

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Conference Paper, Published Version

**Pranner, Georg; Simons, Franz; Schmitt-Heiderich, Peter; Amann, Kai-Uwe**

## **Verwendung moderner Regelungsmethoden in der Bewirtschaftung von Stauhaltungsketten am Beispiel der Mosel**

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/106418>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Pranner, Georg; Simons, Franz; Schmitt-Heiderich, Peter; Amann, Kai-Uwe (2019): Verwendung moderner Regelungsmethoden in der Bewirtschaftung von Stauhaltungsketten am Beispiel der Mosel. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Hydraulik der Wasserbauwerke – Neues aus Praxis und Forschung. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 79-84.

### **Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



## Verwendung moderner Regelungsmethoden in der Bewirtschaftung von Stauhaltungsketten am Beispiel der Mosel

Georg Pranner B. Sc., Bundesanstalt für Wasserbau  
Dipl.-Ing. Franz Simons, Bundesanstalt für Wasserbau  
Dr.-Ing. Peter Schmitt-Heiderich, Bundesanstalt für Wasserbau  
Dipl.-Ing. Kai-Uwe Amann, Universität Stuttgart

### Einleitung

42% der deutschen Bundeswasserstraßen sind staugeregelte Flussstrecken, d.h. der Wasserstand wird innerhalb einer definierten Toleranz gehalten, um die Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt zu gewährleisten, um Abflussschwankungen zu reduzieren, um Speicherraum für die Hochwasserabfuhr bereit zu stellen und um eine möglichst vollständige Nutzung des Wasserkraftpotentials zu ermöglichen. Die Erfüllung dieser zum Teil konträren Ziele ist eine anspruchsvolle Aufgabe. Für die automatisierte Bewirtschaftung von Stauhaltungsketten stellt sich deshalb die Herausforderung, diese Ziele in allgemeingültige Regelalgorithmen zu integrieren, die einfach parametrisiert, implementiert und auf andere Stauhaltungsketten übertragen werden können. Ziel ist eine standardisierte Regelung, die einen robusten und sicheren Betrieb der Wasserstraßen ermöglicht.

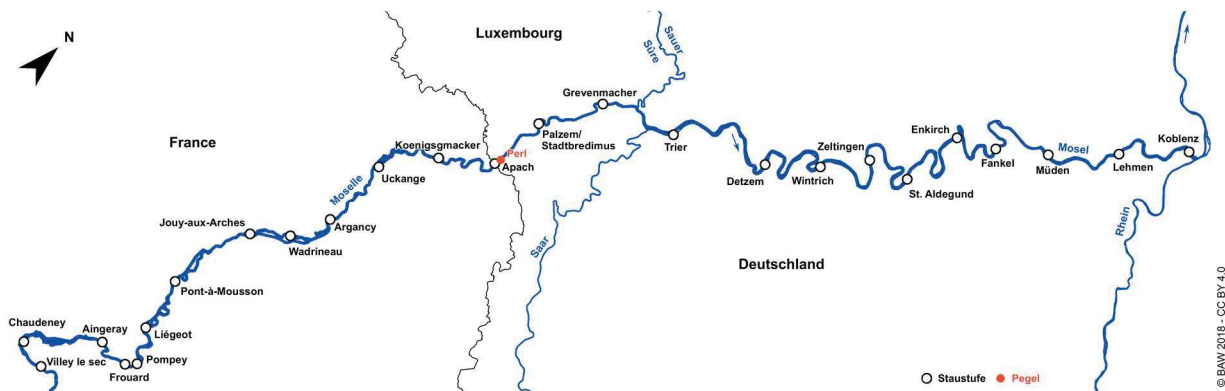


Bild 1: Lage der 25 Wehranlagen an der Mosel in Frankreich, Luxemburg und Deutschland.

