Drohnenbasierte optische Ermittlung von heterogenen Oberflächenströmungsmustern in der Nähe von Fischaufstiegshilfen

Drone-based optical detection of heterogeneous surface flow patterns in the vicinity of fish ladders

Dariia Strelnikova[1], Gernot Paulus[1], Sabine Käfer[2], Karl-Heinrich Anders[1], Peter Mayr[3], Helmut Mader[4], Ulf Scherling[1] und Rudi Schneeberger[5]

[1]Fachhochschule Kärnten· d.strelnikova@fh-kaernten.at (D.S.), g.paulus@fh-kaernten.at (G.P.); k.anders@fh-kaernten.at (K.H.A.); u.scherling@fh-kaernten.at (U.S.)
[2] Verbund Hydro Power GmbH· sabine.kaefer@verbund.com
[3] flussbau iC· p.mayr@ic-group.org
[4] Universität für Bodenkultur Wien · helmut.mader@boku.ac.at
[5] ViewCopter e. U. · rudi@vcopter.net

Zusammenfassung: Strömungsmuster stellen einen wichtigen Reiz für Fische zur Auffindbarkeit von Fischaufstiegshilfen (FAH) dar. Diese Machbarkeitsstudie untersucht die Möglichkeit einer nicht-intrusiven Bestimmung von Oberflächenströmungsmustern in einem alpinen Fluss in der Nähe einer Fischaufstiegshilfe. Das neu entwickelte Methodenkonzept basiert auf hochauflösenden drohnengestützten Videos und der optischen Analysemethode „Particle Image Velocimetry“ (PIV). Die mit PIV berechneten Strömungsmuster zeigen eine gute Übereinstimmung mit den hydraulischen Referenzmessungen, welche mit Hilfe eines Universal-Messflügels durchgeführt wurden. Die Ergebnisse dieser Machbarkeitsstudie sind als wichtige Grundlage zur Schaffung einer effizienten und standardisierten Methodik zur Strömungsanalyse in der Nähe von FAH zu sehen.

Schlüsselwörter: optische Strömungsmessung, Fischaufstiegshilfe, FAH, UAS, Drohne, PIV

Abstract: *Flow patterns are an important indicator that helps fish to discover fish ladders. This feasibility study investigates the possibility of a non-intrusive detection of surface flow patterns near a fish ladder in an Alpine river. The newly developed method concept involves the use of high-resolution drone based videos and the optical analysis method "Particle Image Velocimetry" (PIV). The flow patterns calculated with PIV are in good agreement with the hydraulic reference measurements, which were performed with the help of a propeller current meter. The results of this feasibility study can be seen as a first step towards the creation of an efficient and standardized methodology for flow analysis in the vicinity of fish ladders.*

Keywords: *optical flow measurement, fish ladder, UAS, drone, Particle Image Velocimetry, PIV*

1 Einführung und Motivation

Im Zuge der Klimaerwärmung stellt die Wasserkraft eine wichtige Form der erneuerbaren Energiegewinnung dar; dennoch beeinflusst ihre Nutzung das Ökosystem. Die Wanderungen der Fische flussaufwärts, um geeignete Laichgebiete zu erreichen, werden durch Wasserkraftstaudämme blockiert oder verzögert, was zu einer Fragmentierung des Lebensraums (Buadoin et al., 2015) und zu einem Rückgang der Fischpopulation führt (Larinier, 2001). Im Jahr 2000 bestätigte die Europäische Kommission die hohe Priorität des Gewässerschutzes durch die Wasserrahmenrichtlinie (WFD 2000/60/EC, 2000). Im Jahr 2012 wurden im "Leitfaden zum Bau von Fischaufstiegshilfen" (BMLFUW, 2012)

wesentliche Planungs- und Bemessungskriterien für die Fischaufstiegshilfen (FAH) in Österreich festgelegt, welche eine flussaufwärtsgerichtete Fischwanderung ermöglichen.

Ein kritischer Punkt bei der Konstruktion von FAH ist ihre Auffindbarkeit durch Fische. Als Hauptfaktor, welcher hier eine entscheidende Rolle spielt, wird derzeit die Stärke der „Leitströmung" gesehen (Larinier, 2002b). Viele Studien versuchten, die Effizienz der FAH zu bewerten (Silva et al., 2012; Tummers et al., 2016) und einige davon haben die Notwendigkeit erkannt, die Strömungsmuster im Bereich FAH als Teil der Auffindbarkeit der FAH zu untersuchen (Wagner et al., 2012). Dennoch haben wir keine Publikationen gefunden, welche solche Untersuchungen beschreiben.

