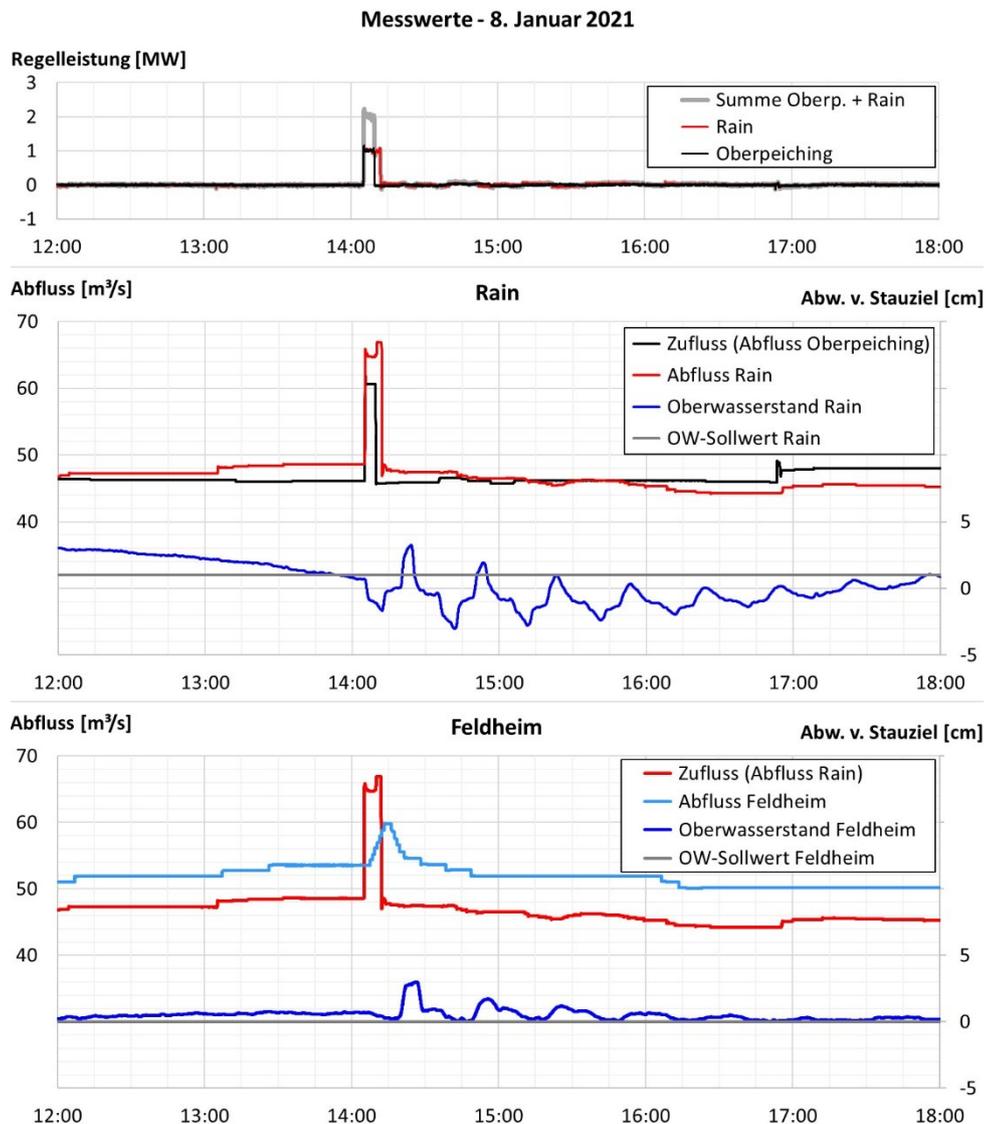
Im Folgenden wird als ein Sonderfall im Betrieb von lokalen Wasserhaushaltsregelungen die Erzeugung von elektrischer Regelleistung zur Gewährleistung der Netzstabilität vorgestellt. Für einen stabilen und zuverlässigen Betrieb des Stromnetzes ist ein ständiges Gleichgewicht zwischen Stromerzeugung und -verbrauch wichtig. Abweichungen müssen durch den Einsatz von Regelleistung ausgeglichen werden, um einerseits die Frequenz nahe der Sollfrequenz von 50 Hz zu halten und andererseits mögliche regionale Abweichungen der Leistungsbilanz von ihrem Sollwert zu beseitigen. Negative Regelleistung, d.h. eine Verringerung der Stromerzeugung, kann bei Laufwasserkraftwerken durch Reduzierung des Turbinen- und Erhöhung des Wehrabflusses erzielt werden. Alternativ kann das nicht zur Stromerzeugung verwendete Wasser durch Erhöhung des Wasserstandes für eine spätere Verarbeitung in der Stauhaltung eingelagert werden, sofern dafür Kapazität vorhanden ist. Positive Regelleistung, d.h. eine Erhöhung der Stromerzeugung, kann durch temporäre Erhöhung des Abflusses erbracht werden, führt jedoch zu einem Absinken des Wasserstandes in der betreffenden Stauhaltung und ist daher zeitlich limitiert. Positive Regelleistung führt immer zu einer (temporären) Beeinflussung des Wasserhaushalts beim Unterlieger.