Das Untersuchungsgebiet für das hier vorgestellte Pilotprojekt ist die Mosel. Auf einem 394 km langen Abschnitt von Neuves-Maisons in Frankreich bis zur Mündung in Koblenz, ist die Mosel staugeregelt und wird für die Schifffahrt und Energiegewinnung genutzt. Der Wasserstand wird dazu mit Hilfe von 25 Staustufen reguliert, davon liegen 13 in Frankreich, zwei im deutsch-luxemburgischen Kondominium und 10 in Deutschland (Bild 1). In den Jahren 2001 bis 2008 wurden 11 Staustufen in Deutschland bzw. Luxemburg mit automatischen Staureglern ausgerüstet. Das aktuell verwendete Regelungssystem setzt dabei auf lokale Oberwasserstands- und Abflussregler (OW/Q-Regler, Bild 2). Dabei wird der Oberwasserstand an der Staustufe mit Hilfe eines Proportional-Integral-(PI)-Reglers geregelt, der basierend auf der aktuellen Abweichung von Ist- und Soll-Wasserstand einen Soll-Abfluss berechnet. Schwankungen des Zuflusses von oberstrom werden durch einen zusätzlichen Steuerungsanteil berücksichtigt. Der momentane Zufluss in die Stauhaltung wird dabei zeitverzögert und gedämpft auf den Soll-Abfluss des PI-Reglers addiert. Das Regelungskonzept der BAW ist ausführlich in den BAWMitteilungen 96 beschrieben (Bundesanstalt für Wasserbau 2012).

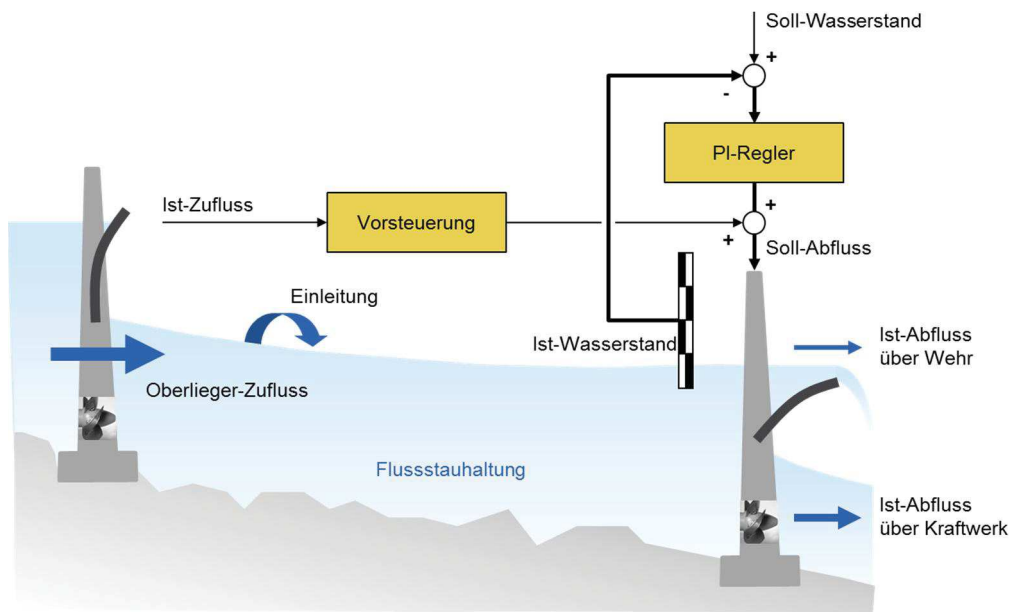


Bild 2: Schematische Darstellung der Oberwasserstands- und Abfluss (OW/Q)-Regelung.

Die OW/Q-Regelung ist eine lokale Regelung, da sie nur Messwerte verarbeitet, die in der Stauhaltung im aktuellen Zeitschritt anfallen. Sie benötigt wenige Eingangssignale und funktioniert für Abflüsse größerer MQ (mittlerer Abfluss) robust und zufriedenstellend. Bei starken Abflussänderungen und für Abflüsse kleiner MQ hat die OW/Q-Regelung den Nachteil, dass sie in der Kette dazu neigt, starke Abflussschwankungen von Stauhaltung zu Stauhaltung zu verstärken (Arnold et al. 2012, Gebhardt und Wohlfart 2012). Dies ist an der Mosel besonders kritisch, da die französischen Wasserkraftanlagen zum Teil im Schwellbetrieb gefahren werden und dadurch starke Schwankungen im Abfluss erzeugen, die die Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffverkehrs gefährden könnten. Daher muss die aktuelle Regelungsstrategie hinsichtlich einer koordinierten Bewirtschaftung der Stauhaltungen weiterentwickelt werden, um eine Vergleichmäßigung des Abflusses zu erreichen. Um dieses Ziel zu erreichen, entwickeln die Universität Stuttgart und die BAW in einem gemeinsamen Forschungsprojekt eine auf der modellprädiktiven Vorsteuerung (engl.: model predictive feed forward control, MPFFC) basierende Regelungsstrategie (Amann et al. 2016, Simons et al. 2018). In der Entwicklung wird ein modellbasierter Ansatz genutzt, d.h. es werden Computermodelle für alle Stauhaltungen der deutsch-luxemburgischen Moselstauufen entwickelt (Wohlfart und Gebhardt 2012). Mit Hilfe von Simulationen kann dann das Verhalten der gefundenen Regelungsstrategie für unterschiedlichste Szenarien getestet werden, bevor das neue Konzept in den produktiven Betrieb überführt wird.

