

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Article, Published Version

**Gebhardt, Michael; Schmitt-Heiderich, Peter; Zhang, Bo**  
**Einfluss von Messgrößen auf die Regelgüte und**  
**Möglichkeiten zur Filterung relevanter Informationen**

BAWMitteilungen

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102550>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Gebhardt, Michael; Schmitt-Heiderich, Peter; Zhang, Bo (2012): Einfluss von Messgrößen auf die Regelgüte und Möglichkeiten zur Filterung relevanter Informationen. In: BAWMitteilungen 96. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 99-110.

**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.



# Einfluss von Messgrößen auf die Regelgüte und Möglichkeiten zur Filterung relevanter Informationen

## *Influence of Variables on the Quality of a Controller and Options for Filtering Relevant Information*

Dr.-Ing. Michael Gebhardt, Dr.-Ing. Peter Schmitt-Heiderich, Bundesanstalt für Wasserbau  
M. Sc. Bo Zhang, Elektrotechnisches Institut, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

*Die Eingangssignale, die für eine automatisierte Abfluss- und Stauzielregelung (ASR) einer Staustufe zur Verfügung stehen, werden durch verschiedene Ursachen gestört, wie z.B. Schwall und Sunk, schiffs- oder windinduzierte Wellen. Mit Hilfe von Filtern müssen diese unerwünschten Signalanteile abgeschwächt und unterdrückt werden, damit die Regelung einer Stauhaltung(skette) nicht unmittelbar darauf reagiert. Digitale Filter haben hier viele Vorteile, so sind beispielsweise Filterfunktionen möglich, die mit Analogfiltern nur schwer oder gar nicht realisierbar sind. Der Beitrag gibt einen Überblick über die Filtertypen, zeigt ihre Vor- und Nachteile, gibt Hinweise zum Filterentwurf und zeigt Perspektiven zum Einsatz von Digitalfiltern an den staugeregelten Wasserstraßen auf.*

*The available input signals for an automatic control of discharge and water level (ASR) of a barrage are disturbed by various noise sources, such as waves from passing ships, surge due to lock operations or wind-induced waves. These undesirable signals must be weakened and suppressed with the help of filters, so that the control of a (chain of) impoundments does not respond directly to them. A digital filter has many advantages. For example, filter functions are possible, which can be difficult or even impossible with an analog filter. This article will provide an overview of the types of digital filters, explain their advantages and disadvantages, make suggestions for filter design and show perspectives for the use of digital filters to the impounded waterways.*

### **1 Dynamik einer Stauhaltung** *Dynamics of an impounded river*

Stauhaltungen befinden sich praktisch zu keiner Zeit in einem stationären Zustand, was den Betrieb einer Was-

serstraße wesentlich erschwert. Bei der Bereitstellung ausreichender Mindestwassertiefen und Lichtraumprofile müssen auch die Auswirkungen instationärer Strömungsvorgänge berücksichtigt werden, wie z.B. durch Hochwasser oder Tide. Zusätzliche Wellen entstehen durch Schwall und Sunk, Schifffahrt oder starken Wind.

Schwall und Sunk wird im Wesentlichen durch den Schleusenbetrieb verursacht. Bei der Entnahme des Füllwassers aus dem oberen Vorhafen sinkt der Wasserspiegel zunächst unmittelbar an der Entnahmestelle ab. Das dadurch entstehende Wasserspiegelgefälle pflanzt sich mit der Wellengeschwindigkeit in Richtung Oberwasser fort. Die maximale Wasserspiegelabsenkung (Sunk) tritt dabei zum Zeitpunkt des größten Schleusenzuflusses auf, der im Wesentlichen durch die Schleusungszeit und den Schützfahrplan bestimmt wird. Dies gilt umgekehrt auch für die im unteren Vorhafen bei der Kammerentleerung entstehende Schwallwelle. Die Schleusenzuflüsse können insbesondere bei Niedrigwasser kurzfristig den mittleren Abfluss in der Stauhaltung weit übersteigen. Beispielsweise beträgt der Scheitelabfluss bei der Füllung der Schleuse Detzem an der Mosel (Breite 12,0 m, Nutzlänge 165 m, Fallhöhe 9,0 m) bis zu 70,0 m<sup>3</sup>/s (siehe Bild 1b). Partenscky (1986) gibt an, wie sich die maximalen Schwall- bzw. Sunkhöhen überschlägig berechnen lassen.

Schwall und Sunk kann auch durch eine plötzliche Abflussänderung der Stellorgane verursacht werden, wie z.B. bei einer Abflussreduzierung für eine Rechenreinigung oder beim Umschalten von Über- zu Unterströmung von Wehrverschlüssen. Die durch Schwall- und Sunkwellen hervorgerufenen Wasserstandsänderungen können am Referenzpegel im Oberwasser, an dem das vorgeschriebene Stauziel kontrolliert wird, durchaus eine Amplitude von 20 bis 30 cm aufweisen und zum

Eingreifen der Regelung oder zum Überschreiten der Konzessionsgrenzen führen. Die Schwall- und Sunkwellen werden am Haltungsende, zum Teil auch an Querschnittsänderungen, reflektiert und führen zu einer Überlagerung von Primär- und Sekundärwellen und damit im ungünstigsten Fall zu einer zusätzlichen Wasserpiegeländerung. In Stauhaltungen mit frei fließenden Abschnitten werden die Wellen dabei stärker gedämpft als in Stauhaltungen, bei denen die Stauwurzel bis zur oberstrom liegenden Staustufe reicht.

Bei schiffserzeugten Wellen unterscheidet man zwischen dem Primärwellensystem, zu dem der Wasser-

spiegelabsenk gehört, der in Schiffsnähe auftritt und dessen Fortschrittsgeschwindigkeit der Schiffsgeschwindigkeit entspricht, und den Sekundärwellen, die sich weit vom Schiff fortbewegen können und sich dort wie freie Wellen verhalten (BAW, 2004). Während natürliche Zuflussänderungen infolge Hochwasser und Tide langperiodische Wellen sind, auf die eine Regelung durch eine Abflussänderung antworten muss, sollte der Regler auf die eher kurzperiodischen Wellen durch Schifffahrt sowie Schwall und Sunk nicht reagieren. Dies kann durch eine entsprechende Filterung des Oberwasserstandes erreicht werden.

