

Ursachenanalyse und Erfolgskontrolle am Beispiel von Pegel- und Abflussschwankungen an Limmat und Aare

Georg Möller und Peter Billeter

Zusammenfassung

Wenn lange Datenreihen von Pegelständen oder Abflüssen mit guter zeitlicher Auflösung verfügbar sind, können die Ursachen von Pegel- und Abflussschwankungen in Flüssen mit den Instrumenten der digitalen Signalanalyse untersucht werden. Nach einer kurzen methodischen Einführung wird die Analyse von Schwankungen an den Schweizer Flüssen Aare und Limmat vorgestellt. Die auftretenden Schwankungen erreichten teilweise Werte die aus gewässerökologischer Sicht nicht mehr zulässig waren. Beide Flüsse werden über zahlreiche Kraftwerksstufen mit teilweise direkt zusammenhängenden Stauräumen genutzt. Es galt deshalb abzuklären, ob die Schwankungen primär durch einzelne Betriebsereignisse bei den Kraftwerksanlagen erzeugt wurden (Laständerungen und/oder Interventionen an einzelnen Anlagen) oder sie sich durch eine systematische regeltechnische Amplifikation bzw. ein nicht optimale Funktionieren der Wasserhaushaltsregelungen (WHR) über die Staukette einstellten. Aufgrund der differenzierten Ursachenanalyse konnten die massgebenden Einflüsse der Schwankungen festgestellt werden. Die Ursachen sind in beiden Fällen verschieden. Die Analyse an der Aare zeigt einen Zusammenhang mit kraftwerksbedingten Regelungen. Mit einer Optimierung der Kraftwerksregulierung und der Modifikation der WHR der einzelnen Kraftwerksstufen konnten die Schwankungen in der Aare deutlich reduziert werden. Mittels Erfolgskontrolle wurde die Reduktion der Schwankungen nachgewiesen und quantifiziert. An der Limmat zeigt die Analyse eine völlig andere Einflussgrösse. Regeltechnisch bedingte Schwankungen liegen praktisch nicht vor. Einzelne Betriebsereignisse wurden als ursächlich identifiziert. Die wesentlichen Erkenntnisse zweier Projekte werden vorgestellt und die Methoden der Ursachenanalyse und deren Anwendbarkeit in der Praxis diskutiert.

1 Einleitung und Problematik

Die Aare und die Limmat sind zwei Schweizer Flüsse und Bestandteil des Rhein Flusssystem (vgl. Abb. 1). Regulierte Seen speisen die beiden Flüsse, welche durch Laufwasserkraftwerke mit Stauwehren zur nicht bedarfsgerechten Stromproduktion genutzt werden. Das zufließende Wasser wird im Regelbetrieb eins zu eins weitergegeben, ein effektiver Kaskadenbetrieb wird nicht gefahren. Je nach Dargebot wird das Wasser in den Turbinen verarbeitet respektive über das Wehr abgelassen. Änderungen im Abfluss sind je nach Grösse durch verschiedene hydraulische Organe bzw. Maschinen weiterzuleiten. Diese können je nach Standort und Steuerung Schwankungen verursachen. Durch Wasserhaushaltsregelungen (WHR) sind die Rahmenbedingungen festgelegt. Einzelne Betriebsereignisse entstehen durch Laständerungen und/oder Interventionen an einzelnen Anlagen. Systematische regeltechnische Amplifikationen können sich über die Staukette einstellen. Es besteht bei gelungener Steuerung die Chance Schwankungen stromab zu dämpfen, aber auch das Risiko diese regeltechnisch zu amplifizieren. Letzteres wird oft von anderen Interessengemeinschaften bei auftretenden Pegelschwankungen a priori als Ursache gesehen. Für einen Nachweis der Ursache ist eine umfassende und komplexe Datenanalyse notwendig. Es sind grundsätzlich 2 Typen bzw. 3 Arten von Schwankungen zu unterscheiden: 1. Langwellige Schwankungen mit Perioden T von mehr als 3-6 Stunden infolge der Seeregulierung oder des natürlichen Sihlzuflusses. 2. Kurzwellige

Schwankungen mit Perioden T kleiner als ca. 2-3 Stunden infolge 2a: Betriebsereignissen /Betriebsstörungen oder 2b: regeltechnisch generierte Schwankungen der WHR.