### Modellprädiktive Vorsteuerung

Bild 3 zeigt die Struktur der von der Universität Stuttgart entwickelten MPFFC-Regelung. Das Verfahren basiert auf dem ursprünglich von Hug-Glanzmann et al. (2005) entwickelten Konzept. Im Vergleich zur in Bild 2 gezeigten OW/Q-Regelung wird hier die Vorsteuerung nun mit Hilfe des MPFFC realisiert. Der MPFFC benötigt eine Vorhersage für den Zufluss in die Stauhaltung. Für die Erstellung der kurzfristigen Zuflussprognose werden Abflussmessungen von weiter oberstrom liegenden Pegeln benötigt. Der Zeithorizont für die Vorhersagen beträgt drei Stunden mit einer zeitlichen Auflösung von einer Minute.

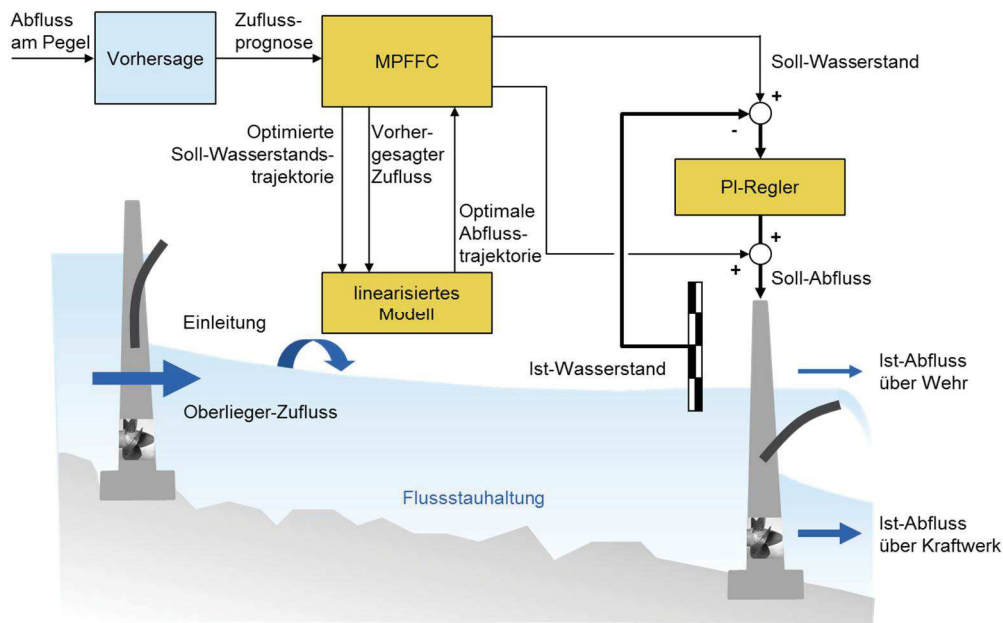


Bild 3: Schematische Darstellung der modellprädiktiven Vorsteuerung (MPFFC).

