

## Erfassung turbulenter Wirbel in Vertical-slot Fischpässen mittels zeitaufgelöstem PIV

### Capturing turbulent eddies in vertical-slot fish passes by means of time-resolved PIV

**B. Sokoray-Varga\***, **R. Weichert\*\***, **F. Nestmann\***

\* Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie  
Kaiserstraße 12. 76131 Karlsruhe

\*\* Abteilung Wasserbau im Binnenbereich, Bundesanstalt für Wasserbau  
Kußmaulstraße 17. 76187 Karlsruhe

PIV, PTV, turbulente Wirbel, swirling strength, Fischpass

PIV, PTV, turbulent eddies, swirling strength, fish pass

#### Zusammenfassung

Ziel des Forschungsprojektes ist die Eigenschaften der turbulenten Wirbel in einem physikalischen Modell eines Vertical-slot Fischpasses mittels PIV-Messungen zu bestimmen. Die vorliegende Studie beschäftigt sich mit der Erkennung von turbulenten Wirbeln in den gemessenen Geschwindigkeitsfeldern. Dabei ist eine besondere Schwierigkeit, dass infolge des turbulenten Zerfallprozesses, Wirbel unterschiedlicher Skalen im Strömungsfeld gleichzeitig überlagert präsent sind. Es ist daher vor der Erkennung einzelner Wirbeln erforderlich, zunächst die Wirbel unterschiedlicher Skalen zu trennen. In diesem Beitrag wird die Trennung der Wirbel mittels frequenzbasierten Filtern, die Wirbelerkennung anhand des sogenannten swirling strength realisiert.

#### Einleitung

Fischaufstiegsanlagen werden an Stauanlagen und anderen Querbauwerken in Fließgewässern gebaut, um den Fischen das Passieren der Stauanlage zu ermöglichen und dadurch die ökologische Durchgängigkeit des Flusses wiederherzustellen. Dabei spielen die Strömungsverhältnisse innerhalb der Fischaufstiegsanlagen eine maßgebende Rolle, denn sie bestimmen, ob Fische es aufgrund ihrer gegebenen Schwimmleistung schaffen können, die Anlage zu passieren.

Hinsichtlich der Schwimmleistung der Fische existiert umfangreiche Literatur, die vorwiegend auf Fischverhaltensexperimenten basiert. Für die Schwimmleistung gegen die mittlere Fließgeschwindigkeit wurde ein klarer Zusammenhang zwischen Schwimmgeschwindigkeit, Fischgröße und Ausdauer der Fische abgeleitet. Untersuchungen zum Einfluss von Turbulenz auf die Schwimmleistung haben dagegen bislang keinen klaren Zusammenhang ableiten können, wobei neueste Untersuchungen die Eigenschaften der turbulenten Wirbel (z.B. die Wirbelgröße) als maßgebenden Einflussparameter identifizieren (z.B. Smith et al. 2005, Liao 2007, Tritico et al. 2010, Pryzbilla et al. 2010).

Obwohl die Strömung innerhalb von Fischaufstiegsanlagen bereits Gegenstand zahlreicher Untersuchungen war und mehrfach gezeigt wurde, dass die Strömung in solchen Anlagen in der Regel stark turbulent ist, gibt es kaum Kenntnisse über die Eigenschaften der turbulenten Strukturen in solchen Anlagen. Ziel unseres laufenden Forschungsprojektes ist die detaillierte Untersuchung der Turbulenz in Schlitzpässen, den weltweit am häufigsten eingesetzten Bautyp von Fischaufstiegsanlagen. Die Eigenschaften der turbulenten Wirbel sollen experimentell mittels zeitaufgelöstem Particle Image Velocimetry (PIV) in einem physikalischen Modell eines Schlitzpasses ermittelt werden.

Die vorliegende Studie beschäftigt sich mit der Erkennung von turbulenten Wirbeln in den Geschwindigkeitsfeldern. Eine besondere Schwierigkeit dabei ist, dass infolge des turbulenten Zerfallprozesses von Wirbeln, Wirbel unterschiedlicher Skalen im Strömungsfeld gleichzeitig im selben Punkt überlagert präsent sind.