Am Lechkanal unterstrom von Augsburg sowie am unteren Lech betreibt die LEW Wasserkraft GmbH eine Kette von insgesamt 7 Stauanlagen, für die von den Autoren lokale Wasserhaushaltsregelungen erstellt und parametrisiert wurden. An einigen dieser Anlagen wurden zusätzliche Module durch die KIMA Automatisierung GmbH implementiert, die eine Bereitstellung von elektrischer Regelleistung ermöglichen. Am 8. Januar 2021 kam es zu einem massiven Abfall der Frequenz in Teilen des europäischen Stromnetzes, weswegen an den regelungstechnisch voneinander unabhängigen, hintereinanderliegenden Stauanlagen Oberpeiching und Rain am unteren Lech positive Regelleistung abgerufen, d.h. die Stromerzeugung erhöht, wurde.

Für diesen Tag zeigt Abb. 2 über einen Zeitraum von 6 Stunden in der mittleren und unteren Grafik Messwerte des Abfluss- und Wasserstandsverlaufs an den Stauanlagen Rain und Feldheim sowie in der oberen Grafik Messwerte der erzeugten Regelleistung an den Stauanlagen Oberpeiching und Rain.

Der zeitgleich um 14:05 Uhr beginnende Abruf von Regelleistung dauert bei Oberpeiching (schwarz) knapp 5 Minuten, bei Rain (rot) etwa 7 Minuten, wobei an beiden Anlagen jeweils ca. 1 MW Regelleistung erzeugt wird. Im Verhältnis zu der vor und nach dem Regelleistungsabruf aufgrund des geringen Wasserdargebots erzeugten Gesamtleistung von nur 3,3 MW (Oberpeiching) bzw. 3,6 MW (Rain) liegt damit eine erhebliche prozentuale Leistungssteigerung vor.

Zur Erzeugung dieser Regelleistung wird der Abfluss Oberpeiching von  $Q = 46 \text{ m}^3/\text{s}$  auf ca.  $Q = 61 \text{ m}^3/\text{s}$ , der Abfluss Rain von  $Q = 48 \text{ m}^3/\text{s}$  auf ca.  $Q = 66 \text{ m}^3/\text{s}$  angehoben. Der Leistungsabruf mit diesen massiven Abflusserhöhungen hat entsprechende Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, weswegen diese Betriebsart als Sonderfall in die Regelungen integriert wurde, um nach Ende des Abrufs rasch wieder relativ ruhige Abflussverhältnisse zu erzielen.



**Abb. 2** Regelleistung Oberpeiching und Rain sowie Abfluss- und Wasserstandsverlauf Rain und Feldheim (Messwerte)

Der Oberwasserstand Rain (mittlere Grafik, blau) reagiert auf die Abflusserhöhung direkt mit einem Sunk von ca. 3 cm, wenige Minuten später erreicht die Schwallwelle durch die Abflusserhöhung beim Oberlieger die Stauanlage Rain und hebt den Oberwasserstand um ca. 4 cm an. Sunk- und Schwallwelle laufen mehrfach durch die Stauhaltung und werden dabei jeweils an den Stauanlagen reflektiert, wobei eine allmähliche Dämpfung erfolgt, so dass der Oberwasserstand nach ca. 3 Stunden wieder ruhig ist und dem Stauziel entspricht. Die Regelung reagiert während des Manövers kaum auf die Wasserstandsänderung, so dass der Abfluss nach Ende des Abrufs trotz des zuvor erfolgten massiven Eingriffs in den Wasserhaushalt einen gleichmäßigen Verlauf zeigt.

