

Strategien zur Reduktion unnatürlicher Abflussschwankungen an Fließgewässern

Andreas Kron

Peter Oberle

Fabian Knepper

Mário Franca

Stichworte: Steuerung, Regelung, Abflussschwankungen,
Wasserkraft

1 Hintergrund

A6-03

In vielen durch Wasserkraft genutzten Fließgewässern werden unnatürliche Abflussschwankungen beobachtet. Diese Schwankungen sind nicht auf Niederschlagsereignisse zurückzuführen, sondern entstehen durch Steuerungs- und Regelungsprozesse der Wasserkraftanlagen. Kraftwerksbetreiber sind aufgrund der Konzessionsvorgaben zur Einhaltung des Stauziels verpflichtet und müssen gleichzeitig sicherstellen, dass durch den Betrieb das natürliche Abflussgeschehen nicht beeinflusst wird. Ungünstige Betriebsreglements können in einer Kraftwerkskette die Effekte stromabwärts verstärken. Abbildung 1 zeigt beispielhaft die Zeitreihen der Abflüsse an vier Pegel am oberen Neckar mit einer deutlich erkennbaren Verstärkung der Schwankungen, insbesondere in den Zeiträumen 05.– 06.08. sowie am 12.08. Die Situation verschärft sich insbesondere in Niedrigwasserphasen, da plötzliche Pegeländerungen bei geringen Abflüssen deutlich größere Auswirkungen haben.

Neben betrieblichen und wasserwirtschaftlichen Herausforderungen im Betrieb von Wasserkraftanlagen wirken sich Abflussschwankungen erheblich auf aquatische Lebensräume aus. Rasche Wasserstandsänderungen können zu Habitatverlust, Stress für aquatische Organismen bis hin zu einer erhöhten Mortalität von Fischen und Makrozoobenthos führen. Zusätzlich besteht die Gefahr,

dass Fischtreppen trockenfallen und es hierdurch zu Fischschädigungen oder zumindest die Durchgängigkeit eingeschränkt wird. Im Extremfall können die Schwankungen zudem negative Auswirkungen auf die Schifffahrt haben. Bei plötzlichen Pegeländerungen können Mindestfahrwassertiefen unterschritten werden, was zu Einschränkungen in der Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt führt.

Um diese Problematik zu adressieren, wurden am IWU in einem mehrstufigen Ansatz mehrere, z. T. noch laufende Studien am oberen Neckar durchgeführt und hierbei Ursachen identifiziert sowie Strategien zur Reduktion der Schwankungen entwickelt. Ziel ist die Umsetzung optimierter Betriebsweisen, die sowohl energetische, rechtliche als auch ökologische Anforderungen berücksichtigen.

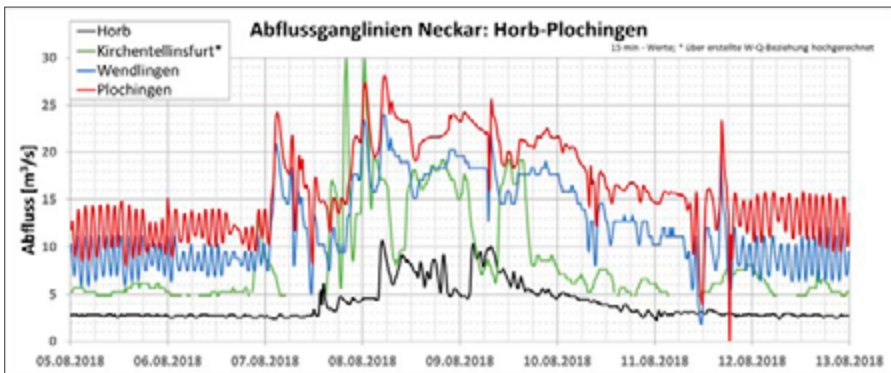


Abbildung 1: Unnatürliche Abflussschwankungen am oberen Neckar zwischen den Pegeln Horb und Plochingen

