

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Periodical Part, Published Version

Gebhardt, Michael; Gebhardt, Michael; Schmitt-Heiderich, Peter BAW-Brief Nr. 1 - Juni 2009

BAWBrief

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/100491>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2009): BAW-Brief Nr. 1 - Juni 2009. Karlsruhe:
Bundesanstalt für Wasserbau (BAWBrief, 1/09).

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.





BAW-Brief Nr. 1 - Juni 2009

598 – W

Modellgestützte Festlegung von Regelungsparametern

1. Notwendigkeit der modellgestützten Bestimmung der Regelungsparameter

Deutschland verfügt über ein weitmaschiges, wirtschaftlich leistungsfähiges Wasserstraßennetz mit einer Gesamtlänge von etwa 7350 km, von denen 24 % kanalisiert, 35 % frei fließend und 41 % staugeregt sind. Für die Abfluss- und Stauzielregelung betreibt die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) über 280 Wehranlagen. In den meisten Fällen befinden sich daneben Kraftwerke von Energieversorgungsunternehmen (EVU). Die parallele Nutzung einer Stauhaltung für unterschiedliche Zwecke kann zu Interessenskonflikten führen. So werden die Kraftwerksbetreiber daran interessiert sein, den tageszeitlich variierenden Strombedarf durch die Bewirtschaftung einer Lamelle mit großer Stautoleranz zu decken, während die Schifffahrt die Minimierung der Wasserstandsschwankungen fordert. Die Anforderungen, die z. B. in Planfeststellungsbeschlüssen und Verwaltungsvorschriften definiert sind, verlangen die Erfüllung mehrerer Ziele [1].

Jede Regelung beschreibt ein rückgekoppeltes Systemverhalten, bei der durch Vorgabe der Stellgrößen an den Regelorganen, üblicherweise Kraftwerk und Wehr, der Wasserstand der Regelstrecke, d. h. der Stauhaltung, geführt wird. Bei fehlerhaft ausgelegtem Regelungssystem bzw. Regelungsparametern können instabile Zustände in der Flusstauhaltung hervorgerufen werden, was sich in Wasserstandsschwankungen mit wachsender Amplitude zeigen kann. Daher können die Regelparameter nicht im Betrieb bestimmt werden, diese müssen vorab bereitgestellt werden. Am Beispiel der Neckarstauhaltung Pleidelsheim wird nachfolgend dieses Vorgehen erläutert.

2. Modellgestützte Bestimmung der Regelparameter am Beispiel der Neckarstauhalt Pleidelsheim

2.1 Besonderheiten der Neckarstauhaltung Pleidelsheim

Kennzeichnend für die Stauhaltung Pleidelsheim ist die räumliche Trennung von Kraftwerk, Schleuse und Wehr. Damit wirken sich geforderte Abflussänderungen an den Kontrollbauwerken bzw. Stellgliedern auf das Laufzeitverhalten der Fließstrecke bzw. Regelstrecke unterschiedlich aus. Bild 1 gibt einen Überblick auf Regelstrecke und Lage der Regelorgane.

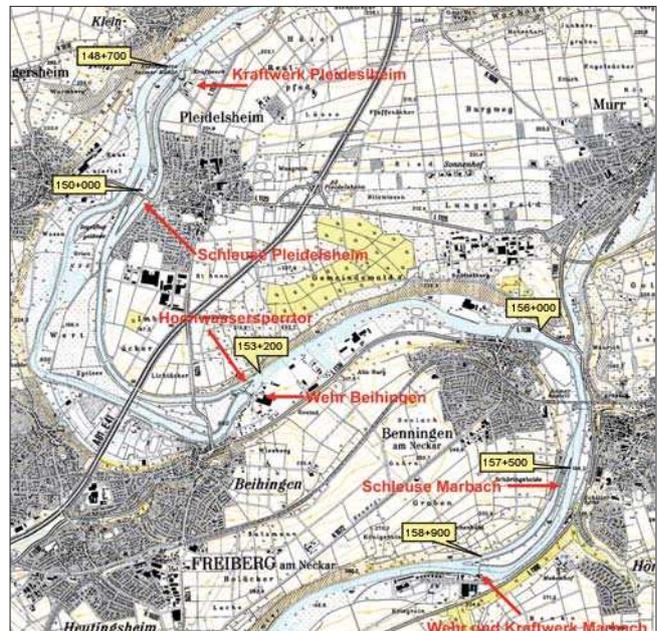


Bild 1: Lageplan der Stauhaltung Pleidelsheim

Das Wehr Beihingen besteht aus drei Wehrfeldern mit je 18 m Breite und Rollschützen, die bei Bedarf „von Hand“ gefahren werden, und einem 10 m breiten Wehrfeld mit einem elektromechanisch angetriebenen Hakendoppelschütz, welches bis zu Durchflüssen von 80 m³/s ferngesteuert wird. Mit dem maximalen Abfuhrvermögen des Kraftwerkes von 80 m³/s ergibt sich ein automatisierbares Abflussspektrum von 0 – 160 m³/s (Niedrig- und Mittelwasserabfluss), welches zentral über die Leittechnik im Kraftwerk Pleidelsheim geführt

wird. Dem höchsten schiffbaren Wasserstand (HSW) in der Stauhaltung Pleidelsheim ist ein Abfluss von ca. 200 m³/s zugeordnet.

Sowohl in Marbach als auch Pleidelsheim befinden sich zwei Schleusenammern, die im Verbund betrieben werden können. Die Kammerabmessungen betragen 110 x 12 m. Die mittlere Fallhöhe beträgt in Marbach 6 m und in Pleidelsheim 8 m. Damit gibt die Schleuse Marbach kurzzeitig ca. 8.000 m³ in die Stauhaltung Pleidelsheim ab und die Schleuse Pleidelsheim benötigt ca. 11.500 m³ Wasser aus der Stauhaltung bei Füllvorgängen, die nicht im Verbund erfolgen. Gerade der Betrieb der Schleuse Pleidelsheim zeigt bei Niedrig- und Mittelwasserabfluss einen erheblichen Einfluss auf die Wasserstände in der Stauhaltung. Es können Sunkwellen mit einer maximalen Amplitude von 20 cm auftreten. Dieser Sunk bewirkt kurzzeitig eine deutliche Unterschreitung des Sollwasserstandes, worauf die Regelung nur schwach reagieren darf (vgl. Kapitel 2.3).

Die Gewährleistung der Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs in der Stauhaltung Pleidelsheim verlangt die Erfüllung zweier gegensätzlich wirkender Vorgaben. Es muss einerseits die minimale Durchfahrthöhe am Sperrtor bereitgestellt werden, was einen möglichst niedrigen Sollwasserstand am Wehrpegel erfordert, andererseits muss eine ausreichende Drempeltiefe für die Einfahrt in die Schleuse Pleidelsheim vorhanden sein, wofür ein möglichst hoher Wasserstand am Schleusenpegel notwendig ist.

2.2 Beschreibung des Regelungskonzeptes

Das Kraftwerk in Pleidelsheim wird von der SÜWAG AG betrieben. Dazu beauftragte die SÜWAG AG die Rittmeyer AG, ein Konzept für die Leittechnik zu erstellen. Dieses Konzept wurde in der Zusammenarbeit von Wasser- und Schifffahrtsamt (WSA) Stuttgart, Wasser- und Schifffahrtsdirektion (WSD) Südwest, BAW, SÜWAG AG und Rittmeyer AG leicht modifiziert, so dass die Belange der Schifffahrt berücksichtigt sind. Dieses modifizierte Regelungskonzept ist in Bild 2 dargestellt. Die Parametrisierung dieses komplexen Regelungskonzeptes erfolgte durch die BAW [2].

Bei dem Regelungskonzept handelt es sich um eine reine Wasserstandsregelung (prozessnahe Regeleinrichtung, gelb hinterlegt) mit Störgrößenaufschaltung (blau hinterlegt). Die prozessnahe Regeleinrichtung stellt die letzte Rückfallebene bei Ausfall der Zuflussinformationen dar. Die wesentlichen Eigenschaften der Wasserstandsregelung sind nachfolgend erläutert:

1. Die Wasserstandsregelung erfolgt sowohl auf den Pegel am Wehr Beihingen als auch auf den Schleusenpegel (Mehrgrößenregelung). Beide gemessenen Ist-Wasserstände werden jeweils über einen eigenen PI-Regler durch Abgleich mit den abflussabhängigen Sollwasserständen nachgeführt.
2. Das Wehr wird nur dann beaufschlagt, wenn die Leistungsfähigkeit des Kraftwerkes erschöpft ist. Priorität hat der Abfluss über das Kraftwerk. Lediglich

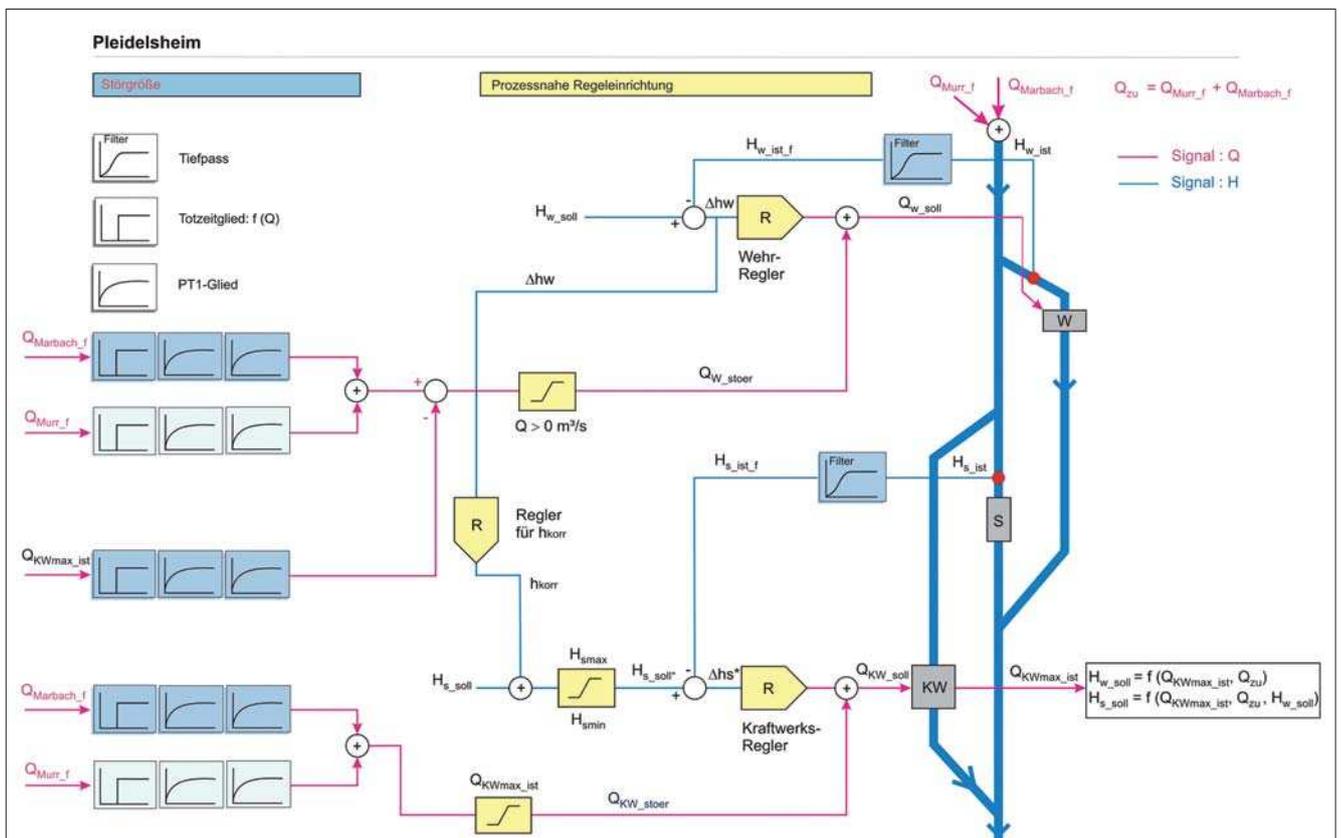


Bild 2: Regelungskonzept für die Stauhaltung Pleidelsheim

eine Mindestwassermenge wird permanent über das Wehr in den Altneckar eingeleitet.