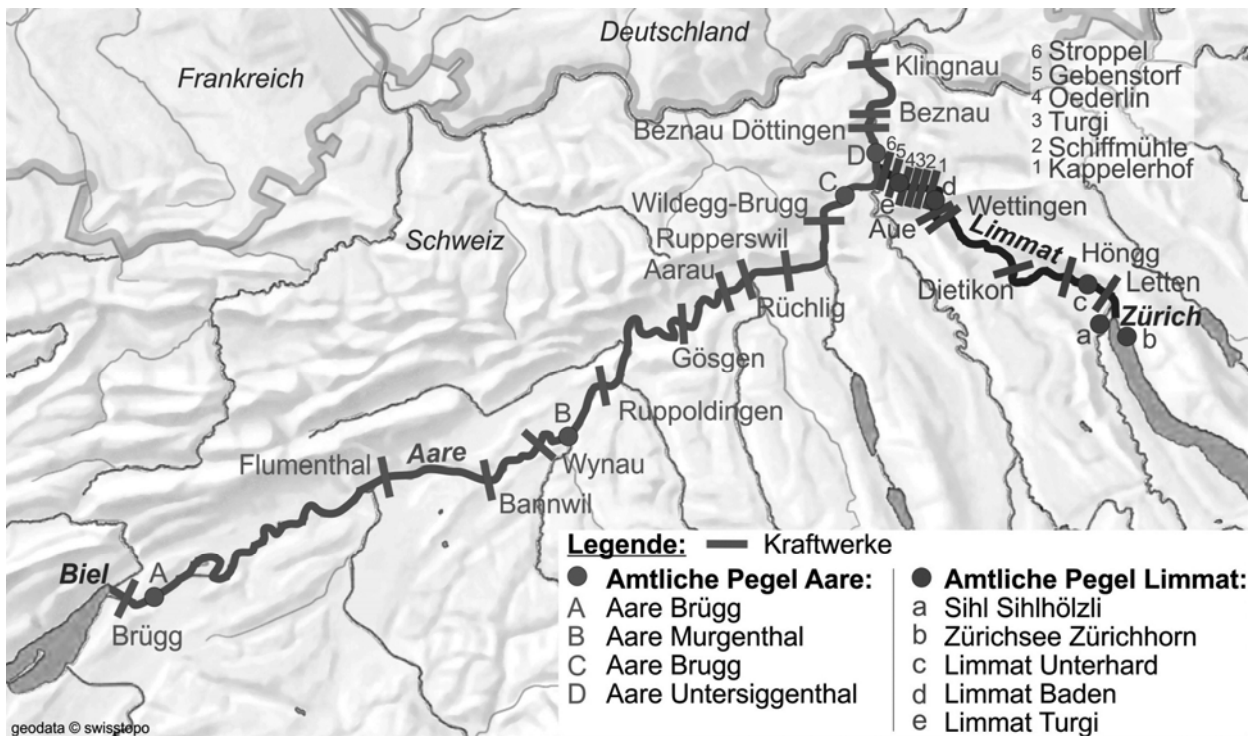


Abb. 1 Übersichtsplan Aare und Limmat mit Zuflüssen, Kraftwerken und Messstellen.

1.1 Situation an der Aare zwischen Bielersee und Hochrheinmündung

Der betrachtete Flussabschnitt vom Bielersee bis zur Mündung in den Rhein hat auf einer Fließstrecke von ca. 125 km durch die Kantone Bern, Solothurn und Aargau einen Höhenunterschied von 115 m, welches durch 13 Laufwasserkraftwerke genutzt wird.

Das Auftreten von regelmässigen grossen und schnell auftretende Abflussschwankungen, die sich weder auf natürliche Ereignisse noch auf den normalen Kraftwerksbetrieb zurückführen lassen, mit unklarer Ursache, veranlasste den Verband Aare-Rheinwerke (VAR) eine Studie bezüglich der Ursache und allfälligen Massnahmen zu deren Behebung in Auftrag zu geben (Meier, 2001). Es stellten sich kraftwerksverursachte Abflussschwankungen bei Aareabflüssen von $340 \text{ m}^3/\text{s}$ von bis zu $\pm 50 \text{ m}^3/\text{s}$ heraus, was Pegelschwankungen von $\pm 10 \text{ cm}$ entspricht. Daraufhin wurde die Modifizierung der Regeleinrichtungen an den Kraftwerken veranlasst, was zu einer Verringerung der Abflussschwankungen auf bis zu 10% führen sollte. Zur Überprüfung ihrer Wirksamkeit wurde von der IUB Engineering AG eine Erfolgskontrolle der umgesetzten Massnahmen durchgeführt.

1.2 Situation an der Limmat

Die Limmat überwindet zwischen Zürichsee und Aare vom Kanton Zürich in den Kanton Aargau auf einer Fließstrecke von 36 km einen Höhenunterschied von 78 m und wird durch 11 Laufwasserkraftwerke genutzt. Entlang der Limmat treten Pegelschwankungen auf, wobei unklar ist, ob diese primär durch Betriebsereignisse bei einzelnen Anlagen erzeugt werden oder sie sich durch regeltechnische Amplifikation über die Staukette einstellen. Seit wenigen Jahren werden alle Pegelschwankungen protokolliert, Amplituden im Dezimeterbereich treten auf. Die IUB Engineering AG wurde vom Kanton Aargau mit einer Ursachenanalyse beauftragt.

2 Grundlagen und Vorgehen

2.1 Datengrundlage und Bereinigung

Verwendet wurden 10-min Mittelwerte von amtlichen Messstellen der Haupt- und markanten Nebenflüsse, sowie Kraftwerksabflussdaten. Die Bereinigung umfasste die Analyse von Messlücken mit etwaiger Interpolation und eine Ausreisseranalyse. Ergebnis war ein stetiges Signal mit Äquidistanz von 10 min.

2.2 Statistische Analyse im Zeitraum

Die Mittel der deskriptiven Statistik erlauben eine Analyse mittels Kennzahlen und die Prüfung der Plausibilität. Jeder Datensatz bzw. Teil davon wurde durch mindestens zwei Kenngrößen beschrieben, einer für die Lage und einer für die Streuung. Verschiedene Kennzahlen wie die Standardabweichung, aber auch die simple Amplitude selbst dienen der Analyse. Die Pegel an den verschiedenen Messstellen sind aufgrund ihrer geografischen Lage auf verschiedenen Niveaus. Um diese vergleichen zu können und später die Pegelschwankungen zu analysieren, wurde das 0.01-Quantile der gesamten Beobachtungsdauer, von jedem Messwert abgezogen. Dadurch wird in gewisser Weise der Grundwert abgezogen. Die Pegelschwankung ist nunmehr eine Funktion der Gerinnegeometrie und der Abflussschwankung.

2.3 Filterung

Saisonale und andere Einflüsse wie Hochwasser führen zu langwelligen Schwankungen im Abfluss- und Pegelsignal. Kurzweilige Schwankungen des Pegels überlagern die Ganglinie und lassen sich beispielsweise durch die Verwendung eines gleitenden Mittelwerts vom Ursprungssignal in punkto Jahres-, Tagesgang und etwaige Hochwasser filtern. In der Signaltheorie wird der gleitende Mittelwert als Tiefpassfilter mit endlicher Impulsantwort (FIR-Tiefpass) beschrieben und stellt in der gleichgewichteten Form den einfachsten Filter dar. In der gleichgewichteten Form stellt der gleitende Mittelwert das einfachste FIR-Tiefpassfilter dar. Abb. 2 zeigt den Vergleich der Pegelschwankungen mit der über 3 (± 1.5) Stunden gemittelten Kurve.