Die Strömungsbedingungen in der Nähe von FAH unterliegen jahreszeitlichen Schwankungen, hängen vom Betriebsmodus des Wasserkraftwerkes ab und können sich in Folge der Hochwasserereignissen erheblich ändern. Um nachzuweisen, dass bestimmte Strömungsmuster mit einer erhöhten Effizienz einer FAH verbunden sind, muss die Strömungsmusteranalyse unter verschiedenen Strömungsbedingungen auf einem Teststandort mehrmals durchgeführt werden. Die Möglichkeit, eine regelmäßige und bevorzugt kostengünstige Analyse von Strömungsmustern vor Ort durchzuführen, hängt von der Existenz einer effizienten Methodik ab. Herkömmliche *in situ* Messungen mithilfe von Strömungsmessgeräten, wie z.B. einem konventionellen Strömungsmessgerät oder einem akustischen Doppler-Current-Profiler sind zeitaufwendig und auf die ausgewählten Punkte oder Querprofile beschränkt. Die Strömungsgeschwindigkeiten zwischen den Einzelmesspunkten werden durch Interpolation bestimmt, was zu signifikant unterschiedlichen Ergebnissen führen kann, insbesondere bei heterogener Strömung (Goode, 1990), welche für die Gebiete in der Nähe von FAH charakteristisch ist. Deshalb erachten wir es als sinnvoll, neue Methoden zur effizienten Bestimmung von Strömungsmustern in Betracht zu ziehen, z.B. die berührungslose optische Messung und Berechnung von Strömungsmustern.

Die optische Analyse der Strömung wird auf Grundlage von Videoaufnahmen in Kombination mit der Eingabe von Tracer-Partikeln durchgeführt. Dabei werden aus der Videoaufnahme Einzelbilder extrahiert und entzerrt. Im Folgeschritt werden die Bilder vorverarbeitet, um die Sichtbarkeit der verfolgbaren Partikeln zu erhöhen. Als Nächstes werden die Partikelverschiebungen zwischen den aufeinanderfolgenden Bildern bestimmt und Vektoren berechnet, die Strömungsrichtungen und Strömungsgeschwindigkeiten darstellen. Diese Vektoren werden gefiltert, um nicht plausible Messungen zu entfernen. Im Gegensatz zu den herkömmlichen punktbasierten Strömungsmessverfahren ist die optische Analyse der Strömungen nicht intrusiv, erlaubt die sofortige flächenmäßige Bestimmung eines kompletten Strömungsfeldes und kann damit sehr effizient durchgeführt werden.

Bei der Anwendung an Flüssen unter Feldbedingungen zielt die optische Analyse der Strömungen auf die Messung von 2D Oberflächengeschwindigkeiten ab. Die Oberflächengeschwindigkeiten korrelieren nach Hauet et al. (2018) mit der tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeit. Daher können aus den mit optischen Analysemethoden berechneten Oberflächengeschwindigkeitsfeldern Rückschlüsse auf allgemeine Strömungsmuster abgeleitet werden.

Ein weitverbreiteter Ansatz zur Datenerfassung unter natürlichen Strömungsbedingungen ist die Videoaufnahme aus der Luft mithilfe unbemannter Flugsysteme (UAS oder „Drohnen"), die in bisher unzugänglichen Gebieten anwendbar sind (Dal Sasso et al., 2018;

Detert & Weitbrecht, 2016; Perks et al., 2016). In den letzten Jahren gab es erfolgreiche Versuche, Strömungsgeschwindigkeiten mithilfe optischer Analysemethoden aufgrund von drohnenbasierten Aufnahmen zu ermitteln (Detert, Johnson, & Weitbrecht, 2017; Lewis & Rhoads, 2018). Sie haben gezeigt, dass die Bestimmung von Strömungsmustern im Vergleich zu den traditionellen Methoden vereinfacht werden kann. Allerdings wurden die erwähnten Untersuchungen auf geraden Flussabschnitten durchgeführt, welche durch eine homogene Strömung charakterisiert wurden. Die Untersuchungsgebiete in der Nähe von FAH in alpinen Flüssen hingegen sind durch heterogene Strömungsmuster gekennzeichnet. Deshalb muss die Hypothese, dass die Ergebnisse früherer Studien auch in komplexeren Untersuchungsbedingungen gelten, überprüft werden. Die Leistung der optischen Strömungsanalysemethode wird daher in der Nähe von FAH empirisch getestet, um herauszufinden, ob sie als eine Alternative der herkömmlichen Messmethoden gesehen werden kann.