3. In den Zeiten, in denen nur das Kraftwerk den Abfluss aus der Stauhaltung Pleidelsheim regelt, wird über einen weiteren Regelkreis gewährleistet, dass der Wasserstand auch am Wehrpegel nachgeführt wird. Dazu wird die Wasserstands Differenz am Wehrpegel über einen Korrekturregler h_{korrr} auf den Sollwasserstand am Schleusenpegel aufgeschaltet.
4. Damit beinhaltet die Wasserstandsregelung drei PI-Regler!

Die Parameter der drei PI-Regler (proportional-integrale Regler) wurden ohne die Berücksichtigung einer Störgrößenaufschaltung bestimmt, da die Regelungsgüte durch eine zeitlich vorausschauende Störgrößenaufschaltung verbessert wird. Die Störgrößenaufschaltung der Zuflüsse aus der Stauhaltung Marbach und der Murr wird über ein abflussabhängiges Totzeitglied und zwei nachgeschaltete PT1-Glieder (Dämpfungsglieder) modelliert. Die Zuflussinformationen werden auf die Regelorgane Kraftwerk Pleidelsheim und Wehr Beihingen aufgeschaltet. Für das Kraftwerk wird der Zufluss auf den maximalen Kraftwerksdurchfluss (Abfuhrvermögen des Kraftwerks) beschränkt, während am Wehr Beihingen eine Zuflussaufschaltung erst dann erfolgt, wenn der Zufluss das Abfuhrvermögen des Kraftwerkes überschreitet. Da bei Notschluss einer Turbine der aktuelle maximale Kraftwerksdurchfluss erst nach einer zeitlichen Verzögerung am Wehr Beihingen wirksam wird, wird der zeitliche Verlauf des maximalen Kraftwerksdurchflusses auch über ein Totzeitglied und zwei PT1-Glieder abgebildet [2].

2.3 Bestimmung der Parameter der Leittechnik

Stauhaltung (Regelstrecke), Kraftwerk und Wehr (Regelorgane) sowie die Leittechnik wurden in einem mathematischen Modell abgebildet. Für die Modellierung der Regelstrecke der Stauhaltung Pleidelsheim wurde das BAW-eigene hydrodynamisch numerische Verfahren CasControl (1D-HN-Modell, instationär) mit einer räumlichen Diskretisierung von 100 m verwendet. Das Kraftwerk wird vereinfacht modelliert. Die Turbinen werden dem Sollabfluss dann nachgeführt, wenn die Differenz zwischen Soll- und Ist-Abfluss die Größe des Turbinenmindestverstellungsschrittes von 2 m³/s überschreitet. Im Vergleich zu Turbinen weisen Wehrverschlüsse ein träges Verhalten auf, was unter Umständen dazu führt, dass ein neuer Sollwert im nächsten Taktschritt nicht umgesetzt wird. Da diese Trägheit des Regelorganes Wehres bei der Bestimmung der Regelparameter berücksichtigt werden muss [3], wurden die Steuerung und die Bewegung des automatisierfähigen kleinen Wehrverschlusses in Beihingen in dem mathematischen Modell abgebildet. Der Abfluss über das Wehr in Beihingen resultiert dann aus aktueller Wehr-

stellung und dem aktuellen Wasserstand am Wehr, den das HN-Modell liefert.

Die verwendeten PI-Regler sind mit den Größen Proportionalanteil bzw. Kreisverstärkung k_R und Nachstellzeit T_N abflussabhängig zu parametrisieren. Dazu werden Zuflusssprünge (Testfunktionen) um einen Basisabfluss aufgebracht. Die Parameter des Reglers werden über die Dauer der Berechnung konstant gehalten. Die Simulationsdauer eines Berechnungslaufes betrug in dieser Untersuchung ca. sechs Tage. Durch die Wiederholung der Berechnung mit geänderten Reglerparametern können die Wirkungen analysiert und verglichen werden.

Gleichung 1 beschreibt den PI-Regelalgorithmus, der sowohl auf Änderungen der Regelgröße H als auch der Führungsgröße H_{Soll} reagiert.

$$Q_{ab}(t) = k_p \cdot \Delta H(t) + k_I \cdot \int \Delta H(t) \cdot dt$$

$$= k_R \cdot \left[\Delta H(t) + \frac{1}{T_N} \cdot \int \Delta H(t) \cdot dt \right]$$

Q_{ab}	[m ³ /s]	Abfluss (Stellgröße)
ΔH	[m]	Regelabweichung ($H_{\text{Soll}} - H$)
H_{Soll}	[m]	Sollwasserstand
H	[m]	Istwasserstand
k_R, k_p	[m ² /s]	Regelparameter ($k_R = k_p$)
k_I	[m ² /s ²]	Regelparameter
T_N	[s]	Nachstellzeit (\cong Laufzeit; $T_N = k_p / k_I$)

Da unterschiedliche Parameterkombinationen von Proportionalanteil k_p bzw. Kreisverstärkung k_R und Nachstellzeit T_N zu vergleichbaren zeitlichen Wasserstandsverläufen führen, müssen bei einer Gesamtbewertung weitere Kriterien wie Abflussvergleichmäßigung, Variabilität der Wasserstandsabweichungen, Anzahl der Stellbefehle etc. berücksichtigt werden. Alle Kriterien werden auf eine einheitliche Skala normiert und gewichtet zu einer Gesamtbewertung zusammengefasst. Durch Variation der Parameter kann der Parameterraum bezüglich der Eignung bewertet werden.

In Bild 3 ist das Ergebnis aus 256 Simulationsrechnungen für die Parametrisierung des Kraftwerksreglers dargestellt. Die Zuflussganglinie bleibt hierfür unverändert. Dafür wurden sowohl Proportionalanteil als auch Nachstellzeit in jeweils 16 unterschiedlichen Größen vorgegeben. Dies entspricht einem Simulationszeitraum von ca. vier Jahren. Über dem Proportionalanteil P und der Nachstellzeit T_N sind die Ergebnisse farbig aufgetragen, der Wertebereich ist durch den Farbbalken definiert, der rechts neben dem Diagramm steht. Blaue Bereiche kennzeichnen geeignete Parameterwerte, während rote Bereiche für die Regelung nicht geeignet sind. Exemplarisch sind vier Auswertungen von Einzelzielen mit den Diagrammen 1 bis 4 in

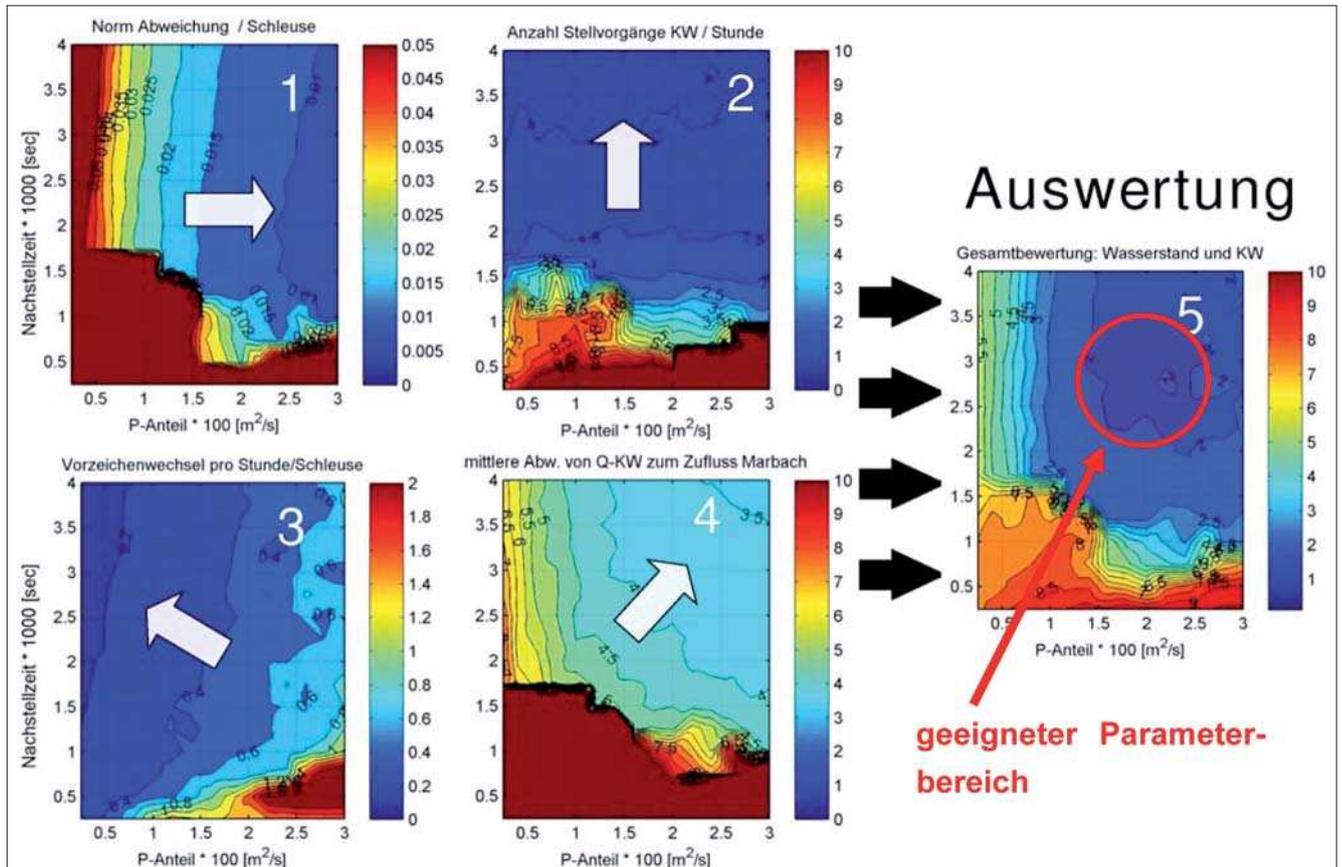


Bild 3: Bewertungsschema der Berechnungsergebnisse bei einem Basisabfluss von $50 \text{ m}^3/\text{s}$

Bild 3 über den gesuchten Regelungsparametern aufgetragen. Diese Einzelziele wurden auf eine einheitliche Skala normiert und gewichtet zu einer Gesamtbewertung zusammengefasst (Diagramm 5). Es fällt Folgendes auf:

- Die Wahl eines „guten Parameters“ unterscheidet sich bei Einzelzielen fundamental.
- Auch bei den Einzelzielen ergeben sich keine eindeutig identifizierbaren optimalen Parameter sondern lediglich Bereiche geeigneter Parameterkombinationen.
- Eine Gesamtbewertung ergibt sich aus einer subjektiven Liste zu erfüllender Einzelziele. Die Gesamtbewertung ersetzt damit nicht die Überprüfung der Einzelziele!

Die gleiche Prozedur wird auf unterschiedlichen Abflussniveaus wiederholt. Der in Bild 3 rot umrandete Bereich geeigneter Parameterwerte stellt sich dann für verschiedene Abflussniveaus unterschiedlich dar. Dadurch werden die Regelungsparameter abflussabhängig optimal ermittelt. Für Pleidelsheim wurden sechs weitere Abflussniveaus untersucht, wodurch für den Kraftwerksregler 30 Jahre Simulationszeit ausgewertet werden konnten. Die Kraftwerksregelung wurde dann mit weiteren 3×30 Jahren Simulationszeit überprüft für eine Regelung unter Beachtung einer Empfindlichkeitslamelle (Toleranzbereich für den Wasserstand zur

Minimierung der Stellbefehle), einer Störgrößenaufschaltung und beiden gemeinsam. Die Regelungsgüte verbessert sich mit der Empfindlichkeitslamelle und der Störgrößenaufschaltung gerade auch in den Parameterbereichen, die zuvor als ungeeignet für eine Regelung ausgewiesen wurden. Insgesamt erforderte die Parametrisierung des Kraftwerkreglers mehr als 5000 Simulationsrechnungen. Mit vergleichbarem Aufwand wurden anschließend Korrekturregler und Wehrregler parametrisiert [2].