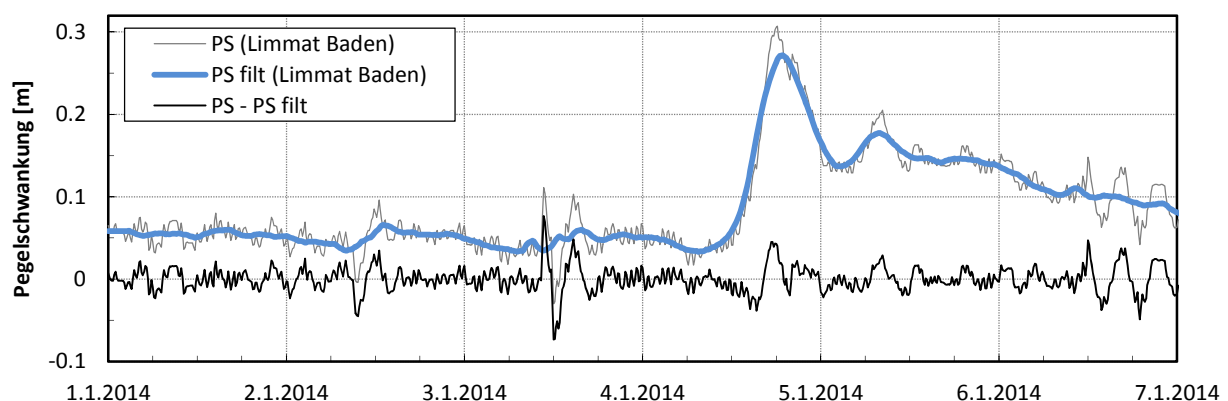


Abb. 2 Pegelschwankungen (PS), Filterung (PS filt) und result. Differenz (PS-PS filt).

Die gefilterte Kurve (PS_filt) enthält nun nicht mehr die höherfrequenten Bestandteile. Die aus der Subtraktion der Pegelschwankungen (PS) und der gefilterten Pegelschwankungen (PS_filt) erhaltenen effektiven Pegelschwankungen (PS_eff) mit Frequenzen kleiner 2–3h (kurzweilig) haben Amplituden von wenigen Zentimetern.

2.4 Analyse im Frequenzraum

Mittels einer Frequenzanalyse können einerseits Häufigkeiten bestimmter Ereignisse in einer gewissen Zeiteinheit untersucht und andererseits periodische Anteile (regeltechnisch bedingte Verstärkung) in einem Signal "sichtbar" gemacht werden. Die Grundlage dieser Signalanalyse bildet die Fourier-Transformation, die Auswertung basiert auf den Methoden der Analyse zufälliger Signale (vgl. z.B. Bendat & Piersol, 1980, 1986). Verwendet werden die heute gängigen Instrumente der digitalen Signalanalyse mit der Verknüpfung des Zeit- und des Frequenzraums via die Fourier-Transformation.

Zur Trennung von deterministischen und stochastischen Signalanteilen wurden eine blockweise Signalbearbeitung und die anschließende Mittelung eingesetzt (blockwise averaging). Die Fourier-Transformation wurde über gleitende Zeitfenster von 512 Datenpunkten (ca. 3.5 Tage) durchgeführt, die sich um 50% überlappen, was dann Spektren aus über 150 Mittelungen ergibt. Die Abfluss- und Pegelmessdaten waren mit einer zeitlichen Auflösung von 10 min ($f = 144 [1/d]$) vorhanden, womit Schwankungen bis zu einer Frequenz von $f = 72 [1/d]$ bzw. einer Periode von 20 min erfasst werden können (Nyquist-Theorem).

Das Vorgehen bei der Signalanalyse ist schematisch in Abb. 3 dargestellt. Berechnet wurden einerseits die sogenannten Leistungs- bzw. Kreuzleistungsspektren $S_{xx}(f)$, $S_{yy}(f)$ bzw. $S_{xy}(f)$ für die nacheinander liegenden Messstelle x und y . Andererseits wurden die Übertragungsfunktionen $H_{xy}(f)$ als Quotient zwischen dem Kreuzleistungsspektrum $S_{xy}(f)$ und dem Eingangsspektrum $S_{xx}(f)$ oder - näherungsweise - als Quotient der Leistungsspektren der beiden Messstelle ermittelt. Die Übertragungsfunktion gibt an, wie stark die Schwankung mit einer Frequenz f_i auf dem Übertragungsweg von der Messstelle x (KW x) zur Messstelle y (KW y) verstärkt oder abgeschwächt wird. Weiter ergibt die Rückwärtstransformation des Kreuzleistungsspektrums die Kreuzkorrelationsfunktion, anhand welcher die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Abflussschwankungen ermittelt werden kann.