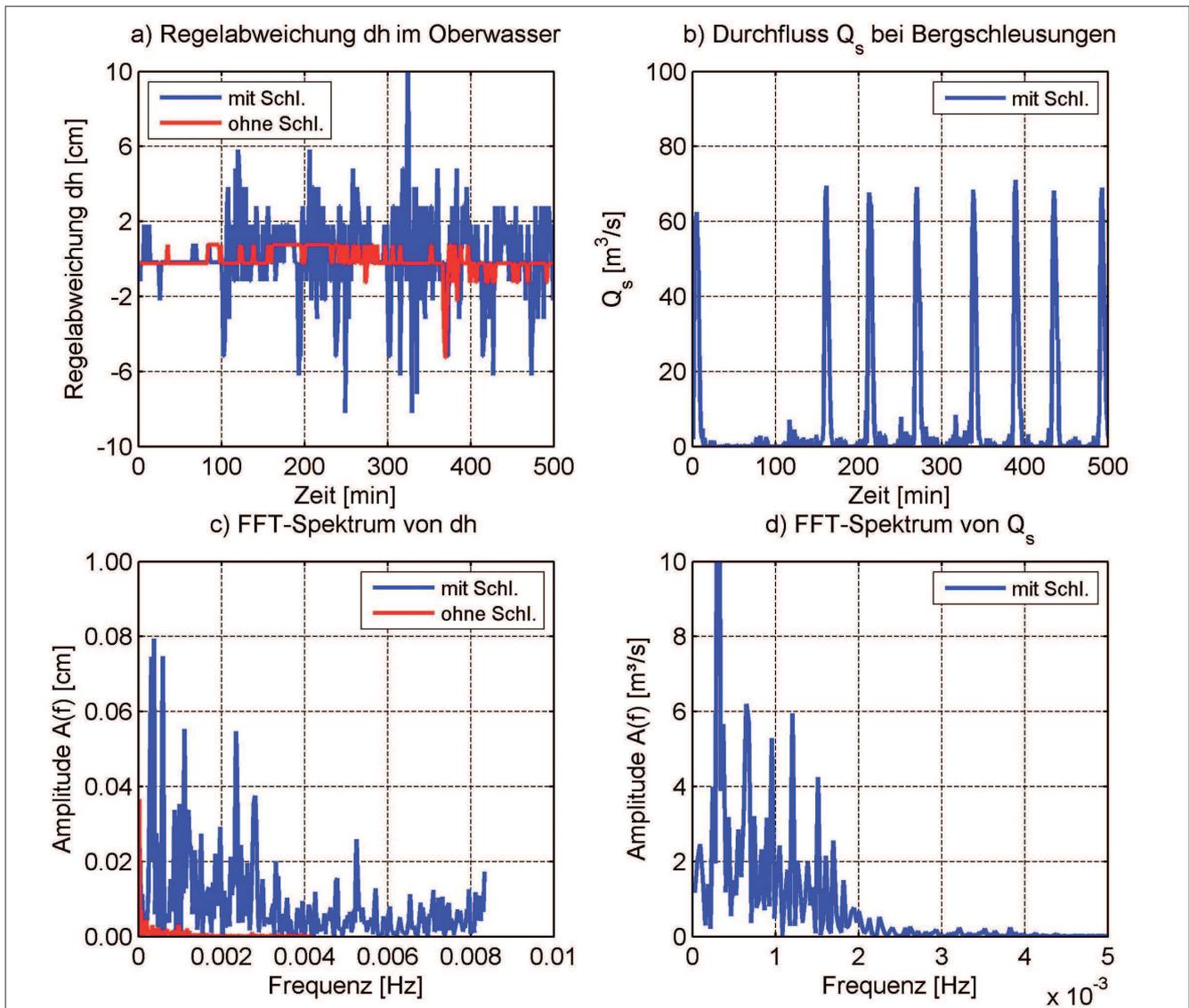


Bild 1: a) Vergleich der Schwankungen im Oberwasser der Moselstaustufe Detzem am 22. Nov. 2007, 16:00 bis 23:00 Uhr mit Schleusenbetrieb und am 14. Juni 2008, 9:00 bis 17:00 Uhr ohne Schleusenbetrieb; b) Abgabe für die Bergschleusungen; c) Frequenzspektren zu Bild 1a); d) Frequenzspektrum zu Bild 1b)

Figure 1: a) Comparison of variations in the headwater of the Mosel barrage at Detzem on Nov. 22, 2007, 16.00 to 3.00 o'clock with lock operations and on June 14, 2008, 9.00 to 17.00 o'clock without lock operation; b) Discharge through lock; c) Frequency spectrum to Figure 1a); d) Frequency spectrum to Figure 1b)

Die Dynamik in einer Stauhaltung sei im Folgenden exemplarisch am Beispiel der Moselstauhaltung Detzem dargestellt, die 29,3 km lang ist und je nach Abfluss eine Wellenlaufzeit zwischen 90 und 110 Minuten aufweist. Bild 1a zeigt einen Vergleich der Wasserspiegelschwankungen um das Stauziel (Regelabweichung), während eines normalen Schleusenbetriebs und an einem Tag, an dem auf Grund von Instandsetzungs- und Modernisierungsarbeiten kein durchgehender Schiffsverkehr auf der Mosel stattfand. Es wird deutlich, dass Schwall und Sunk durch den Schleusenbetrieb Wasserspiegelschwankungen von  $\pm 12/8$  cm verursachen gegenüber  $\pm 2/5$  cm während der Schifffahrtssperre. In beiden Zeiträumen waren die Zuflussschwankungen gering. In Bild 1b sind für denselben Zeitraum die zusätzliche Abgabe für die Bergschleusungen dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass acht Bergschleusungen durchgeführt wurden, was einer durchschnittlichen Wiederholungszeit von 50 Minuten entspricht. Hierzu ist anzumerken, dass die Abgabe aus der Wasserstandsänderung in der Schleusenkammer berechnet wurde, was die kleineren Schwankungen in Bild 1b erklärt.

Die Bilder 1c und 1d zeigen die zugehörigen Frequenzspektren, die über eine schnelle Fourier-Transformation ermittelt wurden. Das Frequenzspektrum der Bergschleusungen (siehe Bild 1d) weist dominierende Frequenzen im Bereich  $3 \div 4 \cdot 10^{-4}$  Hz auf, was – wie zu erwarten – der durchschnittlichen Schleusungswiederholungszeit entspricht. Im selben Frequenzbereich liegen die dominierenden Frequenzen bei der Regelabweichung (siehe Bild 1c), allerdings können hier auch größere Amplituden bei höheren Frequenzen bis etwa  $3 \cdot 10^{-3}$  Hz festgestellt werden, die durch die Schifffahrt erzeugt werden. Das Frequenzspektrum ist Basis für den Filterentwurf, bei dem man sich darauf konzentriert, welche Teile eines Frequenzspektrums durchgelassen werden (Durchlassbereich) und welche nicht (Sperrbereich).

## 2 Filtermöglichkeiten

### *Filter options*

### 2.1 Eingangssignale und Messverfahren

#### *Input signals and measuring methods*

Bei den Eingangssignalen, die für eine automatisierte Abfluss- und Stauzielregelung einer Staustufe zur Ver-

fügung stehen, handelt es sich in den meisten Fällen um Wasserstände, die direkt als Regelgröße oder indirekt als Störgröße, über eine Umrechnung mit Hilfe einer Wasserstands-Abfluss-Beziehung (Schlüsselkurve), in einer Regelung berücksichtigt werden. In jüngster Zeit gewinnen ADCP-Messungen (Acoustic Doppler Current Profiler) an Bedeutung, bei denen die Strömungsgeschwindigkeiten mit Hilfe eines Aktivsonars bestimmt werden. Dabei werden in Richtung der Gewässersohle Schallsignale ausgesendet, die von den Schwebstoffen (vorwiegend Plankton) reflektiert und von der ADCP-Sonde als Echos empfangen werden. Je nach Bauart und Konfiguration des Geräts kann die Geschwindigkeitsverteilung in verschiedenen Tiefen gemessen und über den Messquerschnitt der Abfluss bestimmt werden. Dieses Messverfahren ist insbesondere an den Pegelstandorten von Bedeutung, bei denen im unteren Abflussspektrum infolge des Rückstaus kein eindeutiger Zusammenhang mehr zwischen Wasserstand und Abfluss vorhanden ist.

