

Der Einfluss der Stellorgane auf die Abfluss- und Stauzielregelung (ASR)

The Influence of the Actuators on the Automated Discharge and Water Level Control

Dr.-Ing. Peter Schmitt-Heiderich, Dr.-Ing. Michael Gebhardt, Dipl.-Ing. Sven Wohlfart,
Bundesanstalt für Wasserbau

Die Analyse des Stellorgans Wehr zeigt, dass die Trägheit des Stellverhaltens bei der Parametrisierung der Regler berücksichtigt werden muss. Wenn der Regelkreis ohne das Stellglied aufgebaut ist, können instabile Zustände oder ein hoher Verschleiß von Bauwerksteilen infolge zu häufiger Stellbefehle provoziert werden. Für die Parametrisierung der Regler an Mosel und Saar bildet die BAW das Verhalten der Wehranlage in detaillierten Modellen im Regelkreis mit ab. Allerdings sind hier die Wehranlagen nahezu einheitlich mit demselben Verschlussstyp ausgestattet: Sektoren an der Mosel sowie Zugsegmente mit Aufsatzklappen an der Saar. Andere Bundeswasserstraßen weisen hier eine größere Vielfalt an Verschlüssen auf, was den Aufwand für die Erstellung der Bauwerksmodelle deutlich erhöht. Damit beliebige Wehrtypen in der ASR berücksichtigt werden können, sollte der Detaillierungsgrad reduziert werden, da aus Sicht der Modellerstellung ein möglichst einfaches Wehrmodell wünschenswert ist. Künftige Untersuchungen müssen hier zeigen, wie einfach ein Bauwerksmodell gestaltet werden darf, damit es für die Fragestellungen der ASR hinreichend genaue Informationen zum Stellverhalten liefert.

The analysis of the weir as an actuator shows that a sluggish behaviour must be taken into account in the parameterisation of the controllers. If the closed loop system is developed without the actuator, instable conditions or a high level of wear may be caused to gate and drive components due to frequent adjustment commands. For the parameterisation of the controllers on the Moselle and Saar rivers, the BAW depicts the behaviour of the weir plant with detailed models in the closed loop system. However, the weirs here are almost unvaryingly equipped with the same type of gate: on the Moselle, sector weirs, and on the Saar, reverse radial gates with flap gates. Other German Federal wa-

terways have a greater variety of gate types, which makes modelling the actuator weir more complicated. From the perspective of the modelling these different types of weirs, a weir type that is as simple as possible is preferable. Here, future studies will be required to show how a model of a weir can be designed as simply as possible while still providing sufficiently precise information on the behaviour of the actuators in matters of automated discharge and water-level control.

1 Arten und Steuerung des Stellorgans Wehr

Types and control of the actuator weir

Die einzelnen Stellorgane einer Staustufe unterscheiden sich deutlich in ihren Stelleigenschaften, d. h. in der Umsetzung eines Soll- in einen Istabfluss. Turbinen reagieren mit einer sofortigen Umsetzung auf jede Änderung des Sollabflusses und sind bauartbedingt unempfindlich gegenüber häufigen Stellbefehlen. Wehrverschlüsse reagieren im Gegensatz zu Turbinen im Allgemeinen deutlich langsamer. Gerade ältere Verschlüsse sind nicht für häufige Stellbefehle ausgelegt und verschleiben schneller. Wenige große Verstell Schritte verringern den Verschleiß des Bauwerks, sie bewirken aber auch stärkere Wasserstandsschwankungen im Oberwasser. Die Abflussänderung auf Grund eines Verstellschritts hängt dabei im Wesentlichen von der Verschlussgeometrie, von der Über- oder Unterströmung, von der Antriebsart (hydraulisch, ölhydraulisch, Elektrohub, Ketten) und von den hydraulischen Randbedingungen (Überströmungshöhe, Öffnungsweite, Fallhöhe, Unterwassereinfluss, Belüftung etc.) ab, die üblicherweise in der Wehrkennlinie zusammengefasst werden.

Bild 1 gibt einen Überblick über die an Wehranlagen eingesetzten Verschlussstypen, bei denen zwischen überströmten, unterströmten sowie sowohl über- als auch unterströmten Verschlüssen unterschieden wird.

Die Verstellgeschwindigkeiten der Wehrverschlüsse am Neckar liegen bei den meisten Anlagen unabhängig vom Verschlussstyp und unabhängig von der Über- oder Unterströmung bei etwa 15 cm/min (FMSW, 2011), was aus einer einheitlichen Antriebsdimensionierung resultiert. Die an der Saar eingesetzten Zugsegmente mit Aufsatzklappen weisen Verstellgeschwindigkeiten von 1 cm/min auf. Bei der etwa 2 m hohen Klappe der Saaraustufe Mettlach entspricht das einer mittleren (vertikalen) Verstellgeschwindigkeit von etwa 16 cm/min und bei einem 6,70 m hohen Zugsegment etwa 11 cm/min.

Auf Grund der Drehbewegung der Verschlüsse besteht hier kein linearer Zusammenhang zwischen Verstellschritt und Öffnungsweite. Weiterhin seien die Fischbauchklappen an der Ruhrstaustufe Raffelberg mit einer Breite von 18 m und einer Verschlusshöhe von 4,90 m erwähnt. Während des Probetriebs im Juni 2006 zur Inbetriebnahme des lokalen Reglers wurden hier Verstellgeschwindigkeiten bis zu 18 cm/min erreicht.

Je nach Über- oder Unterströmung des Verschlusses werden bei gleicher Verstellgeschwindigkeit deutlich unterschiedliche Abflussänderungen erzielt. Dies wird am Beispiel des Neckarwehres Deizisau deutlich. Die Wehranlage besteht aus drei Wehrfeldern mit je 17,50 m Breite. Die Randwehrfelder sind mit Schützen, welche zur Abflusssteuerung angehoben werden, ausgestattet.

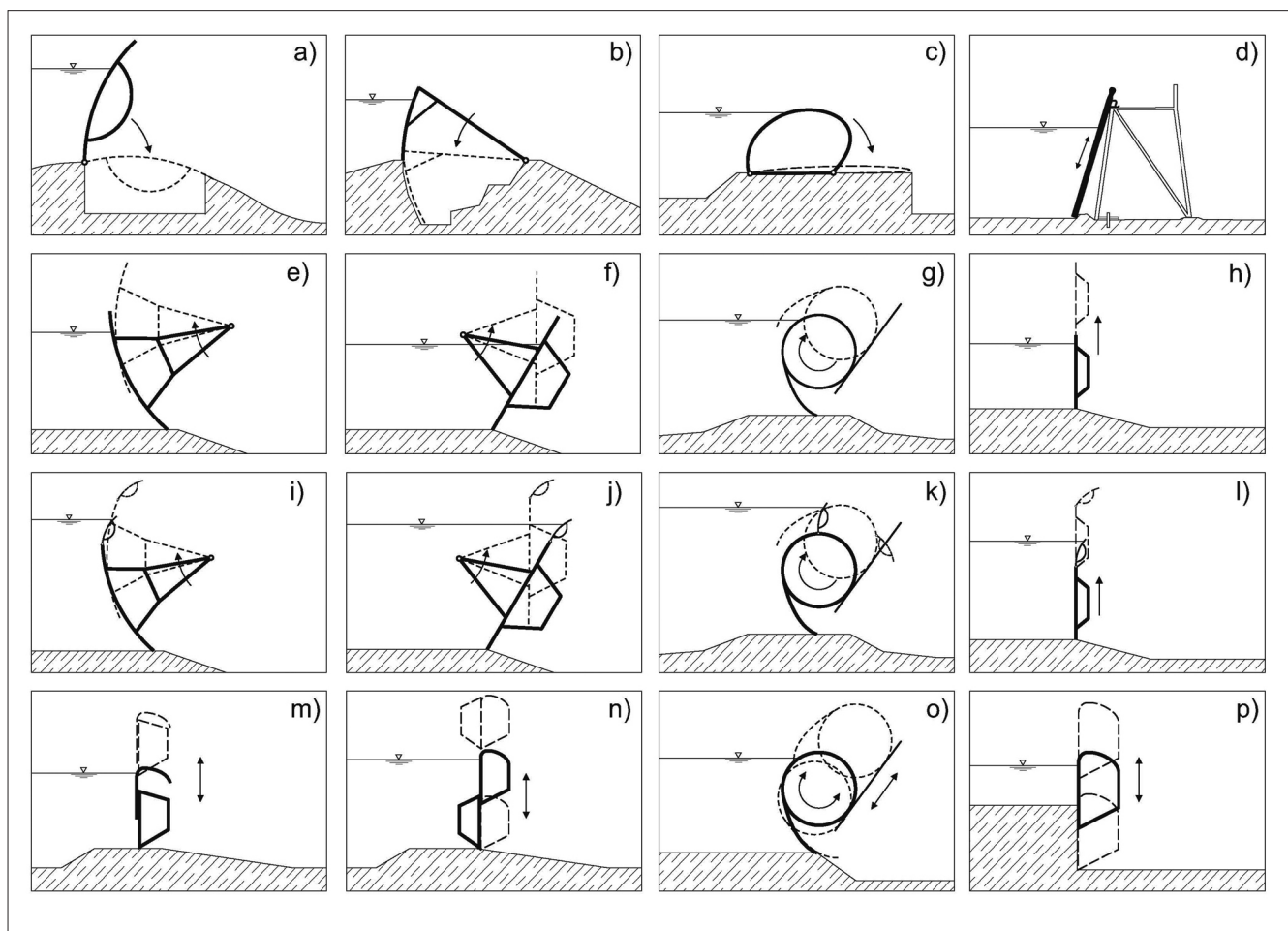


Bild 1: Schematische Darstellung von Wehrtypen; überströmte: a) Klappe, b) Sektor, c) Schlauchwehr, d) Nadelwehr; unterströmte: e) Drucksegment, f) Zugsegment, g) Walze, h) Hubschütz; über- und unterströmte: i), j), k), l) wie e), f), g), h), aber mit aufgesetzter Klappe; m) Hakenschütz, n) Doppelschütz, o) Versenkwalze, p) Hub-Senkschütz