2 Grundlagen der Stauzielregelung

Aus technischen und wirtschaftlichen Gründen werden bei kleineren Wasserkraftanlagen fast ausschließlich Regelungen implementiert, die dem Prinzip einer reinen Stauzielregelung folgen (siehe Abbildung 2). Dabei erfolgt die Regelung ausschließlich über den Vergleich des gemessenen Wasserstandes im Oberwasser der Wehranlage mit dem Sollwert (Stauziel gemäß den Konzessionsvorgaben). Der Gesamtzufluss in die jeweilige Stauhaltung, der sich aus

dem Abfluss der oberstrom liegenden Anlagen sowie den seitlichen Zuflüssen in die Stauhaltung ergibt, ist üblicherweise nicht bekannt und kann somit bei einer Stauzielregelung auch nicht berücksichtigt werden. Ergeben sich Abweichungen des aktuellen Wasserstandes mit dem Sollwert, werden diese über eine Anpassung des Abflusses über die Stellorgane (Turbinen, Wehr etc.) ausgeglichen. Da keine Information über die Zuflüsse vorliegen kann der Regler erst reagieren, wenn am Pegel eine Abweichung auftritt bzw. die Stauzieltoleranz über- oder unterschritten ist. Aufgrund der Trägheit im Regelkreis machen sich Abflussänderungen durch die Stellorgane dabei erst nach einer gewissen Zeit am Pegel bemerkbar. Werden die Stauzieltoleranzen sehr eng gesetzt (aktuell üblich sind $\pm 1\text{--}3\text{ cm}$) kann diese Latenz zu einer Verstärkung von Abflussschwankungen (DWA, 2006) und zu Schwingungsverhalten führen.

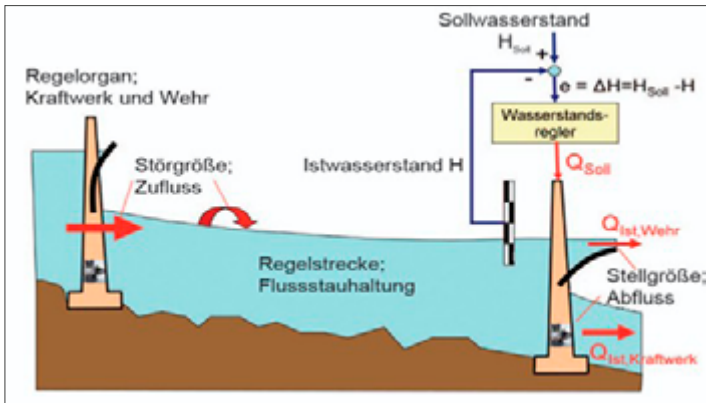


Abbildung 2: Prinzipschema einer Stauzielregelung [aus BAW, 2012]

3 Methodik

Zur Auswahl von relevanten Abflussereignissen wurden die Pegel­daten der Pegel Horb, Kirchentellinsfurt, Wendlingen und Plochingen über einen Zeitraum von 2014 bis 2022 ausgewertet und auf kritische Abflussschwankungen geprüft (siehe Abbildung 3). Maßgebende Kriterien waren in erster Linie das Auftreten von deutlich verstärkten Abflussschwankungen an den Pegeln Kirchentellins-

furt, Wendlingen und Plochingen im Vergleich zum Pegel Horb bei Abflussmengen im Niedrig- und Mittelwasserbereich sowie extreme und ggf. für die Schifffahrt kritische Schwankungen an den Pegeln Wendlingen bzw. Plochingen.