In der unteren Grafik wird der Abbau der Abflussänderung in der Folgestauhaltung Feldheim betrachtet. Die bei Rain aufgrund des Abrufs von Regelleistung aufgetretene Abflussspitze von  $\Delta Q = 16 - 18 \text{ m}^3/\text{s}$  erzeugt Wasserstandsänderungen um bis zu 3 cm und wird durch die lokale Wasserhaushaltsregelung Feldheim auf  $\Delta Q = 7 \text{ m}^3/\text{s}$  reduziert.

## **4 Übergeordnete Steuerungen für komplexe Anforderungen**

### **4.1 Abflussvergleichmäßigung**

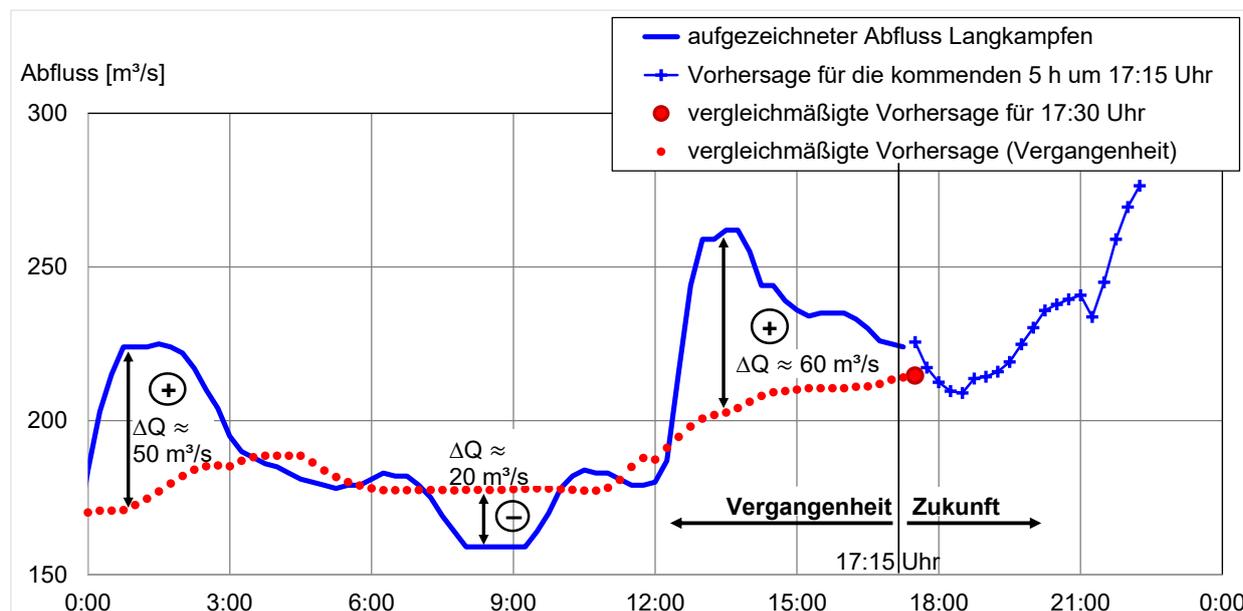
Gut eingestellte lokale Regelungen an Stauanlagen ermöglichen eine weitgehend unveränderte Weitergabe des Zuflusses nach unterstrom. Möglichkeiten zur aktiven Dämpfung von Zuflussschwankungen durch die lokalen Regelungen bestehen aufgrund der verhältnismäßig kurzen Laufzeiten zwischen Zufluss und Stauanlage i.d.R. nicht, weshalb Schwankungen im Zufluss einer Kette häufig durch die gesamte Kette weitergegeben werden. Ein gleichmäßiger Abflussverlauf ist jedoch in vielerlei Hinsicht erstrebenswert, da hierdurch u. a. die Stellorgane geschont werden, die Stromerzeugung gleichmäßiger erfolgen kann und Wasserstandsschwankungen im Unterwasser reduziert werden. An manchen Anlagen wird durch manuelle Vorgabe eines über längere Zeit konstanten Abflusses auf Kosten erhöhter Wasserstandsabweichungen vom Stauziel ein gleichmäßigerer Abflussverlauf erreicht. Dies erfordert jedoch viel Erfahrung sowie eine erhöhte Aufmerksamkeit des Bedienpersonals, führt nicht immer zum gewünschten Erfolg und widerspricht der durch eine Automatisierung angestrebten Entlastung des Personals. Stattdessen kann diese Aufgabe effektiv durch eine übergeordnete Steuerung übernommen werden, wie im Folgenden gezeigt wird.