### 2.2 Filtertypen

#### *Types of filters*

Filter lassen sich nach mehreren Kriterien klassifizieren, zum Beispiel nach Komplexität, Struktur oder Berechnungsmethode. Analogfilter verarbeiten Signale zeit- und amplitudenkontinuierlich, während die Verarbeitung bei Digitalfiltern zeit- und wertdiskret erfolgt. Analog- und Digitalfilter unterscheiden sich grundsätzlich im Aufbau, obwohl sie beide einen bestimmten Frequenzbereich „herausfiltern“ und alles andere „unterdrücken“.

Karrenberg (2009) beschreibt den Unterschied sehr treffend:

- Ein analoges Filter ist eine meist mit Operationsverstärkern sowie diskreten Bauelementen wie Widerständen, Kondensatoren aufgebaute Schaltung („Hardware“).
- Demgegenüber ist ein digitales Filter durchweg virtueller Natur, nämlich ein Programm („Software“), welches aus einer dem Eingangssignal entsprechenden Zahlenkette eine andere Zahlenkette berechnet, die dem gefilterten Signal entspricht.

In zunehmendem Maße ersetzen digitale Filter in Kombination mit Analog-Digital-Umsetzern und Digital-Analog-Umsetzern (A/D- bzw. D/A-Wandler) die früher aus-

schließlich analog realisierten Filterstrukturen. Dabei wird das kontinuierliche Signal abgetastet und in ein diskretes Signal überführt bzw. umgekehrt das digitale Signal in ein analoges Signal umgesetzt. So wird heute beispielsweise ein klassisches analoges Filter wie das Tiefpassfilter in den meisten Fällen als digitales Filter realisiert. Oder anders ausgedrückt: Aus dem zeitkontinuierlichen wurde ein zeitdiskretes Filter. Das hat den Vorteil, dass die bei analogen Bauelementen auftretende Ungenauigkeit und Temperaturabhängigkeit keinen Einfluss mehr auf die Güte des Filters hat (Karrenberg, 2009). Auf Grund ihrer Verbreitung handelt es sich bei den im Folgenden beschriebenen Filtertypen ausschließlich um digitale Filter.

Nach Arnold (2005) kann bei Filtern zwischen folgenden Standardtypen unterschieden werden:

- Ein **Tiefpassfilter** schwächt die hohen Frequenzen bis zu einer Durchlassfrequenz  $f_D$  und lässt alle tieferen Frequenzen praktisch ohne Abschwächung passieren.
- Im Gegensatz dazu schwächt ein **Hochpassfilter** die tiefen Frequenzen bis zu der Durchlassfrequenz  $f_D$ , während alle höheren Frequenzen durchgelassen werden.
- Ein **Bandpassfilter** schwächt alle Frequenzen außerhalb eines Frequenzintervalls ab, welches durch zwei Durchlassfrequenzen  $f_{D,1}$  und  $f_{D,2}$  beschrieben wird.
- Ein **Bandsperrfilter** stellt die Umkehrung des Bandfilters dar: Nur Frequenzen innerhalb eines Frequenzintervalls, das durch zwei Durchlassfrequenzen  $f_{D,1}$  und  $f_{D,2}$  festgelegt ist, werden abgeschwächt.

Die maximal zulässigen Abweichungen vom Wunschverlauf  $\delta_D$  und  $\delta_S$  werden Durchlass- bzw. Sperrtoleranz genannt. Die zugehörigen Eckfrequenzen  $f_D$  und  $f_S$  werden als Durchlass- und Sperrfrequenz bezeichnet. Durch  $f_D$  und  $f_S$  wird der Frequenzbereich der Filter (s. Bild 2) in drei Bereiche unterteilt:

$f < f_D$ bzw. $f > f_D$	Durchlassbereich lässt Frequenzkomponenten unbeeinflusst durch (Verstärkung $\approx 1$ )
$f < f_S$ bzw. $f > f_S$	Sperrbereich unterdrückt Frequenzkomponenten
$f_D < f < f_S$ bzw. $f_S < f < f_D$	Übergangsbereich

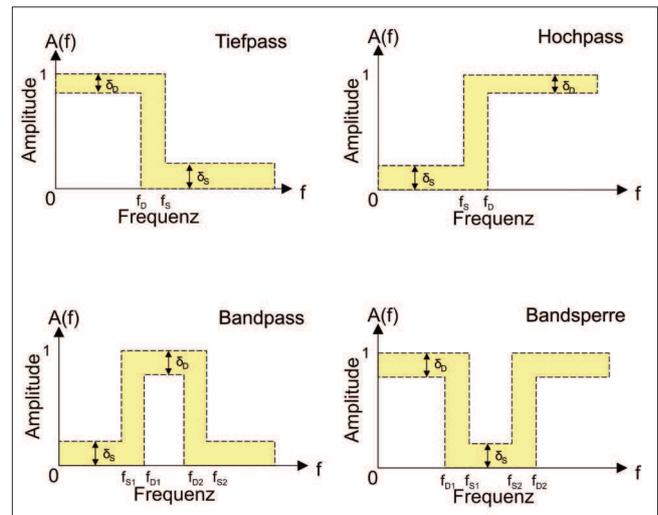


Bild 2: Toleranzschema eines Tiefpass-, Hochpass-, Bandpass- und Bandsperrfilters

Figure 2: Tolerance scheme of a lowpass, highpass, bandpass and bandstop filter

Im Allgemeinen gilt, je enger der Übergangsbereich ist, desto höher ist die Ordnung der Filter. Sollen die ungewünschten Frequenzkomponenten stärker unterdrückt werden, nimmt die Ordnung der Filter ebenfalls zu. Außer den oben erwähnten vier klassischen Filtertypen gibt es noch weitere Filter, wie z. B. den Differentiator, der ein ähnliches Verhalten wie ein Hochpassfilter aufweist, den Hilbert-Transformator sowie den Allpassfilter, die in der Nachrichtentechnik zur Phasenentzerrung eingesetzt werden.

Digitale Filter lassen sich als zeitdiskrete LTI-Systeme (Linear time-invariant) mit einer rationalen Übertragungsfunktion (Gleichung (1)) oder mit einer Differenzengleichung (Gleichung (2)) beschreiben. Linear bedeutet in diesem Zusammenhang, dass jede Summe von beliebig vielen Eingangssignalen zu einer dazu proportionalen Summe von Ausgangssignalen führt und damit das Superpositionsprinzip gilt. Zeitinvariant bedeutet, dass eine beliebige Zeitverschiebung des Eingangssignals zur selben Zeitverschiebung des Ausgangssignals führt. Hydrologen und Wasserbauingenieuren sind die LTI-Systeme wahrscheinlich besser bekannt unter dem Begriff der Einheitsganglinie (vgl. Schmitt-Heiderich und Gebhardt, 2012, in diesem Heft).

$$H(z) = \frac{y(z)}{x(z)} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_N z^{-N}}{1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_M z^{-M}} \quad (1)$$

Gleichung (1) beschreibt das Übertragungsverhalten im z-Bereich, wobei  $x(z)$  das Eingangs- bzw.  $y(z)$  das Ausgangssignal sowie N bzw. M die Ordnung des Filters be-

zeichnet. Alternativ können digitale Filter auch über die allgemeine Differenzgleichung definiert werden (Kiencke und Jäkel, 2008):

$$y(n) = \sum_{k=0}^M b_k \cdot x(n-k) - \sum_{k=1}^N a_k \cdot y(n-k) \quad (2)$$