Mit Hilfe von internen linearisierten Modellen zur Beschreibung des hydraulischen Verhaltens der Stauhaltung berechnet der MPFFC einen optimalen dreistündigen Verlauf für den Soll-Wasserstand und den Soll-Abfluss der Stauhaltung, welcher den vorhergesagten Zufluss optimal bewirtschaftet. Die Dämpfung von Abflussschwankungen durch die Nutzung der vorhandenen Toleranz für das Stauziel wird hierbei explizit als Qualitätskriterium im Optimierungsprozess verwendet. Das Regelungssystem arbeitet in einem Takt von einer Minute, d.h. jede Minute wird eine neue Optimierung basierend auf der aktuellen Vorhersage und dem aktuellen Zustand durchgeführt. Es werden die Werte des ersten Zeitschritts der optimierten Soll-Wasserstands- und Soll-Abflusstrajektorien als Referenzwert für den PI-Regler bzw. als Steuerungsanteil des Soll-Abflusses genutzt. Der PI-Regler ist für die Nachführung des Ist-Wasserstands an den vom MPFFC berechneten Soll-Wasserstand verantwortlich und kann so Ungenauigkeiten in den Modellbeschreibungen ausgleichen.

In einer Kette von Stauhaltungen benötigt nur der erste MPFFC eine Zuflussvorhersage die auf oberstrom erfassten Abflussmessungen beruht. Für alle weiteren Stauhaltungen kann der berechnete optimierte Abflussverlauf des Oberliegers als Vorhersage für den Zufluss verwendet werden. Beginnend an der ersten Anlage kann das neue Regelungskonzept so abschnittsweise implementiert werden. Dies ist insbesondere deshalb wünschenswert, da sich der Zeitraum für die Modernisierung der Anlagen häufig über Jahre erstreckt.

### Simulation und Ergebnisse

Im Folgenden wird die Funktionsweise der modellprädiktiven Regelung in der Moselstauhaltungskette demonstriert. Hierzu wurden zunächst für die Stauhaltungen Palzem, Grevenmacher, Trier, Detzem, Wintrich und Zeltingen mathematische Modelle der Regelkreise in der Software MATLAB®/Simulink® aufgebaut. Das hydraulische Verhalten der Stauhaltungen wird mit eindimensionalen numerischen Fließgewässern beschrieben, die in der Simulation direkt mit den jeweiligen Simulink-Modellen für die MPFFC-Regelung gekoppelt werden.

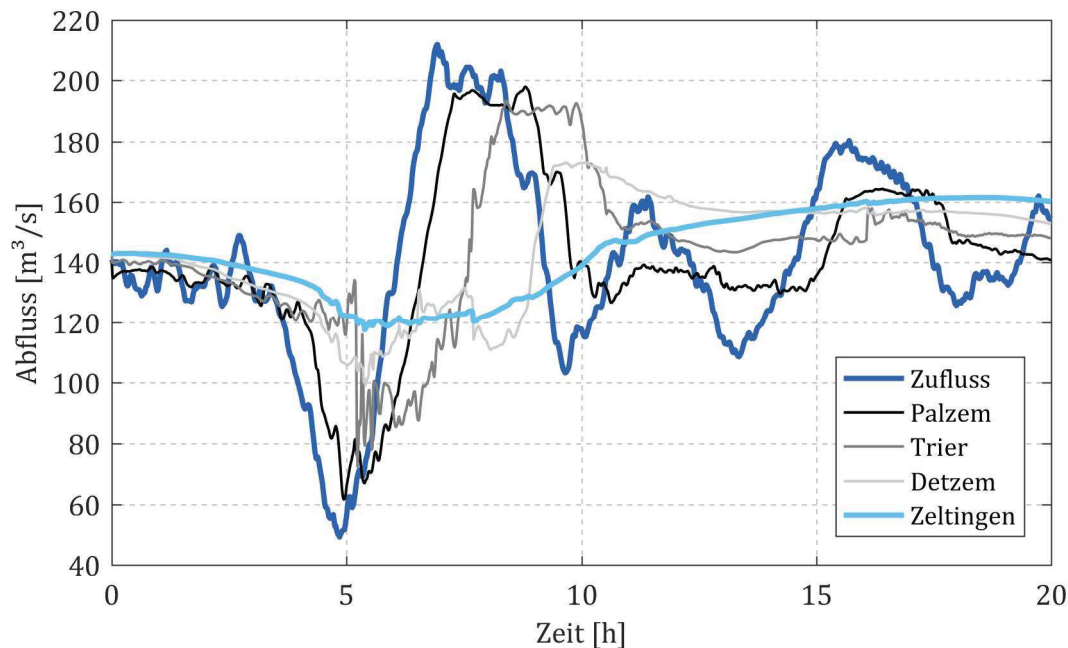


Bild 4: Zeitlicher Verlauf des Abflusses der Staustufen in der Kette.