Mit den parametrisierten Reglern wurden anschließend folgende ausgewählte Betriebssituationen näher analysiert und die Funktionsfähigkeit der Parameter überprüft:

- Schleusungen in Pleidelsheim und Marbach,
- Wehr übernimmt im Abflussspektrum 0 bis $80 \text{ m}^3/\text{s}$ die Wasserführung (kein Abfluss durchs Kraftwerk),
- Übergang vom Kraftwerksbetrieb zum gemeinsamen Betrieb des Kraftwerkes und des Wehres,
- Übergang vom Kraftwerksbetrieb zum gemeinsamen Betrieb des Kraftwerkes und des Wehres bei reduzierter Kraftwerksleistungsfähigkeit (zwei Turbinen aktiv),
- Wiederaufsetzen der Regelung bei ablaufendem Hochwasser,
- Wiederaufsetzen der Störgrößenaufschaltung,
- Turbinenschnellschluss.

Der Schleusenpegel reagiert erwartungsgemäß deutlich auf Bergschleusungen in Pleidelsheim. Wenn die Regelung auf den Absink am Schleusenpegel direkt reagiert, entsteht ein instabiles Regelungsverhalten. Dies kann durch ein zusätzliches Filter vermieden werden, wie es nachfolgend anhand einer Wasserstandsmessung am Schleusenpegel erläutert wird.

Die Wasserstandsmessungen werden durch ein Tiefpassfilter ständig geglättet, damit hochfrequente wind- und schiffsinduzierte Wellen nicht die Regelung „beruhigen“ und eine erhöhte Anzahl von Stellbefehlen an den Regelorganen provozieren. Diesem Messwertfilter ist ein Schleusenfilter vorgeschaltet. Bei beiden Filtern handelt es sich um einen Tiefpass 1. Ordnung (PT1-Glied). Die Zeitkonstante für das Messwertfilter beträgt fünf Minuten und für das Schleusenfilter 30 Minuten.

Das Schleusenfilter ist in der Regel inaktiv und wird nur mit dem Beginn einer Bergschleusung in Pleidelsheim über die Dauer von 30 Minuten aktiv geschaltet. Bild 4 zeigt die Wirkung dieser Datenfilterung für den gemessenen Wasserstand am 12. November 2006 am Schleusenpegel Pleidelsheim (blaue durchgezogene Linie). Um die Mittagszeit (ca. 670 Minuten im Diagramm) fand eine Bergschleusung statt, welche eine deutlich ausgeprägte Wasserstandsschwankung erzeugte. Die Amplitude dieser Schwankung beträgt ca. 13 cm. Das ständig mitlaufende Messwertfilter, in gelber Farbe eingezeichnet, dämpft die maximale Schwingungsamplitude auf ca. 6 cm. Ein PI-Regelalgorithmus würde diese gelbe Wasserstandsschwankungen in einen Sollabfluss übertragen, der ebenfalls dieses unerwünschte schwingende Verhalten zeigen würde. Erst durch das zusätzliche Filtern mit dem Schleusenfilter (rot gestrichelte Linie) wird der Wasserstandsverlauf im grün hinterlegten Zeitbereich beruhigt. Der rot gestrichelte Verlauf des Wasserstandes sinkt langsam ab und bewirkt das gewünschte behutsame Gegensteuern durch den Regler.

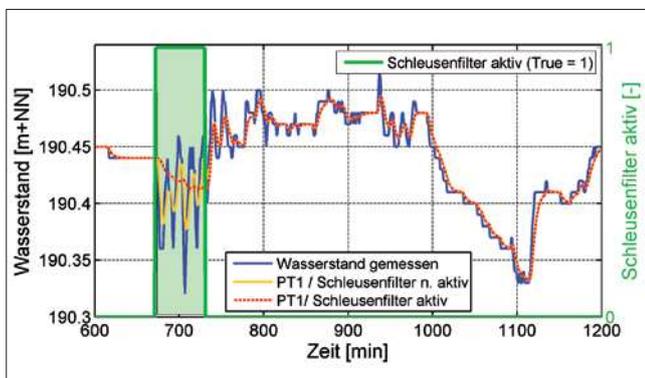


Bild 4: Wirkung der Datenfilterung am Beispiel der Wasserstandsaufzeichnungen vom 12. November 2006

3. Erfolgskontrolle

Die Parameter des Wasserhaushaltsreglers wurden dem Kraftwerksbetreiber SÜWAG AG Ende 2007 übergeben, der die Umsetzung und den Betrieb in Abstimmung mit der WSV übernahm. Der Wasserhaushaltsregler wurde Anfang 2008 in Betrieb genommen und hat sich mittlerweile bewährt. Aufgrund der zahlreichen Rückkoppelungen im Regelungskonzept empfahl die BAW, den automatisierten Betrieb in der Stauhaltung Pleidelsheim über längere Zeit „digital zu beobachten“. Dazu sollten die Wasserstände an Wehr und Schleuse, die Durchflüsse über Kraftwerk und Wehr sowie die Reglergrößen in hoher zeitlicher Auflösung dokumentiert und bei Bedarf der BAW zugestellt werden. Damit könnten Probleme in der Regelung nachvollzogen und bewertet werden. Die Erfolgskontrolle an der Mosel zeigt, dass mit einer weitreichenden Dokumentation auftretende Regelungsprobleme diagnostiziert und Lösungen erarbeitet werden können.

4. Literatur

- [1] Bundesanstalt für Wasserbau (2004): Simulation von Hydraulik und Leittechnik im numerischen Staustufenmodell zur Optimierung der automatisierten Steuerung und Regelung von Wehren und Wasserkraftwerken. Tätigkeitsbericht der BAW, S. 54-58.
- [2] Bundesanstalt für Wasserbau (2008): Gutachten über die Abfluss- und Stauzielregelung der Neckarstaustufe Pleidelsheim, unveröffentlicht.
- [3] Gebhardt, M. und Schmitt-Heiderich, P. (2008): Entwicklung und Simulation von Regelungsalgorithmen für Staustufen an Bundeswasserstraßen. In: Wasserwirtschaft, Heft 6/2008, S. 16-18.

Dr.-Ing. Peter Schmitt-Heiderich

Abteilung Wasserbau im Binnenbereich

Referat Wasserbauwerke, Stauhaltungen und Kanäle

Telefon: 0721 9726-2600

Fax: 0721 9726-5555

E-Mail: peter.schmitt-heiderich@baw.de

599 – W Erste Erfahrungen mit der Umsetzung der automatisierten Abfluss- und Stauzielregelung an der Mosel

1. Rückblick auf die Automatisierung der Staustufenkette

Rund 30 Jahre nach der offiziellen Einweihung der Mosel als Schifffahrtsstraße war es erstmalig erforderlich, die maschinen- und elektrotechnischen Anlagen an den Wehren der 12 Moselstaustufen zu ersetzen. Bis auf die Staustufe Koblenz handelt es sich bei allen Staustufen um Sektorwehre, wie beispielsweise die Staustufe Fankel in Bild 1, die im deutsch-luxemburgischen Abschnitt mit zwei, ab Trier mit drei Wehrverschlüssen ausgestattet sind. In den Jahren 1999 bis 2001 wurden zunächst an der Staustufe Detzem prototypisch die elektro-, regel- und maschinenbautechnischen Komponenten der Wehranlagen erneuert, zu denen auch der Ersatz des bisherigen Metrawatt-Reglers durch eine moderne Abfluss- und Stauzielregelung (ASR) zählte. Der Automatikbetrieb sollte dabei das Abflussspektrum von NNQ bis zum Ende des Regelbereichs umfassen, die Stauziele unter Ausnutzung des zulässigen Toleranzbereichs eingehalten und der Abfluss entlang der Kette vergleichmäßig werden. Heute sind bis auf die Staustufe Koblenz alle Moselstaustufen modernisiert und mit lokalen Reglern ausgestattet, die von der BAW mit entwickelt und modellbasiert parametrisiert wurden.



Bild 1: Staustufe Fankel mit einem dreifeldrigen Sektorwehr

2. Regelungsprinzip der lokalen Regler

Stauhaltungen weisen ein nichtlineares Verhalten auf, das sich über den Regelbereich ändert. Für Stauhaltungen, die zum Übersteuern neigen, ist es Stand der Technik, eine sogenannte OW/Q-Regelung einzusetzen. In der Abkürzung OW/Q bezeichnet OW den Oberwasserstand (Regelgröße) und Q den Zufluss (Störgröße). Das Regelungsprinzip ist in Bild 2 darge-

stellt. Während die Wasserstandsregelung mit einem klassischen PI-Regelalgorithmus erfolgt, wird die Störgröße zeitversetzt über einen Filter als Steuerungsanteil berücksichtigt [1].

Mit Hilfe einer Simulation kann am Beispiel der 18,8 km langen Stauhaltung Fankel sehr anschaulich aufgezeigt werden, in welchem Bereich die Stauhaltung mit einer Wasserstandsregelung zum Übersteuern neigt: Hierzu wird einem eindimensionalen hydro-numerischen (HN)-Modell eine kaskadenförmige Zuflussfunktion als obere Randbedingungen vorgeben und der Abfluss bei konstantem Oberwasserstand berechnet. Die Zeit zwischen den Zuflusssprüngen ist dabei so groß gewählt, dass sich jeweils vor dem nächsten Sprung wieder ein stationärer Zustand eingestellt hat. Aus Bild 3 ist links zu erkennen, dass die Stauhaltung bis zu einem Abfluss von etwa 200 m³/s zum Übersteuern neigt, während sie für größere Abflüsse sehr „gutmütig“ reagiert. Eine andere Möglichkeit zur Identifikation der zwei Abflussbereiche ist die Charakterisierung der Stauhaltung über die Stauraumkenngrößen Lauf- und Retentionszeit, T_L und T_R , wie es u. a. in [2] beschrieben wird.

In Bild 3 rechts sind die berechneten Lauf- und Retentionszeiten für die Stauhaltung Fankel dargestellt: Dabei ist zu erkennen, dass die Laufzeit mit zunehmendem Abfluss abnimmt, während die Retentionszeit zunimmt. Im Bereich bis etwa 200 m³/s ist die Retentionszeit kleiner als die Laufzeit. Hier neigt die Stauhaltung zum Übersteuern, da ein reiner Wasserstandsregler erst nach der Laufzeit auf eine Zuflussänderung reagieren kann und bis dahin zu viel Volumen in die Stauhaltung eingespeist wurde. Für Stauhaltungen mit $T_R < T_L$ ist eine OW/Q-Regelung die geeignetere Betriebsweise: Da eine Zuflussänderung (Störgröße) über den Steuerungsanteil direkt als Abflussänderung berücksichtigt wird, ist es wichtig, dass die zeitliche Verzögerung der Störgröße so gewählt wird, dass sie der berechneten Retentionszeit entspricht. Hierfür muss die Parametrisierung der Störgrößenaufschaltung abflussabhängig erfolgen. Dass dies individuell für jede Stauhaltung erfolgen muss, zeigt ein Vergleich der Retentionszeiten aller Moselstauhaltungen (siehe Bild 4).

Eine Besonderheit der Mosel gegenüber anderen Wasserstraßen sind die abflussabhängigen Stauziele, die ebenfalls als „Stauzielbildung“ im lokalen Regler abgebildet sind (siehe Bild 2): Die Oberwasserstände werden hier mit steigendem Zufluss in der Regel in Schrittwerten von 20 cm und mit einer Geschwindigkeit von 10 cm/h um bis zu 70 cm abgestaut. Im Allgemeinen gelten Stauzieltoleranzen von ± 5 cm.