In Gleichung (2) wird der n-te Ausgangswert  $y(n)$  als gewichtete Summe vergangener Eingangs- und Ausgangswerte berechnet. Sind alle  $a_k$  Koeffizienten gleich Null, wird das digitale Filter als nichtrekursives oder als FIR-Filter (finite impulse response) bezeichnet. Im anderen Fall spricht man von einem rekursiven Filter bzw. einem IIR-Filter (infinite impulse response). Ein Kriterium zur Unterscheidung der FIR-Filter und IIR-Filter ist, ob berechnete Ausgangswerte vergangener Zeitschritte „weiterverwendet“ werden oder nicht. Für FIR-Filter werden die Ausgangswerte nicht verwendet, d.h. das Filter ist ohne Rückkopplung. Für IIR-Filter hingegen werden die vorangegangenen Ausgangswerte verwendet, um den neuen Ausgangswert zu berechnen. Auf Grund dieser Rückkopplung können IIR-Filter instabil werden, während FIR-Filter grundsätzlich stabil sind. Der wesentliche Vorteil von IIR-Filtern liegt darin, dass sich mit einer geringeren Ordnung höhere Filtergüten erzielen lassen.

## 2.3 Das Tiefpassfilter

### *Low-pass filter*

Der am häufigsten eingesetzte Filtertyp im Zusammenhang mit der ASR ist das PT1-Glied bzw. Tiefpassfilter, welches ein Übertragungsverhalten mit einer Verzögerung 1. Ordnung aufweist. Im Zeitbereich lässt sich ein Tiefpassfilter durch folgende Differenzialgleichung beschreiben:

$$T \cdot \dot{y}(t) + y(t) = K \cdot x(t) \quad (3)$$

mit:

$x(t)$	Eingangssignal
$y(t)$	Ausgangssignal
$K$	Übertragungskonstante bzw. Verstärkungsfaktor
$T$	Zeitkonstante

In der digitalen Signalverarbeitung wird Gleichung (3) als folgende Differenzgleichung mit der Abtastrate  $\Delta t$  verwendet.

$$T \cdot \frac{y_n - y_{n-1}}{\Delta t} + y_n = K \cdot x_n \quad (4)$$

Durch entsprechende Umformung erhält man:

$$y_n = \frac{1}{\frac{T}{\Delta t} + 1} \left[ K \cdot x_n + \frac{T}{\Delta t} \cdot y_{n-1} \right] \quad (5)$$

Oder anders ausgedrückt:

$$y_n = b_1 \cdot x_n + a_1 \cdot y_{n-1} \quad (6)$$

Im Vergleich zu Gleichung (2) wird hiermit deutlich, dass ein digitales PT1-Glied einem IIR-Filter 1. Ordnung entspricht.

Zu einer anderen Darstellung der Filterfunktion gelangt man, indem die Folge

$$e^x = \left( 1 + \frac{x}{n} \right)^n \quad (7)$$

als Definition für die Exponentialfunktion mit:  $n = \frac{T}{\Delta t}$  verwendet wird.

Unter Verwendung der Gleichungen (4) und (5) gelangt man damit zu folgender Darstellung:

$$y_n = K \cdot \left( 1 - e^{-\frac{\Delta t}{T}} \right) \cdot u_n + e^{-\frac{\Delta t}{T}} \cdot y_{n-1} \quad (8)$$

Eine gute Näherung für Gleichung (8) bildet folgende Funktion:

$$y_n = K \cdot \frac{T}{\Delta t} \cdot x_n + \left( 1 - \frac{T}{\Delta t} \right) \cdot y_{n-1} \quad (9)$$

Die beiden letztgenannten Funktionen stehen als Simulink-Blöcke in der BAW-Bibliothek zur Staufensimulation zur Verfügung (The MathWorks GmbH, 2004).

## 3 Filterentwurf

### *Filter design*

Aufgabe des Filterentwurfs ist die Festlegung des Filtertyps, die Bestimmung der Ordnung und die Ermittlung der Filterkoeffizienten. Die Entscheidung, welche Frequenzanteile relevant für die Regelung sind, bestimmt den Filtertyp wie z.B. Tiefpass, Hochpass, Bandpass oder Bandsperrfilter. Für den Filterentwurf gibt es verschiedene Methoden, wie sie z.B. in von Grüningen (2008) beschrieben werden.

Die im Folgenden beschriebene Vorgehensweise konzentriert sich auf die Methoden, die MATLAB & Simulink mit dem Filter Design & Analysis Tool (FDA-Tool) zur Verfügung stellt. Das FDA-Tool ist eine grafische Benutzeroberfläche innerhalb der Signal Processing Toolbox,

die eine Filter Sammlung auf Industriestandards basierender Algorithmen für die Verarbeitung analoger und digitaler Signale beinhaltet (siehe Bild 3). Das FDA-Tool bietet Zugriff auf die meisten FIR- und IIR-Filterentwurfsmethoden in der Toolbox (BAW, 2010).

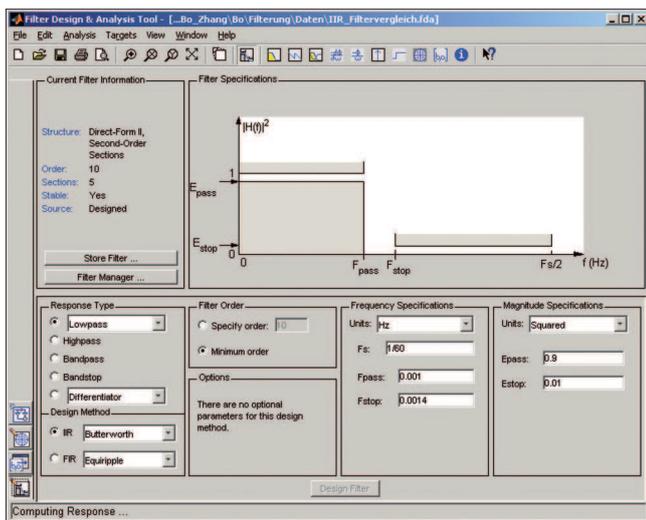


Bild 3: Grafische Benutzeroberfläche der Filter Design & Analysis Tool (FDA-Tool) der Signal Processing Toolbox™ von MATLAB®

Figure 3: Graphical user interface of the Filter Design & Analysis Tool (Tool FDA) of the Signal Processing Toolbox™ MATLAB®

### 3.1 Analyse der Wasserstandsschwankungen im Oberwasser einer Staustufe

#### Analysis of the variations in the headwater level of a barrage

Der Filterentwurf wird beispielhaft an der automatisierten Wehranlage Wendisch-Rietz am Beginn der Storkower Gewässer demonstriert. Über das Wehr erfolgt die Abfluss- und Stauzielregulierung für das Einzugsgebiet des Scharmützelsees. In Bild 4 ist ein Ausschnitt einer Ganglinie des Oberwasserstands zwischen dem 3. und 17. August 2007 im 1-min-Messzyklus dargestellt. Es wird deutlich, dass die Wasserstandsschwankungen  $\pm 5$  cm betragen können, während außerhalb der Schleusenbetriebszeiten praktisch keine Schwankungen festzustellen sind ( $< 1$  cm). Das zugehörige Frequenzspektrum weist eine dominierende Frequenz bei etwa  $1,8 \cdot 10^{-3}$  Hz auf, was einer Periodendauer von etwa 560 s entspricht.