### Versuchsaufbau und Methodik

Die Experimente werden in einem physikalischen Modell eines Schlitzpasses im Labor der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) durchgeführt. Das physikalische Modell beinhaltet neun Becken von 99 cm Länge und 78,5 cm Breite mit einer Schlitzbreite von 12,2 cm (Abb. 1). Das Modell hat eine Sohlneigung von 2,8 %. Die Sohle und die Seitenwände sind aus Plexiglas. Die mittlere Wassertiefe in den Becken betrug während der Messungen 22 cm.

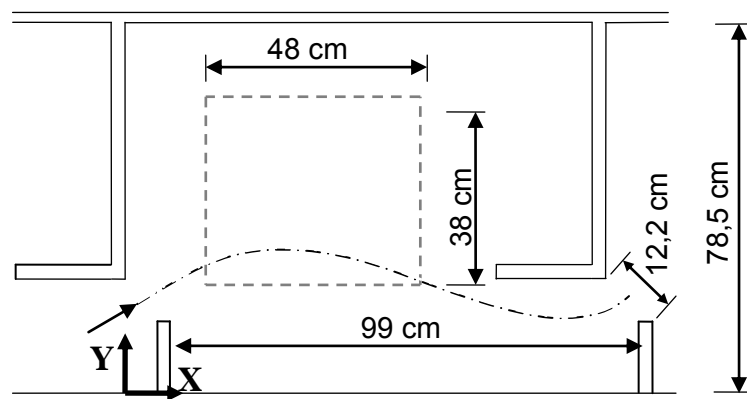


Abb. 1: Draufsicht eines Beckens im physikalischen Modell. Das gestrichelte Rechteck ist die Position des Messfeldes bei den PIV-Messungen, die Strichpunktlinie stellt den Verlauf der Hauptströmung dar

Voruntersuchungen mittels Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) haben gezeigt, dass sich in den Becken ein für den Schlitzpass typisches Strömungsmuster entwickelt, bei dem die Hauptströmung einen leicht gebogenen Verlauf von Schlitz zu Schlitz aufweist (Abb. 1). Die maximalen Fließgeschwindigkeiten treten in der Nähe des Schlitzes in der Hauptströmung mit ca. 86 cm/s auf. Die auf die maximalen Fließgeschwindigkeit und Schlitzbreite basierende Reynolds Zahl ergibt sich für das Modell zu ca.  $Re \sim 105.000$ .

Die hier präsentierten 2D/2C PIV Messungen wurden mit einer kontinuierlicher Messfrequenz von 200 Hz in einem Messfeld von 48 cm x 38 cm durchgeführt (Abb. 1). Die Messebene war 10 cm über der Sohle und parallel dazu. Die Bildaufnahmen wurden durch die Plexiglassohle mittels einer CCD Kamera mit 1280x1024 Pixel Auflösung realisiert. Für die Messung wurden Polyamid Partikel mit einer mittleren Korngröße von ca. 110  $\mu\text{m}$  der Strömung zugegeben. Die für diese Voruntersuchung erzeugte 30 Sekunden lange PIV-Aufnahme wurde mit einem Particle Tracking Velocimetry (PTV) Verfahren ausgewertet, das ca. 30.000 Vektoren pro Bild lieferte. Die gestreuten Geschwindigkeitsvektoren wurden an-

schließlich auf ein Rechteckgitter von 2,5 mm x 2,5 mm interpoliert, wodurch in jedem Gitterpunkt eine Geschwindigkeitszeitreihe entstand.