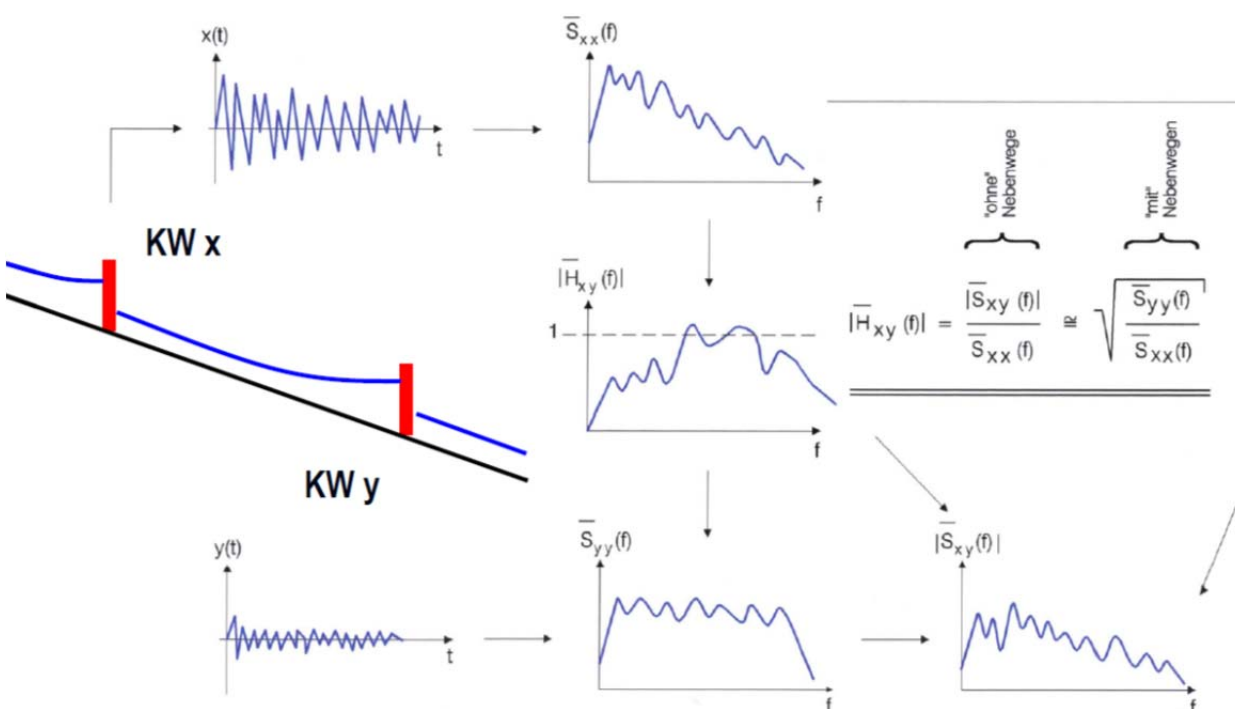


Abb. 3 Prinzipskizze Analyse im Frequenzraum

3 Resultate

3.1 Aare

Wie die Untersuchungen des Zustands vor den Massnahmen von Meier (2001) zeigen, treten die grössten Abflussschwankungen im Bereich des Mittelwasserabflusses ($MQ_{\text{Brugg}} = 316 \text{ m}^3/\text{s}$) auf. Beim Vergleich der mittleren Amplituden ausgewählter Zeitreihen in diesem Bereich (Abb. 4) zeigt sich eine deutliche Abschwächung der Schwankungen um bis ca. 75% von maximal $39 \text{ m}^3/\text{s}$ vor Umsetzung der Massnahmen auf ca. $10 \text{ m}^3/\text{s}$. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist jedoch grundsätzlich zu berücksichtigen, dass es sich um recht kurze Zeitreihen handelt, die nicht zwangsläufig repräsentativ für das Gesamtbild sind.

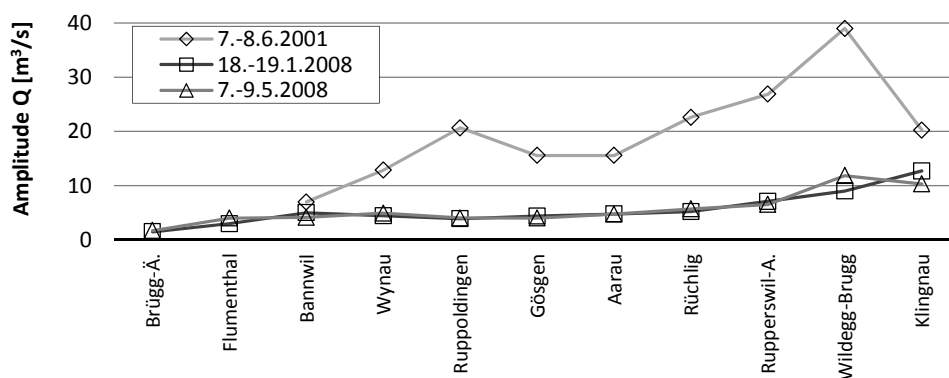


Abb. 4 Mittlere Amplitude der Abflussschwankungen ausgewählter Zeitreihen bei MQ: Vergleich der Situation vor und nach Umsetzung der Massnahmen.

Die periodische Abfluss- und Pegelschwankungen längerer Zeitreihen werden mittels der Standardabweichung quantifiziert. Natürlich, hydrologisch bedingte Schwankungen (langwellige Schwankungsanteile mit Perioden grösser als einen Tag) wurden herausgefiltert. Die Standardabweichungen der Abfluss- und Pegelschwankungen zeigen, dass die Schwankungen mit der Umsetzung aller Massnahmen an den Pegeln Murgenthal, Brugg und Untersiggenthal am unteren Ende der Aare um bis zur Hälfte abgenommen haben, obwohl die Schwankungen am Beginn der Staukette (Pegel Brügg-Ägerten) in ähnlicher Grösse geblieben sind. Nach der Sanierung der Kraftwerksregelungen ist nun noch mit Standardabweichungen der Wasserstandsschwankungen in der Aare von ca. 5 cm (vor der Vereinigung mit Reuss und Limmat) bzw. 2 cm (nach der Vereinigung mit Reuss und Limmat) zu rechnen. Diese Wellenamplituden liegen unter den Amplituden der natürlichen windinduzierten Wellen auf der Wasseroberfläche.

Die gemittelten Leistungsspektren der Q-Ganglinien der amtl. Pegel wurden für die Zeit vor bzw. nach Umsetzung der Modifizierungen berechnet. Die Wirkung der verbesserten Kraftwerksregelung ist sehr gut anhand der Spektren der MS Brugg zu sehen (Abb. 5). Die Abflussschwankungen werden über weite Frequenzbereiche deutlich gemindert, lediglich Schwankungen mit Perioden im Bereich 1/2 bis 1 Tag (entsprechend einer Frequenz von 1-2-mal tgl.) und ca. 1 h (ca. 24-mal tgl.) werden nicht gedämpft. Zu einer leichten Zunahme der Schwankungen in weiten Frequenzbereichen kommt es hingegen am Pegel Brügg-Ägerten. Wie Abb. 5 und die weitere Analyse zeigen, sind bezüglich der Ausbreitung in der Staukette der Aare primär die Schwankungen mit Perioden von 1/2 bis 1 Tag relevant. Mit dem Pegel Brügg-Ägerten wird die Bielersee-Regulierung erfasst. Dieser wird heute, nach den Erfahrungen bei den Hochwasserereignissen 2005 und 2007, sensibler reguliert (sog. Prognoseregulierung) als in der Betrachtungsperiode vor der Umsetzung der regeltechnischen Massnahmen bei den Kraftwerken.