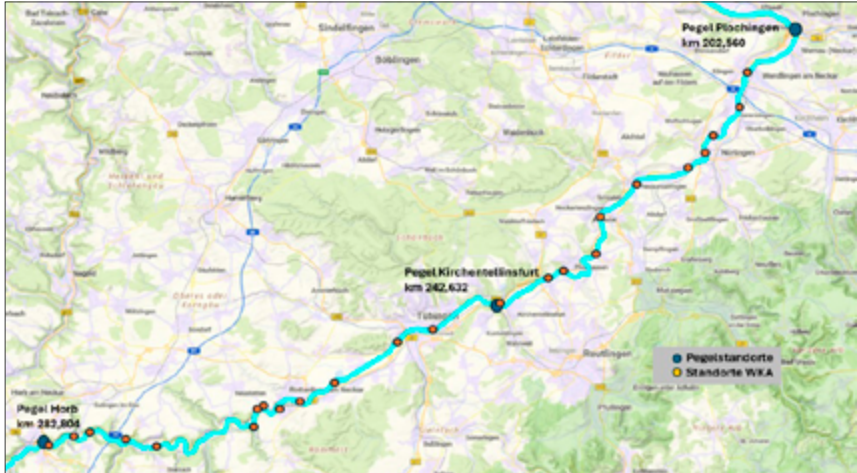


Abbildung 3: Verlauf oberer Neckar mit Standorten der Pegel- und Wasserkraftanlagen aus (Karte: Geoportal BW)

Aus dieser Pegelauswertung wurden insgesamt 22 Zeiträume mit der beschriebenen Abflusscharakteristik ausgewählt. Da an den Anlagen keine direkten Informationen über die Abflussmengen vorliegen wurde der Gesamtabfluss aus den Betreiberdaten berechnet.

$$Q_{\text{ges}} = Q_{\text{Turb}} + Q_{\text{Wehr}} + Q_{\text{Rest}}$$

mit

$$Q_{\text{ges}} = \text{Gesamtabfluss des jeweiligen Kraftwerks}$$

$$Q_{\text{Turb}} = \text{Turbinendurchfluss des jeweiligen Kraftwerks, rückgerechnet aus der erzeugten Kraftwerksleistung und Fallhöhe}$$

Q_{Wehr} = Abfluss über Wehranlage (ggf. Grundablässe, Schütze etc.), berechnet aus Wasserständen sowie Stellung der Regelorgane

Q_{Rest} = Abgegebene Restwassermenge der jeweiligen Anlage, gemäß Vorgaben

Basierend auf den rückgerechneten Abflüssen sowie den gemessenen Oberwasserständen wurden für jeden Analysezeitraum Einzelschwankungen identifiziert und deren Verlauf detailliert über die Stauufenkette verfolgt. Die Daten wurden über statistischer Frequenzanalysen sowie deskriptive Verfahren betrachtet und ausgewertet.

4 Ergebnisse

4.1 Typisierung der Abflussschwankungen

Im Rahmen der Auswertung wurden die Betreiberdaten zunächst systematisch auf eine vergleichbare Genese der Abflussschwankungen hin untersucht. Dabei konnten typische Ereignisabläufe identifiziert werden:

- (nicht vermeidbare) Abflussänderungen, die aus dem ordnungsgemäßen Betrieb der Anlagen resultieren und sich innerhalb der Stauhaltungskette verstärken,
- Schwankungen, die aufgrund eines fehlerhaften Betriebsreglements der Stellorgane erzeugt werden,
- Periodische Abflussschwankungen, die durch die Regelung selbst verursacht werden,

Insbesondere der zuerst genannte Fall zeigt die Problematik der Stauzielregelung in Verbindung mit engen Vorgaben zur Stauzieltoleranz. Abbildung 4 veranschaulicht dies anhand der Abflussganglinien von drei Anlagen in der untersuchten Stauhaltungskette.