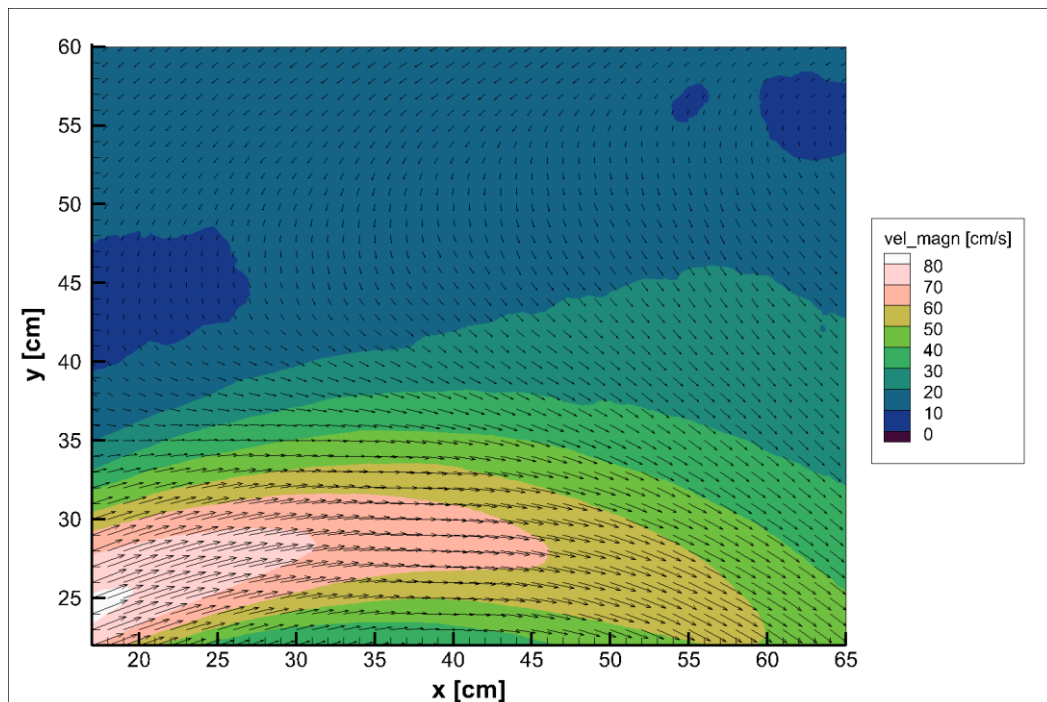


Abb. 2: Mittlere Fließgeschwindigkeiten im Messfeld aus der PIV-Messung. Die Anzahl der Vektoren wurde zum Zweck einer übersichtlicheren Darstellung verringert

Aus den berechneten Mittelwerten der Geschwindigkeiten wird das mittlere Strömungsfeld sichtbar und die Hauptströmung gut erkennbar (Abb. 2). Abb. 3 zeigt das Energiespektrum der Geschwindigkeitszeitreihe im Gitterpunkt (32,46). In dem Verlauf des Energiespektrums lässt sich die für den turbulenten Zerfallprozess typische  $-5/3$  Neigung gut erkennen.

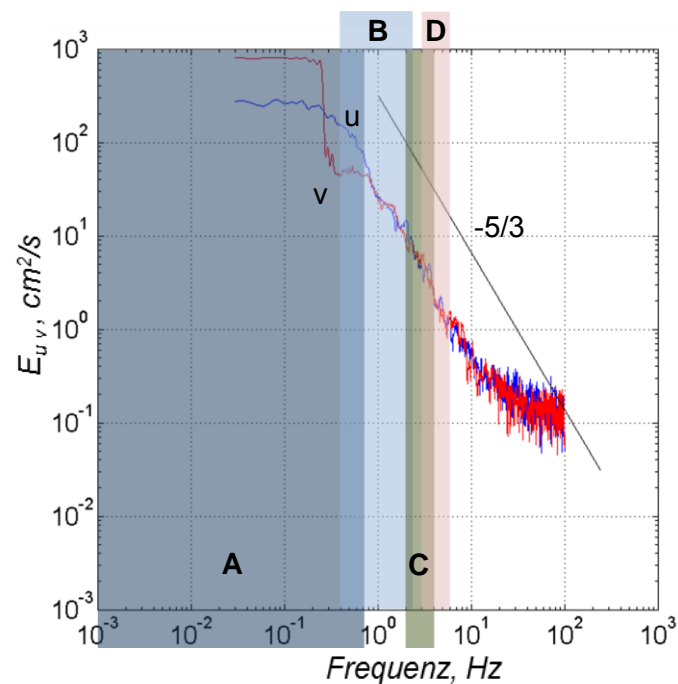


Abb. 3: Spektrum der Geschwindigkeitszeitreihe aus der PIV-Messung in Punkt (32,46). Die gefärbten Bereiche zeigen die Intervalle der angewendeten Tief- und Bandpassfilter

Zur Wirbelerkennung die auf zweidimensionalen Geschwindigkeitsfeldern adaptierte swirling strength Methode eingesetzt (Adrian et al. 2000). Die Methode basiert auf die Erkenntnis, dass bei einer wirbelförmigen Bewegung der lokale zweidimensionale Geschwindigkeitsgradiententensor ein Paar konjugiert komplexer Eigenwerte hat und bei einer drallfreien Bewegung ein Paar realer Eigenwerte. Wirbel lassen sich dementsprechend daran erkennen, dass der Betrag des komplexen Anteils, der sogenannte swirling strength, nicht null ist.