Am bayerischen resp. bayerisch-österreichischen Inn betreibt die Verbund Hydro Power AG eine Kette von 17 Kraftwerken, deren Zufluss in die oberste Stauhaltung, Oberaudorf/Ebbs, häufig sehr unruhig ist. Mittels gezielter Bewirtschaftung resp. durch Ein- und Auslagerungen von Volumen in die Stauhaltungen Oberaudorf/Ebbs und Nußdorf kann eine erhebliche Vergleichmäßigung des Inn-Abflusses erzielt werden, wie im hier vorgestellten, im Auftrag von Verbund durchgeführten Projekt gezeigt wird. Das Untersuchungsgebiet gliedert sich in die Vorhersagestrecke von den Pegeln Innsbruck/Inn und Mayrhofen/Ziller, 75 Fluss-km resp. 63 Fluss-km oberhalb der Stauanlage Langkampfen (Zufluss in die Stauhaltung Oberaudorf/Ebbs) sowie die beiden bewirtschafteten Stauhaltungen.

Für die komplexe Aufgabe der automatisierten Vergleichmäßigung des Abflussverlaufs wurde ein Lösungsansatz aus zwei Elementen entwickelt. Die Wellenlängen der auftretenden Schwankungen und die Verfügbarkeit geeigneter oberstromiger Pegel bestimmen die Möglichkeiten der Vergleichmäßigung, weshalb zunächst eine genaue Analyse der auftretenden Abflüsse und der Eignung der für eine Vorhersage zur Verfügung stehenden Abfluss-Pegel erforderlich ist. Die Abflussvorhersage wird für einen definierten Zeitraum erstellt und diese Ganglinie mittels eines spezifischen Algorithmus vergleichmäßigt. Anschließend wird der so ermittelte vergleichmäßigte Abfluss, soweit möglich, an den beteiligten Anlagen umgesetzt. Die Umsetzbarkeit wird vom verfügbaren Bewirtschaftungsbereich und der aktuellen Lage des Wasserstandes innerhalb des Bewirtschaftungsbereiches bestimmt.

Der Zufluss in die Stauhaltung Oberaudorf/Ebbs wird für die nächsten 5 Stunden auf Grundlage der o.g. Pegel sowie einer speziellen Offset-Korrektur vorhergesagt. Letztere ermöglicht eine gute Vorhersage trotz vernachlässigter seitlicher Zuflüsse und Ungenauigkeiten in der Abflusser-

mittlung. Ein am Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft der Universität Kassel entwickelter, spezifischer Algorithmus berechnet aus dieser Vorhersage alle 15 min einen vergleichmäßigten Abfluss, wie in Abb. 3 für einen beispielhaft gewählten Zeitpunkt dargestellt ist.