Das nachfolgend untersuchte Szenario erstreckt sich über 20 Stunden und wurde aufgrund der starken Abflussschwankungen zwischen 50 und 200 m<sup>3</sup>/s gewählt. Als idealisierte Zuflussprognose für die erste Stauhaltung Palzem wurde die Abflussmessung am oberstrom liegenden Pegel Perl (vgl. Bild 1) gegenüber dem eigentlichen Ereignis zeitlich um drei Stunden nach vorne verschoben. Künftig wird hierzu der zeitliche Verlauf des Abflusses an den Moselpegeln Uckange und Hagondange in Frankreich genutzt. Alle weiteren Stauhaltungen verwenden die optimierte Abflustrajektorie des Oberliegigers als Zuflussprognose. In Bild 4 ist der Abfluss der Staustufen über den Verlauf der Kette dargestellt. Die Abflüsse der Stauhaltungen Grevenmacher und Wintrich werden der Übersicht halber nicht dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, wie der zunächst stark schwankungsbehaftete Zufluss im Verlauf der sechs Stauhaltungen deutlich gedämpft und vergleichmäßigt wird. Aufgrund ihrer Stauhaltungslänge dämpfen die Stauhaltungen Trier und Detzem die Über- und Unterschwinger im Abfluss stark ab. Auch in den anderen Stauhaltungen kommt es trotz starker Abflussschwankungen nie zu einer Verstärkung der Schwankungen. Dies ist ein essentieller Vorteil der MPFFC-Regelung im Vergleich zur OW/Q-Regelung.

Möglich wird die starke Abflussvergleichmäßigung durch eine vorausschauende Anpassung des Soll-Wasserstands und durch eine Nutzung der zulässigen Toleranzen. In Bild 5 bzw. Bild 6 sind jeweils die Soll- und Ist-Wasserstände für vier Stauhaltungen aufgetragen. Man erkennt, dass der vom MPFFC vorgegebene Soll-Wasserstand den gesamten Bereich der Staulamelle ausnutzt. Weiterhin sind geringe Abweichungen von Ist- und Sollwasserstand vorhanden. Diese Abweichungen resultieren aus den Randbedingungen des MPFFCs (Toleranzen sind beschränkt), der Modellunsicherheit des MPFFC, der Ungenauigkeiten der Abflussmessungen (Zuflussprognose) sowie der Trägheit der Wehre. Wehre sind träge Regelorgane, die nicht permanent den Soll-Abfluss nachführen. Mindestverstellschritte sowie Totzeiten zwischen einzelnen Stellschritten erzeugen ein nichtlineares Stellverhalten. Die verbliebenen Abweichungen werden durch den PI-Regler reduziert, der die Modellgrenzen des MPFFC, Ungenauigkeiten der Abflussmesswerte und Nichtlinearitäten kompensiert.