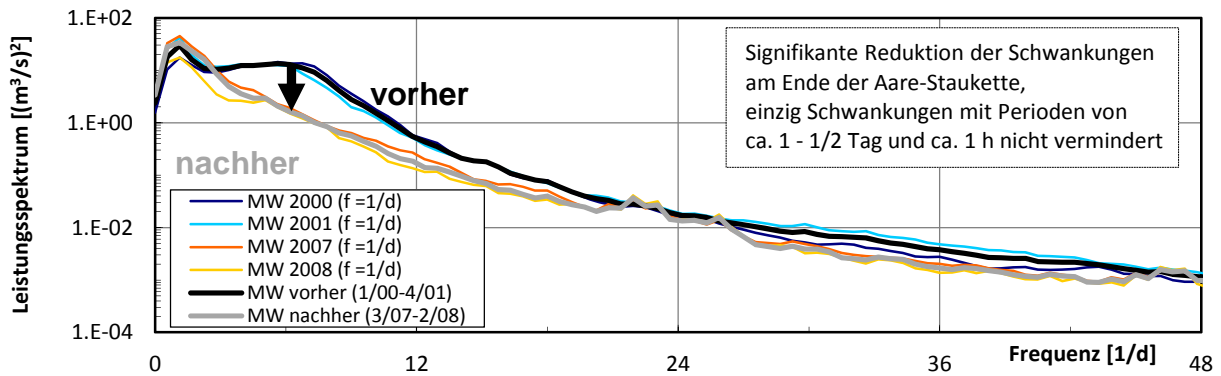


Abb. 5 Leistungsspektren der Q-Schwankungen (Pegel Brugg) vor und nach Massnahmen.

Die Übertragungsfunktion beschreibt, wie sich Abflussschwankungen entlang der Fließstrecke von einem Ort zum andern übertragen. Nimmt die Funktion einen Wert >1 an, entspricht dies einer Verstärkung der Schwankung im jeweiligen Frequenzbereich. Berechnet wurden die Übertragungsfunktionen zwischen den amtlichen Pegeln und zwischen benachbarten KWs. Die Übertragungsfunktionen entlang der Aare machen deutlich, dass sich Abflussschwankungen heute im Frequenzbereich mit Perioden von ca. 1-8 Stunden weit weniger stark aufbauen als vor der Modifikation der Kraftwerk-Regelungen. Abb. 6 zeigt beispielhaft die Übertragungsfunktionen vom Pegel Brügg-Ägerten am Beginn des Untersuchungsgebiets zum Pegel Brugg kurz oberhalb der Mündungen von Reuss und Limmat. Die massive Verstärkung der Schwankungen mit Perioden von zwei bis acht Stunden (3-12-mal täglich) konnte deutlich reduziert werden. Eine leichte Schwankungszunahme findet heute vor allem noch bei einer Frequenz von 2-mal täglich statt, die vermutlich auf die Steuerung des Bielersees zurückzuführen ist.

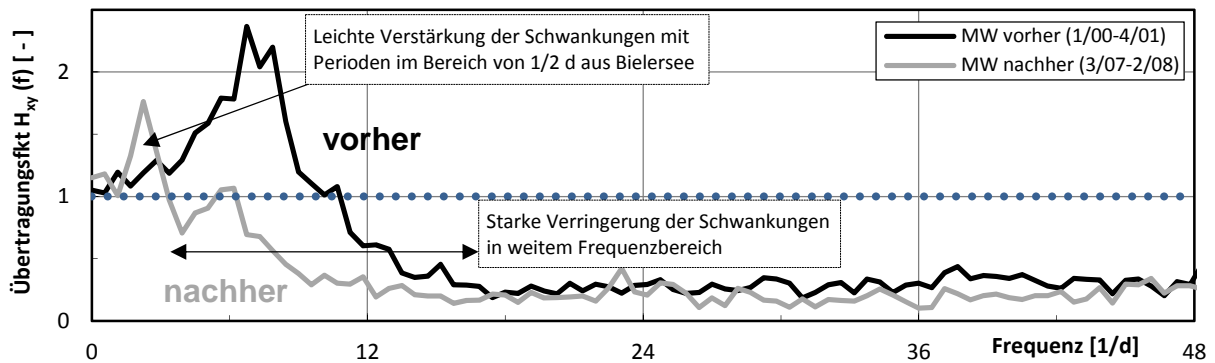


Abb. 6 Übertragungsfunktionen (Brügg-Ägerten -> Brugg) vor bzw. nach Modifikation.

Die Auswertung der Standardabweichungen und Amplituden von Abfluss- und Pegeldaten bestätigt nun, dass periodische, regelungsbedingte Schwankungen nach der Modifikation um 50 bis 75% abgenommen haben. Die heutigen Amplituden des Abflusses liegen bis zur Mündung von Reuss und Limmat durchgängig unter $15 \text{ m}^3/\text{s}$, der Pegel schwankt weniger als 1.0 cm. Die Auswertung von Leistungsspektren und Übertragungsfunktionen zeigt im Allgemeinen eine sehr gute Dämpfung von regelungsbedingten Schwankungen mit Perioden im Stundenbereich. Geringe Änderungen treten dagegen bei den Abfluss-Schwankungen mit Perioden von mehr als 12 h und deutlich weniger als einer Stunde auf. Diese Schwankungen sind jedoch weniger eine Folge der Kraftwerksregulierung: Neben der Kraftwerksregulierung haben auch die Zuflüsse Emme und Reuss bzw. Limmat einen wesentlichen Einfluss auf die Schwankungsgrößen. Dabei werden Zuflussschwankungen der Emme nach Abschluss der Reglermo-

difikationen gut bis sehr gut ausgedämpft. Potenziell störend wirken sich dagegen die langwelligen Schwankungen aus der heute schnelleren Bielersee-Regulierung aus (sogenannten Prognoseregulierung).

In Anbetracht der sehr weitgehenden Verbesserung konnte auf zusätzliche Anpassungen an den Kraftwerksregulierungen verzichtet werden. Die im Jahr 2001 empfohlenen und bis im Sommer 2007 umgesetzten Massnahmen zur Optimierung der Kraftwerksregulierung waren somit bezüglich der Abflussschwankungen in der Aare erfolgreich. Die heutigen Schwankungen mit Perioden im Stundenbereich können kaum mehr von natürlichen, kurzweiligen Abflussschwankungen oder windbedingten Wellen unterschieden werden. Das Ziel der durchgeführten Massnahmen wurde erreicht.