Figure 1: Schematic representation of gate types; for overflow: a) flap gate, b) sector gate, c) inflatable weir, d) needle weir; for underflow: e) radial gate, f) reverse radial gate, g) roller weir, h) vertical lift gate; for overflow and underflow: i), j), k), l) as e), f), g), h) but with flap gate on the leaf top; m) vertical lift hook-type gate, n) double-leaf vertical lift gate, o) submersible roller weir, p) vertical lift and lowering gate

Im mittleren Wehrfeld ist ein Versenkschütz zur Feinregulierung angeordnet. In Bild 2 sind die Wehrkennlinien für das überströmte und das unterströmte Versenkschütz dargestellt, die auf Ergebnissen von physikalischen Modellversuchen basieren (BAW, 2004). Vergleicht man die Durchflusscharakteristik, so ist bei Unterströmung der Durchfluss linear proportional zur Öffnungsweite, während der Zusammenhang bei Überströmung nichtlinear ist. Das bedeutet, dass überströmte Verschlüsse grundsätzlich besser für eine Feinregulierung geeignet sind, es muss aber geprüft werden, ob Abflussänderungen, wie sie beispielsweise aus einem Turbinenschnellschluss resultieren, schnell genug abgearbeitet werden können.

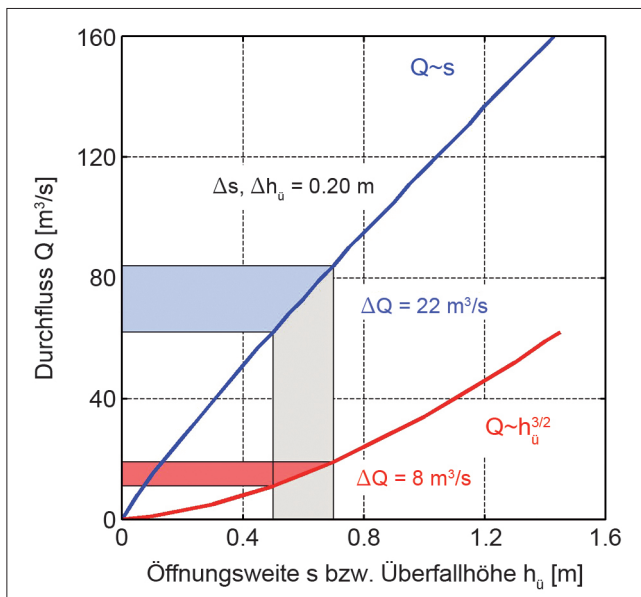


Bild 2: Vergleich der Über- und Unterströmung eines Wehrverschlusses am Beispiel des 17,50 m breiten Versenkschützes am Neckarwehr Deizisau; blau: Unterströmung, rot: Überströmung

Figure 2: Comparison of the overflow and underflow of a gate using the example of the 17.50-metre wide vertical lowering gate at the Neckar weir at Deizisau; blue: underflow, red: overflow

Im Gegensatz zu den extern angetriebenen Verschlüssen werden Sektorwehre durch das Zu- und Ableiten von Wasser in und aus dem Sektorinneren komplett hydraulisch gesteuert. Die Betriebserfahrungen der automatisierten Moselwehre zeigen, dass auch mit diesem einfachen Antriebsprinzip Stellgeschwindigkeiten von 5 cm bis 6 cm pro Minute erzielt werden. Je länger die Stellwege, desto höher sind hier die Verstellgeschwindigkeiten. Um die deutlich schnellere Reaktion der Turbinen zu kompensieren, wurde zum Angleichen des

unterschiedlichen Regelverhaltens ein Mindestverstellschritt für das Kraftwerk empfohlen, der auf Basis der Wehrkennlinien und eines Mindestverstellschrittes von 4 cm/min für die Sektoren ermittelt wurde (BAW, 2010).

2 Stellorgan im Regelkreis *Actuator in the closed loop system*

2.1 Notwendigkeit der Modellierung des Stellorgans Wehr

Need for the modelling of the weir as an actuator

Im Zuge der Entwicklung und Parametrisierung der OW/Q-Regler für die Moselstauufen war es notwendig, die Betriebsweise und die Hydraulik der dortigen Sektorwehre in einem mathematischen Modell abzubilden. Die Voraussetzungen lagen hierfür vor, da die Wasserstands-Abflussbeziehungen der Moselwehre durch physikalische Modelluntersuchungen in der BAW ermittelt worden waren sowie Fahrweise und Kenngrößen der einzelnen Verschlüsse bekannt waren. Damit konnte eine der Wasserhaushaltsregelung untergelagerte Wehrprogrammsteuerung (WPS) mit den Kenngrößen der Verschlüsse (Anzahl, Breite, Höhe, Verstellgeschwindigkeit, Mindestverstellschritt, Endlagen etc.) und die aus den Modellversuchen ermittelten Wehrkennlinien, der Zusammenhang von Abfluss und Überströmungshöhe, in einem Wehrmodell zusammengeführt werden.

Auf Grund von Bauwerksrestriktionen kann ein Wehrverschluss nicht beliebig oft verstellt werden, da „Ruhezeiten“ zwischen zwei Verstellritten einzuhalten und die Verstellgeschwindigkeiten durch die Antriebe limitiert sind (Abschnitt 1). Die Adaption des Istabflusses an einen geforderten Sollabfluss erfolgt damit verzögert in bauwerksabhängigen Mindestverstellritten. Eine ständige Nachführung des Istabflusses belastet die Antriebsmechanik der Wehrantriebe übermäßig und ist daher nicht sinnvoll (Abschnitt 3). Folglich ist die Trägheit des Stellorgans Wehr im Regelkreis zu berücksichtigen. Eine Vernachlässigung des „langsamen“ Stellorgans Wehr führt zu einer Fehleinschätzung des Regelverhaltens, was ein analytischer Ansatz (vgl. Abschnitte 2.2 bis 2.4) aufzeigt.

2.2 Analytischer Ansatz nach Kühne (1975) ohne Stell- und Filterglied

Analytical approach according to Kühne (1975) without actuator and filter term

Nachfolgend wird das Konzept von Kühne (1975) zur Parametrisierung von Reglerkennwerten für staugeregelte Flüsse vorgestellt. Dieses Verfahren berücksichtigt verschiedene Regelalgorithmen und ein vereinfachtes Flussmodell, das die Regelstrecke lediglich als Speicherglied abbildet. Die Hydraulik des Bauwerkes sowie die Messwertfilterung bleiben unberücksichtigt. Da dieser analytische Ansatz um Stellorgan und Datenfilterung erweitert werden kann (Abschnitt 2.3), wird dieses vereinfachte Verfahren genutzt, um die Auswirkungen unterschiedlicher Regelungsstrategien zu analysieren.

Ausgehend von der Bilanzgleichung

$$\frac{dV}{dt} = F(t) - Q(t) \tag{1}$$

ergibt sich unter der Annahme $dV \cong A \cdot dH$ nachfolgende Speichergleichung, die die Regelstrecke beschreibt:

$$\frac{dH}{dt} = \frac{1}{A} \cdot (F(t) - Q(t)) \tag{2}$$

Dabei bedeuten:

V	[m ³]	Speicherinhalt
A	[m ²]	Speicheroberfläche
H	[m]	Wassertiefe
F	[m ³ /s]	Zufluss in den Speicher/Stauhaltung
Q	[m ³ /s]	Abfluss aus dem Speicher/Stauhaltung

Unter der Annahme, dass zum Zeitpunkt $t = 0$ stationäre Zustände mit $H_0, F_0 = Q_0$ herrschen, können die Größen der Gleichung (2) wie folgt formuliert werden. Die zeitlichen Änderungen sind durch Kleinbuchstaben gekennzeichnet.

$$\begin{aligned} H(t) &= H_0 + h(t) \\ F(t) &= F_0 + f(t) \\ Q(t) &= Q_0 + q(t) = F_0 + q(t) \end{aligned} \tag{3}$$

Damit ergibt sich die Bilanzgleichung wie folgt:

$$\frac{dH(t)}{dt} = \frac{dh(t)}{dt} = \frac{1}{A} \cdot (f(t) - q(t)) \tag{4}$$

In Gleichung (4) werden nicht die absoluten Größen betrachtet, sondern lediglich deren Änderung gegenüber den stationären Ausgangswerten (Arbeitspunkt: $H_0, F_0 = Q_0$). Die Schreibweise wird vereinfacht, wenn der Zeitbezug der Größen nicht explizit erwähnt und die Zeitableitung mit h' bzw. q' abgekürzt wird (Gleichung 5).

$$h' = \frac{1}{A} \cdot (f - q) \tag{5}$$

Gleichung (5) beschreibt eine Regelstrecke 1. Ordnung (Differenzialgleichung 1. Ordnung). Es ist eine Regelstrecke ohne Ausgleich (integrale Strecke), da nach einer festen Änderung von f oder q die Regelgröße dauernd wächst oder fällt und sich damit keinem endlichen Wert nähert.