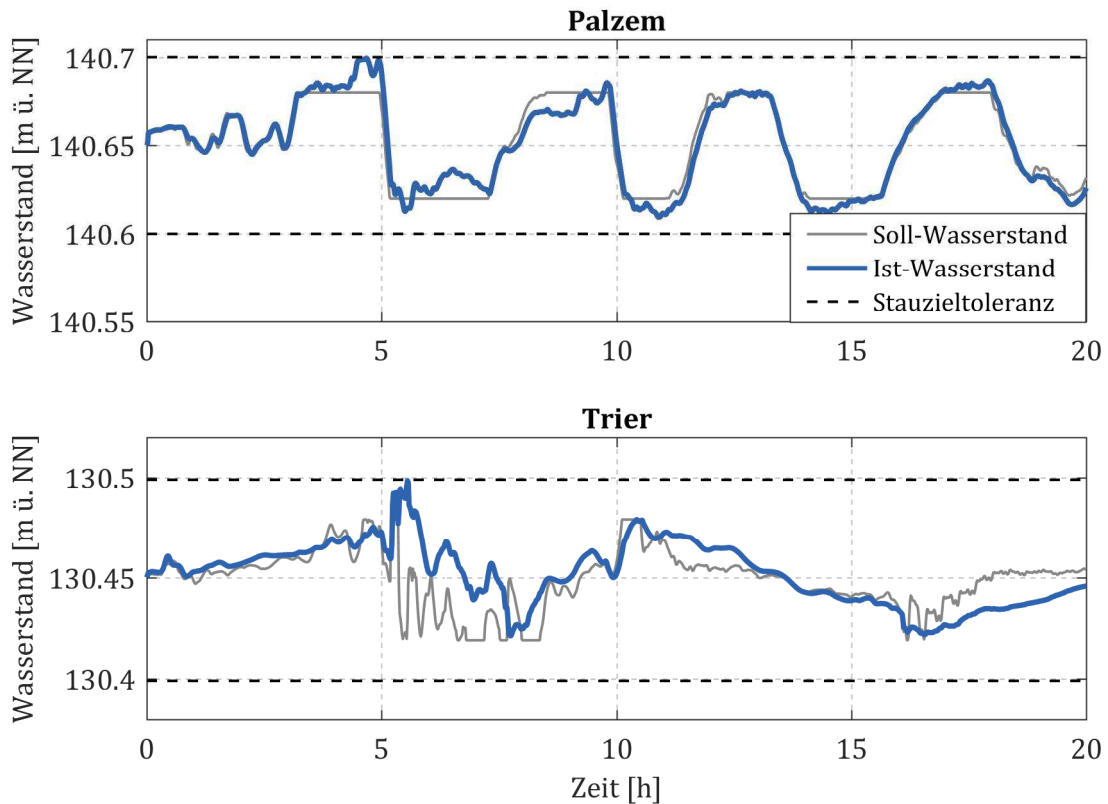


Bild 5: Zeitlicher Verlauf des Soll- und Ist-Wasserstands in Palzem und Trier.

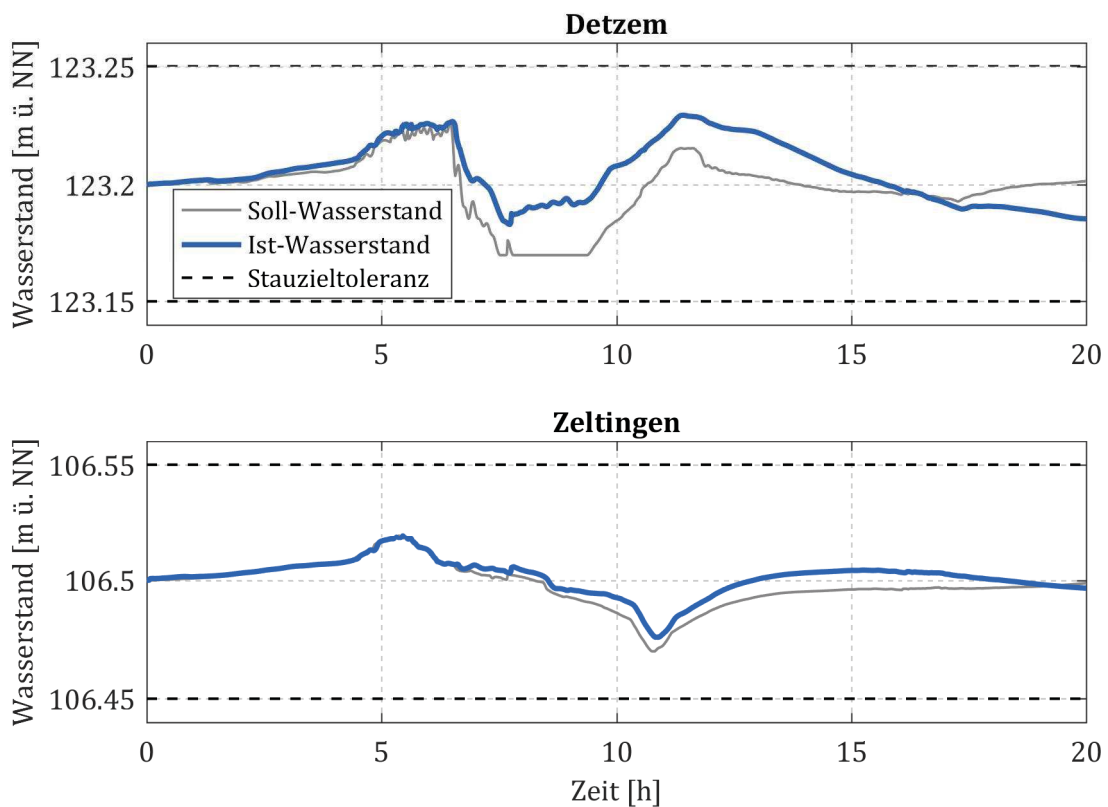


Bild 6: Zeitlicher Verlauf des Soll- und Ist-Wasserstands in Detzem und Zeltingen.