3.2 Limmat

Die statistische Analyse am Beispiel der Standardabweichung (Abb. 7) zeigt, dass einzig kurzperiodische Pegel- und Abfluss-Schwankungen über den Fliesweg entlang der Limmat geringfügig verstärkt werden. Langperiodische Schwankungen werden über den Fliesweg nicht verstärkt oder gar minimal abgeschwächt bzw. ausgeglichen. Kurzperiodischen Schwankungen mit Standardabweichungen der Pegelschwankungen im Bereich von 1 bis 2 cm sind sehr klein im Vergleich zu den langperiodischen, natürlichen Schwankungen mit Werten um 35 cm. Durch die verbesserte Dokumentation von auftretenden Pegelschwankungen lassen sich die Ereignisse praktisch immer zuordnen. Nahezu alle Pegelschwankungen sind eine Folge von Betriebsunstetigkeiten und Betriebsstörungen.

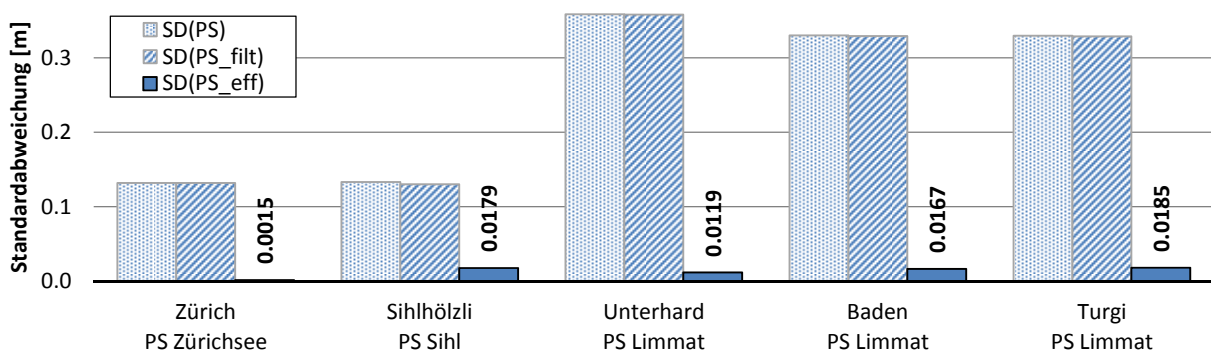


Abb. 7 Vergleich der Standardabweichung der kurz- und langperiodischen Pegelschwankungen entlang der Messstellen flussabwärts der Limmat

Abb. 8 zeigt die Kreuzkorrelationsfunktion der Pegelschwankung. Gut erkennbar sind deutliche Maxima der Kreuzkorrelationsfunktion zwischen den betrachteten Messstellen. Die Pegelschwankungen sind auf der kurzen Strecke zwischen Baden und Turgi am besten korreliert. Die Strecke Sihl-Unterhard hat die am wenigsten ausgeprägte, aber immer noch mit deutlicher Spitze, Kreuzkorrelationsfunktion, was eine Folge der Superposition von Sihl- und Limmatablfluss ist. Aus den Versatzzeiten lässt sich die mittlere Fließ- bzw. Fortpflanzungsgeschwindigkeit v_0 von Abfluss-Schwankungen als $v_{tot} = v_0 + c_{sw} = v_0 + \sqrt{gH}$ berechnen. Die so ermittelten mittleren Fließ- bzw. Fortpflanzungsgeschwindigkeiten sind ebenfalls in Abb. 8 angegeben. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit in der seichten und ungestauten Sihl (und der ungestauten Restwasserstrecke der Limmat bis Unterhard) sind deutlich kleiner, als die Geschwindigkeit in der Staukette der Limmat. In einer Staukette wird die verzögerte Fließgeschwindigkeit v_0 durch die grössere Wellenausbreitungsgeschwindigkeit c_{sw} mehr als kompensiert.

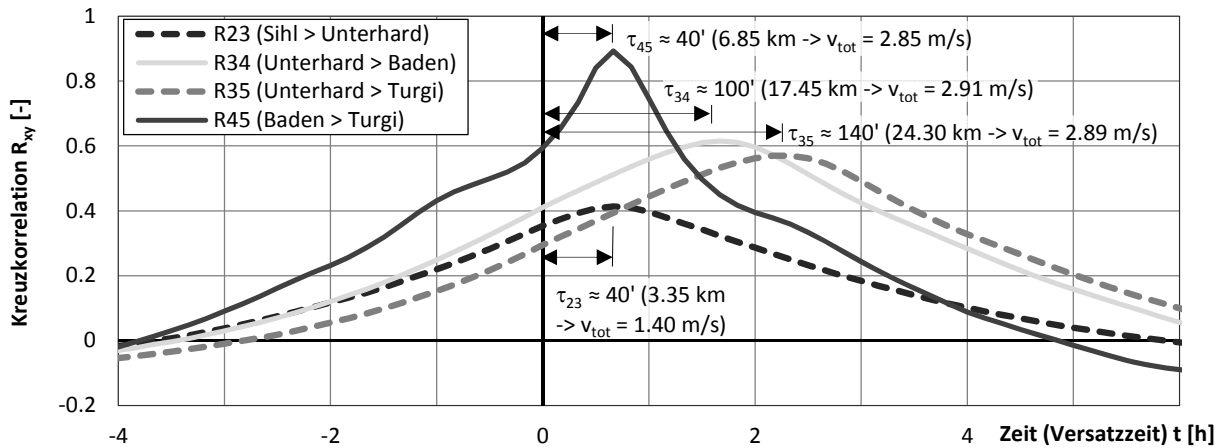


Abb. 8 Kreuzkorrelation und Phasen- d.h. Zeitversatz der Pegelschwankung.

Abb. 9 zeigt die Entwicklung der Pegelschwankungen über den Fliessweg. Pegelschwankungen mit Perioden von mehr als ca. 3-4 Stunden werden über den Fliessweg nicht verstärkt. Die Wasserhaushaltssteuerungen funktionieren hier gut. Höherfrequente Schwankungen mit Perioden von weniger als ca. 3 Stunden werden leicht verstärkt und diese Verstärkung ist möglicherweise durch die Wasserhaushaltsregulierungen der Kraftwerkskette bedingt. Der absolute Betrag dieser Schwankungen ist aber sehr klein, d.h. im Millimeter- bis tiefen Zentimeter-Bereich. Werden nun die Übertragungsfunktionen und die Kohärenzen der Pegelschwankungen betrachtet, so bestätigen sich die obigen Aussagen (Abb. 10). 1. Niederfrequente Schwankungen mit Perioden grösser als 2 h werden kohärent übertragen, aber nicht verstärkt.