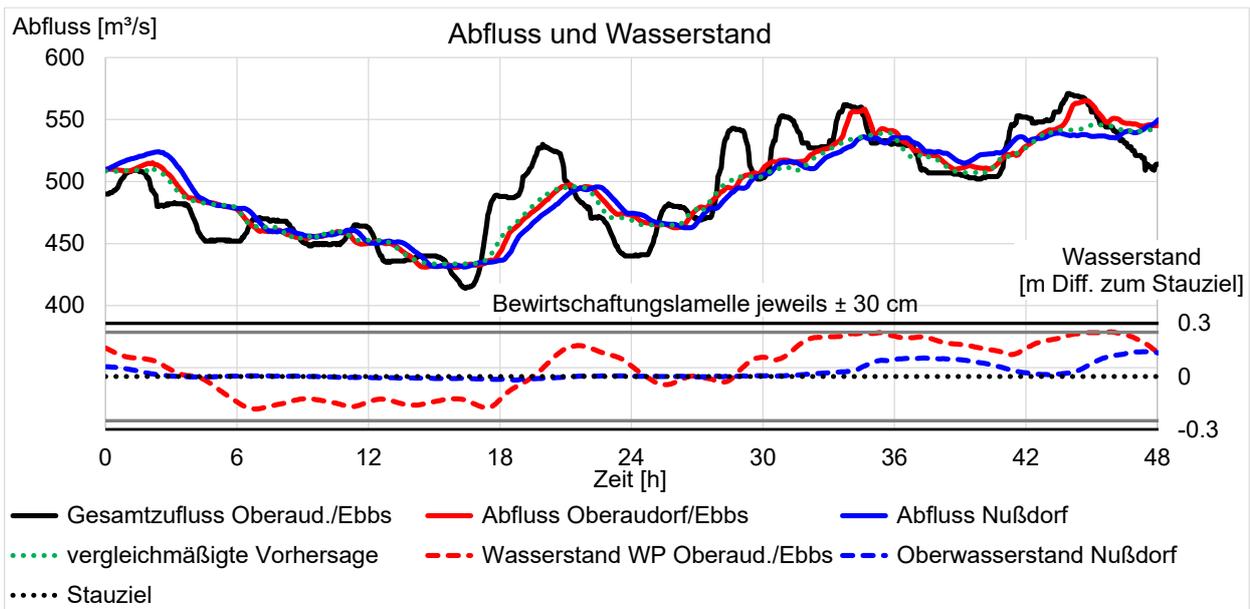


**Abb. 3** Aufgezeichneter Abfluss, Vorhersage und vergleichmäßigte Vorhersage

Die Grafik zeigt in Blau die Ganglinie des an der Stauanlage Langkampfen bis 17:15 Uhr aufgezeichneten Abflusses sowie die zu diesem Zeitpunkt vorliegenden Vorhersagewerte für die kommenden fünf Stunden. Aus diesen Vorhersagewerten wird der vergleichmäßigte Vorhersageabfluss für 17:30 Uhr ermittelt (großer roter Punkt). Die vor 17:15 Uhr ermittelten Vorhersagewerte für den vergleichmäßigten Abfluss (klein rot gepunktet) zeigen im Vergleich mit dem aufgezeichneten Abfluss eine Reduzierung der Abflussschwankungen von bis zu  $\Delta Q = 60 \text{ m}^3/\text{s}$ . Mit „+“ bzw. „-“ gekennzeichnete Volumendifferenzen sind bei der Umsetzung einzulagern bzw. abzugeben, was einen Bewirtschaftungsbereich erfordert, in dem sich der Wasserstand bewegen darf.

Die Umsetzung über das zweistufige Konzept (vgl. Abb. 1) sieht vor, dass die lokale Regelung durchgängig aktiv ist. Die für die Volumenein- bzw. -auslagerung vorzunehmende Abflussänderung  $\Delta Q$  und Stauzieländerung  $\Delta h$  werden von der übergeordneten Steuerung ermittelt und auf Umsetzbarkeit hin geprüft, d.h. je nach aktueller Lage des Oberwasserstandes innerhalb des Bewirtschaftungsbereichs ggf. reduziert und anschließend an die Stauanlage übermittelt. Nicht umsetzbare Stauziel- und damit Abflussänderungen werden an die Unterliegerstauanlage weitergegeben, um dort realisiert zu werden.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass für den oberen Inn unter Ausnutzung einer Bewirtschaftungslamelle von  $\Delta z = \pm 30 \text{ cm}$  in den Stauhaltungen Oberaudorf/Ebbs und Nußdorf in der Regel eine vollständige Umsetzung der vergleichmäßigten Abflussganglinie möglich ist, wie in Abb. 4 dargestellt. Der zur Vergleichmäßigung genutzte Bereich wurde hierbei bereits um einige Zentimeter Sicherheitsabstand zu den Bewirtschaftungsgrenzen reduziert, um Überschreitungen zu vermeiden.