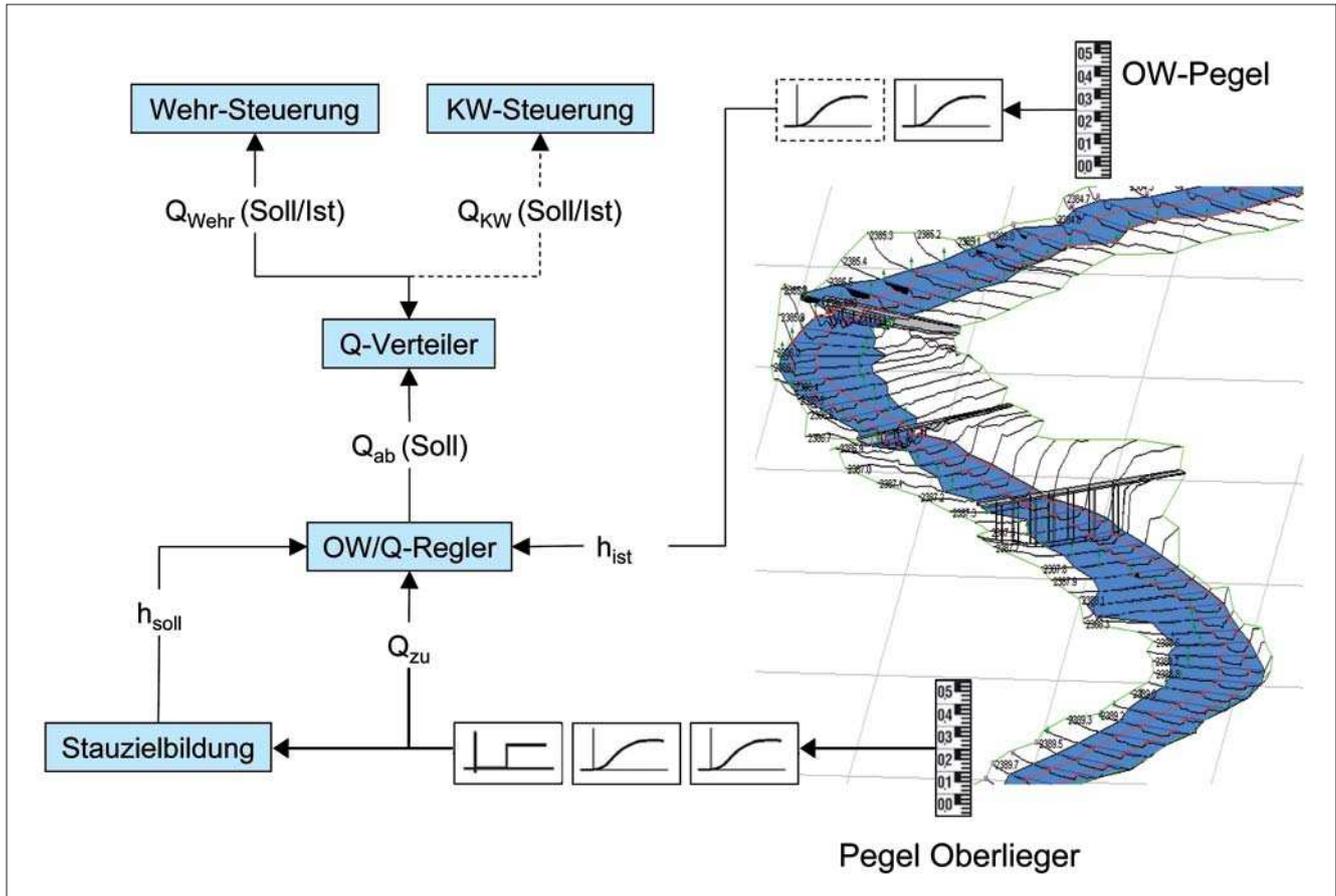


Bild 2: Struktur des BAW-Reglers an den Moselstaustufen

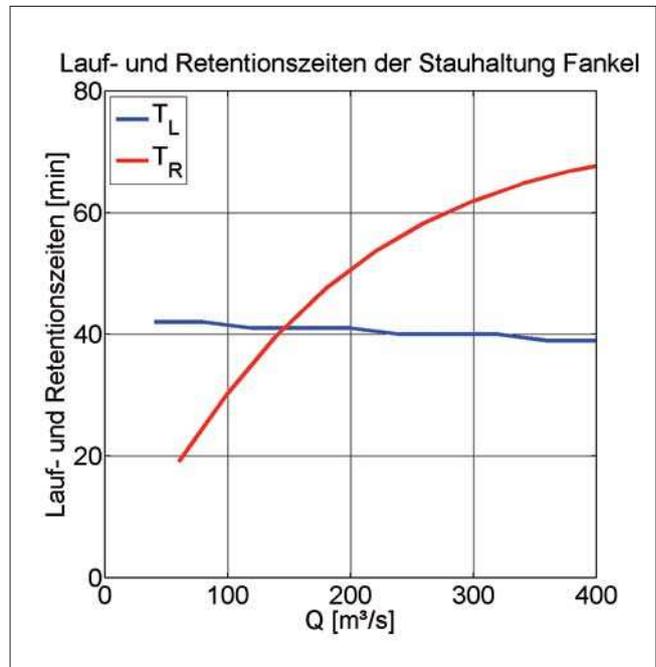
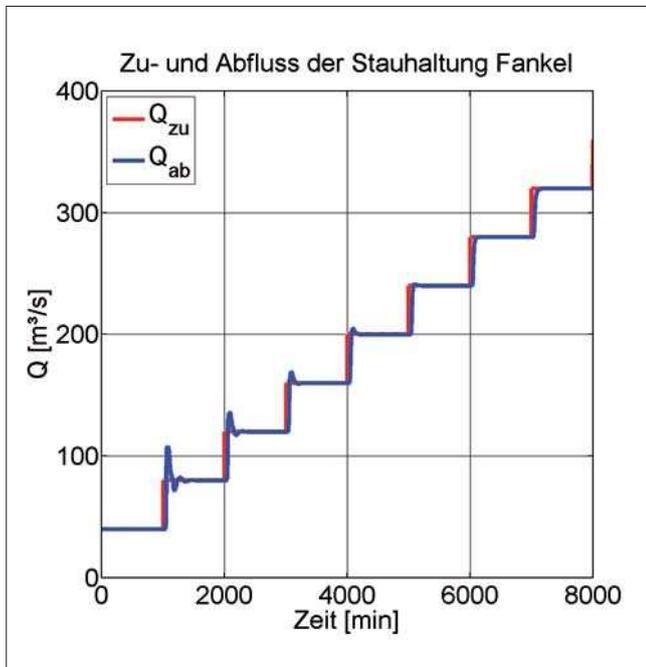


Bild 3: Sprungantwort sowie Lauf- und Retentionszeiten der Moselstaustufe Fankel

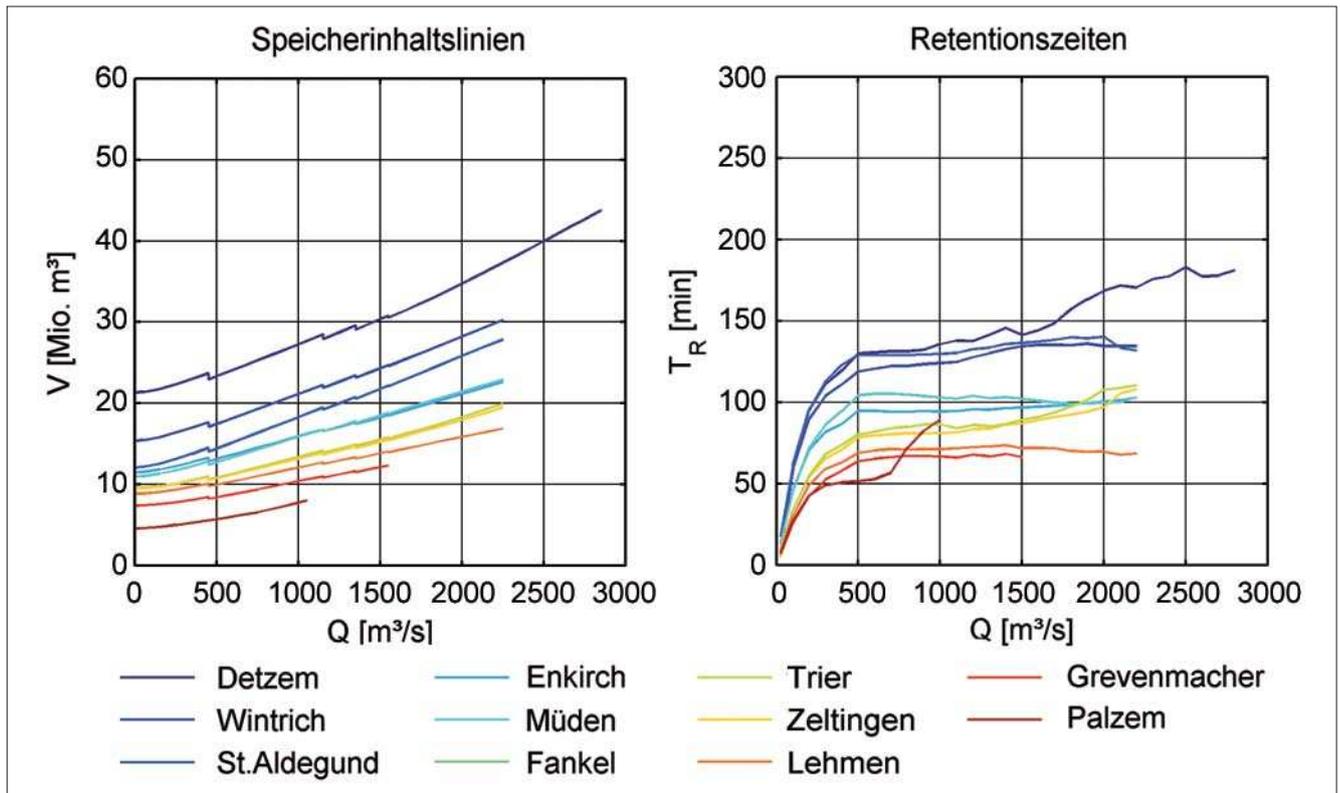


Bild 4: Speicherinhaltslinien und Retentionszeiten der automatisierten Moselstauhaltungen

3. Betriebserfahrungen im automatisierten Betrieb

An den Moselstaustufen liegen zum Teil mehrjährige Betriebserfahrungen vor, die eine Analyse des bisherigen Automatikbetriebs und eine erste Erfolgskontrolle erlauben: Zur Beurteilung der Regelgüte kann dabei nicht nur auf die Betriebspegel im Ober- und Unterwasser oder die hydrologischen Abflusspegel, sondern auch auf alle Ein- und Ausgangssignale des OW/Q-Reglers zugegriffen werden. Das Leitsystem vor Ort zeichnet Daten in Form von Trends auf, die in Diagrammen ausgewertet oder zur Weiterverarbeitung portiert werden können. Exemplarisch kann dies für die Staustufe St. Aldegund für den Zeitraum 1. August 2007 bis 1. August 2008 gezeigt werden. Neben dem dreifeldrigen Sektorwehr befindet sich ein Kraftwerk mit vier Kaplan-Rohrturbinen, das von der RWE Power mit einem eigenen Kraftwerksregler ausgestattet ist. In der Vergangenheit wurde bei Erreichen der Schluckfähigkeit (etwa $400 \text{ m}^3/\text{s}$) die Stauverantwortung an die WSV übergeben und der BAW-Regler übernahm die Wasserführung. Im o. g. Zeitraum wurden erstmalig sowohl Wehr als auch Kraftwerk von dem BAW-Regler geführt. Dieser Testbetrieb diente dazu, Erfahrungen zu sammeln und auszuwerten, um den Regler für einen zukünftigen gemeinsamen Betrieb von Kraftwerk und Wehr zu optimieren.