Die Methode beruht somit auf den lokalen Geschwindigkeitsgradienten des momentanen Strömungsfeldes und ist deswegen auf Ungenauigkeiten der Geschwindigkeitsvektoren anfällig. Da für Frequenzen über 10 Hz das Energiespektrum typische Merkmale des Rauschens aufweist (Abb. 3), wurden die Zeitreihen vor der Wirbelerkennung zunächst mit einem 10 Hz Tiefpass-Frequenzfilter gefiltert, mit dem Ziel, das Rauschen aus dem Signal zu entfernen.

Das Ergebnis der Wirbelerkennung in den rauschentfernten Geschwindigkeitsfeldern ist für den Zeitpunkt  $t=4,55$  s in Abb. 4 zu sehen. Das Bild sollte jedoch viel mehr Wirbel zeigen, da die Strömung in den Becken sehr turbulent ist. Da die Wirbel unterschiedlicher Skalen im Geschwindigkeitsfeld zeitlich und räumlich überlagert sind, wird die Erkennung der einzelnen Wirbel durch die Präsenz der restlichen Wirbel gestört. Um einzelne Wirbel besser erkennen zu können, müssen die überlagerten Wirbel zunächst getrennt werden.

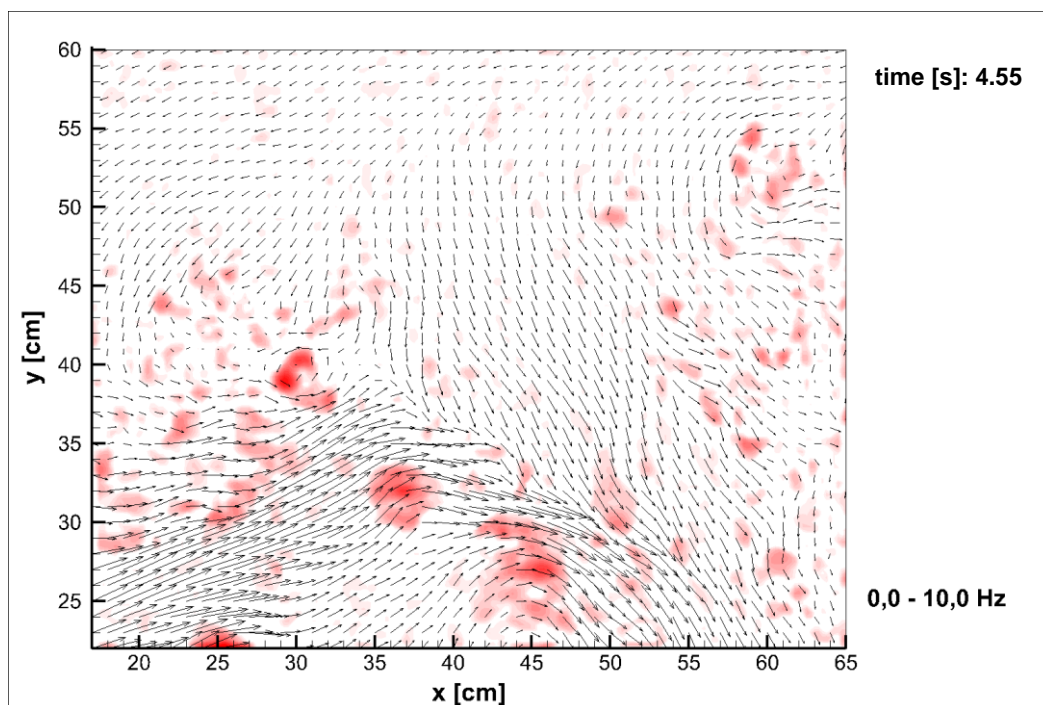


Abb. 4: Wirbelerkennung im Geschwindigkeitsfeld bei  $t = 4,55$  s nach der Rauschfilterung. Die Färbung zeigt den swirling strength.