### 3.2 Filterentwurf für den Oberwasserstand

#### Filter design for headwater level

Der Messwert im Oberwasser soll über zwei PT1-Glieder (Tiefpassfilter) geglättet werden, wobei das zweite PT1-Glied nur bei Schleusungen hinzugeschaltet wird. Voraussetzung ist dabei die Bereitstellung eines Schleusungssignals. Das erste PT1-Glied glättet die Messwerte im schleusungsfreien Betrieb, während das zweite PT1-Glied die Wasserstandsschwankungen infolge der Schleusungen dämpft, sodass der Regler nicht darauf reagiert. Für die beiden PT1-Glieder wurden Filterzeiten von  $T_1 = 600$  s bzw.  $T_2 = 1800$  s empfohlen (BAW, 2008).

Aus Bild 5 a und Bild 5 b ist der Einfluss der zwei PT1-Filter auf den Oberwasserstand zu erkennen: Bild 5 a zeigt das Frequenzspektrum des Ausgangssignals und des gefilterten Signals sowie den Amplitudengang der zwei PT1-Filter, während in Bild 5 b der Einfluss im Zeitbereich dargestellt ist. Aus dem Amplitudengang in Bild 5 a wird deutlich, dass der Übergangsbereich, also der Bereich, in dem das Ausgangssignal teilweise gedämpft wird, sehr breit ist ( $0 < |A(f)| < 2,5 \cdot 10^{-3}$  Hz) und praktisch kein Durchlassbereich ( $|A(f)| = 1$ ) besteht. Das führt zu einem Informationsverlust im Übergangsbereich, da (ungewollt) auch Wasserstandsschwankungen unterhalb der dominierenden Frequenz von etwa  $1,8 \cdot 10^{-3}$  Hz geglättet werden.

Als Alternative zu dem oben beschriebenen Filterkonzept wurden ein FIR- und ein IIR-Filter entworfen, deren Parameter in Tabelle 1 zusammengestellt sind. Der Einfluss auf das Frequenzspektrum und das Ausgangssignal im Zeitbereich ist in Bild 5 c bis 5 f zu erkennen. Im Vergleich zu den in Reihe geschalteten PT1-Filtern kann Folgendes festgestellt werden:

- Sowohl beim IIR-Filter als auch beim FIR-Filter ist die Flankensteilheit des Übergangsbereiches größer und damit Sperr- und Durchlassbereich schärfer voneinander abgetrennt. Das bedeutet, dass bis zur Durchlassfrequenz  $f_D$  (engl.  $f_{pass}$ ) kein Informationsverlust vorhanden ist. Im Vergleich der Frequenzspektren ist zu erkennen, dass die kleineren Frequenzen dadurch (nahezu) unverändert bleiben. Die Dämpfung des Oberwasserstandes ist etwas geringer als bei den PT1-Filtern.
- Die Filterordnung (Aufwand) ist abhängig von der Steilheit im Übergangsbereich: Um die gleiche Steil-

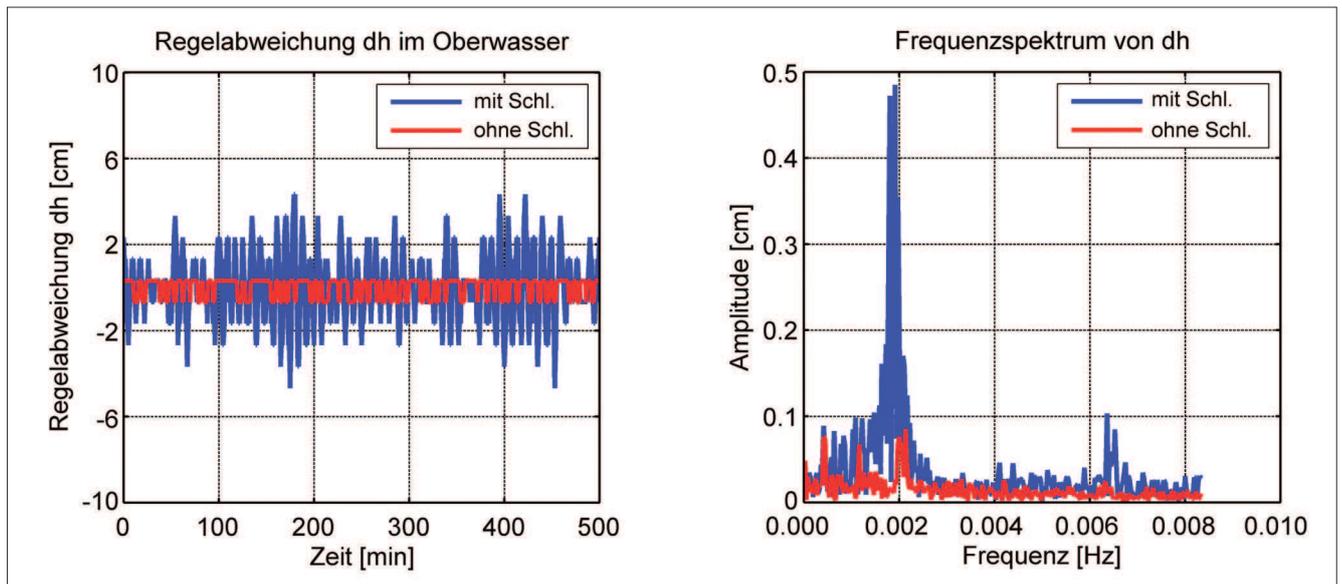


Bild 4: Vergleich der Schwankungen im Oberwasser der Wehranlage Wendisch-Rietz im Zeitraum 3. bis 17. August 2007 (links) in und außerhalb der Schleusenbetriebszeiten (7:00 bis 20:00 Uhr); Vergleich der zugehörigen Frequenzspektren (rechts)

Figure 4: Comparison of variations in the headwater of the Wendisch-Rietz weir in the period 3rd to 17th August 2007 (left) in and outside of the lock operating hours (7:00 to 20:00 o'clock); Comparison of the corresponding frequency spectra (right)

heit zu erreichen, benötigt der FIR-Filter aber eine 10-fach höhere Ordnung als der IIR-Filter. Die daraus resultierenden Rechenzeiten machen den so parametrisierten FIR-Filter für die Praxis untauglich.

- Gegenüber dem IIR-Filter weist der FIR-Filter im Amplitudengang  $|A(f)|$  Überschinger (Rippel) im Durchlass- und Sperrbereich auf, die das Resultat der Nullstellen in der Übertragungsfunktion  $H(z)$  sind (Werner, 2006 oder Meyer, 2002).

Im vorliegenden Fall wäre der IIR-Filter eine gute Alternative zu den in Reihe geschalteten PT1-Filtern. Grundsätzlich müssen aber IIR-Filter als rekursive Filter immer auf Stabilität geprüft werden. Dies kann durch die in der Signaltechnik bekannten Methoden zum optimierten

Filterentwurf erfolgen. Hinweise dazu finden sich u. a. in Werner (2006) oder Meyer (2002).