2 Methode

2.1 Untersuchungsgebiet und Experimentparameter

Ein alpiner Fluss, welcher durch das Untersuchungsgebiet fließt, ist ca. 35 m breit, zwischen 0.1 und 2 m tief und durch eine heterogene Strömung gekennzeichnet (Abb. 1).

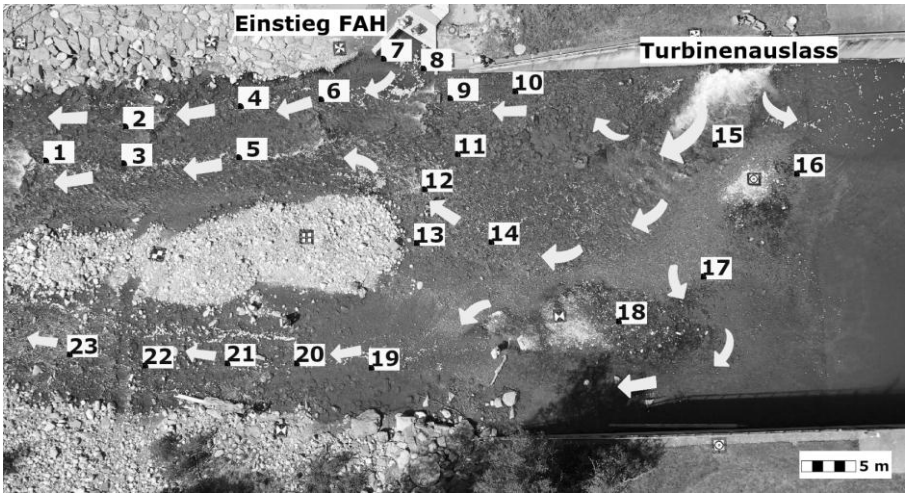

Abb. 1: Untersuchungsgebiet: Lage der Referenzmessungen mit den entsprechenden IDs und Strömungsrichtungen.

Die Messpositionen der hydraulischen Referenzmessungen wurden in enger Absprache mit HydraulikexpertInnen ausgewählt, um die Leistung der nicht-intrusiven optischen Analysemethode für alle wichtigen Komponenten der Strömung zu bewerten. Zur Erfassung von Referenz-Strömungsgeschwindigkeiten wurde ein hydrometrischer Messflügel OTT C31 (OTT, 2019) mit ±2% Messgenauigkeit verwendet. Die Referenzmessungen wurden manuell an 23 Stellen direkt unter der Wasseroberfläche durchgeführt. Die Strömungsrichtungen wurden mithilfe eines Kompasses mit einer Genauigkeit von ±5° bestimmt, wobei der Wert 0° dem Norden entspricht. Zur

Bestimmung der Koordinaten der Referenz-Strömungsmessungen wurde ein Differenzial-GPS der Firma TRIMBLE mit einer Positionierungsgenauigkeit von ±2-3 cm verwendet. Die Datenerfassung wurde mit Hilfe einer DJI Mavic Pro-Drohne durchgeführt (Kosten ca. €1000 (Stand 2019), Gewicht 0,8 kg). Dieses UAS hat eine Positionierungsgenauigkeit von ±30 cm horizontal bzw. ±10 cm vertikal. Der eingebaute Kamerasensor der Firma Hasselblad hat die folgenden Parameter: 1/2,3", 26mm F/2,2, 78,8° (entspricht 35mm), Verzeichnung 1,5%. Ein Vorteil dieser Drohne ist eine automatische Korrektur der tonnenförmigen Verzeichnung.

Damit die optische Strömungsanalyse funktioniert, müssen verfolgbare Partikel, sogenannte „Tracer" in der Strömung vorhanden sein bzw. eingebracht werden. In dieser Studie wurden ökologische und vollständig abbaubare Verpackungschips aus Mais (zylindrisch, Durchmesser 1,5-2 cm, Länge 4,5-6 cm) als Tracer verwendet (Le Coz et al., 2010; Muste et al., 2014). Das Video wurde im Schwebeflug mit 25 fps aus einer Höhe von 50 m aufgenommen. Die gesamte Dauer der Videoaufzeichnung betrug fünf Minuten, wobei eine relativ dichte und gleichmäßige Verteilung der Tracer in den interessierenden Bereichen innerhalb des Sichtfeldes für ca. zwei Minuten beobachtet wurde. Für die Georeferenzierung der Aufnahmen wurden elf Passpunktmarken aus weißem Kunststoff mit schwarz gedruckten Mustern verwendet. Die Positionen der Passpunkte wurden mithilfe des Differenzial-GPS mit einer Positionierungsgenauigkeit von ±2-3 cm eingemessen.