Damit bei einer Änderung der Stellgröße (Abfluss) q bzw. der Störgröße (Zufluss) f die Regelabweichung h auf Null zurückgeführt wird, muss die Stellgröße q aus einem Regelalgorithmus abgeleitet werden. Für eine Wasserstandsregelung über einen PI-Algorithmus erhält man, unter Beachtung der Randbedingungen, folgende Differenzialgleichungen für die Regelgröße h und die Stellgröße q in Abhängigkeit des gewählten Regelalgorithmus (Kühne, 1975).

$$\text{PI-Regler: } q = k_P \cdot h + k_I \cdot \int h \cdot dt \tag{6a}$$

$$A \cdot h'' + k_P \cdot h' + k_I \cdot h = f' \tag{6b}$$

$$A \cdot q'' + k_P \cdot q' + k_I \cdot q = k_P \cdot f' + k_I \cdot f$$

$$\text{mit } h(0) = q(0) = 0 \tag{6c}$$

$$h'(0) = \frac{1}{A} \cdot f(0)$$

$$\text{und } q'(0) = \frac{k_P}{A} \cdot f(0)$$

Die Gleichungen (6b) mit den Randbedingungen (6c) sind lineare und zeitinvariante Differenzialgleichungen (LZI-Systeme) und können im Zeitbereich abhängig von der Zuflussänderung f analytisch bzw. numerisch gelöst werden. Alternativ können die Gleichungen mit der Laplace-Transformation vom Zeitbereich in den Frequenz- bzw. Bildbereich überführt werden (Gleichungen 8 und 9). Die nachfolgenden Untersuchungen nutzen diese Transformation, da mit dem Strukturbild und der Block-

schaltbildalgebra die Gleichungen sehr viel einfacher abgeleitet und erweitert werden können. Auch nutzen zahlreiche Verfahren der Regelungstechnik den Bildbereich, um die Stabilität von Regelungen nachzuweisen (Bode-Diagramm, Nyquist-Kriterium, Wurzelortskurve etc).

2.3 Erweiterung des analytischen Ansatzes um Stell- und Filterglied

Extension of the analytical approach to include actuator and filter term

Die in Bild 3 dargestellten Strukturdiagramme für die Wasserstandsänderung h und die Abflussänderung q beinhalten bereits die Erweiterung um Messglied und Stellorgan Wehr. Das Systemverhalten der einzelnen Regelkreisglieder wird mit den Systemfunktionen G_S für die Strecke, G_F für die Messwertfilterung, G_R für den Regelalgorithmus und G_W für das Stellorgan Wehr beschrieben. Unter alleiniger Berücksichtigung der rot hinterlegten Blöcke G_S und G_R beschreibt Bild 3 den Ansatz von Kühne (1975).

Die Differenz $(f-q)$ wird mittels der Streckenbeschreibung in eine Wasserstandsänderung überführt. In der Realität wird diese Wasserstandsänderung durch schiffs- und windinduzierte Wellen überlagert, deren höhere Frequenzen durch ein Tiefpassfilter herausgefiltert werden. Die gefilterte Wasserstandsänderung h entspricht dabei der Abweichung vom Sollwert und damit dem Reglereingang. Der Regler ermittelt, in Abhängigkeit von seinen Parametern k_p und k_i , die Änderung des Sollabflusses q , der vom Stellorgan (Wehr) in eine tatsächliche Abflussänderung umgesetzt wird.

Die Systemfunktionen sind in den Gleichungen (7) und im rechten Strukturdiagramm des Bildes 3 beschrieben. Das Messwertfilter entspricht einem als PT1-Glied formulierten Tiefpass (z. B. Unbehauen, 2005). Die

Wehrträgheit im Regelkreis wird ebenfalls vereinfacht über ein PT1-Glied abgebildet. Damit beschreiben die folgenden vier Systemfunktionen das Verhalten der Regelkreisglieder im Bildbereich (Laplace-Ebene) mit der komplexen Variablen s .

$$\text{mit: } G_S(s) = \frac{1}{A \cdot s}; \quad G_F(s) = \frac{1}{1 + T_F \cdot s}; \quad (7)$$

$$G_R(s) = k_p + \frac{k_i}{s}; \quad G_W(s) = \frac{1}{1 + T_W \cdot s};$$

Verwendete Formelzeichen:

A	$[m^2]$	Speicheroberfläche
h	$[m]$	Änderung der Wassertiefe
f	$[m^3/s]$	Änderung des Zuflusses in die Stauhaltung
q	$[m^3/s]$	Änderung des Abflusses aus der Stauhaltung
k_p	$[m^2/s]$	Regelparameter Proportionalanteil
k_i	$[m^2/s^2]$	Regelparameter Integralanteil
T_F	$[s]$	Zeitkonstante des Filters
T_W	$[s]$	Zeitkonstante des Wehres

Für die Bestimmung der Gleichungssysteme im Bildbereich können die Gleichungen (6) transformiert oder aus Strukturdiagrammen (Blockbildern) gewonnen werden. Die Ableitung aus den Strukturdiagrammen des geschlossenen Regelkreises erweist sich hier als einfacher und anschaulicher Weg. Demnach ergeben sich aus dem Ansatz nach Kühne entsprechend den Strukturen nach Bild 3 die folgenden Laplace-Transformierten für Wasserstandsänderung h und Abflussänderung q :

$$L\{h(t)\} = H(s) = \frac{G_S(s)}{1 + G_0(s)} \quad (8)$$

$$= \frac{s}{A \cdot s^2 + k_p \cdot s + k_i} \cdot F(s)$$

$$\text{mit } G_0(s) = G_S(s) \cdot G_R(s)$$

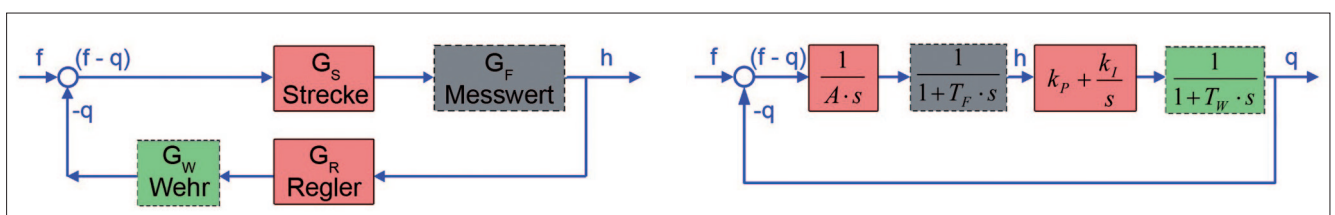


Bild 3: Strukturdiagramme für die Wasserstandsänderung h und Abflussänderung q
 Figure 3: Structure diagrams for change in water level h and in discharge q

$$L\{q(t)\} = Q(s) = \frac{G_0(s)}{1 + G_0(s)} \quad (9)$$

$$= \frac{k_P \cdot s + k_I}{A \cdot s^2 + k_P \cdot s + k_I} \cdot F(s)$$

Werden Messwertfilter und Wehr in Bild 3 mitberücksichtigt, so ergeben sich mit

$$G_0(s) = G_S(s) \cdot G_F(s) \cdot G_R(s) \cdot G_W(s)$$

nachfolgende Gleichungen in der Bildebene:

$$L\{h(t)\} = H(s) = \frac{G_S(s) \cdot G_F(s)}{1 + G_0(s)} \quad (10)$$

$$= \frac{T_W \cdot s^2 + s}{A \cdot (T_F \cdot T_W \cdot s^4 + (T_F + T_W) \cdot s^3 + s^2) + k_P \cdot s + k_I} \cdot F(s)$$

$$L\{q(t)\} = Q(s) = \frac{G_0(s)}{1 + G_0(s)} \quad (11)$$

$$= \frac{k_P \cdot s + k_I}{A \cdot (T_F \cdot T_W \cdot s^4 + (T_F + T_W) \cdot s^3 + s^2) + k_P \cdot s + k_I} \cdot F(s)$$

Die Software MATLAB mit der Erweiterung „Control System Toolbox“ (www.mathworks.de) bietet eine große Auswahl an Funktionen, mit denen LZI-Systeme in Regelkreisen bearbeitet und analysiert werden können. Darüber hinaus entfällt die Rücktransformation in den Zeitbereich, da über die Systemfunktion (z. B. Gleichungen (8) bis (11)) das Verhalten im Zeitbereich für MATLAB ebenfalls bekannt ist. Dies wird in Abschnitt 2.4 genutzt, um die Stabilität bzw. Instabilität von Regelkreisen zu verdeutlichen.

2.4 Berechnungsbeispiele unter Berücksichtigung der Wehrträgheit

Examples of calculations taking into account the sluggish behaviour of the weir

Die Wasserturbine ist im Gegensatz zum Wehrverschluss ein schnell reagierendes Stellorgan und in der Lage, jeden technisch möglichen Sollabfluss innerhalb der Taktzeit der Leittechnik (1 min) einzustellen. Sie muss im Regelkreis nur dann beachtet werden, wenn beispielsweise die Anzahl der Turbinenstellbefehle zu optimieren ist.

Das Stellorgan Wehr muss auch bei Ausfall der Turbinen in der Lage sein, die Wasserführung zu übernehmen, sodass sich ein regelbares Abflussspektrum von Niedrig- bis Hochwasser ergibt. Das Abflussverhalten des Wehres wird charakterisiert durch eine nichtlineare Wasserstands-Abflussbeziehung, durch den Wehrfahrplan und diverse Kenngrößen der einzelnen Verschlüsse. Im folgenden Beispiel wird diese Trägheit über ein PT1-Glied berücksichtigt (vgl. Bild 3).