### 3.3 Unsicherheiten bei der Zuflussermittlung *Uncertainties in determining the inflow*

Wenn der Zufluss in eine Stauhaltung nicht direkt gemessen wird, beispielsweise über eine ADCP-Messeinrichtung, oder indirekt über die Turbinen- und Wehrkennlinien des Oberlieggers bestimmt werden kann, erfolgt die Zuflussermittlung noch in vielen Fällen über kontinuierliche Wasserstandsmessungen und eine Pegelschlüsselkurve am Stauhaltungsbeginn. Schlüsselkurven geben für den gesamten Messbereich eines

Filtertyp	Ordnung	Frequency Specifications		Magnitude Specifications	
		$F_{\text{pass}}$	$F_{\text{stop}}$	$D_{\text{pass}}$	$D_{\text{stop}}$
FIR	$N = 111$	$F_{\text{pass}} = 0,001$	$F_{\text{stop}} = 0,0014$	$D_{\text{pass}} = 0,001$	$D_{\text{stop}} = 0,08$
IIR	$N = 10$	$F_{\text{pass}} = 0,001$	$F_{\text{stop}} = 0,0014$	$E_{\text{pass}} = 0,9$	$E_{\text{stop}} = 0,01$

Tabelle 1: Parametrisierung für den FIR- und den IIR-Filter im Filter Design & Analysis Tool (Bezeichnungen entsprechend Bild 3)  
Table 1: Parameterisation for the FIR and IIR filter in the Filter Design & Analysis Tool (terminology as used in Figure 3)

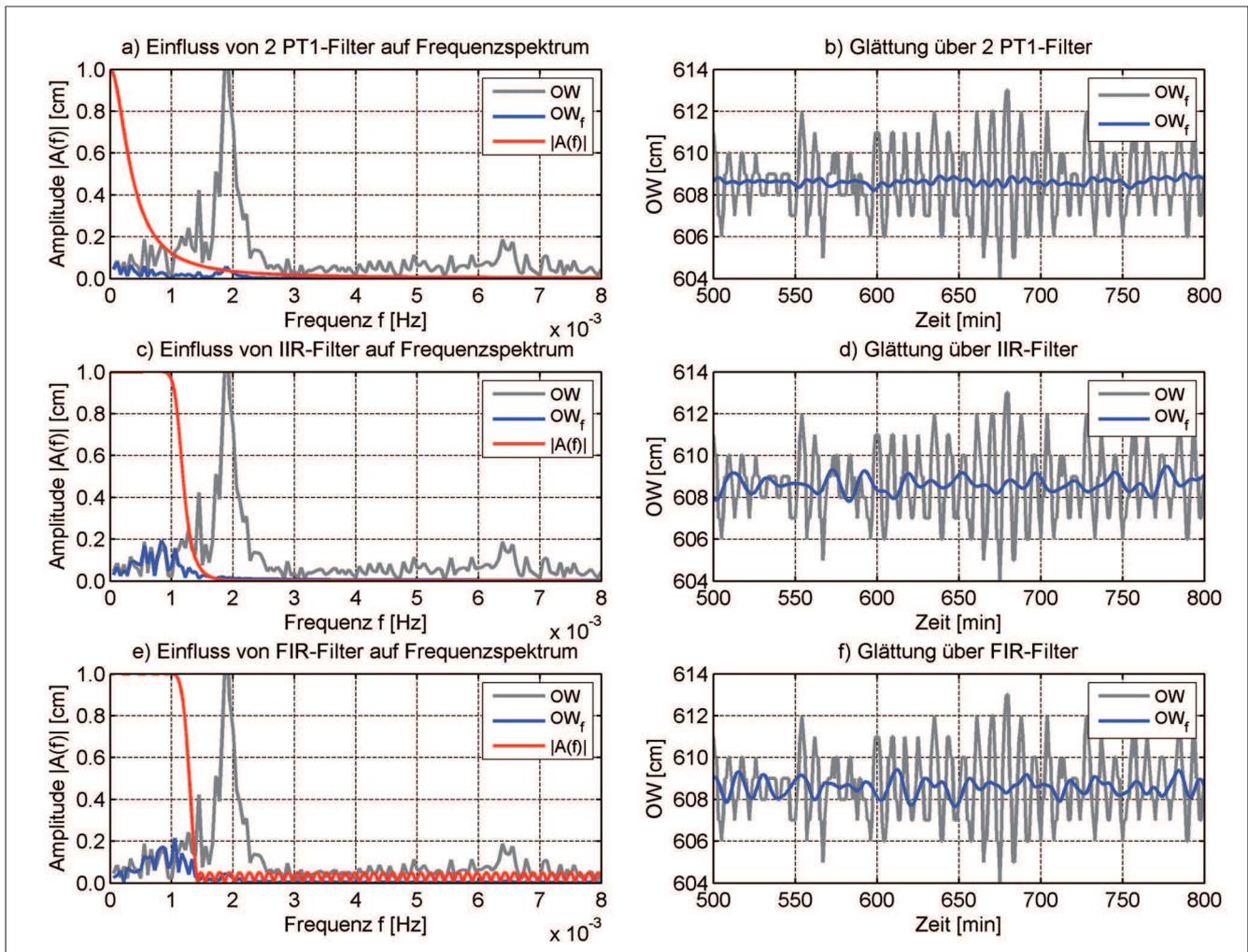


Bild 5: Einfluss unterschiedlicher Filtertypen auf das Frequenzspektrum und das Ausgangssignal im Zeitbereich: a, b) zwei PT1-Filter in Reihe geschaltet; c, d) IIR-Filter; e, f) FIR-Filter

Figure 5: Influence of different filter types on the frequency spectrum and the output signal in the time domain: a, b) two PT1 filters in series c, d) IIR filter, e, f) FIR filter

Pegels das Verhältnis von Wasserstand zu Abfluss in diesem Gewässerabschnitt an. Sie lassen sich am sichersten ableiten, indem über den gesamten Abflussbereich Messungen der Fließgeschwindigkeit durchgeführt werden, aus denen sich dann die Abflüsse relativ genau berechnen lassen. Liegt der Pegel allerdings in der Stauwurzel eines Gewässers, dann liefert die Schlüsselkurve im unteren Abflussspektrum keine eindeutigen Abflüsse mehr.

In Bild 6 ist die Schlüsselkurve des Pegel Perls dargestellt, der für die Zuflussermittlung des Reglers an der Moselstaustufe Palzem/Stadtbredimus verwendet wird. Hier zeigt sich, dass für Wasserstände unter 250 cm entsprechend einem Abfluss von etwa 150 m<sup>3</sup>/s kein Abfluss mehr angegeben werden kann. Der Vergleich zum mittleren Abfluss MQ = 170 m<sup>3</sup>/s (Busch, 1995) macht

deutlich, dass über zwei Drittel eines Jahres keine zuverlässigen Abflüsse vorliegen würden, was die Regelgüte erheblich verschlechtert, da der Zufluss direkt als Steuerungsanteil weitergegeben wird (vgl. Wohlfart und Gebhardt, 2012, in diesem Heft). Eine Möglichkeit besteht darin, die Schlüsselkurve mit einem hydraulisch-numerischen Modell, das zuvor an den vorhandenen Abflussmessungen kalibriert wurde, zu extrapolieren (siehe Bild 6). Aus der Extrapolation ist aber auch zu erkennen, dass sich kleine Wasserstandsschwankungen in großen Abflussschwankungen bemerkbar machen. Im konkreten Fall wird eine ADCP-Messeinrichtung aufgebaut und redundant der Abfluss des Oberliegigers als Eingangssignal aufgeschaltet.