**Abb. 4** Umsetzung der Abflussvergleichmäßigung

Die Grafik zeigt Abflussganglinien mit Bezug auf die linke Achse und Wasserstandganglinien für den Wendepiegel resp. Oberwasserstand mit Bezug auf die rechte Achse. In den ersten 32 Stunden des dargestellten Zeitraums wird die Vergleichmäßigung vollständig innerhalb der Stauhaltung Oberaudorf/Ebbs (rote Linien) umgesetzt; nur dort variiert der Wasserstand deutlich. Die Stauanlage Nußdorf (blaue Linien) gibt den Abfluss Oberaudorf/Ebbs nahezu unverändert weiter, der Wasserstand dort ist annähernd konstant. Im weiteren Verlauf nähert sich der Wasserstand Oberaudorf/Ebbs temporär soweit der Grenze der Bewirtschaftungslamelle (Stunde 33-37 sowie Stunde 43-47), dass dort keine weitere Vergleichmäßigung stattfinden kann. Der Abfluss Oberaudorf/Ebbs entspricht in diesen Zeiträumen demjenigen, der von der jeweiligen lokalen Regelung vorgegeben wird und erfüllt damit die Qualitätskriterien der bisherigen lokalen Regelung ohne Abflussvergleichmäßigung (unveränderte Weitergabe des Zuflusses). Die Stauhaltung Nussdorf übernimmt in diesen Situationen die Vergleichmäßigung und führt den Abfluss annähernd entsprechend der vergleichmäßigten Vorhersage (grüne Punkte) ab, was in der Stauhaltung Nussdorf zu Wasserstandsänderungen führt. Insgesamt ist durch den gleichmäßigeren Abfluss auch der Verlauf des Unterwasserstandes an den Stauanlagen - hier nicht dargestellt - deutlich ruhiger, was ökologisch von Vorteil ist.

Das Projekt hat eindrucksvoll gezeigt, dass eine Vergleichmäßigung von unruhigem Abflussverhalten durch gezielte Ein- und Auslagerungen in die Stauräume sehr gute Ergebnisse liefern kann. Die Methodik ist auf andere Flusssysteme übertragbar, sofern eine Abflussvorhersage möglich ist und Bewirtschaftungsvolumina verfügbar sind.

## 4.2 Trainingssimulator

### Ausgangssituation

Die fortschreitende Automatisierung von Stauanlagen entlastet das Bedienpersonal im Alltag erheblich und händische Eingriffe in die Steuerung der Anlagen sind immer seltener notwendig. Die Aufgabe des Bedienpersonals verschiebt sich dadurch von der direkten Einflussnahme hin zum Beobachten der Abfluss- und Wasserstandsentwicklung. Besondere Situationen, beispielsweise technische Störungen oder Revisionen, erfordern zum Teil jedoch nach wie vor ein händi-

sches Steuern der Anlagen, wozu Erfahrung und Routine des Bedieners unabdingbar sind. Insbesondere außergewöhnliche Ereignisse, wie z.B. Hochwasser, können an der realen Anlage aber nicht im Vorfeld geübt werden, woraus die Idee entstand, ein Simulationsmodell für die Anlagenbetreiber zu erstellen, mit dem gefahrlos geübt, analysiert, neues Personal geschult und das Systemverhalten veranschaulicht werden kann.

### **Schulungs- und Trainingssimulator für die Obere Donau**

Die LEW Wasserkraft GmbH ist mit der Betriebsführung der 6 Kraftwerke der Obere Donau Kraftwerke AG (ODK) auf dem 36 km langen Abschnitt der bayerischen Donau zwischen den Kraftwerken Oberelchingen und Faimingen beauftragt. Diese Anlagen sind mit automatisierten Regelungen ausgestattet und werden von der Zentralwarte der LEW Wasserkraft GmbH aus überwacht und gesteuert.

In Zusammenarbeit des Fachgebiets Wasserbau und Wasserwirtschaft der Universität Kassel und der Firma Kima Automatisierung GmbH wurde für diese Kraftwerkskette ein Schulungs- und Trainingssimulator entwickelt und auf einer robusten, industriellen Plattform umgesetzt. Er gibt dem Bediener die Möglichkeit, Abflussganglinien auszuwählen und wiederholt – bei Bedarf auch im Zeitraffer – ablaufen zu lassen um dabei das hydraulische Verhalten der Staustufenkette sowie die Reaktionen der Regelungen oder, im Handbetrieb, die Auswirkungen der eigenen Fahrweise zu überprüfen und zu vergleichen. Hierdurch wird es dem Wartpersonal ermöglicht, ein fundiertes Prozessverständnis zu erlangen, wie es sonst nur durch jahrelange Erfahrung erreicht werden kann.

Der Trainingssimulator besteht aus einem hydrodynamisch-numerischen Modell der Stauhaltungskette, den Original-Regelungsstrukturen auf Soft-SPS sowie unterschiedlichen Bedienoberflächen und benötigt nur einen einzelnen Rechner oder Laptop. Die Bedien- und Konfigurationsmöglichkeiten entsprechen weitestgehend denen der Warte, um den Nutzern ein „look-and-feel“ wie an der realen Anlage zu bieten. Die Umsetzung wurde u.a. im Rahmen des Projekts WANDEL aus der GROW-Initiative vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert. Methodik und System sind auf andere Flusssysteme übertragbar.