Die Trennung der Wirbel wird mittels frequenzbasierten Filtern erzielt. Zu diesem Zweck wurden vier Filter auf die Geschwindigkeitszeitreihen angewendet: A) 0,7 Hz Tiefpass, B) 0,4-2,4 Hz Bandpass, C) 2,0-4,0 Hz Bandpass, D) 3,0-6,0 Hz Bandpass, derer Bandbreiten im Energiespektrum graphisch dargestellt sind (Abb.3). Die vier Filter produzieren vier Geschwindigkeitsfeld-Zeitreihen. Dabei gewährleistet die separate Anwendung eines Filters auf die Zeitreihen der einzelnen Gitterpunkte, dass die aufgedeckten Strukturen nicht das Ergebnis einer räumlichen Glättung von lokalen Geschwindigkeitswerten sind.

## Ergebnisse

Die gefilterten Geschwindigkeitsfelder des in Abb. 4 dargestellten Zeitpunktes sind in Abbildungen 5, 6, 7 und 8 zu sehen und beinhalten unterschiedliche Anteile des ursprünglichen Geschwindigkeitsfeldes. Abb. 5 zeigt den langsam verändernden Strömungsanteil, Abbildungen 6, 7 und 8 zeigen die schneller verändernden Strömungsstrukturen, die im ursprünglichen Geschwindigkeitsfeld überlagert existieren.

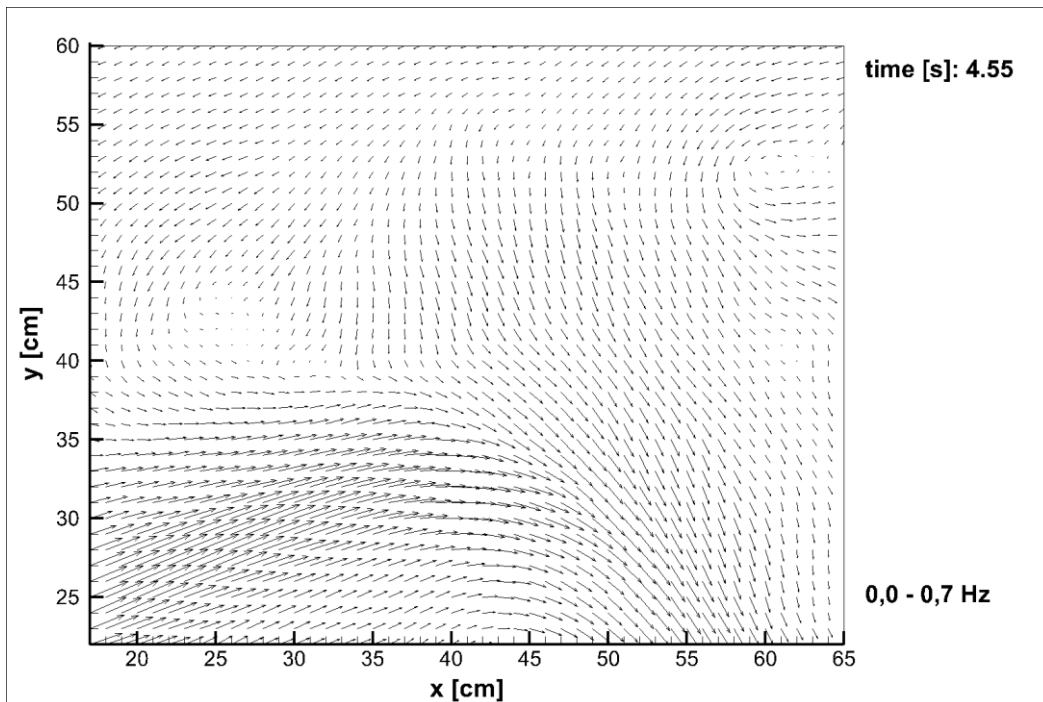


Abb. 5: Geschwindigkeitsfeld bei  $t = 4,55$  s nach Anwendung von Filter A.