Vergleicht man die Regelgüte „Einhaltung des Stauziels“ für verschiedene Betrachtungszeiträume, so ergeben sich unterschiedliche Qualitäten, die sich an einer relativen Häufigkeitsverteilung der Regelabweichung veranschaulichen lassen. In Bild 5 sind für drei ausgewählte Monate die Regelabweichungen der 1 min-Werte im Oberwasser der Staustufe statistisch ausgewertet: Im Hinblick auf die Jahreshauptwerte am Pegel Cochem [3] ist der Monat Oktober 2007 charakteristisch für eine Niedrig- bis Mittelwasserperiode ($\text{MNQ} = 59,0 \text{ m}^3/\text{s}$) mit Abflüssen, die ausschließlich über das Kraftwerk abgeführt werden. Der Monat April 2008 ist beispielhaft für eine Mittelwasserperiode ($\text{MQ} = 315 \text{ m}^3/\text{s}$), in der der Abfluss über das Kraftwerk und über maximal zwei Sektoren erfolgt und der Monat März 2008 kennzeichnet eine Mittel- bis Hochwasserperiode ($\text{HQ}_1 = 1280 \text{ m}^3/\text{s}$), in der zeitweise alle Sektoren zur Hochwasserabfuhr mit eingesetzt werden.

Die Häufigkeitsverteilungen zeigen, dass das Stauziel in den betrachteten Monaten nahezu vollständig in der vorgegebenen Stauzieltoleranz von $\pm 5 \text{ cm}$ gehalten wird. Allerdings ist die Streuung im Oktober 2007 geringer, die Stauzieltoleranz wird weniger ausgenutzt als in den beiden anderen Perioden. Der Regler reagiert viel härter als bei höheren Abflüssen. Hier macht sich der Einfluss des Stellorgans bemerkbar: Während die Turbinen jede Änderung des Sollabflusses sofort umsetzen, reagieren die Sektoren träger: Weniger und dafür größere Verstell Schritte bewirken stärkere Wasser-

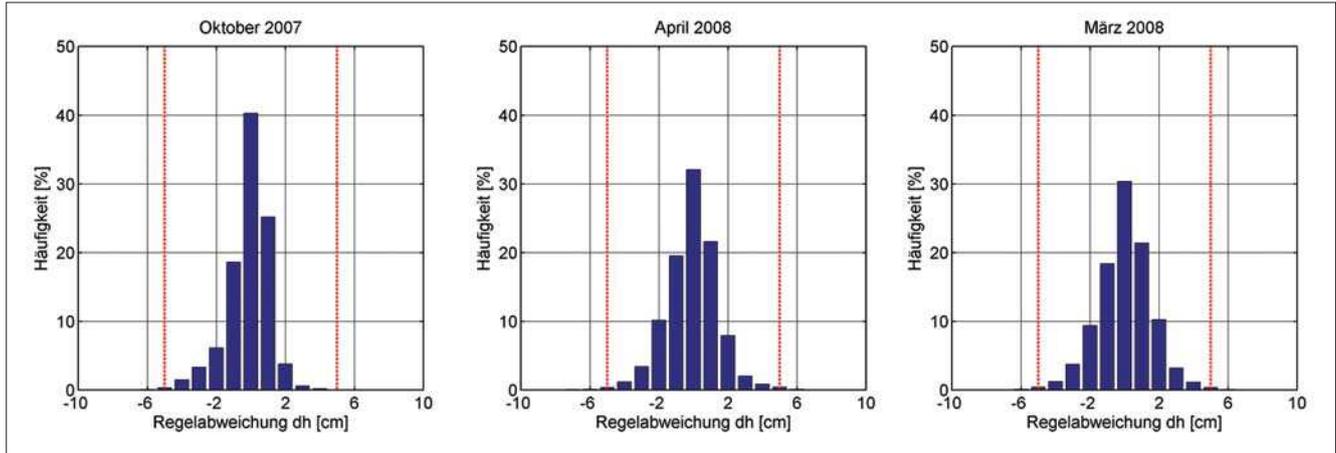


Bild 5: Stauzieleinhaltung in St. Aldegund: Häufigkeitsverteilung der Regelabweichungen für die Monate Oktober 2007 ($Q = 20 \div 220 \text{ m}^3/\text{s}$), April 2008 ($Q = 290 \div 820 \text{ m}^3/\text{s}$) und März 2008 ($Q = 300 \div 1350 \text{ m}^3/\text{s}$)

standsschwankungen im Oberwasser. Zurzeit laufen noch Untersuchungen, um den Regler auch bei niedrigeren Abflüssen im reinen Kraftwerksbetrieb etwas weicher einzustellen und die Stauzieltoleranzen damit besser auszunutzen.

Neben der Güte des Reglers wurden auch die Betriebszeiten im Automatikbetrieb analysiert: Hier konnte mehrmals beobachtet werden, dass das Betriebspersonal das Wehr auf Automatikbetrieb und nach kurzer Zeit wieder auf Handbetrieb stellte, nachdem der Regler entgegen den Erwartungen reagierte. Eine Analyse der Ursachen führte zu dem Ergebnis, dass zum Zeitpunkt des Einschaltens stark instationäre Zustände vorlagen und der Oberwasserstand nicht dem Stauziel entsprach. Das führte in der Initialisierung des Reglers zu unerwünschten Effekten: Da der Sollabfluss aus dem gemittelten Zu- und Abfluss berechnet wird, ergibt sich bei großen Abweichungen ein Sollabfluss, der deutlich vom Istabfluss abweicht. Kritisch sind dabei Situationen, in denen sich der Oberwasserstand an der oberen oder unteren Stauzieltoleranzgrenze befindet. In Tabelle 1 sind alle Fälle, die in der Initialisierungsphase auftreten können, dargestellt: Fall 1 entspricht dem Idealfall, bei dem der Regler eingeschaltet werden sollte. Auch im Fall 2 ist das Einschalten unproblematisch, da der Regelungsanteil im Verhältnis zum Steuerungsanteil klein ist. Unter den Fällen 3 bis 6 sind die Fälle 4 und 5 am kritischsten, da die vorhandene Regelabweichung verstärkt wird und zu einer Überschreitung der Stauzieltoleranz führt. Dabei ist insbesondere die Unterschreitung sehr kritisch für die Schifffahrt.

Fall	Oberwasserstand H_{ist}	Zu- und Abfluss	Regler einschalten
1	$H_{ist} = \text{Stauziel}$	$Q_{zu} = Q_{ab}$	Idealfall
2	$H_{ist} = \text{Stauziel} \pm 5 \text{ cm}$	$Q_{zu} = Q_{ab}$	ohne Probleme
3	$H_{ist} = \text{Stauziel} - 5 \text{ cm}$	$Q_{zu} < Q_{ab}$	Oberwasser steigt
4	$H_{ist} = \text{Stauziel} + 5 \text{ cm}$	$Q_{zu} < Q_{ab}$	Oberwasser steigt
5	$H_{ist} = \text{Stauziel} - 5 \text{ cm}$	$Q_{zu} > Q_{ab}$	Oberwasser fällt
6	$H_{ist} = \text{Stauziel} + 5 \text{ cm}$	$Q_{zu} > Q_{ab}$	Oberwasser fällt

Tabelle 1: Denkbare Fälle in der Initialisierungsphase des lokalen Reglers

4. Echtzeitschulungen des Schichtpersonals

Um die Akzeptanz für die lokalen Regler zu fördern und das Verständnis für das Regelverhalten in Sondersituationen zu verbessern, wurden gemeinsam mit der Fachstelle für Gewässerkunde bei der Wasser- und Schifffahrtsdirektion (WSD) Südwest und der Fachstelle Maschinenwesen Südwest (FMSW) Schulungen in den Wasser- und Schifffahrtsämtern (WSÄ) Koblenz und Trier durchgeführt. Zielgruppe waren die Leiter der Außenbezirke, Mitarbeiter der Sachbereiche 3, das Schichtpersonal jeder Staustufe und das Personal der Zentralwarte der RWE Power in Fankel (siehe Bild 6).



Bild 6: Schulung im WSA Koblenz

Für die Schulungen wurde eine Schulungs-SPS (Speicherprogrammierbare Steuerung) Siemens Simatic S7 der FMSW verwendet, die über einen OPC-Server (OLE for Process Control, Standardisierte Software-Schnittstellen im Bereich Automatisierungstechnik) mit der Simulationsumgebung der BAW kommunizierte (siehe Bild 7). Das HN-Modell der Stauhaltung lief dabei in Echtzeit unter der Software MATLAB/SIMULINK. Dieses Verfahren wird auch als Hardware-in-the-Loop (HiL) bezeichnet und wird sehr häufig im Automobil-

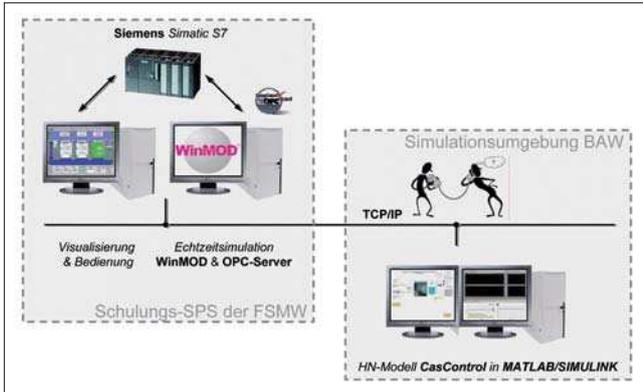


Bild 7: Konfiguration des Echtzeitsystems für die Schulungen (Hardware-in-the-loop)

bereich eingesetzt. Hier dient es zur Verbesserung der Testmöglichkeiten z. B. von elektronischen Steuergeräten.

In den Schulungen konnten mit Hilfe des Echtzeitsystems verschiedene Sondersituationen vorgeführt werden, wie z. B. Turbinenschnellschluss, Durchflussreduzierung zur Rechenreinigung, Stauzielwechsel, Erreichen der Sektorendlagen oder die Dauer zum Füllen der Stauhaltung bei Niedrigwasser. Als Visualisierungsmöglichkeiten dienten Echtzeit-Visualisierungen des Stauraums und der Wehranlage unter MATLAB/SIMULINK (siehe Bild 8). Im Hinblick auf das Einschalten des Reglers konnte beispielsweise gezeigt werden, dass es bei stark instationären Zuständen am sichersten ist, die Anlage so lange von Hand zu fahren, bis Abfluss und Zufluss weitestgehend übereinstimmen und die Regelweichung möglichst gering ist. Selbst bei Abweichungen bis ± 5 cm beträgt die Einschwingphase des Reglers nicht mehr als 1,5 h.

5. Ausblick

Die bisherigen Betriebserfahrungen mit den automatisierten Moselstauufen sind überwiegend sehr positiv. Die lokalen Regler erfüllen die an sie gestellten Anforderungen und halten die Stauziele innerhalb der zulässigen Toleranzgrenzen. Probleme, die im Betrieb auftraten, konnten auf Basis der vor Ort gespeicherten Daten analysiert und Verbesserungsvorschläge erarbeitet werden. Von Vorteil war dabei ein Remote-Zugriff auf die Wehrsteuerungen (pcAnywhere), über den direkt auf Daten in der Anlage zugegriffen werden konnte. Hier zeigte sich, dass ein gutes Datenmanagementsystem unverzichtbar für eine spätere Erfolgskontrolle ist. Die Schulungen hatten das Ziel, das Verständnis für die Wirkungsweise der lokalen Regler zu erhöhen und die Reaktionen im Automatikbetrieb besser interpretieren zu können. Es hat sich gezeigt, dass diese begleitenden Informationen zu einer höheren Akzeptanz bei der Einführung dieser neuen Technologie beitragen.