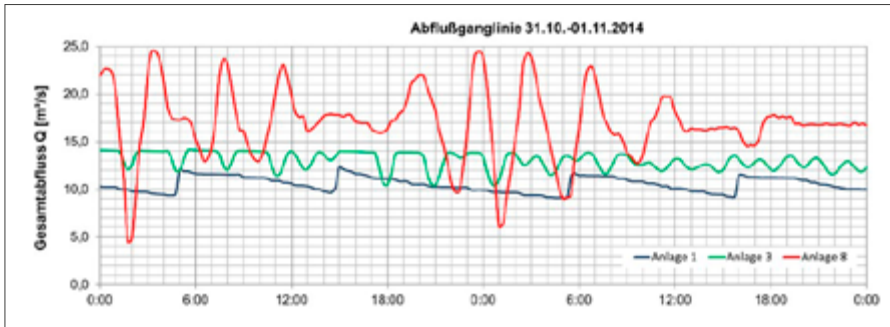


Abbildung 4: Darstellung der Abflussschwankungen an drei Anlagen einer Stauhaltungskette (exemplarisch)

Aufgrund von Spülvorgängen bei der Rechenreinigung werden an Anlage 1 in regelmäßigen Abständen Spülstöße in der Größenordnung von $1,5 - 2 \text{ m}^3/\text{s}$ (ca. $\pm 20\%$ des mittleren Abflusses) verursacht und in den unterhalb liegenden Stauraum eingeleitet. Aufgrund der Vorgabe, dass das Stauziel an den nachfolgenden Anlagen mit einer Toleranz von 1–3 cm eingehalten werden muss, ergibt sich aufgrund der in Kapitel 2 beschriebenen Einschränkungen bei der Stauzielregelung eine deutliche Verstärkung der Schwankungen. An der untersten betrachteten Anlage betragen die Schwankung bis zu $20 \text{ m}^3/\text{s}$. Dies entspricht ca. $\pm 70\%$ des mittleren Abflusses.

4.2 Übersicht der Regelungsqualität über einen Abschnitt der Staustufenkette am oberen Neckar

Bei einer reinen Stauzielregelung steht die Vorgabe einer permanenten und möglichst exakten Einhaltung des Stauziels grundsätzlich der Möglichkeit einer dämpfenden Einwirkung auf Abflussschwankungen bzw. -gradienten entgegen. Für die Betreiber stellt sich die Situation so dar, dass zum einen die Konzessionen eine exakte Einhaltung des Stauziels fordern, zum anderen eine Veränderung der „natürlichen“ Abflußganglinie durch den Anlagenbetrieb nicht zulässig ist. Da beide Anforderungen eine unterschiedliche Ausrichtung der Parametrierung der Regelung erfordern, ist die gleichzeitige Einhaltung praktisch nicht umsetzbar.

Abbildung 5 zeigt die Regelungsgüte von 8 aufeinander folgenden Anlagen für verschiedene Zeiträume.

Bei der Bewertung der Ergebnisse ist auf zwei Kriterien zu achten, (1) das gemäß der Konzession einzuhaltende Stauziel und (2) die Veränderung der Abflussganglinie. In der oberen Bildhälfte sind die Veränderungen der Abflussschwankungen in Bezug auf die oberstromige Stauhaltung in blau dargestellt, der Mittelwert der Änderung als rote Linie. In der unteren Bildhälfte entsprechen die grünen Linien den OW-Schwankungen, die schwarze Linie stellt den Mittelwert dar.