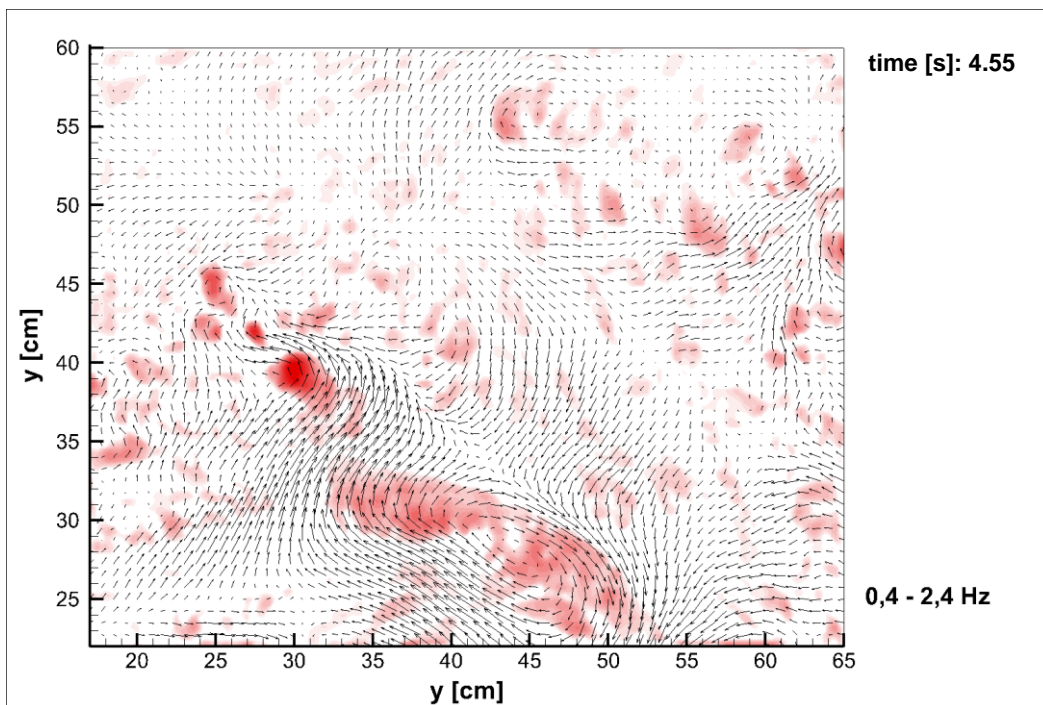


Abb. 6: Geschwindigkeitsfeld und Wirbelerkennung bei  $t = 4,55$  s nach Anwendung von Filter B. Die Färbung zeigt den swirling strength.



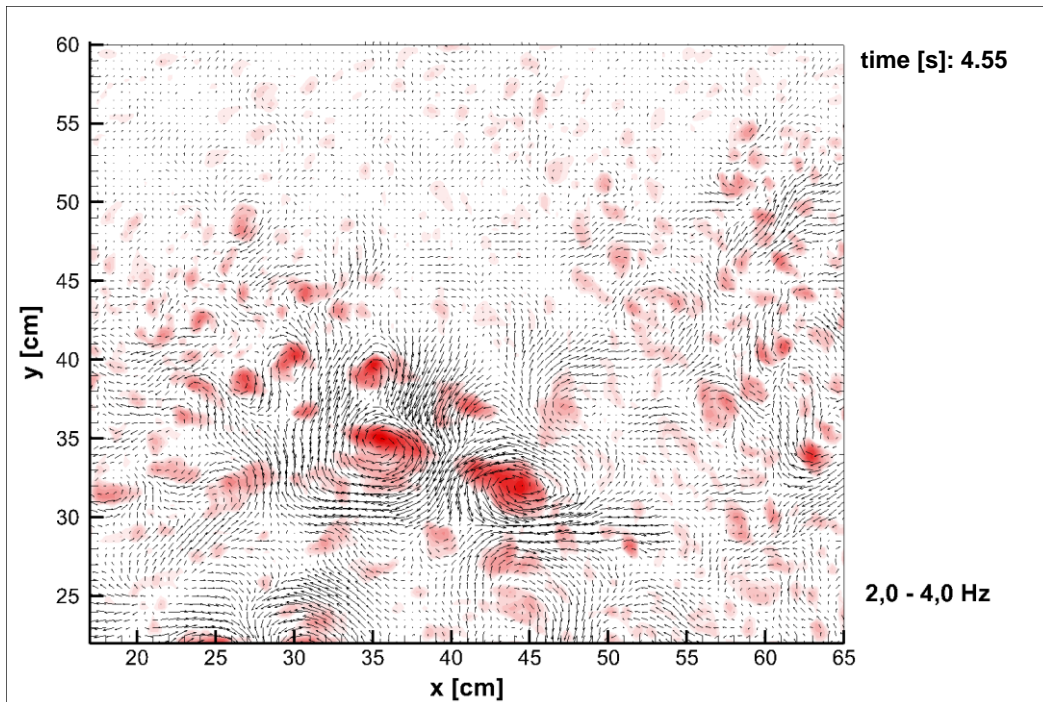


Abb. 7: Geschwindigkeitsfeld und Wirbelerkennung bei  $t = 4,55$  s nach Anwendung von Filter C. Die Färbung zeigt den swirling strength.