Die analytische Lösung erfolgt unter der Annahme einer Zuflussänderung von $f = 50 \text{ m}^3/\text{s}$. Die daraus resultierenden Wasserstandsänderungen h sind in Bild 4A und C und die Abflussänderungen in Bild 4B und D dargestellt.

Folgendes kann aus Bild 4 abgeleitet werden:

1. Die analytische Lösung beschreibt eine reine Wasserstandsregelung, die auf einen Zuflusssprung reagiert, beispielweise aus dem abrupten Anfahren bzw. Abschalten einer Turbine oder infolge eines Starkniederschlagsereignisses in einem urbanen Einzugsgebiet (vgl. auch in diesem Heft: Schmitt-Heiderich und Belzner, 2012). Prinzipiell ist dabei für LZI-Systeme die Größe des Zuflusssprunges f von untergeordneter Bedeutung, da nach dem Superpositionsprinzip nur der Systemausgang linear skaliert wird, während sich das System- bzw. das Regelungsverhalten nicht ändert.
2. Bild 4A und Bild 4B ergeben sich aus der Lösung der Strukturdiagramme (vgl. Bild 3) bzw. der Gleichungen (8) bis (11). Werden lediglich die Regelstrecke und der Regelalgorithmus betrachtet, so wie es der Ansatz von Kühne (1975) vorsieht, stellen sich bereits nach 1,5 Stunden nahezu wieder stationäre Verhältnisse ein (rote Linie in Bild 4). Der vermeintlich gut parametrisierte Regelkreis zeigt deutliche Abfluss- und Wasserstandsschwankungen, wenn zusätzlich entweder das Messwertfilter oder die Wehrträgheit berücksichtigt werden (grüne und schwarze Linien). Mit einer realitätsnahen Betrachtung unter Berücksichtigung aller vier Größen des Regelkreises zeigt sich ein aufschwingendes Verhalten (blaue Linie). Die Regelung wird durch die Trägheit des Wehres instabil und erfordert geänderte Regelungsparameter.
3. Der Zuflusssprung f als Belastungsvorgabe tritt in der Realität als kontinuierliche Zuflussänderung auf (s. Bild 4C und Bild 4D). Hierzu wird angenommen,

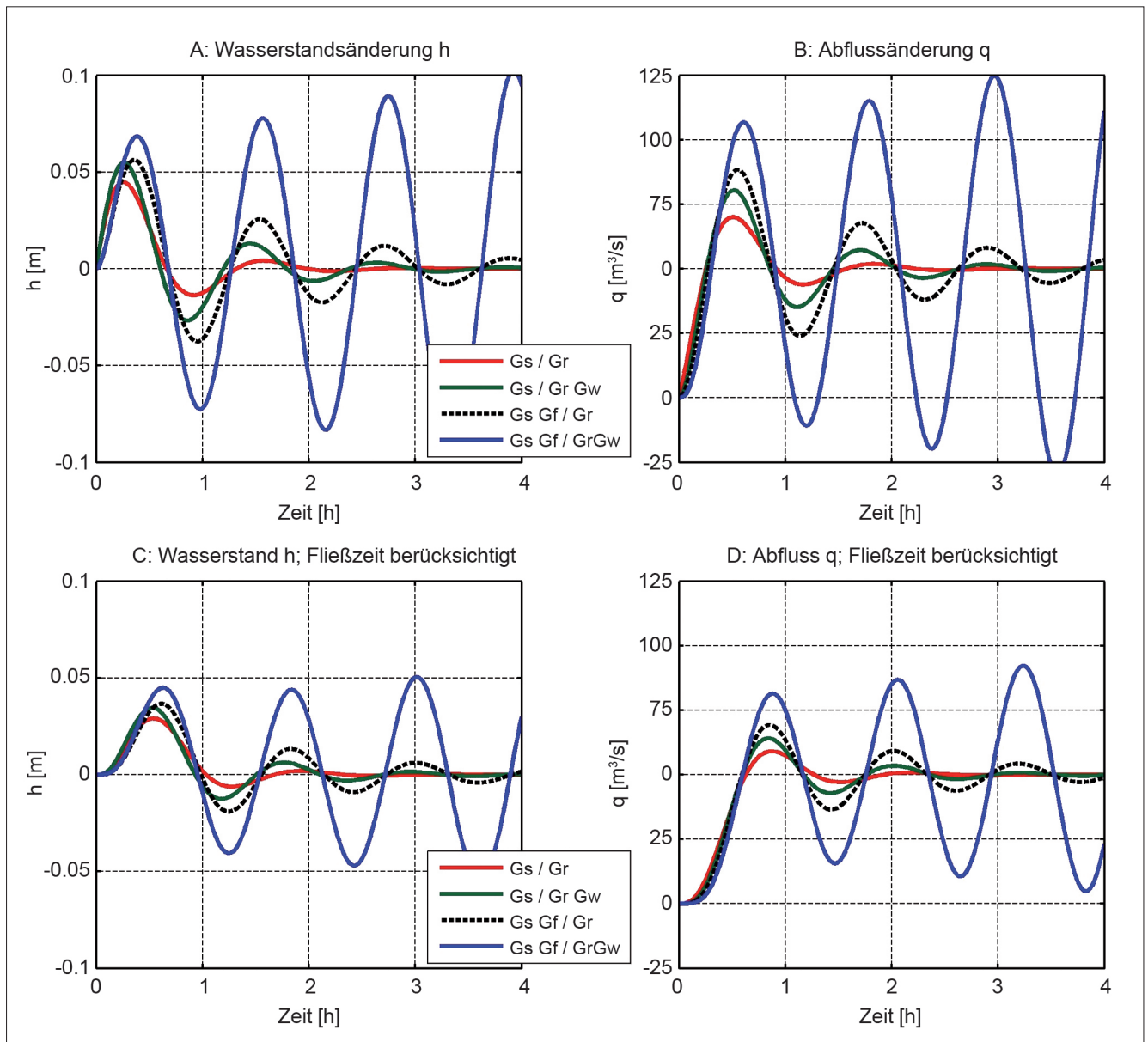


Bild 4: Berechnungsergebnisse für die Wasserstandsänderung h und Abflussänderung q (hier: $T_F = 300$ s, $T_W = 180$ s, $A = 500.000$ m², $k_p = 500$ m²/s und $k_i = 1$ m²/s²); A-B: Gleichungen 10-11; C-D: Zuflussprung verzögert und gedämpft mit 2 PT1-Gliedern ($T = 300$ s)

Figure 4: Results for change in water level h and in discharge q (with: $T_F = 300$ s, $T_W = 180$ s, $A = 500,000$ m², $k_p = 500$ m²/s and $k_i = 1$ m²/s²); A-B: equations 10-11; C-D: jump in inflow rate delayed and attenuated with 2 PT1 terms ($T = 300$ s)

dass die Zuflussänderung f verzögert und gedämpft auftritt, was hier über zwei Einzellinearspeicher für f realisiert wird (Zeitkonstanten: 300 s). Entsprechend den Vorschriften der Blockschaltdiagrammalgebra können diese LZI-Glieder in den Vorwärts- und Rückwärtszweig des Regelkreises geschoben werden, wenn dabei beachtet wird, dass im Rückwärtszweig die inverse Systemfunktion der Zuflusssdämpfung steht. Die Ergebnisse zeigen, dass die Amplituden kleiner werden, allerdings bleibt die Regelung für den kompletten Regelkreis instabil.

In Bild 5 sind die Reaktionen für h und q bei einem negativen Zuflusssprung und einer geänderten Parametrisierung der Regelstrecke dargestellt. Die deutlich kleinere Wasseroberfläche A reagiert schneller auf die Zuflussänderung, wodurch sich auch andere Regelparameter ergeben. Anstatt eines PT1-Gliedes wird in diesem Beispiel ein Totzeitglied von 3 min für das Wehr verwendet. Auch dieses zweite Beispiel zeigt, dass der Regelkreis bei der Berücksichtigung aller Glieder des Regelkreises instabil werden kann.