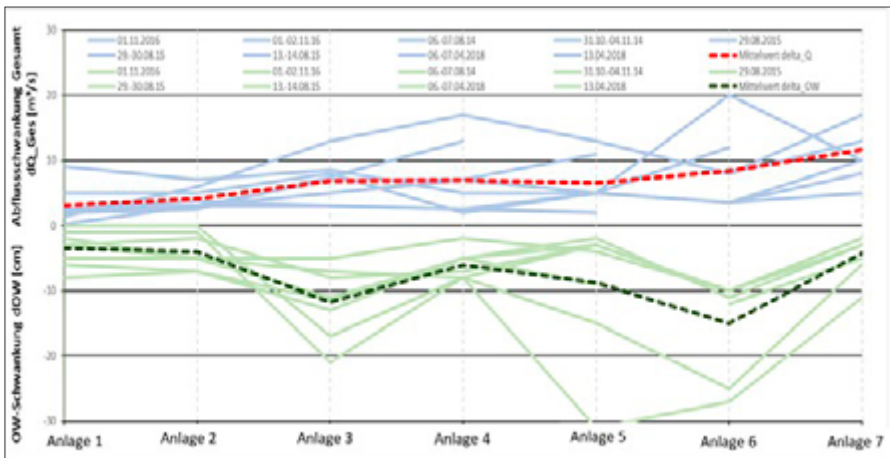


Abbildung 5: Zusammenfassung der Q- bzw. OW-Schwankungen im betrachteten Fließabschnitt vor Umsetzung der Maßnahmen

Ein bezüglich des Einhaltens des Stauziels gute Regelung ist dadurch gekennzeichnet, dass die OW-Schwankung einen möglichst kleinen Wert annimmt. Entsprechendes gilt für die Abflussschwankungen. Überall dort, wo der Wert im Vergleich zur oberstromhalb liegenden Stauanlage reduziert wird, erfolgt eine Dämpfung, wobei hier tendenziell größere Wasserstandsschwankungen in Kauf genommen werden müssen. Als vorrangig für eine Optimierung der Regelung sind zum einen diejenigen Anlagen zu betrachten, bei denen eine Verstärkung der Schwankungsgrößen für beide betrachteten Kriterien (Wasserstand und

Abfluss) erfolgt. Dies ist ein deutlicher Hinweis auf Optimierungsbedarf der Regelung. Anlagen, die durch eine optimierte Regelung das Stauziel in einem sehr geringen Schwankungsbereich halten, verstärken oftmals die Abflussschwankungen (siehe Kapitel 2) und bieten daher ebenfalls Optimierungspotenzial.

4.3 Lösungsansätze zur Verbesserung der Regelungsqualität

Aus den Gesprächen mit den Kraftwerksbetreibern wurden gemeinsam verschiedene Anpassungsoptionen entwickelt, die zu einer deutlichen Verbesserung der Situation geführt haben (siehe Abbildung 6):

- Trägere Parametrisierung der Regelung zur Verringerung der Stellbefehle für die Leitapparate der Turbinen sowie der Wehroorgane
- Erhöhung des Totbandes der Regelung (Stauzieltoleranz) mit zusätzlicher Implementierung einer Trenderkennung des Wasserstandes
- Anpassung der Regelungsanteile verschiedener Stellorgane
- Einrichtung von Maximalverstellungsschritten (z. B. für Grundablässe) zur Vermeidung extremer Hub- oder Senkbewegungen

Es konnte im Vergleich zum Zustand ohne Anpassungsmaßnahmen ein deutlich ruhigeres Abflussverhalten festgestellt werden. Insbesondere kritische periodische Schwankungen, in kurzen Zeitabständen auftreten können nun vermieden werden. Auch die Amplitude der Schwankungen wurde im Mittel durch die Regelungsanpassungen reduziert. So kommt es teilweise zwar weiterhin zu einer Weitergabe von Abflussschwankungen, eine deutliche Verstärkung bleibt aber aus.