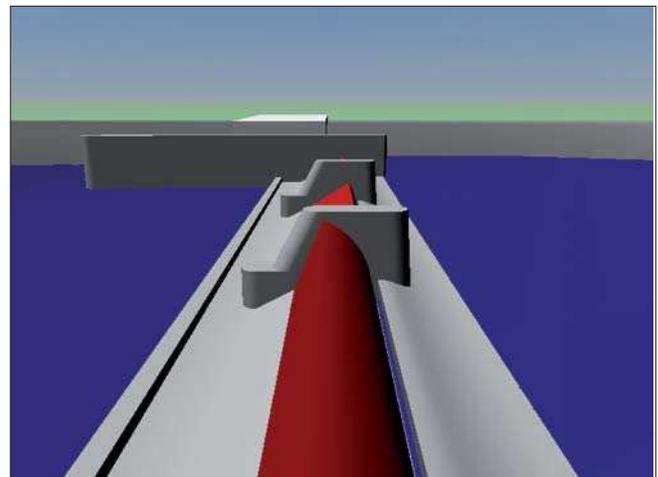
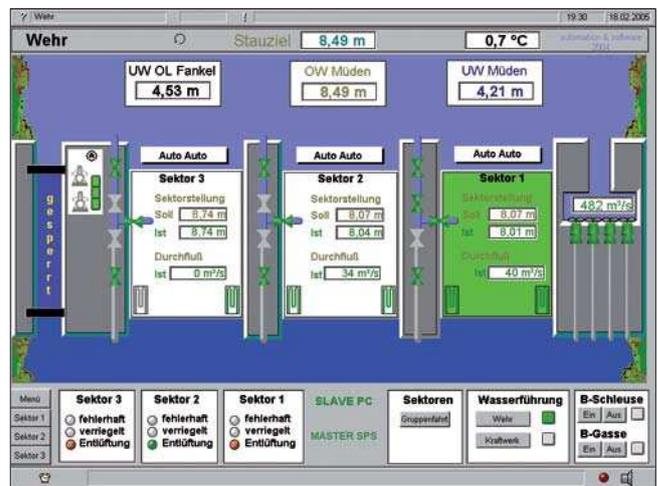
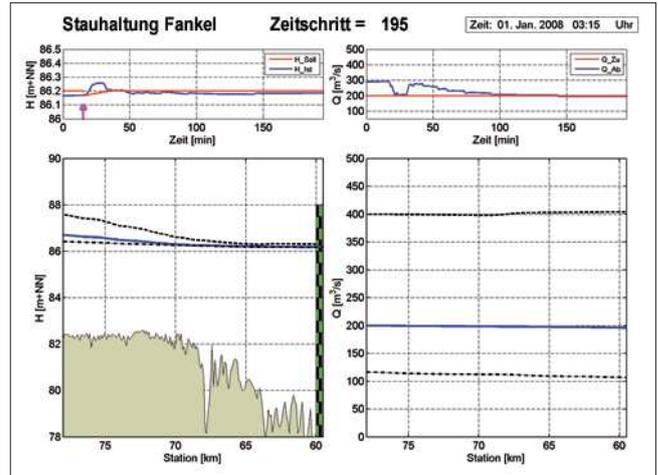


Bild 8: Visualisierungen für die Schulungen: oben) Stauraum mit Soll- und Istwasserstand, Zu- und Abfluss, Wasserspiegel- und Abflusslängsschnitt, Mitte) Wehrsteuerungssoftware, unten) Sektorwehr als Virtual Reality Modell

Beschränkten sich die bisherigen Erfahrungen, auf Grund der geteilten Wasserführung von RWE Power und WSV, fast ausschließlich auf den Automatikbetrieb der Sektorwehre, so liegen heute auch Erfahrungen über das Führungsverhalten des BAW-Reglers im unteren Abflussspektrum vor, wenn der Abfluss im Wesentlichen über das Kraftwerk erfolgt. Über etwa ein Jahr wurden die Kraftwerke der Stauhaltungen Enkirch und St. Aldegund vom BAW-Regler geführt, und für einen Monat wurde der Testbetrieb auf die Stauhaltungskette Detzem bis Müden ausgedehnt. In diesem generell schwierigeren Regelungsbereich zeigte sich, dass eine Nachparametrisierung erforderlich ist: Einflussfaktoren wie die Ungenauigkeiten in der Zu- und Abflussermittlung (Bilanzfehler) oder die Stellgeschwindigkeit der Turbinen kommen hier stärker zum Tragen und sind Gegenstand laufender Untersuchungen in der BAW. Die Feinoptimierung der lokalen Regler soll bis Mitte 2009 umgesetzt werden.

Die starken Abflussschwankungen aus der französischen Mosel (zum Teil bis 300 m³/s innerhalb weniger Stunden) sowie Abflussschwankungen aus Sauer und Saar lassen sich über eine automatisierte lokale Regelung nicht ausreichend kompensieren. Daher sind zwei Koordinatoren vorgesehen: Für die obere Mosel bis einschließlich Trier und für die untere Mosel bis zur Mündung. Im Rahmen des Forschungsprojekts „Koordinator Obere Mosel“ wurde vom Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft der Universität Kassel ein Koordinator entwickelt, dessen vordringlichste Aufgabe die Vergleichmäßigung des Abflusses unter Berücksichtigung vorhandener Bewirtschaftungsvolumina ist. Der Koordinator wurde unter MATLAB/Simulink realisiert und wird zurzeit in der BAW getestet. Eine Umsetzung zusammen mit der FMSW ist für das Jahr 2009 vorgesehen.

6 Literatur

- [1] Bundesanstalt für Wasserbau (2004): Simulation von Hydraulik und Leittechnik im numerischen Staufstufenmodell zur Optimierung der automatisierten Steuerung und Regelung von Wehren und Wasserkraftwerken. In: Tätigkeitsbericht der BAW, S. 54-58
- [2] Theobald, S., (1999): Numerische Simulation von Staustufenketten mit automatisiertem Betrieb. In: Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Dissertation, Mitteilungen 201, Universität Karlsruhe
- [3] Bundesanstalt für Gewässerkunde (2008): Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch, Rheingebiet, Teil III, <http://dlr.bafg.de:8086/>.

Dr.-Ing. Michael Gebhardt
Abteilung Wasserbau im Binnenbereich
Referat Wasserbauwerke, Stauhaltungen und Kanäle
Telefon: 0721-9726-3410
Fax: 0721 9726 5555
E-Mail: michael.gebhardt@baw.de

Dipl.-Ing. Sven Wohlfart
Institut für Hydromechanik
Universität Karlsruhe
Telefon: 0721 9726 3410
Fax: 0721 9726 5555
E-Mail: sven_wohlfart@web.de

600 – W Reglerentwurf und automatische Codegenerierung

1. Veranlassung und Zielsetzung

Zur Verbesserung der Qualität der Prozessführung und zur Unterstützung des Betriebspersonals werden die Wehranlagen in der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) schrittweise modernisiert und automatisiert. Die automatische Abfluss- und Stauzielregelung (ASR) von Stauhaltungen ist dabei auf Grund des nichtlinearen Streckenverhaltens, der dynamischen Eigenschaften der Stellorgane sowie der Mehrfachnutzung eine anspruchsvolle Regelungsaufgabe.

Die modellbasierte Entwicklung und Parametrisierung von Reglerstrukturen zur Abfluss- und Stauzielregelung wird seit mehreren Jahren in der BAW durchgeführt. Die Algorithmen wurden anfangs in der proprietären Programmiersprache C, später in C++ entwickelt und getestet. Zur Datenaufbereitung, Visualisierung und Ergebnisauswertung wurden eigen entwickelte und kommerzielle Programme genutzt. Seit 2004 wird die Simulations- und Entwicklungsumgebung MATLAB/SIMULINK von The MathWorks [1] eingesetzt, die eine hierarchische Modellierung mit Hilfe grafischer Blöcke ermöglicht. Zusätzlich kann mit so genannten S-Funktionen eigener Code in das Modell integriert werden. Die erstellten SIMULINK-Modelle sind wesentlich übersichtlicher als üblicher C-Code und können ohne Kompilierung ausgeführt werden.

Die entwickelten Algorithmen müssen in der Praxis an herstellereigenspezifische Speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) übergeben und angepasst werden. Bisher wurde dies über den Zwischenschritt eines Metacodes gelöst, der ein zeitaufwendiges und fehleranfälliges Umschreiben bestehender Algorithmen bedeutet.

Nach der Übergabe an die ausführende Automatisierungsfirma muss der Metacode interpretiert und in die dortige Programmierumgebung eingebunden werden. Der implementierte Reglercode ist später vom Entwickler schwer lesbar und erfordert zudem eine Validierung anhand von Simulationsrechnungen.

In diesem Beitrag wird eine vergleichsweise neue Entwicklung vorgestellt, bei der aus einem Modell unter SIMULINK heraus ausführbarer Code auf einer Zielplattform (Target) erzeugt werden kann.

2. Werkzeuge bei der Umsetzung des Reglercodes

2.1. Entwicklungsumgebung und Real Time Workshop

Die Entwicklungsumgebung MATLAB/SIMULINK stellt ein leistungsfähiges Programmpaket für numerische Berechnungen im Bereich der Ingenieurwissenschaften zur Verfügung und setzt weltweit Standards bei der Modellierung und Simulation technischer Systeme. Der Softwarename weist auf die speziell für den Umgang mit Matrizen und Vektoren optimierte Programmiersprache MATLAB und auf die interaktiv grafische Simulationsumgebung SIMULINK hin, die gegenüber dem modularen Aufbau von MATLAB eine der größten Erweiterungen darstellt. Der Real Time Workshop (RTW) ist eine SIMULINK Erweiterung (Toolbox), um SIMULINK Modelle in lauffähigen C-Code für unterschiedliche Plattformen (Real Time Targets) zu übersetzen.

In Bild 1 ist der Entwicklungsprozess bei der automatischen Code-Generierung dargestellt: Auf der einen Seite die Systembeschreibung und Modellierung bis hin zur Codierung und auf der anderen Seite der Test und die Integration auf dem Steuergerät. Das SIMULINK-Modell der Regelstrecke (Stauhaltung) und des Stellorgans (Wehr, Kraftwerk) bildet die Grundlage für die Reglerentwicklung. Das Simulationsmodell wird dazu verwendet, den Regleransatz zu verifizieren und zu parametrisieren.

Die mathematische Modellierung des zu steuernden physikalischen Systems, der Entwurf der Software für Steuerungen und Regelungen und schließlich das Verhalten beider innerhalb einer Entwicklungsumgebung zu modellieren, wird als Model Based Design bezeichnet. Das Blockdiagramm der so erstellten Anwendung

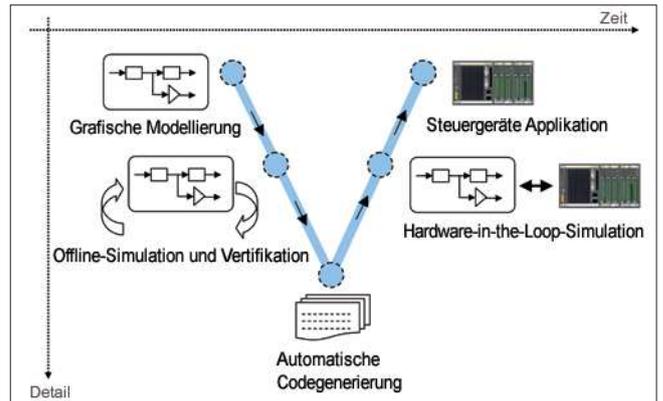


Bild 1: Darstellung des Entwicklungsprozesses der automatischen Code-Generierung als V-Diagramm

dient in der Folge als vollständige und detaillierte Anwendungsbeschreibung und somit als ausführbare Spezifikation. Durch das automatisierte Generieren von Code aus dem SIMULINK-Modell heraus verkürzt sich die Test- und Implementierungsphase (rechte Seite in Bild 1) erheblich. Die Verwendung der kompletten Werkzeugkette, von der Simulation bis hin zur automatischen Codegenerierung, gewährt eine hohe Robustheit des generierten Codes hinsichtlich Laufzeitfehler und Performance.