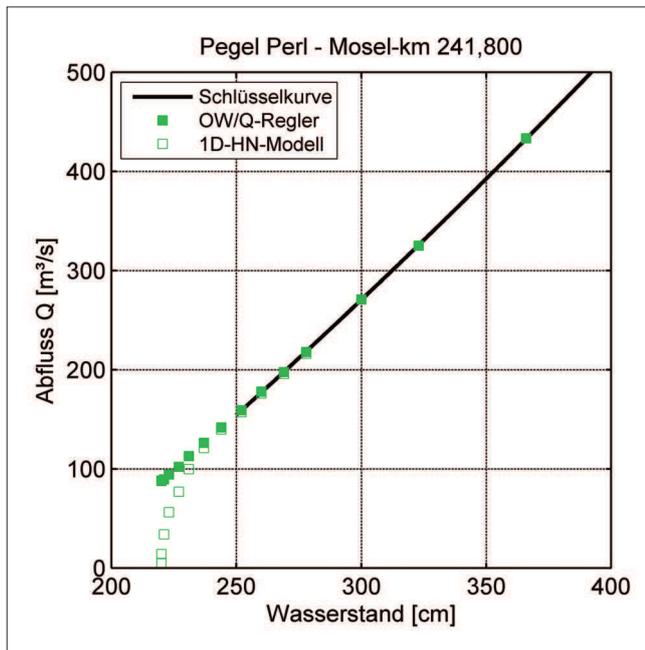


Bild 6: Schlüsselkurve des Pegel Perls an der Mosel mit einem Extrapolationsbereich aus einem hydraulisch-numerischen Modell

Figure 6: Stage-discharge-relation of the Perl water gauge on the River Mosel with an extrapolation range based on calculations using a hydraulic-numeric model

### 3.4 Filterentwurf für den Zufluss Filter design for the inflow

Der Filterentwurf zur Glättung des Zuflusses hat einen anderen Charakter als zur Glättung des Oberwasserstandes, da der Zufluss als Störgröße zeitversetzt um die Retentionszeit als Steuerungsanteil berücksichtigt wird (vgl. Schmitt-Heiderich und Gebhardt, 2012, in diesem Heft). Üblicherweise wird die Retentionszeit dabei in eine Totzeit und eine Reihenschaltung von zwei PT1-Gliedern aufgeteilt, die einen geglätteten Ausgang bei einem mit Schwankungen überlagerten Eingangssignal bewirken (Gebhardt et al., 2010).

Die Zuflussschwankungen treten bei niedrigeren Frequenzen als schiffs- oder windinduzierte Wellen auf und haben hydrologische oder betriebliche Ursachen, wie z. B. aus Bild 7 zu erkennen ist. Daher ist es nicht erforderlich, einen Filterentwurf auf Basis eines Frequenzspektrums durchzuführen mit klar getrenntem Durchlass- und Sperrbereich, vielmehr geht es darum, die Retentionswirkung in dem gestauten Gewässerabschnitt durch eine entsprechende Parametrisierung der Störgrößenaufschaltung vereinfacht abzubilden. Dabei

muss berücksichtigt werden, dass Filter nicht nur glätten, sondern bei einer kontinuierlichen Veränderung des Zuflusses auch eine Phasenverschiebung verursachen. Bei einem PT1-Filter entspricht die Phasenverschiebung dann in etwa der Filterzeit.

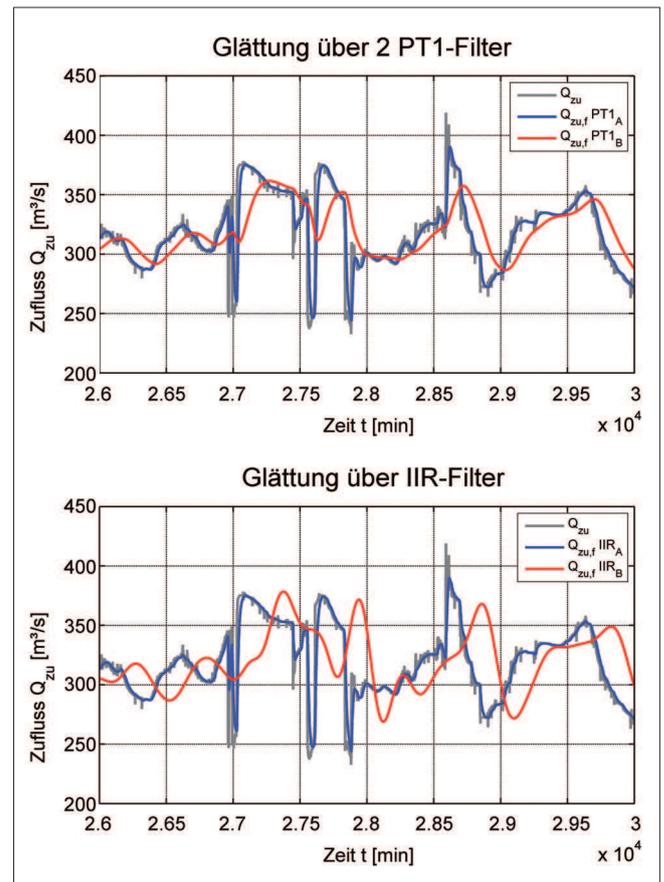


Bild 7: Glättung einer Zuflussganglinie: über zwei in Reihe geschaltete PT1-Filter (oben) und über einen IIR-Filter (unten)

Figure 7: Smoothing of an inflow hydrograph: two PT1-filters in series (top) and one IIR filter (below)

Als Alternative kommen hier auch digitale Filter höherer Ordnung in Betracht, wie z. B. ein IIR-Filter, allerdings ist dadurch kein signifikanter Vorteil zu erwarten, da es eher um die Abbildung der Retentionswirkung als um die Trennung von Signalanteilen geht. In Bild 7 sind die geglätteten Zuflussganglinien mit zwei PT1-Gliedern und einem IIR-Filter mit jeweils zwei unterschiedlichen Parametrisierungen dargestellt.

## 4 Eigene Ergebnisse im Vergleich zum Stand der Wissenschaft

### *Own results in comparison to the state of science*

Im Vergleich zu anderen wasserbaulichen Themen, wie Flussbau, Bauwerkshydraulik, Geschiebetransport oder numerische Modellierung ist die automatisierte Abfluss- und Stauzielregelung in der Wasserbauliteratur eher ein Randthema. Der Einfluss der Messgrößen auf die Regelgüte und die Möglichkeiten zur Filterung werden darin, wenn überhaupt, nur am Rande erwähnt.

Theobald (1999) untersuchte mit Hilfe von 1D-HN-Untersuchungen den Einfluss der Erfassungsgenauigkeit des Durchflusses auf die Abflussregelung und gibt einen Vorschlag zur Behandlung von Schleusungsvorgängen, entweder durch eine entsprechende Dämpfung der gemessenen Wasserstände mit Verzögerungsgliedern oder durch eine kurzfristige Abschaltung der Regelung. Das Abschalten der Regelung ist nach Ansicht der Autoren auf Grund der (Neu-)Initialisierung des Reglers eher kritisch und wenig praktikabel.