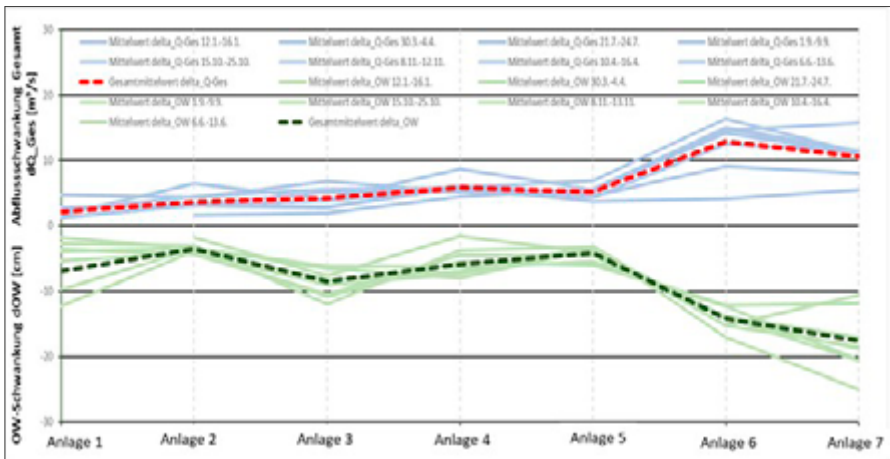


Abbildung 6: Zusammenfassung der Q- bzw. OW-Schwankungen im betrachteten Fließabschnitt nach Umsetzung der Maßnahmen

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Optimierung der Regelung einer automatisierten Stauzielregelung ist Gegenstand zahlreicher Untersuchungen und immer noch eine Herausforderung für die Umsetzung in der praktischen Anwendung. Die Kraftwerksbetreiber sind grundsätzlich verpflichtet sowohl das in den Konzessionsvorgaben definierte Stauziel für ein weites Abflussspektrum einzuhalten und hierbei gleichzeitig das natürliche Abflussregime nicht negativ zu beeinflussen. Diese Anforderungen sind mit den insbesondere bei kleineren und mittleren Anlagen implementierten Regelungselementen kaum zu erfüllen. Hierzu müssten deutlich komplexere Systeme implementiert werden, die neben der Berücksichtigung weiterer Elemente für der Regelung (zusätzliche Störgrößenaufschaltung, Ermittlung der Abflüsse über/durch die Regelorgane, Leit- und Fernwirktechnik zur Weitergabe von Abflussinformationen, abflussabhängige Reglerparametrierung etc.) auch die Stauraumcharakteristik (z. B. Länge, Volumen, Lauf- und Retentionszeit, etc.) abbilden. Verfahren zur Kopplung von HN-Strömungs- mit Regelungsmodellen sind vorhanden, aus wirtschaftlichen Gründen aber in den meisten Fällen nicht umsetzbar.

Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen haben jedoch gezeigt, dass über eine anlagenspezifische Analyse die Regelungsqualität bewertet, Verbesserungspotenzial aufgezeigt und geeignete Maßnahmen entwickelt werden können, die mit vertretbarem Aufwand zu einer Verbesserung der Situation führen können.

Aber auch die Genehmigungsbehörden können einen Beitrag liefern, in dem im Rahmen einer Gesamtbetrachtung eine gewisse Toleranz in der Einhaltung der Vorgaben eingeräumt wird. Beispielsweise kann die Akzeptanz/Erweiterung der Stauzieltoleranz dazu führen, dass die Regelung bei kleineren Schwankungen nicht eingreift und so Abflussänderung im Stauraum gedämpft wird. Dies jedoch wie Eingangs beschrieben u. a. unter Berücksichtigung der ökologischen Belange.

Literatur

BAW (2012): Automatisierte Abfluss- und Stauzielregelung (ASR). BAWMitteilungen Nr. 96, Karlsruhe 2012

DWA (2006): Automatisierter Betrieb von Staustufen, DWA Themenheft , Hennef 2006

Autoren:

Dr.-Ing. Andreas Kron
Institut für Wasser und Umwelt
Karlsruher Institut für Technologie
Kaiserstraße 12
76131 Karlsruhe
Tel.: +49 721 608 48421
E-Mail: kron@kit.edu

Dr.-Ing. Peter Oberle
M.Eng. Fabian Knepper
Prof. Dr. Mário Franca
Karlsruher Institut für Technologie
Kaiserstraße 12
76131 Karlsruhe