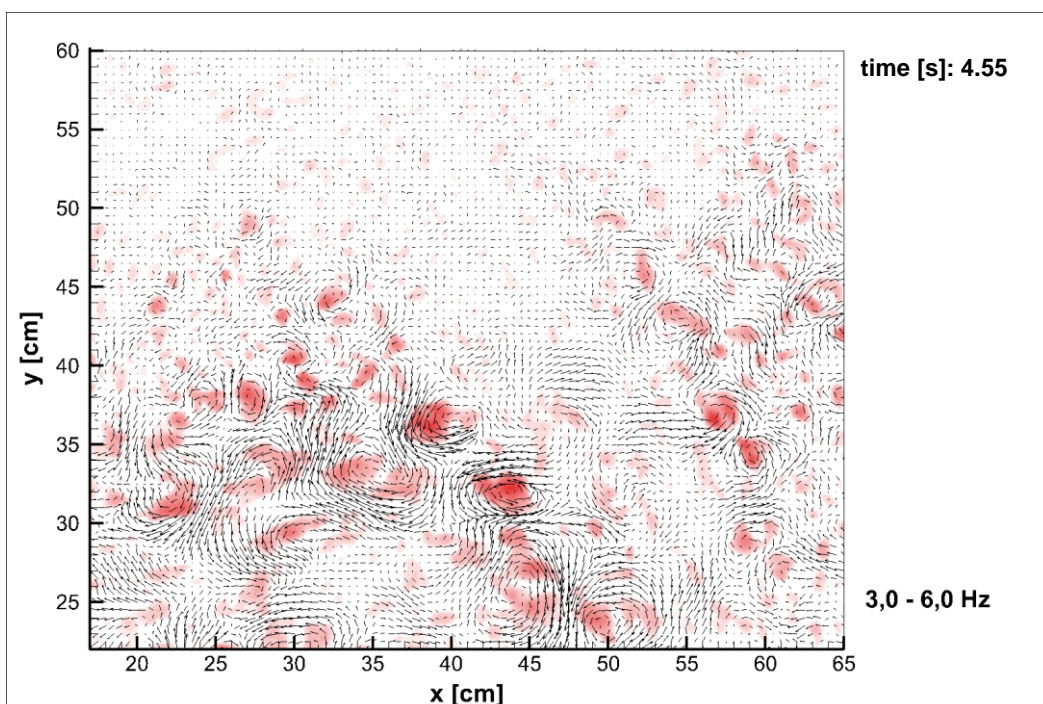


Abb. 8: Geschwindigkeitsfeld und Wirbelerkennung bei  $t = 4,55$  s nach Anwendung von Filter D. Die Färbung zeigt den swirling strength.

Durch die unterschiedlichen Filter werden in den Abbildungen 6 bis 8 die in der Strömung vorhandenen Wirbel visuell erkennbar. Der swirling strength zeigt dort erhöhte Werte, wo die Wirbel zu sehen sind. Leider liefert der swirling strength oft nicht kontinuierliche Werte innerhalb des ganzen Wirbels, wie das beim großen Wirbel im Punkt (45,28) in Abb. 6 zu beobachten ist. Eine der Gründe hierfür ist wahrscheinlich, dass die Trennung der Strukturen

nicht vollständig ist. Wenn das Frequenz-Intervall des Bandpassfilters zu breit ist, können im gefilterten Geschwindigkeitsfeld mehrere überlagerte Strömungsstrukturen verbleiben.

Abbildungen 7 und 8 zeigen dagegen mehrere Wirbel, die in beiden Geschwindigkeitsfeldern zu finden sind. Da die Filter C und D eine relativ große Überlappung hatten, befinden sich die zeitlichen Schwankungen der gemeinsamen Wirbel wahrscheinlich im überlappenden Frequenzbereich von 2,0 – 3,0 Hz.