## Schlussfolgerungen und Ausblick

Durch ihre vorausschauenden Eigenschaften hat die MPFFC-Regelung deutliche Vorteile gegenüber der momentanen OW/Q-Regelung. Abflussschwankungen können in der Stauhaltungskette effektiv gedämpft werden. Möglich wird das durch eine explizite Berücksichtigung der Reduktion von Abflussschwankungen und der Ausnutzung der Staulamelle als Gütekriterien im Optimierungsprozess. Trotz der gestiegenen Komplexität ist das Regelungsverhalten des neuen Konzepts transparent und kann mit geringem Aufwand auf weitere Stauhaltungen übertragen werden. Ein Nachteil der MPFFC-Regelung sind die erhöhten Anforderungen an zuverlässige Messdaten. Für die notwendige Zuflussprognose werden kontinuierliche Abflussmessungen in guter Qualität benötigt.

In Computersimulationen wird stets von idealisierten Bedingungen ausgegangen. Im gezeigten Beispiel wurde z. B. von einer idealen Zuflussprognose ausgegangen. In einer Studienarbeit wurde jedoch der Einfluss von Fehlern in der Zuflussprognose und den Abflussmessungen auf die Regelgüte untersucht und es konnte gezeigt werden, dass Fehler immer nur kurzfristige Auswirkungen haben (Pranner 2018). Grund dafür ist, dass die Berechnung der Regelung im Minutentakt neu durchgeführt wird. Die in der Prognose vorhandenen Fehler werden so in den folgenden Zeitschritten wieder ausgeglichen. Neben den Simulationen des neuen Regelungskonzepts läuft aktuell ein realer Test einer Prototypimplementierung an einer Stauhaltung der Mosel. Erste Ergebnisse sind vielversprechend, jedoch muss mindestens ein hydrologisches Jahr abgewartet werden, um weitere Aussagen treffen zu können. Bei einem erfolgreichen Test ist die abschnittsweise Implementierung des neuen Konzepts im Rahmen der Modernisierung der Moselwehre geplant.

## Literatur

- Arnold, E., Schmitt-Heiderich, P., Sawodny, O. (2012): Parametrisierung von Reglern zur automatisierten Abfluss- und Stauzielregelung (ASR) – Stand von Wissenschaft und Technik. In: BAWMitteilungen Nr. 96, S. 23-64.
- Amann, K.-U., Arnold, E., Sawodny, O. (2016): Online real-time Scheduled Model Predictive Feedforward Control for impounded River Reaches applied to the Moselle River. In: Proc. of the IEEE Int. Conf. on Automation Science and Engineering, Forth Worth, USA, S. 1276–1281.
- Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2012): Automatisierte Abfluss- und Stauzielregelung. Karlsruhe (BAWMitteilungen, 96).
- Gebhardt, M., Wohlfart, S. (2012): Die automatische Regelung einer Stauhaltungskette – Von den Voruntersuchungen bis zur Inbetriebnahme der automatisierten Staustufen. In: BAWMitteilungen Nr. 96, 2012, S. 135-144.
- Hug-Glanzmann, G., von Siebenthal, M., Geyer, T., Papafotiou, G., Morari, M. (2005): Supervisory water level control for cascaded river power plants. In: Hydropower Conference 05, Stavanger, Norwegen.
- Pranner, G. (2018): Anwendung einer modellprädiktiven Vorsteuerung für die Abfluss- und Stauregelung von Wasserstraßen am Beispiel der Neckarstauhaltung Hofen, Bachelorarbeit.
- Simons, F., Kasper, J., Amann, K.-U., Arnold, E., Sawodny, O., Thorenz, C. (2018): On Migrating to Advanced Model Predictive Control Strategies at the Moselle River. In: EPiC Series in Engineering 3, S. 1989-1999. DOI: 10.29007/22rd.
- Wohlfart, S., Gebhardt, M. (2012): Automatisierung der Abfluss- und Stauzielregelung durch Model-Based Design und automatische Codegenerierung. In: BAWMitteilungen Nr. 96, 2012, S. 111-121.