Detering (2003) diskutiert eine andere Möglichkeit, den Pegelwert bei Schleusungsvorgängen während eines Schleusungsvorgangs für mehrere Minuten „einzufrieren“ und führt als Nachteil an, dass damit durch die Dämpfung auch ein Zeitverzug beim echten Auftreten einer Messwertänderung verbunden ist. Als Verbesserung sieht Detering (2003) perspektivisch den Einsatz eines Kalman-Filters, das auch zur Glättung, Filterung und Vorhersage von Werten eingesetzt werden könnte. Das Kalman-Filter ist zwar ein weit verbreiteter Algorithmus zur Zustandsschätzung linearer und nichtlinearer Systeme (Kalman, 1960), allerdings wird sein Einsatz nach Ansicht der Autoren auf Grund seiner Komplexität und der Voraussetzung, für die Stauhaltung ein Zustandsraummodell zu erstellen, als eher schwierig gesehen.

Nach eigenen Recherchen finden sich in der Literatur zur Wasserbewirtschaftung von Stauhaltungen oder Bewässerungskanälen keine weiteren Angaben zum Filterentwurf. Bei den beschriebenen klassischen regelungstechnischen Verfahren oder modell-prädiktiven Regelungsansätzen werden bereits geglättete Messwerte vorausgesetzt. Daher muss für dieses umfangreiche Thema auf die Literatur anderer Ingenieursdisziplinen,

z.B. der Nachrichten-, Elektro- und Informationstechnik, verwiesen werden (von Grüningen (2008), Karrenberg (2009), Meyer (2002), Werner (2008)). Der Beitrag soll daher eine Lücke schließen und Hinweise für die Auswahl und den Entwurf von Filtern geben, die beim automatisierten Betrieb von Stauhaltungsketten zum Einsatz kommen.

## 5 Schlussfolgerungen

### *Conclusions*

Digitale Filter sind Stand der Technik und bieten viele Vorteile: Es treten keine Schwankungen durch Toleranzen oder Alterung der Bauteile auf wie bei den herkömmlichen Analogfiltern. Es ist kein manueller Abgleich in der Fertigung notwendig, woraus eine raschere Endprüfung der Geräte resultiert. Es sind Filterfunktionen möglich, die mit Analogfiltern nur schwer oder gar nicht realisierbar sind. Es sind aber nicht nur diese Vorteile, die in den letzten Jahren zu einem verstärkten Einsatz von Digitalfiltern führten, sondern die rasante Entwicklung der Computertechnologie. Digitalfilter waren aufwändiger in der Programmierung und rechenintensiver in der Anwendung. Software-Tools erlauben aber heute einen komfortablen Filterentwurf, der Programmierungsaufwand wird über eine automatische Code-Generierung kompensiert und die Hardware der Zielplattformen ist deutlich leistungsfähiger. Dies gilt für die Nachrichtentechnik sowie die Elektro- und Informationstechnik.

Am Beispiel der Filterung eines Oberwasserstandes wurde gezeigt, dass ein Digitalfilter Vorteile bietet, da der Übergangsbereich kleiner als beim häufig eingesetzten PT1-Filter ist. Dadurch können Frequenzen besser selektiert und durchgelassen, andere hingegen gesperrt werden, sodass ausschließlich die für die Regelung relevanten und eher niederfrequenten Wasserstandsänderungen ungedämpft am Reglereingang anliegen. Auf Grund der geringeren Ordnung haben IIR-Filter hier Vorteile gegenüber FIR-Filtern, wobei sorgfältig auf die Stabilität der rekursiven Filter geachtet werden muss.

Bei der Glättung von Zuflussignalen hingegen bieten digitale Filter höherer Ordnung keine wesentlichen Vorteile. Die hydrologisch oder betrieblich bedingten Schwankungen erfolgen im Verhältnis zu dem üblichen

Einsatzbereich der Digitalfilter eher langsam. Eine Selektion von Frequenzanteilen ist nicht erforderlich, vielmehr geht es darum, die Retentionswirkung, also die Abflussvergleichmäßigung auf der Strecke, vereinfacht abzubilden. Sowohl Analog- als auch Digitalfilter weisen eine Phasenverschiebung auf, die beim zeitversetzten Aufschalten auf den Reglerausgang über eine Anpassung der Totzeit berücksichtigt werden muss. In der Summe sind Digitalfilter sicherlich eine gleichwertige Alternative zu den bisher eingesetzten Analogfiltern, wie z. B. einem PT1-Filter, allerdings ist davon keine signifikante Erhöhung der Filtergüte zu erwarten.

## 6 Literatur *References*

- Arnold, D. (2005): Seminar Digitale Signalverarbeitung, Thema: Digitale Filter, Universität Koblenz-Landau.
- Bundesanstalt für Wasserbau (2004): Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen (GBB), Mitteilungsblatt der BAW Nr. 87, Karlsruhe.
- Bundesanstalt für Wasserbau (2008): Gutachten über die Abfluss- und Stauzielregelung der Wehranlage Wendisch Rietz, unveröffentlicht.
- Bundesanstalt für Wasserbau (2010): Bericht über den Entwurf von Digitalfiltern mit Hilfe von MATLAB & Simulink, unveröffentlicht.
- Busch, N. (1995): Niederschlag und Abflusssituation im Moselgebiet. Mitteilungen der Bundesanstalt für Gewässerkunde, Nr. 12, Koblenz, S.10-23.
- Detering, M. (2003): Modellgestützte Regelung von Stauhaltungssystemen und Laufwasserkraftanlagen. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen.
- Gebhardt, M., Schmitt-Heiderich, P., Wohlfart, S. (2010): Automated operation of chains of barrages – development of controller algorithms with the use of model-based design. In: Proceedings of River Flow 2010 – International Conference on Fluvial Hydraulics, Braunschweig, 8. bis 10. September 2010, S.1399-1406.
- Kalman, R. E. (1960): A new approach to linear filtering and prediction problems. Trans. ASME, Series D, J. Basic Eng. 82(3), 35-45.
- Karrenberg, U. (2009): Signale – Prozesse – Systeme: Eine multimediale und interaktive Einführung in die Signalverarbeitung. Springer, Berlin.
- Kiencke, U., Jäkel, H. (2008): Signale und Systeme. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, korrigierte Auflage.
- Meyer, M. (2002): Grundlagen der Informationstechnik: Signale, Systeme und Filter. Vieweg Verlag, 1. Auflage.
- 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.
- Partenscky, H.-W. (1986): Binnenverkehrswasserbau, Schleusenanlagen. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York Tokyo.
- The MathWorks GmbH (2004): Aufbau einer Simulink-Bibliothek für die Simulation automatisierter Staustufen im Auftrag der Bundesanstalt für Wasserbau.
- Theobald, S. (1998): Numerische Simulation von Staustufenketten mit automatisiertem Betrieb. Universität Karlsruhe.
- Von Grüningen, D. Ch. (2008): Digitale Signalverarbeitung: mit einer Einführung in die kontinuierlichen Signale und Systeme. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 4. Auflage.
- Werner, M. (2006): Digitale Signalverarbeitung mit MATLAB®. Grundkurs mit 16 ausführlichen Versuchen, Vieweg+Teubner Verlag, 3. Auflage.