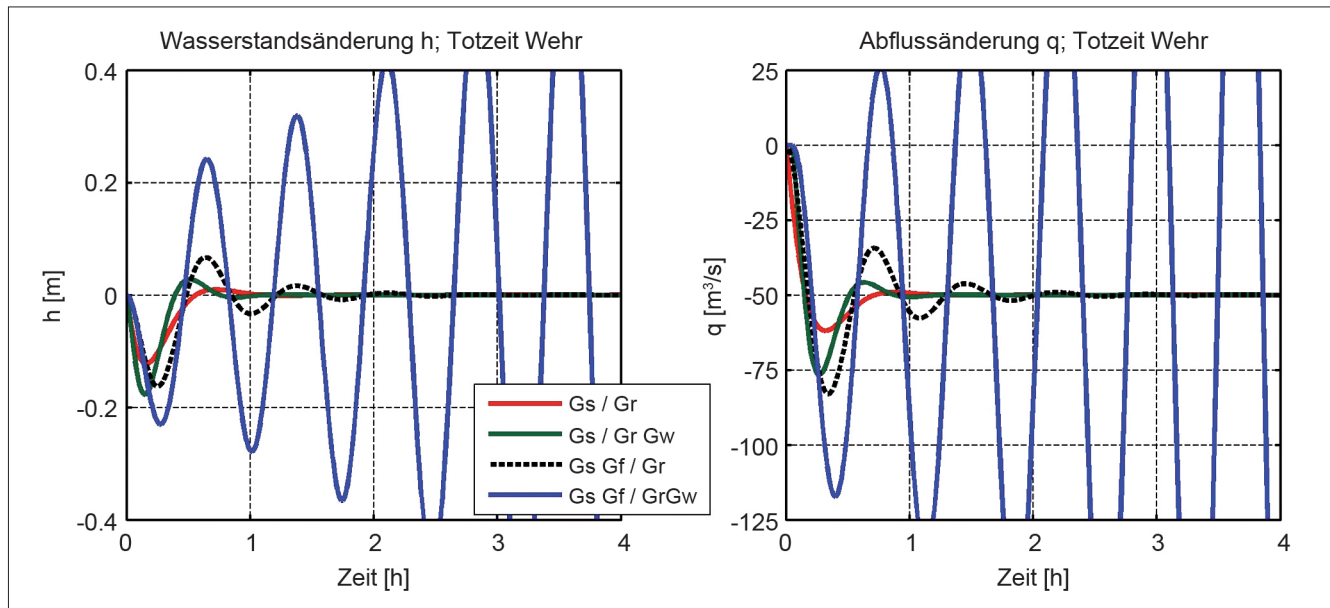


Bild 5: Berechnungsergebnisse für die Wasserstandsänderung h und Abflussänderung q bei negativem Zuflusssprung (hier: $T_F = 300$ s, Totzeit Wehr = 180 s, $A = 100.000$ m², $k_p = 250$ m²/s und $k_f = 0,4$ m²/s²)

Figure 5: Results for change in water level h and in discharge q for negative jumps in inflow rate (with: $T_F = 300$ s, delay weir: 180 s, $A = 100,000$ m², $k_p = 250$ m²/s and $k_f = 0.4$ m²/s²)

Mit diesen Beispielen wird gezeigt, dass die Trägheit des Stellorgans Wehr einen Einfluss auf die zu ermittelnden Regelparameter hat. Durch eine Vernachlässigung der Wehrträgheit kann im Extremfall ein instabiler Regelkreis resultieren.

In der Realität ist das Verhalten des Stellorgans Wehr deutlich komplexer und nicht als LZI-Glied formulierbar, da aus Ruhezeiten zwischen Stellschritten (Totzeiten) und Mindestverstellschritten ein nichtlineares Abflussverhalten des Stellorgans resultiert. Die Beschreibung mit den LZI-Gliedern ist geeignet, das prinzipielle Regelungsverhalten zu erläutern, für die Bemessung der Regelungsparameter sind diese Ansätze aufgrund der starken Vereinfachung aber nicht geeignet.

3 Folgen der fehlenden Berücksichtigung des Stellorgans Wehr im Aufbau einer ASR

Consequences of not including the weir as an actuator when developing an automated discharge and water level control

Der Wasserhaushaltsregler in Kombination mit einem Abflussverteiler gibt den Sollabfluss für die Stellorgane vor. Die Umsetzung in den Ist-Abfluss erfolgt in den

unterlagerten Kraftwerks- und Wehrprogrammsteuerungen (KPS und WPS). Die WPS berücksichtigt die Eigenschaften der Wehrverschlüsse und der Antriebe, wofür es in der Literatur wenige Beispiele gibt (Arnold et al., 2012, in diesem Heft). Üblicherweise wird der Sollabfluss über das Wehr als Stellgröße betrachtet, für den die Wehrstellung berechnet und im folgenden Zeitschritt umgesetzt wird. Diese Annahme trifft bei den in der Abfluss- und Stauregelung (ASR) üblichen Abtastzeiten von einer Minute selten zu.

Wenn die Eigenschaften der Wehrverschlüsse und der Antriebe nicht berücksichtigt werden, können zwei unterschiedliche fehlerhafte Regulationssituationen provoziert werden:

1. Der Regelkreis ist ohne Beachtung der WPS parametrisiert und setzt ein zügiges Umsetzen des Sollwertes voraus. Ein vermeintlich stabiler Regelkreis kann dann bei ungünstiger Beanspruchung instabil werden (s. Abschnitt 2.4).
2. Die Eigenschaften der Wehrverschlüsse und der Antriebe sind unzureichend in der WPS berücksichtigt. Infolgedessen wird das Wehr versuchen, kleine Änderungen im Sollabfluss ständig nachzufahren. Dies führt zu häufigen Stellbefehlen und starkem Verschleiß einzelner Bauteile.

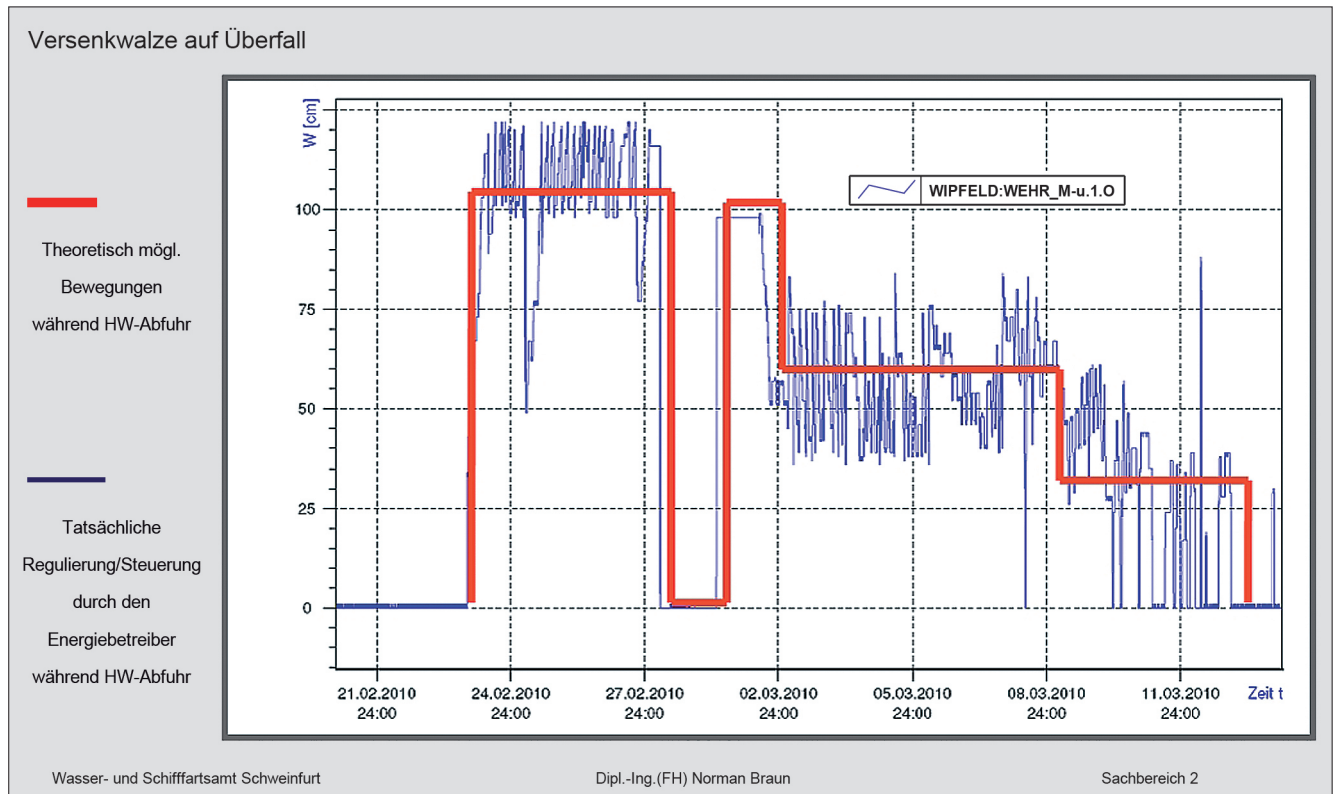


Bild 6: Fahrwege einer Versenkwalze während eines HW-Abflusses (Braun, 2009)
 Figure 6: Actuation of a roller gate during flood discharge (Braun, 2009)

Braun (2009 und 2011) und Hofmann (2011) berichten über ein Beispiel am Main, bei dem die Eigenschaften der Wehrverschlüsse und der Antriebe bei der Automatisierung nicht berücksichtigt wurden.

In Abstimmung mit der WSV werden die Wehranlagen am Main durch die E.ON Wasserkraft von einer zentralen Steuerstelle in Langenprozelten aus ferngesteuert (WSA Schweinfurt, 2009). Ein OW/Q-Regler führt Kraftwerk und Wehr auf Grundlage einer Verwaltungsvorschrift (VV-WSD Süd 22-1). Allerdings zeigen die Betriebserfahrungen der letzten Jahre, dass hier noch Optimierungsbedarf besteht. In Bild 6 sind exemplarisch die Verstellungen der Versenkwalze der Mainstaustufe Wipfeld dargestellt, die zur Feinregulierung verwendet wird. Die blaue Linie zeigt die tatsächlichen Bewegungen bei einem Hochwasser über einen Zeitraum von 20 Tagen gegenüber einer idealen „ruhigen“ Fahrweise (rote Linie). Diese unruhige Fahrweise der Verschlüsse ließ sich auch an anderen Wehranlagen am Main beobachten.