### **Hochwasser- und Trainingssimulator für die Donau von Donauwörth bis Passau**

Im Auftrag der Uniper Kraftwerke GmbH wird derzeit ein umfangreicher Hochwasser- und Trainingssimulator erstellt, der in einer ersten Phase den 285 km langen Flussabschnitt der Donau oberstrom von Passau sowie einen 21 km langen Abschnitt der Isar bis zur Mündung in die Donau abbildet. Die Strecken umfassen insgesamt 11 Stauhaltungen mit Kraftwerken und Schleusenanlagen sowie den frei fließenden Abschnitt zwischen Straubing und Vilshofen.

Der Hochwasser- und Trainingssimulator ist modular aufgebaut, wodurch die existierenden Wasserhaushaltsregelungen der einzelnen Stauanlagen direkt im Programmsystem abgebildet oder als Hard- bzw. Software-SPS angebunden werden können. Zur Visualisierung steht dem Auftraggeber eine vom Leitsystem unabhängige, zweite Warte zur Verfügung, an die das Programmsystem angebunden wird. Die Auswahl von Szenarien, der jeweils aktiven Regelung sowie der allgemeinen Simulationseinstellungen erfolgt über einen separaten Trainerarbeitsplatz. Reales Leitsystem und Simulation bleiben zur Gewährleistung der IT-Sicherheit streng getrennt. Fragestellungen bezüglich des Wasserhaushalts, auch bei Extremereignissen und manuellen Eingriffen, können mit großer Ähnlichkeit zur realen Stauhaltungskette simuliert werden und erhöhen so das Prozessverständnis.

## 5 Fazit

Eine Unterstützung des Bedienpersonals an Wasserkraftanlagen durch automatisierte, lokale Wasserhaushaltsregelungen ist heutzutage weit verbreitet. Die Erstellung von Wasserhaushaltsregelungen in Struktur und Parametern ist eine komplexe Aufgabe, zu deren Bewältigung die simulationsgestützte Analyse mit Kopplung von hydrodynamisch-numerischen und regelungstechnischen Modulen verbunden mit entsprechender Erfahrung effektiv beiträgt.

Übergeordnete Steuerungskonzepte sind noch eher selten, können jedoch das Erreichen anspruchsvoller Betriebs- bzw. Bewirtschaftungsziele ermöglichen, wie z.B. die vorgestellte Reduzierung von Abflussschwankungen am oberen Inn. Eine Weiterentwicklung des bei der Erstellung von Wasserhaushaltsregelungen genutzten Simulationssystems zu einem bedienerfreundlichen Simulations- und Trainingssystem für das Bedienpersonal der Warte ermöglicht diesem eine Erweiterung und Vertiefung des Prozessverständnisses für das Gesamtsystem.

## Literatur

Dettmann, S.; Theobald, U.; Theobald, S.: Einsatzmöglichkeiten einer übergeordneten Steuerung beim automatisierten Betrieb von Staustufenketten. In: WasserWirtschaft 112 (2022), Heft 4, S. 42-49.

DWA (Hrsg.): Automatisierter Betrieb von Staustufen. In: DWA-Themen, 2006.

Theobald, S.: Numerische Simulation von Staustufenketten mit automatisiertem Betrieb. In: Mitteilungen des Instituts für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe, 1999, Nr. 201.

Theobald, S.: Simulationswerkzeuge zum automatisierten Betrieb von Staustufen. In: WasserWirtschaft 108 (2008), Heft 6, S. 10-13.

Theobald, U.; Dettmann, S. und Theobald, S.: Automatisierter Staustufenbetrieb auf Basis lokaler Wasserhaushaltsregelungen. In: WasserWirtschaft 112 (2022), Heft 4, S. 33-41.

Theobald, U.; Theobald, S.: Central Water Resources Management in a cascade of hydropower plants. In: IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, Delft, Niederlande, 2011.

## Anschrift der Verfasser

Dipl.-Ing. Swantje Dettmann

Dipl.-Ing. Ute Theobald

Dettmann & Theobald Bauingenieure Partnerschaft

Am Hilgenberg 23 B, D - 34128 Kassel

s.dettmann@dettmann-theobald.de

u.theobald@dettmann-theobald.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stephan Theobald

Fachgebiet für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Universität Kassel

Kurt-Wolters-Straße 3, D - 34125 Kassel

s.theobald@uni-kassel.de