2.2. Auswahl einer Zielplattform – das Real Time Target

Bei der Codegenerierung mit dem Real Time Workshop wird auf vordefinierte Schablonen zurückgegriffen, die die jeweiligen Real Time Targets beschreiben. Grundsätzlich wird unterschieden zwischen der Generierung von Code, der auf PC-Komponenten mit Windows- oder Linux-Betriebssystem lauffähig ist (z. B. als eigenständiges Executable auf einem Industriepc), und Code, der auf Steckkarten (Embedded) oder SPS-Modulen eingesetzt wird. Eine Auswahl der verschiedenen Zielplattformen, die Konfigurationseinstellungen und die Implementierung wurden in Wagenbret (2008) [2] ausführlich untersucht und spezifische Vor- und Nachteile aufgezeigt. Gemeinsam ist allen Zielplattformen der mehrstufige Entwicklungsprozess, der auf einem parametrisierten und validierten SIMULINK-Modell aufsetzt und nach der Spezifikation eines Target-Files im Code-Generator vollautomatisch bis zum ausführbaren Object-Code der Zielhardware durchläuft (siehe Bild 2).

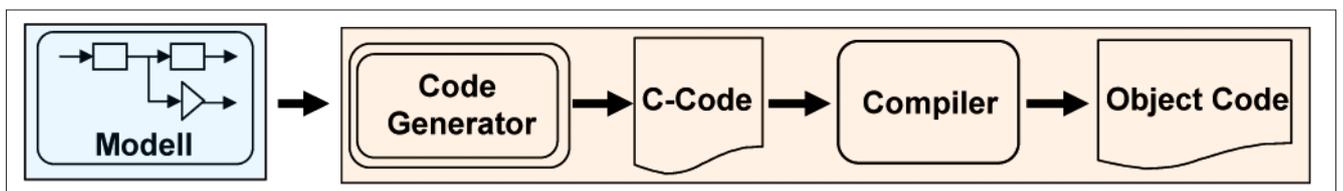


Bild 2: Entwicklungsstufen bei der automatischen Codegenerierung

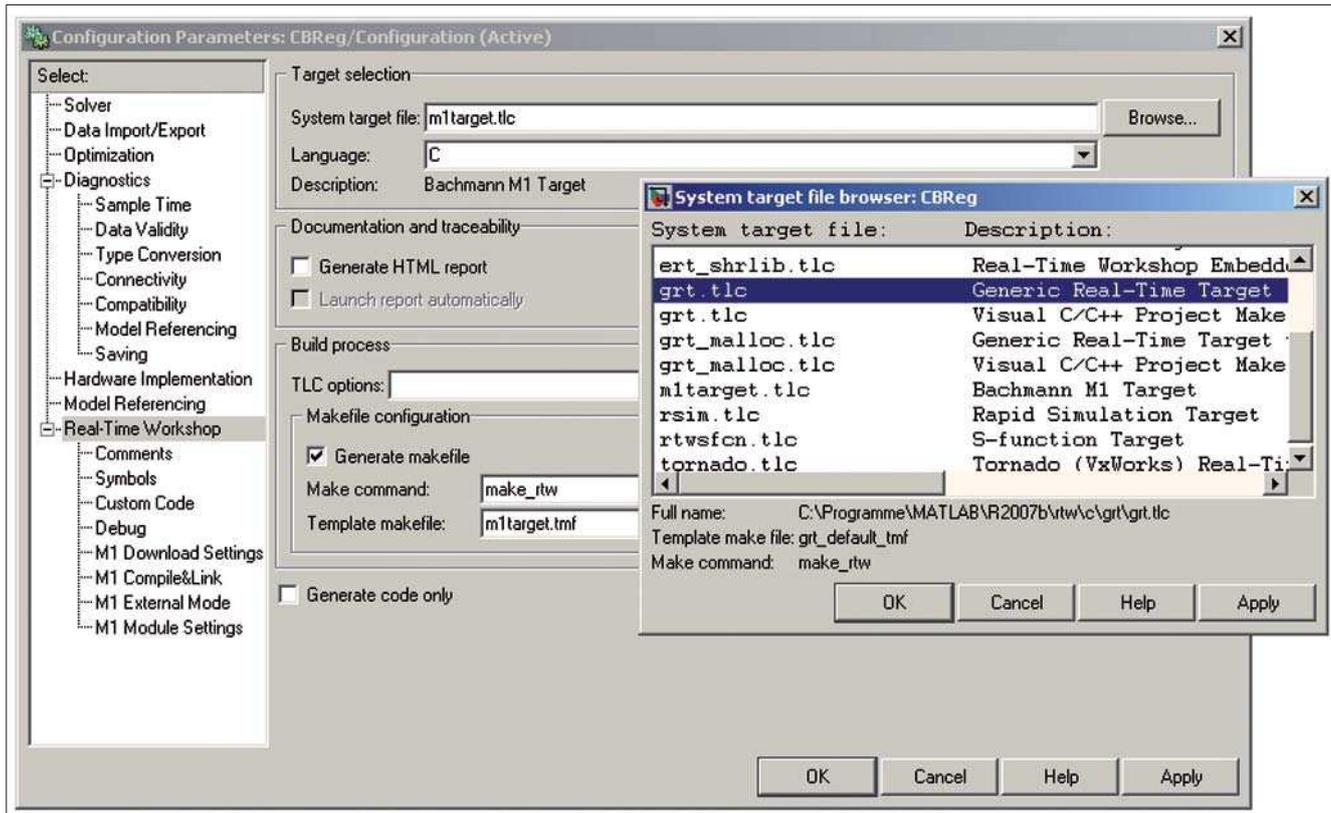


Bild 3: Konfiguration der Masken im Real Time Workshop

In der WSV wird häufig auf die weit verbreiteten speicherprogrammierbaren Steuerungen der Bauarten S5 und S7 von der Firma Siemens zurückgegriffen. Für die Inbetriebnahme dieser speicherprogrammierbaren Steuerungen ist der Einsatz des Industrie-Automatisierungssystems SIMATIC STEP von Siemens erforderlich.

Eine Alternative dazu stellen gegenwärtig zwei zertifizierte Partner von The MathWorks dar, die Firma Bachmann electronic [3] und B&R automation [4], die Steuerungen mit Software-Werkzeugen zur automatischen Codegenerierung anbieten. Beide Firmen stellen Schablonen für den Real Time Workshop zur Verfügung, die speziell für die herstellereigene Hardware angepasst wurden. Damit wird die Offenheit einer PC-basierten Steuerung mit der Zuverlässigkeit industrieller Hardwareplattformen vereint. Durch die vollständige Einbindung der Zielhardware in die Entwicklungsumgebung MATLAB/SIMULINK wird das Rapid Control Prototyping, die rechnergestützte Entwurfsmethode zur Regelungs- und Steuerungsentwicklung, ermöglicht. Typischerweise umfasst das Rapid Control Prototyping folgende Schritte bei dem Entwurf von Regelungen und Steuerungen:

- Die (dynamische) Beschreibung des zu automatisierenden Systems und dessen Modellbildung,
- der Entwurf der Regelung und Steuerung im Modell,
- die Umsetzung des Regelungs- und Steuerungsentwurfs auf dem Steuergerät,

- die Erprobung der Lösung in einer reinen Simulationsumgebung und die Erprobung am realen System.

Bei der Auswahl der Zielplattform müssen im Real Time Workshop verschiedene Einstellungen bezüglich Netzwerkprotokolle, Name und Speicherort des Prozesses, Ausführungsvorschriften für die Initialisierung, Taktrate und externer Zugriff in einzelnen Masken festgelegt werden. Eine Auswahlmöglichkeit dieser Masken mit Ansicht auf die Konfigurationsebene der einzelnen Parameter wird aus Bild 3 ersichtlich. Die Konfiguration der mitgelieferten Schablonen ist somit vom Entwickler einmalig an das eigene System anzupassen und dient dann als Vorlage für weitere Projekte. Neben den Targets für den Real Time Workshop stellen beide Firmen eigene Blockbibliotheken ihrer Hardware für die Simulationsumgebung SIMULINK zur Verfügung, die als einzeln konfigurierbare Module zum Simulationsmodell gelinkt werden können.

Ein Simulationsmodell, wie es sich in Bild 4 darstellt, wird aus Elementen, die in Standard-Blockbibliotheken (SIMULINK-Library) hinterlegt sind, aufgebaut und mit Signalleitungen verbunden. Hierfür stehen kontinuierliche und diskrete dynamische Blöcke, wie z. B. Integration und Unit Delay, algorithmische Blöcke wie Sum, Product und Lookup Table und strukturelle Blöcke wie Mux, Switch und Bus Selector zur Verfügung. Nach Auswahl eines Gleichungslösers (Solver) und der Abtastrate (Sample Time) wird das fertige Blockdiagramm zu Simulationszwecken ausgeführt und über

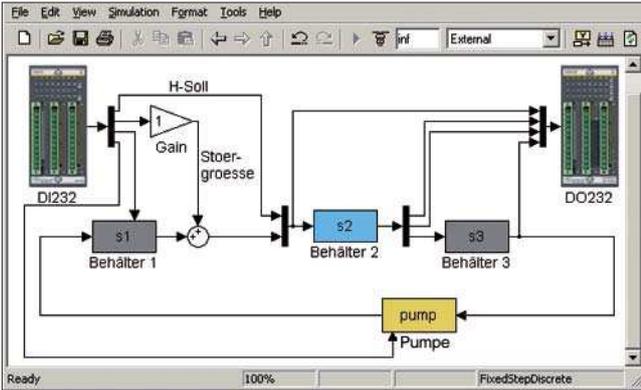


Bild 4: Simulationsmodell mit Signalleitungen und Elementen aus verschiedenen Blockbibliotheken

die Ausgabe auf so genannten Scopes (Software-Oszilloskop) als Graphen visualisiert, als Datei abgespeichert oder direkt auf die Module der Zielhardware geschrieben.

Die einzelnen Hardwarekomponenten der Steuerung sind in Bild 5 zu sehen: Das Prozessormodul mit Speicher, Arbeitsspeicher und Netzwerkmodul ist dabei das Grundsystem, welches über die Schnittstellenmodule, digitale und analoge Ein- und Ausgabemodule (IO-Module), erweitert wurde.

Die Konfiguration wird neben der Handhabung als Blockbibliothek unter SIMULINK über das hersteller-

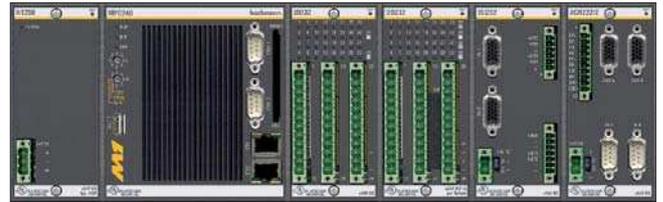


Bild 5: Beispielhafter modularer Aufbau einer Steuerung

eigene Softwarepaket Solution Center durchgeführt (siehe Bild 6, oben). Damit die Portierung des Codes aus der Entwicklungsumgebung zur Hardware reibungslos funktioniert, muss gewährleistet sein, dass die genutzten Algorithmen entsprechend umgesetzt werden. Hier hat sich gezeigt, dass bei Initialisierungsvorgängen und bei der Nutzung und Einbindung von selbst erstelltem Code Fehler entstehen können [2]. Diese führen bei der automatischen Codegenerierung mit dem Real Time Workshop zu Abbrüchen oder Fehlermeldungen, welche in einem Log-File unter MATLAB/SIMULINK und in der Konfigurationsumgebung dokumentiert werden. Läuft der Portierungsprozess nach Bild 6 fehlerfrei durch, wird die generierte Applikation automatisch an das Prozessormodul der Zielhardware übergeben, initialisiert (EOI, End of Init) und gestartet (Run-Modus). Die aktuelle Ausgabe der einzelnen Übergabewerte wird in der Variablenansicht (rechts unten im Bild 6) dargestellt.