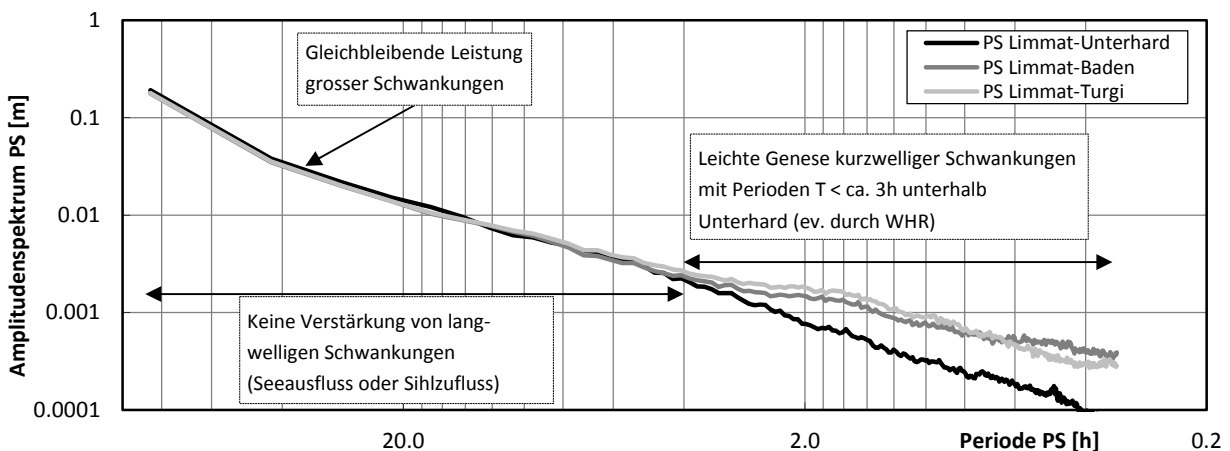


Abb. 9 Amplitudenspektrum Pegelschwankungen in Funktion der Wellenperiode ($1/f$).

Folgende Erkenntnisse können aus der Ursachenanalyse für die Limmat zusammengefasst werden. Die Wellenfortpflanzung langweiliger Pegelschwankungen ist über die Messstationen an der Limmat kohärent und gut nachweisbar. Langweilige Abflussschwankungen infolge der Seeregulierung oder des Sihl-Abflusses mit Perioden grösser als 2-3 h werden über die Staukette an der Limmat nicht verstärkt sondern tendenziell eher gedämpft. Die Pegel Baden und Turgi zeigen gegenüber dem Pegel Unterhard leicht verstärkte kurzweilige Schwankungen mit Perioden T kleiner als 2-3 h (Verstärkung um bis zu einen Faktor 2). Die kurzweiligen, regeltechnischen Schwankungen in Baden und Turgi sind nicht kohärent zum «Eingangssignal» in Unterhard, d.h. sie werden auf dem Fliessweg von Unterhard nach Baden erzeugt (ev. durch WHR Höngg, Dietikon, Wettingen oder Aue). Die durch ausserordentliche Betriebsereignisse

generierten, kurzwelligen Schwankungen sind deutlich grösser als die regeltechnisch bedingten, die nur Pegelschwankungen im Millimeterbereich verursachen. Die Standardabweichungen der kurzwelligen Pegelschwankungen liegen in Baden und unterhalb von ca. 1.7 cm ($2.5 \text{ m}^3/\text{s}$), die Standardabweichung der natürlichen Schwankungen bei 33 cm ($46 \text{ m}^3/\text{s}$). Diese kleinen, kurzwelligen und ev. regeltechnisch bedingten Schwankungen sind aus gewässerökologischer Sicht zulässig, da hier vor allem die Pegeländerungsraten klein sind und die zulässigen Werte nicht überschritten werden. Anders sieht dies aber bei den durch Betriebsstörungen oder Betriebsunstetigkeiten bedingten Einzelereignissen aus. Bei Schwankungen, die durch solche Ereignisse entstehen, wird die zul. Pegeländerungsrate zum Teil auch deutlich überschritten. Auf den ökologischen Fließstrecken hat eine grosse Pegeländerungsrate deutlich negativere Auswirkungen. In stark kanalisierten und trapezförmigen Gerinneabschnitten können die Auswirkungen der grossen Änderungsraten hingegen marginal sein.

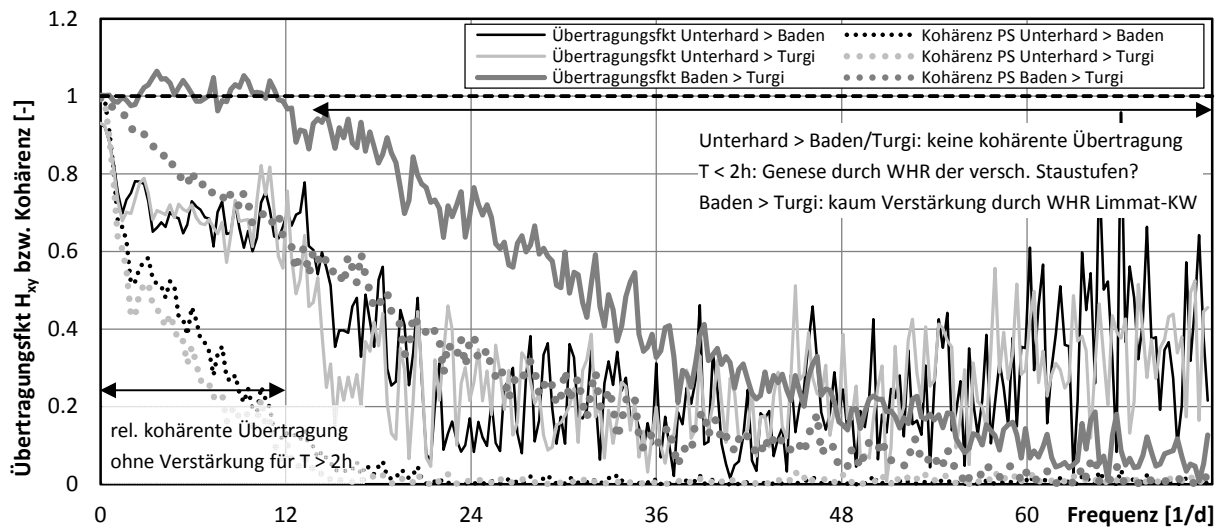


Abb. 10 Übertragungsfkt. und Kohärenz der Pegelschwankungen in Funktion der Frequenz.