Die häufigen Stellschritte für die Versenkwalze blieben nicht ohne Folgen für die beweglichen Bauwerksteile, wie die plastischen Verformungen der Zahnschiene und der Zahnkränze in Bild 7 zeigen. Infolgedessen kam es

zur Schiefstellung und damit einhergehend zu einer veränderten Belastung der Walze und deren Lagerung. Das Laufverhalten der Walze ändert sich. Mit zunehmendem Spiel der Walzenführung neigt diese zu strömungsinduzierten Schwingungen, was den Verschleiß weiter beschleunigt. Das Bauwerk „altert“ sehr schnell und benötigt bereits nach einer kurzen Betriebsdauer eine aufwändige Sanierung.



Bild 7: Plastische Verformungen der Zahnschiene und der Zahnkränze an der Versenkwalze der Mainstaustufe Viereth (Braun, 2009 und 2011)

Figure 7: Plastic deformation of toothed rack and sprocket wheel at the roller gate at the Viereth dam of the Main River (Braun, 2009 and 2011)

4 Modelle für das Stellorgan Wehr *Models for the weir as an actuator*

4.1 Datengrundlage *Data basis*

Die Automatisierung von Wehranlagen setzt die Kenntnis von Wehrkennlinien voraus, die den spezifischen Zusammenhang zwischen Verschlussstellung, Abfluss sowie Ober- und Unterwasserstand beschreiben. Mit Hilfe der Wehrkennlinien kann der über den Regler ermittelte Sollabfluss in eine Solllage eines Verschlusses umgerechnet werden und umgekehrt. Die unterschiedlichen Verschlussstypen sowie die unterschiedliche Anzahl und Breite der Wehrfelder sind zu berücksichtigen. Als Grundlage für die systematische Erstellung von Wehrkennlinien werden in der BAW in der Regel Modelluntersuchungen von Wehranlagen durchgeführt (Grimm et al., 2007). Sofern keine Modellergebnisse oder Naturmessungen vorliegen, müssen die Wehrkennlinien mit den aus der Literatur bekannten Abflussbeiwerten abgeschätzt werden (z. B. Naudascher, 1992).

Mit den bauwerksspezifischen Kenngrößen, dem Wehrfahrplan und den Wehrkennlinien liegen alle notwendigen Informationen vor, um ein für die vorliegende Fragestellung hinreichend genaues Bauwerksmodell zu erstellen.

4.2 Wahl eines Wehrmodells *Choosing a model for the actuator weir*

In den Abschnitten 2 und 3 wurde gezeigt, dass die Vernachlässigung des Stellorganes Wehr bei der Parametrisierung des Reglers zu Instabilitäten bzw. zu einem erhöhten Bauwerksverschleiß führen kann. Bei der Wahl des Wehrmodells stellt sich die Frage, wie genau das Original abgebildet werden muss, damit die rechnergestützte Parametrisierung des Wasserhaushaltsreglers realitätsnah erfolgt.

Wie sich am Beispiel der Regelstrecke anschaulich aufzeigen lässt, muss auch bei der Wahl eines Wehrmodells nicht zwangsläufig das qualitativ hochwertigste Verfahren verwendet werden. Bei der Modellierung der Regelstrecke wird üblicherweise ein eindimensionales HN-Verfahren genutzt, das den instationären Ab-

flussvorgang beschreibt. Prinzipiell wäre auch hier eine zwei- oder dreidimensionale Modellierung möglich, welche das Streckenverhalten genauer wiedergeben würde. Der Mehraufwand stünde aber in keinem Verhältnis zu der interessierenden Zielgröße, dem Wasserstand am Regelungspegel (Punktinformation). Ein mehrdimensionales Modell gibt hier die Wasserstände am Regelungspegel nicht zwangsläufig besser wieder, da Messfehler und Unsicherheiten aus wind- und schiffsinduzierten Wellen größer sind als die Unsicherheiten der verwendeten Modellansätze. Im Gegenteil, einige Untersuchungen zeigen, dass für die ASR die eindimensionale Beschreibung des instationären Abflussvorganges über die Saint-Venantschen Gleichungen sogar vereinfacht werden kann (siehe Beitrag Schmitt-Heiderich und Gebhardt, 2012, in diesem Heft).

Für die Mosel- und Saarwehre erstellte die BAW bisher Wehrmodelle, wie z. B. das eines Zugsegmentes mit Aufsatzklappe für die Saarstaustufe Mettlach (Bild 8A). Da die Geometrie des Zugsegmentes und der Aufsatzklappe in dem Bauwerksmodell miterfasst sind, ist die aktuelle Stellung der Verschlussorgane zu jedem Zeitpunkt bekannt. Die Lageänderung pro Zeitschritt wird über die Verstellgeschwindigkeiten berechnet. Bei der Ermittlung des Abflusses über die Fischbauchklappe ist zu berücksichtigen, dass sich die Lage des Hochpunkts mit der Drehung ändert (vgl. auch Bild 9B). Die bekannten Verschlusscharakteristika, z. B. der Mindesthub des Zugsegmentes zur Vermeidung von strömungsinduzierten Schwingungen, sind bekannt und werden im Wehrmodell berücksichtigt. Die Wehrkennlinien wurden im Labor der BAW ermittelt (BAW, 1978, und Pulina und Voigt, 1981) und die funktionellen Abhängigkeiten derart aufbereitet, dass das Wehrmodell in Abhängigkeit der Anzahl der aktiven Wehrfelder, des Oberwasserstandes und der aktuellen Lage der Regelorgane den Ist-Abfluss bestimmt. Der Abfluss über das Wehr ist nur bei selten auftretendem Hochwasser rückgestaut und implizit in den Wehrkennlinien enthalten, weshalb der Unterwasserstand als Einflussgröße nicht berücksichtigt werden muss.

Das Wehrmodell beschreibt somit die maßgeblichen Zusammenhänge und die Wechselwirkung zwischen Wehr und Abfluss realitätsnah und bestmöglich. Der dazu erforderliche große Aufwand für die Modellerstellung ist nur an den Wasserstraßen gerechtfertigt, an denen ähnliche Verschlussstypen vorhanden sind, die

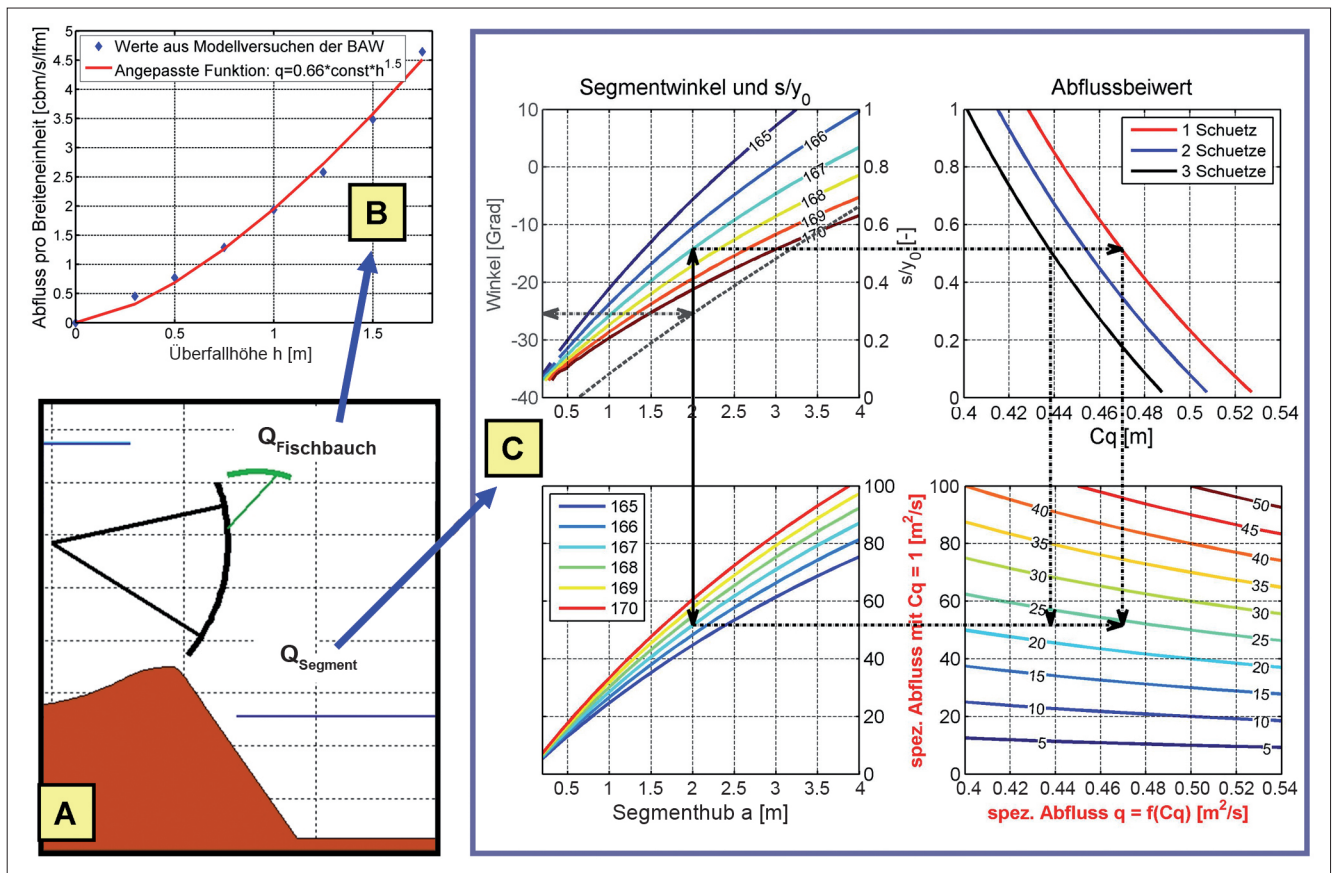


Bild 8: Modellierung der Bewegung eines Zugsegmentes mit Aufsatzklappe (A) und funktionale Abhängigkeiten des spezifischen Abflusses bei Überströmung (B) und Unterströmung (C)

Figure 8: Modelling the movement of a reverse radial gate with flap gate (A) and functional dependencies of the specific discharge at overflow (B) and underflow (C)

die Wiederverwendbarkeit der entwickelten Wehrmodelle gewährleisten. Dagegen finden sich am Neckar zahlreiche Wehranlagen mit verschiedenen Verschlussarten. Um den Aufwand zu minimieren, sollte hier ein vereinfachtes Wehrmodell verwendet werden, das eine hinreichend genaue Beschreibung im Regelkreis gewährleistet. Diese Vorgehensweise wird im Folgenden am Beispiel einer Fischbauchklappe skizziert.