Man kann feststellen, dass die Frequenzfilterung die Strukturen nicht nach Größe separiert. Zwar ist zu beobachten, dass die größten Strukturen in den gefilterten Geschwindigkeitsfeldern mit steigender Grenzfrequenz tendenziell kleiner sind, sind jedoch auch ähnlich große Wirbel in den unterschiedlichen Geschwindigkeitsfeldern zu finden. Einerseits ist dabei anzumerken, dass der Zusammenhang aus der Turbulenztheorie zwischen Wirbelgröße und Frequenz ein statistischer Zusammenhang ist und damit nur durchschnittlich gilt. Andererseits ist zu beachten, dass die frequenzbasierte Filterung den Mittelwert der lokalen Geschwindigkeit einbezieht. Eine gewisse Schwankungsfrequenz wird in einer langsamen Grundströmung andere Wirbelgrößen aufdecken als in einer schnellen. Das ist gut erkennbar, wenn man die Verteilung der mittleren Geschwindigkeiten (Abb. 2) mit der Verteilung der Wirbelgrößen innerhalb eines gefilterten Geschwindigkeitsfeldes vergleicht (z.B. Abb. 8).

### **Schlussfolgerungen und Ausblick**

Durch die Anwendung von frequenzbasierten Filtern auf die Zeitreihen der einzelnen Gitterpunkte erhält man gefilterte Geschwindigkeitsfeld-Zeitreihen. Durch Filterung mit unterschiedlichen Grenzfrequenzen werden im gleichen Geschwindigkeitsfeld unterschiedliche Wirbel aufgedeckt, die dadurch von Wirbelerkennungsmethode gefunden werden können.

Die swirling strength zeigt tatsächlich dort erhöhte Werte, wo die Wirbel visuell erkennbar sind. Leider ergeben sich aber oft keine kontinuierlichen Werte innerhalb der Wirbel, was die spätere Anwendung des swirling strength zur Abgrenzung der einzelnen Wirbel erschwert. Es bleibt zu Erkunden, welche Gründe die ungleichmäßige Verteilung dieser Werte hat.

Die Grenzfrequenzen der Filter wurden in dieser Voruntersuchung durch Ausprobieren festgelegt. Die nicht eindeutig erkennbaren Strömungsstrukturen weisen darauf hin, dass die Trennung der Strukturen nicht vollständig war, weil die Frequenzintervalle vermutlich zu breit gewählt waren.

Es ist zu beachten, dass die separate Anwendung eines Filters auf die Zeitreihen der einzelnen Gitterpunkte gewährleistet zwar, dass keine Glättung zwischen benachbarten Gitterpunkten geschieht und die aufgedeckten Strukturen nicht das Ergebnis einer räumlichen Glättung von lokalen Geschwindigkeitswerten sind, frequenzbasierte Filterung einbezieht jedoch den Mittelwert der lokalen Geschwindigkeit in die Bearbeitung und wirkt bei inhomogener Verteilung der mittleren Geschwindigkeiten gewissermaßen auf die erhaltene Form und Ausbreitung der Strukturen aus.

Durch Integration einer zweiten Kamera in das PIV-System ist es vorgesehen die Erfassung der „out-of-plane“ Geschwindigkeitskomponente zu realisieren, um die Genauigkeit der Geschwindigkeitsvektoren zu verbessern.

## Literatur

- Adrian, R.J., Christensen, K.T. Liu, Z.-C., 2000: Analysis and interpretation of instantaneous turbulent velocity fields, *Experiments in Fluids*, Vol. 29, pp. 275-290
- Liao, J.C., 2007: A review of fish swimming mechanics and behaviour in altered flows, *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, Vol. 362, pp. 1973–1993
- Przybilla, A., Kunze, S., Rudert, A., Bleckmann, H., Brucker, C., 2010: Entraining in trout: a behavioural and hydrodynamic analysis, *Journal of Experimental Biology*, Vol. 213, pp. 2976-2986
- Tritico, H.M., Cotel, A.J., 2010: The effects of turbulent eddies on the stability and critical swimming speed of creek chub (*Semotilus atromaculatus*), *Journal of Experimental Biology*, Vol. 213(13), pp. 2284-2293
- Smith, D.L., Brannon, E.L., Odeh, M., 2005: Response of Juvenile Rainbow Trout to Turbulence Produced by Prismatic Shapes, *Transactions of the American Fisheries Society*, Vol. 134(3), pp. 741 - 753