3.3 Exkurs in die Limnologie: Nachweis von Seiches am Zürichsee

Als Indikator für die Güte der angewandten Analyseverfahren sei das Leistungsspektrum der Zürichseepegelschwankungen gezeigt (Abb. 11). Die beiden Leistungsspitzen mit 32.63 und 62.16 1/d, d.h. Perioden von 44.2 bzw. 23.2 min zeigen die ersten beiden Wellenmodi von Flachwasserwellen, sogenannten Seiches (Flachwasserwellen in Seen), im Zürichsee. Diese barotropen Schwingungen mit einer Grundfrequenz von ca. 45 min sind physikalische Prozesse die durch äussere Lasten, oftmals Wind, angefacht werden.

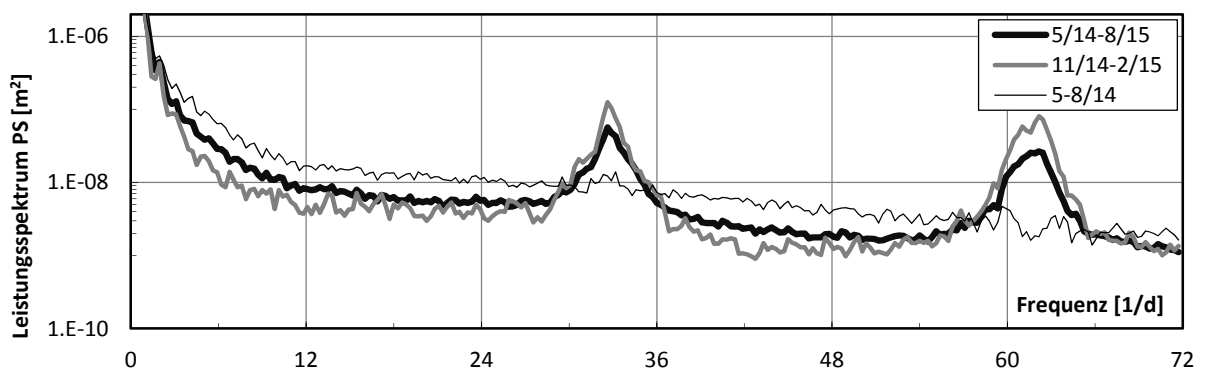


Abb. 11 Leistungsspektrum des Zürichseepegels am Zürichhorn mit saisonaler Aufteilung.

Hutter et al. (1982) geben für die ersten beiden longitudinalen Modi beobachtete Perioden von 44.7 und 23.4 min an. Die Seiches sind v.a. im Winter gut erkennbar. Die Stratifizierung des Zürichsees beeinflusst die Seiches signifikant. Für einen vertieften Exkurs in die Limnologie bzw. die physikalischen Prozesse von Seen wird an dieser Stelle auf Fischer (1979) und Hutter (2011) verwiesen.

4 Schlussfolgerungen

Die an den zwei Beispielen Aare und Limmat dargestellten Methoden der Analyse im Zeit- und im Frequenzraum zeigen eine vielversprechende Anwendung im Ingenieurbereich. Ob Ursachenanalyse oder Erfolgskontrolle, mit der Kombination dieser Methoden ist ein mathematischer Nachweis zielführend erbringbar. Es konnte gezeigt werden, dass an der Limmat im Gegensatz zur Aare (vor Optimierung WHR) keine besonders grossen Verstärkungen oder gar signifikante Frequenzbereiche, in denen klare Verstärkungen auftreten können, vorhanden sind. Die statistische Datenanalyse im Zeitraum ist weit verbreitet, oft zielführend und relativ einfach anwendbar. Jedoch ist ein vertieftes Verständnis notwendig, um kausale Interpretationen bzw. Zusammenhänge zu belegen. Hier bietet sich der Übergang zur Analyse im Frequenzraum an. Wenn lange Zeitreihen blockweise in den Frequenzraum transformiert und die einzelnen Spektren gemittelt werden, periodische Signalanteile über das stochastischen Rauschen hinaus erkennbar. Die Fortpflanzung von Wellen bzw. Pegel- oder Abflussschwankungen lässt sich so fundiert beschreiben. Die Analyse steht mathematisch auf einer sicheren Basis und erlaubt statistisch fundierte Aussagen.

Literatur

- Benat, J. S. & Piersol, A.G. (1980): Engineering applications of correlation and spectral analysis. Wiley, New York, 302 S.
- Benat, J. S. & Piersol, A.G. (1986): Random data – analysis and measurement procedures. 2. Auflage, Wiley, New York, 566 S.
- Fischer, H. B. (1979). Mixing in inland and coastal waters. New York: Academic Press.
- Hutter, K., Raggio, G., Bucher, C. & Salvadè, G. (1982): The surface seiches of Lake of Zürich. Schweiz. Z. Hydrol. 44(2), 423-454.
- Hutter, K., Wang, Y., & Chubarenko, I. P. (2011): Physics of Lakes. Foundation of the Mathematical and Physical Background. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Meier, C. (2001): Untersuchung der Abfluss-Schwankungen in der Aare, Technischer Bericht, Unterengstringen, 27 S.

Anschrift der Verfasser

Dr. sc. ETH Georg Möller
IUB Engineering AG
Heinrichstrasse 147, CH-8005 Zürich
georg.moeller@iub-ag.ch

Dr. sc. techn. ETH Peter Billeter
IUB Engineering AG
Belpstrasse 48, CH - 3000 Bern 14
peter.billeter@iub-ag.ch