4.3 Modell- und Parameterunsicherheit in dem Wehrmodell

Model and parameter uncertainty in the model for the actuator weir

Die Wahl des „richtigen“ Bauwerkmodells im Regelkreis kann mit dem Konzept der stochastischen Bemessung (Plate, 1992) analysiert und bewertet werden. Gegenüber einer klassischen Betrachtung, die lediglich zwischen den Aussagen „richtig“ oder „falsch“ zu unterscheiden vermag, werden die Unsicherheiten mit

stochastischen Methoden beschrieben und in Beziehung gesetzt, sodass eine Quantifizierung von „richtig“ oder „falsch“ möglich wird. Ein komplexes Modell reduziert zwar die Unsicherheit, die aus einer vereinfachten Prozessbeschreibung resultiert (Modellunsicherheit), gleichzeitig werden aber mehr Parameter notwendig, wodurch die Parameterunsicherheit vergrößert werden kann. Die gleichzeitige Betrachtung von Modell- und Parameterunsicherheit liefert dann ein optimales Modell, das nicht zwangsläufig auch das komplexeste sein muss. Diese stochastische Betrachtung erlaubt weitere Unsicherheiten zu berücksichtigen, sofern die natürliche Variabilität, Stichproben- oder Messunsicherheit von Bedeutung sind. Am Beispiel der Fischbauchklappe wird dieses Vorgehen erläutert.

Bild 9A zeigt die auf dem Zugsegment aufgesetzte Fischbauchklappe der Saarstaustufe Mettlach. Unsichere oder eventuell fehlerbehaftete Parameter sind hier Drehwinkel, Drehgeschwindigkeit und Überfallhöhe. Die Unsicherheiten in der Überfallhöhe h resultie-

ren aus dem Messfehler der Wasserstandserfassung am Pegel, der Gleichsetzung des Pegelwertes mit dem maßgebenden Wasserstand am Wehr, instationären Effekten aus Schwall und Sunk, schiffs- und windinduzierten Wellen und baulichen Ungenauigkeiten. Hinzu kommt die Unsicherheit in den Wehrkennlinien, die hier der unsicheren Überfallhöhe zugerechnet wird. Damit werden in der Überfallhöhe h zahlreiche Fehler summarisch zusammengefasst. Untersuchungen zur Fehlerfortpflanzung zeigen, dass die Überfallhöhe h die Parameterunsicherheiten dominiert. Unsicherheiten aus einer ungenauen Bestimmung des Drehwinkels oder der Drehgeschwindigkeit sind von untergeordneter Bedeutung und werden daher im Folgenden vernachlässigt und als fehlerfrei angenommen.

Zur Erläuterung des „Zusammenspiels“ von Modell- und Parameterunsicherheiten werden zwei Modelltypen unterschieden:

1. Komplexes Wehrmodell: Die Geometrie der Fischbauchklappe wird berücksichtigt, wobei der Hochpunkt in Abhängigkeit vom Drehwinkel wandert (s. Bild 9B). Die Hochpunkte der Fischbauchklappe sind als Punkte aufgetragen und die Differenz aus Wasserstand und Hochpunkt (Überfallhöhe) bestimmt den Abfluss über die Klappe.
2. Einfaches Wehrmodell: Die Lage des Hochpunkt entspricht in jeder Position der Oberkante der Fischbauchklappe, d.h. die Überfallhöhe ergibt sich aus der Differenz von Wasserstand und Oberkante der Fischbauchklappe.

Für den Vergleich der Bauwerksmodelle wird angenommen, dass das Zugsegment geschlossen ist, sodass der Hochpunkt der Aufsatzklappe unabhängig vom Drehwinkel des Zugsegmentes ist. Da die Unsicherheiten in h die Parameterunsicherheit dominiert, beschreibt der Parameter h die maßgebenden Unsicherheiten in beiden Modellansätzen. Die Parameterunsicherheit wird normalverteilt angenommen mit dem Mittelwert $\mu = h$ und einer Standardabweichung σ , die 5% von h entspricht (Variationskoeffizient: 0,05). Aus diesen normalverteilten Überfallhöhen kann bei gegebenem Drehwinkel die Verteilung des Abflusses rückgerechnet werden, die im vorliegenden Fall ebenfalls normalverteilt ist. In Bild 9C sind für eine Überfallhöhe von $h = 1,0$ m und einen Klappendrehwinkel von 10° die resultierenden Abflussverteilungen dargestellt. Die blaue

Verteilung ergibt sich für das komplexe Wehrmodell: Sie nähert sich der Realität bestmöglich an und weist eine geringe Modellunsicherheit auf. Eine größere Modellunsicherheit ergibt sich hingegen mit dem vereinfachten Wehrmodell (rote Verteilung). Dadurch, dass die Oberkante der Fischbauchklappe tiefer als der tatsächliche Klappenhochpunkt liegt, vergrößert sich die Überfallhöhe h . Da außerdem die Parameterunsicherheit proportional zur Überfallhöhe angenommen wurde, vergrößert sich für den vereinfachten Modellansatz die Streuung der Abflüsse.

Unter der Annahme, dass das Auftreten des wahren Wertes für den spezifischen Abfluss mit der blauen Verteilung beschrieben ist, kann gefordert werden, dass der wahre Wert kleiner als $\mu + 2 \cdot \sigma$ sein muss. Diese Grenze beschreibt den „wahren“ spezifischen Abfluss, der mit einer Wahrscheinlichkeit von 98% nicht überschritten wird (hellblaue Linie in Bild 9C). Für die Verteilung des einfachen Wehrmodells wird nun analysiert, welcher Anteil oberhalb dieser Grenze liegt (inverser „Fehler der 2. Art“). Dieser Fehlerbereich ist in Bild 9C gelb hinterlegt und beschreibt die Modellunsicherheit für das einfache Wehrmodell, die von der Überströmhöhe, dem Drehwinkel und der Unsicherheit von h (Parameterunsicherheit) abhängt. Anschaulich lässt sich mit Bild 9C die Wirkung der Parameterunsicherheit erläutern. Wenn die Parameterunsicherheit größer wird, bleiben zwar die Mittelwerte für beide Modelltypen unverändert, aber beide Standardabweichungen der spezifischen Abflüsse vergrößern sich. In Folge wird die 98%-Grenze in Richtung des Mittelwertes des einfachen Wehrmodells verschoben und der Fehlerbereich verkleinert sich, d.h. mit größer werdender Parameterunsicherheit verkleinert sich die Modellunsicherheit!

Die Einzelbetrachtungen der Modellunsicherheiten sind in Bild 9D und E systematisch zusammengefasst. Dazu wurde der Drehwinkel zwischen 0 und 30 Grad und die Überfallhöhe zwischen 0 und 1,8 m variiert. Bild 9D und E unterscheiden sich darin, dass unterschiedliche Parameterunsicherheiten mit 5% (Bild 9D) bzw. 20% (Bild 9E) gewählt wurden.

Bei kleiner Parameterunsicherheit (Bild 9D) bewirkt die vereinfachte Modellierung der Fischbauchklappe bei einem Drehwinkel von 15 Grad und für Überfallhöhen kleiner als 1,0 m bereits einen großen Fehler. Unter der Bedingung, dass die Überfallhöhe h und die hierunter