Station 1

MX213/N	AIO288	-	DO232	DI232
OK	RUN	-	RUN	RUN
-	Real	-	Real	Real
-	Card: 3	-	Card: 5	Card: 6

Variable	Value	Type	Access	Length [B...	Element N...
MIO					
CBR					
How	136.0	REAL64_BLK	RW	8	1
QOW	150.0	REAL64_BLK	RW	8	1
Qist	150.0	REAL64_BLK	RW	8	1
Zufluss	145.0	REAL64_BLK	RW	8	1
QistRegler	85.4952205625...	REAL64_BLK	R	8	1

Bild 6: Konfigurationsumgebung und Status der Hardwaremodule im Solution Center und Visualisierung der aktuellen Variablen

3. Anwendungsbeispiele für die automatische Codegenerierung

3.1 Versuchsaufbau eines geregelten Mehrbehältersystems

Um die Portierbarkeit eines in SIMULINK entwickelten Reglers zu testen, wird gegenwärtig im Labor der BAW ein Modell in Form eines Mehrbehältersystems aufgebaut. Das in Bild 7 dargestellte Labormodell besteht aus Vorrats-, Regel- und Auffangbehälter, die über zwei elektrisch angesteuerte Ventile miteinander verbunden sind. Die magnetisch-induktiven Durchflussmesser (MID) befinden sich jeweils in der Nähe des Behälterbodens, um die gesamte Wassersäule in den Becken für die Regelung zu nutzen. Eine Pumpe in der Verbindungsstrecke zwischen Auffang- und Vorratsbehälter wird über einen Schwimmschalter im Auffangbehälter in Betrieb genommen. Der Wasserstand im Regelbehälter wird mit Hilfe einer Ultraschall-Messsonde, der des Auffangbehälters durch einen Schwimmschalter gemessen. Die einzelnen Sensorsignale werden über analoge und digitale Busleitungen zur Bachmann-Steuerung geführt. Der Regelalgorithmus soll über den manuell vorgegebenen Sollwert den Wasserstand im Regelbehälter bei definierten Zu- und Abgaben auf einem konstanten Niveau halten. Als Kontrollelemente sind eine Störgrößenanzeige und eine Feinskala an der Sollwertvorgabe vorgesehen.

Die hardwareseitige Kommunikation der Aktoren (Ventile, MID) und Sensoren wird über die Ein- und Ausgabemodule (IO-Module) der speicherprogrammierbaren Steuerung mittels des Netzwerkprotokolls TCP/IP zur Simulationsumgebung MATLAB/SIMULINK übertragen. Die Zustandsdarstellung der Soll- und Ist-Werte der Variablen wird in der Entwicklungsumgebung über die Nutzung einer herstellereigenen Schnittstelle durchgeführt und in Echtzeit kontinuierlich aktualisiert. Der Regler läuft nach der Portierung autark auf der Steuerung und ist über Schalter aktivierbar.

3.2 Umsetzung des Koordinators für die obere Mosel

Im Zuge der Erneuerung der Wehranlagen sowie der Leittechnik wird für die Staustufen der Oberen Mosel Palzem, Grevenmacher und Trier ein zweistufiges Automatisierungskonzept realisiert. In der ersten Stufe wurden die Staustufen mit lokalen Reglern ausgerüstet, die auf einer OW/Q-Regelung basieren und die abflussabhängigen Stauziele berücksichtigen.

Als zweite Stufe ist eine übergeordnete Steuerung (Kordinator) für die Staustufenkette vorgesehen, dessen vordringlichste Aufgabe die Vergleichmäßigung des Abflusses unter Berücksichtigung der maßgebenden Zuflüsse und unter Ausnutzung der vorhandenen Bewirtschaftungsvolumina ist. Das Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft der Universität Kassel entwickelte in einem Forschungsprojekt den Koordinator

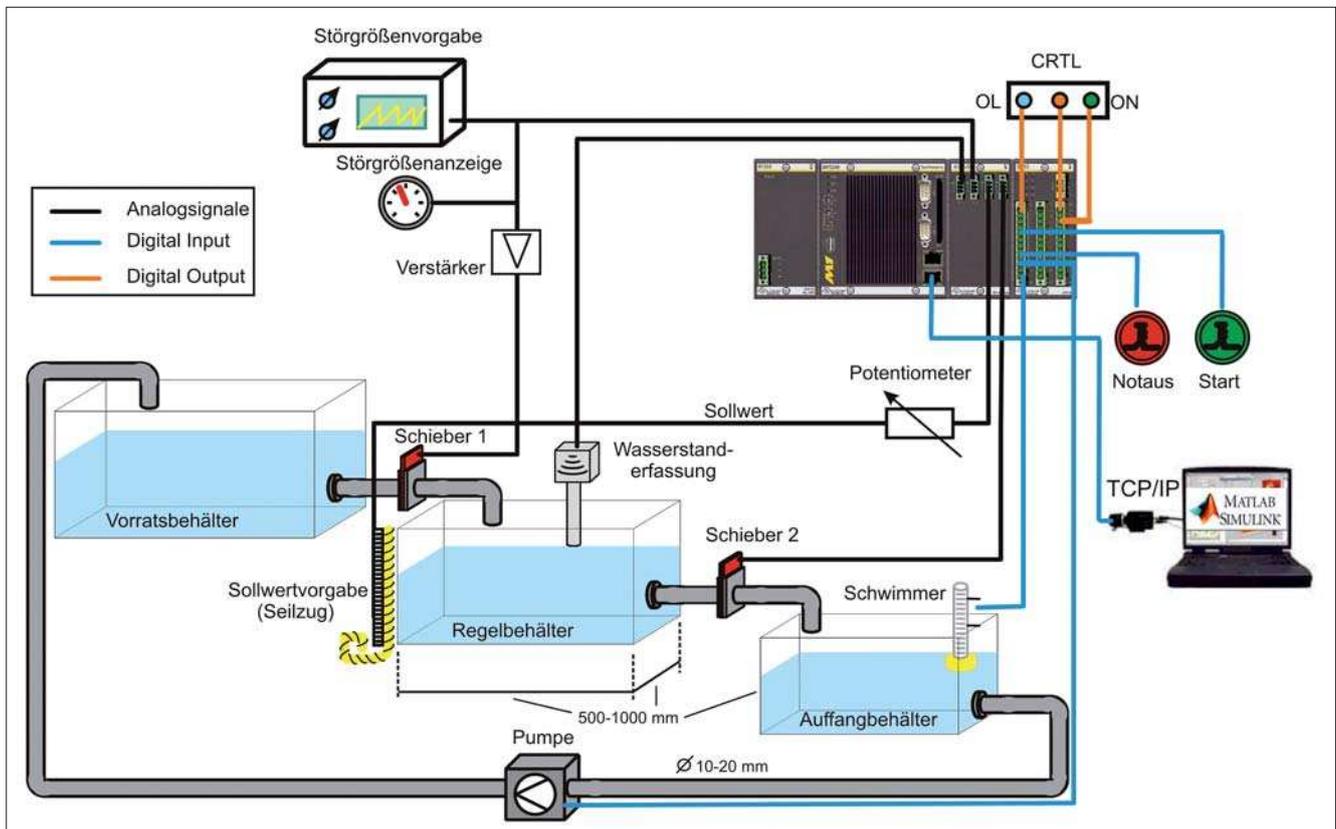


Bild 7: Versuchsaufbau für das Mehrbehältersystem

für die BAW (Theobald, 2008 [5]). Nach der Entwicklungsphase in der Simulationsumgebung MATLAB/SIMULINK, der Analyse der Pegel im Einzugsgebiet, der Erarbeitung von Optimierungsstrategien und den Vergleichsberechnungen mit realen Messdaten wurde der Koordinator in die Simulationsumgebung der BAW eingebunden. Die Simulationsumgebung umfasst damit die drei Stauhaltungen als eindimensionale hydro-numerische (HN)-Modelle, die lokalen OW/Q-Regler und die Optimierungsroutinen des Koordinators.

Der Koordinator soll auf einer Steuerung eingesetzt werden, die zusammen mit einem Visualisierungs-PC im Wasser- und Schifffahrtsamt Trier aufgebaut wird. Die Kommunikation zwischen dem Koordinator und den drei lokalen Reglern, sowie die Übermittlung eines Lebensbits zur Sicherstellung der Datenleitung, wird in Echtzeit realisiert, und zurzeit von der Fachstelle Maschinenwesen Südwest vorbereitet (siehe Bild 8). Die Übergabe von Eingangssignalen der lokalen Regler (Zuflüsse, Wasserstände) werden in der entsprechenden Zeittaktung an den Koordinator übermittelt, die Prognoserechnungen des Koordinators erfolgen im 15-Minuten-Takt. Weiterhin wird die Information, lokaler Regler aktiv oder Handsteuerung, mit Hilfe eines Sondersignals übermittelt.

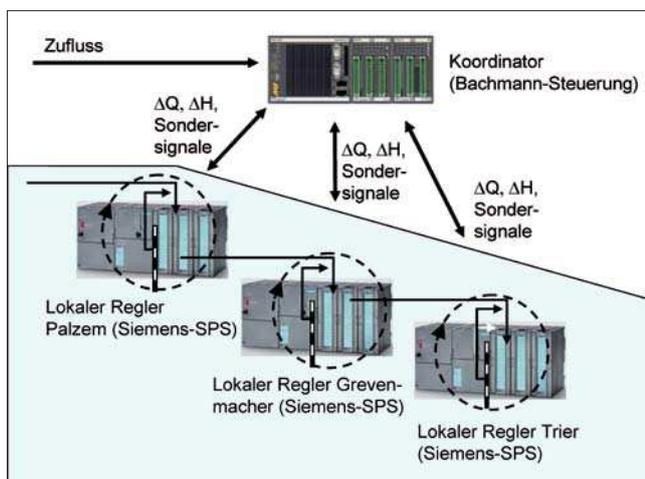


Bild 8: Signalwege der lokalen Regelung und des Koordinators

Für die Umsetzung auf die Steuerung wurde in der Entwicklungsumgebung ein Modell angelegt, das ausschließlich Bestandteile des Koordinators enthält, die mit den Softwaremodulen der Zielhardware aus der Blockbibliothek von Bachmann verbunden wurden. Das Modell und die vorkonfigurierte Steuerung wurden über Netzwerkprotokolle (TCP/IP) miteinander gekoppelt. Dies stellt auch die Vorgehensweise vor Ort dar, bei der die Trennung der bestehenden Anlagenteile (lokale Regler, markierter Bereich im Bild 8) von der neuen Anlage des Koordinators aus Sicherheitsgründen gewährleistet sein muss. Der Koordinator soll zur Fernüberwachung und Erfolgskontrolle über das Netzwerk von der BAW aus zur Verfügung stehen.

Es ist geplant, den Koordinator gemeinsam mit der Fachstelle für Maschinenwesen in Koblenz bis Ende 2009 umzusetzen.

4. Literatur

- [1] The MathWorks (2009): MATLAB/SIMULINK <http://www.mathworks.de/>
- [2] Wagenbret, M. (2008): Automatische Codegenerierung von MATLAB/Simulink-Modellen am Beispiel eines Regelalgorithmus zur automatischen Abfluss- und Stauzielregelung, unveröffentlichter Bericht. (Diplomarbeit an der Berufsakademie Karlsruhe)
- [3] Bachmann electronic (2009): <http://www.bachmann.info/>
- [4] B&R automation (2009): <http://www.br-automation.com>
- [5] Theobald, S. (2008): Forschungsprojekt: Koordinator Obere Mosel, Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft Universität Kassel, unveröffentlichter Bericht

Dipl.-Ing. Sven Wohlfart
 Institut für Hydromechanik
 Universität Karlsruhe
 Telefon: 0721 9726 3410
 Fax: 0721 9726 5555
 E-Mail: sven_wohlfart@web.de

Dr.-Ing. Michael Gebhardt
 Abteilung Wasserbau im Binnenbereich
 Referat Wasserbauwerke, Stauhaltungen und Kanäle
 Telefon: 0721-9726-3410
 Fax: 0721 9726 5555
 E-Mail: michael.gebhardt@baw.de