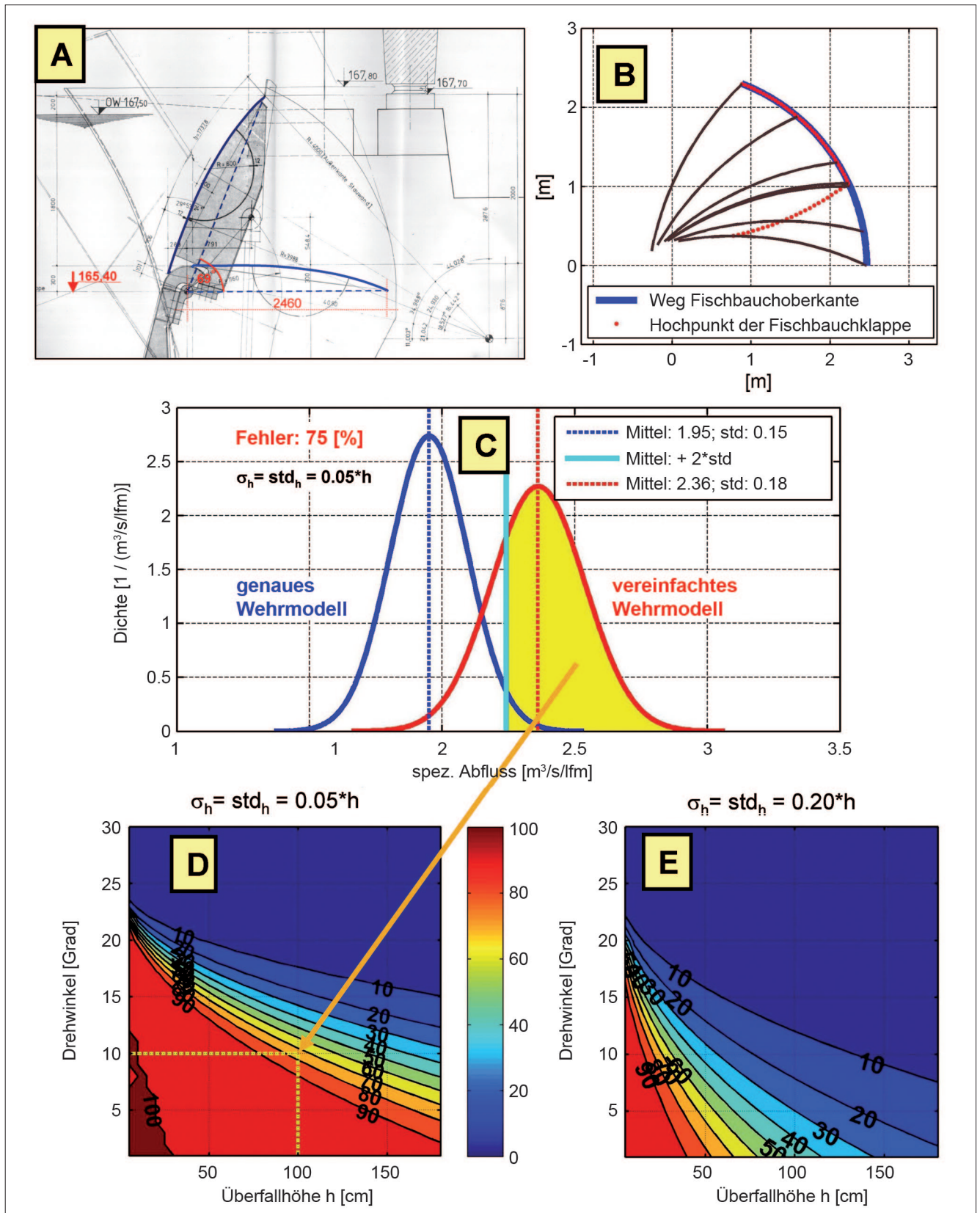


Bild 9: Analyse von Modell- und Parameterunsicherheiten; A: Querschnitt der Fischbauchklappe; B: Weg des Hochpunktes der Fischbauchklappe; C: Modellunsicherheit für $h = 100$ cm, Drehwinkel = 10° und $\sigma_h = 0,05 \cdot h$; D: Modellunsicherheit für $\sigma_h = 0,05 \cdot h$; E: Modellunsicherheit für $\sigma_h = 0,20 \cdot h$

Figure 9: Analysis of model and parameter uncertainties; A: cross section of flap gate; B: path of the highest point of the flap gate; C: model uncertainty for $h = 100$ cm, angle of rotation = 10° and $\sigma_h = 0.05 \cdot h$; D: model uncertainty for $\sigma_h = 0.05 \cdot h$; E: model uncertainty for $\sigma_h = 0.20 \cdot h$

summierten Fehler sehr klein sind, entsteht bei Verwendung des einfachen Modells ein großer Fehler. Hier ist dem komplexen Modell der Vorzug zu geben.

Bei großer Parameterunsicherheit (Bild 9E) ist der Modellfehler des vereinfachten Ansatzes deutlich kleiner, da die große Parameterunsicherheit die Unsicherheiten überdeckt, die in den unterschiedlichen Modellvorstellungen liegen. Hier ist eine vereinfachte Wehrmodellierung vorzuziehen.

Die Analyse von Modell- und Parameterunsicherheiten führt bei der Bewertung des „richtigen“ Wehrmodells zu gegensätzlichen Schlussfolgerungen. Eine abschließende Wertung setzt die größenmäßige Einordnung der Parameterunsicherheit voraus, die hier zu 5% und 20% der Überströmhöhe h angenommen wurde. Die Fehler bzw. die Unsicherheiten, die im Parameter h aufsummiert sind, müssen künftig für die unterschiedlichen Verschlussstypen detailliert bestimmt und analysiert werden. Wenn die Unsicherheiten in den Parametern quantifiziert sind, können die Modellunsicherheiten entsprechend dem Vorgehen in Bild 9 bewertet werden. Abhängig von der vorliegenden Parameterunsicherheit wird dann das „richtige“ Wehrmodell bestimmt.

In einem weiteren Schritt ist zu prüfen, wie sich unterschiedliche Wehrmodelle auf die Parametrisierung der ASR auswirken. Wenn diese Untersuchungen zur Analyse der Unsicherheiten vorliegen und deren Ergebnisse eine Vereinfachung rechtfertigen, dürfen vereinfachte Bauwerksmodelle zur Reglerparametrisierung in der automatisierten ASR genutzt werden. Diese Kenntnisse liegen noch nicht vor und müssen künftig erarbeitet werden.

5 Ausblick *Outlook*

Mit dem momentanen Kenntnisstand wird die BAW die beiden gegensätzlichen Ansätze verfolgen, die das Bauwerksverhalten einerseits möglichst genau und andererseits möglichst einfach beschreiben. Sofern die unterschiedlichen Modellansätze im Regelkreis vergleichbare Ergebnisse zeigen, kann dem einfachen Bauwerksmodell der Vorzug gegeben werden. Diese heuristische Methode ist allerdings aufwändig und die Erkenntnisse sind nicht zwangsläufig auf andere

Standorte übertragbar. Nur die genaue Kenntnis über mögliche Fehler und deren Wirkungen werden hier zu einem Modellverständnis führen, das es erlaubt, bei hinreichend genauer Beschreibung der örtlichen Verhältnisse den Aufwand zu minimieren.

6 Literatur *References*

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, 2012. S. 23-64.

Braun, N. (2009): Walzenwehrprobleme am Main. Interne Präsentation, WSA Schweinfurt.

Braun, N. (2011): Ursachen und Notwendigkeit für einen Verschlusswechsel am Wehr Viereth. BAW Kolloquium: Instandhaltung von Verkehrswasserbauwerken, 25. und 26. Oktober 2011 in Karlsruhe.

Bundesanstalt für Wasserbau (1978): Gutachten über die Staustufe Mettlach/Saar; 1. Teil. Auftraggeber: Wasser- und Schifffahrtsdirektion Südwest, Auftragsnr.: BAW – W361, unveröffentlicht.

Bundesanstalt für Wasserbau (2001): Gutachten über die Abfluss- und Stauzielregelung der Staustufe Detzem, unveröffentlicht.

Bundesanstalt für Wasserbau (2010): Gutachten über die Abfluss- und Stauzielregelung der Moselstaustufen mit jeweils einem gemeinsamen Regler für Wehr und Kraftwerk, unveröffentlicht.

Bundesanstalt für Wasserbau (2004): Bericht über die Ermittlung der Wehrkennlinien für das Neckarwehr Deizisau, unveröffentlicht.

Fachstelle für Maschinenwesen (FSMW) Koblenz (2011): Persönliche Mitteilungen.

Grimm, E., Kemnitz, B., Seiter, H., Sengstock, J., Voigt, A. (2007): Entwicklungsstand der physikalischen Modelluntersuchung von Schleusen und Wehren. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau, Nr. 90, Juli 2007.

Hofmann, W. (2011): Konzept für die Instandhaltung der Wehre am Main. BAW Kolloquium: Instandhaltung von Verkehrswasserbauwerken, 25. und 26. Oktober 2011 in Karlsruhe.

Kühne, A. (1975): Flusstaueregulierung, Grundsätzliche Betrachtungen mit systemtheoretischen Methoden. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Technische Hochschule Zürich.

Naudascher, E. (1992): Hydraulik der Gerinne und Gerinnebauwerke. 2. Auflage, Springer Verlag, Wien.

Plate, E. (1992): Stochastic design in hydraulics: Concept for a broader application. Proceedings of the Sixth IAHR International Symposium on Stochastic Hydraulics, Taipei.

Pulina, B., Voigt, A. (1981): Hydrodynamische Belastung der Wehrverschlüsse an den Saarstufen Rehlingen, Mettlach und Schoden sowie Abflussleistung bei spezifischen Betriebsfällen – Modelluntersuchungen. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau, Nr. 49, 1981.

Schmitt-Heiderich, P., Gebhardt, M. (2012): Der Einfluss der Regelstrecke Stauhaltung auf die Abfluss und Stauzielregelung (ASR). In: BAWMitteilungen Nr. 96, 2012, S. 81-98.

Schmitt-Heiderich, P., Belzner, F. (2012): Verfahren zur Parametrisierung von PI-Reglern der automatisierten Abfluss- und Stauzielregelung. In: BAWMitteilungen Nr. 96, 2012, S. 123-134.

Unbehauen, H. (2005): Regelungstechnik I. 13. Auflage, Vieweg Verlag, Wiesbaden.

W-WSD Süd 22-1 (1983): Verwaltungsvorschrift der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Süd: Abflussregelung Main und Regnitz. 1983.

Wasser- und Schifffahrtsamt Schweinfurt (2009): Interner Bericht zur Ursachenforschung der Schäden am Wehr R in Viereth, unveröffentlicht.