2.2 Analysemethode

Eine optische Strömungsanalyse kann mithilfe verschiedener Datenauswertungsmethoden durchgeführt werden. Die am häufigsten verwendete Methode, Particle Image Velocimetry, oder PIV, basiert auf der Verfolgung der Verschiebung von Partikelgruppen (Raffel et al., 2018). In dieser Machbarkeitsstudie wurde PIV als Datenauswertungsmethode eingesetzt, und die Datenauswertung wurde mithilfe der MATLAB basierten Software PIVlab (Thielicke & Stamhuis, 2014) gemacht, welche in vielen früheren Studien erfolgreich evaluiert wurde (Detert et al., 2017; Le Coz et al., 2016; Lewis & Rhoads, 2015, 2018).

Für die Analyse wurde aus der Videodatei 230 Bildern (3840 x 2160 px) mit einem Zeitintervall von 80 ms zwischen den aufeinanderfolgenden Bildern extrahiert. Als PIV-Korrelationsmethode wurde die Ensemblekorrelation gewählt, um eine mögliche inhomogene Tracer-Verteilung zu berücksichtigen. Die Größe des Abfragebereiches (IA) war 48/48 px im ersten Durchgang und 48/24 px im zweiten Durchgang.

Die Bildstabilisierung wurde mithilfe von MATLAB-Skripts durchgeführt. Der mittlere Lagefehler (Root Mean Square Error, RMSE) der Stabilisierung für zwei beliebige aufeinanderfolgende Bilder betrug durchschnittlich 0,17 px, was einem mittleren Stabilisierungsfehler von 0,045 m/s entsprach. Die Bodenauflösung der Aufnahmen betrug 0,021 m/px. Die Bildvorverarbeitung beinhaltete eine automatische Kontraststreckung und die Anwendung eines Hochpassfilters mit 60 px Kernelgröße. Diese beiden Vorverarbeitungsverfahren wurden mithilfe von PIVlab-Standardfunktionen durchgeführt. Die Bildnachbearbeitung wurde ebenfalls mit den Standardwerkzeugen von PIVlab vorgenommen. Fehlerhaft berechnete Fließgeschwindigkeitsvektoren wurden mithilfe des Standardabweichungsfilters mit einem Schwellenwert der 7-fachen Standardabweichung entfernt; zusätzlich wurde der lokale Medianfilter (Westerweel & Scarano, 2005) mit Standardeinstellungen verwendet.

2.3 Vergleich mit Referenzmessungen

Die PIVlab-Ergebnisse beinhalten die berechneten Fließgeschwindigkeiten und die Fließrichtungen im Rasterformat mit einer Auflösung von 0.021 m. Um diese Ergebnisse mit Referenzgeschwindigkeiten zu vergleichen, wurde eine lagemäßige Ko-Registrierung der beiden Datensätze gemacht. Die Bildkoordinaten der Passpunkte wurden in einem kostenfreien Bildeditor GIMP identifiziert. Danach wurde die Koordinatentransformation von Referenzmessungen in Bildkoordinaten durchgeführt. Im nächsten Schritt wurden die Rasterzellen im Geschwindigkeitsfeldraster identifiziert, die den Positionen der Referenzmessungen entsprachen. Schlussendlich wurden die PIV-Ergebnisse für jede der Referenzmessungen als Median von neun Zellwerten berechnet (die im vorherigen Schritt identifizierte Zelle und acht Nachbarzellen), weil die Genauigkeit der Referenzdaten-Koordinaten ±2-3 cm betrug. Da in PIVlab 0° der Ostausrichtung des Bildes entspricht und mögliche Winkelwerte zwischen -180° und 180° liegen, wurden die extrahierten PIV-Winkelwerte mit den Referenzrichtungen vereinheitlicht, indem 0° nach Norden ausgerichtet wurde und 360° zu negativen Winkelwerten addiert wurde.

3 Ergebnisse

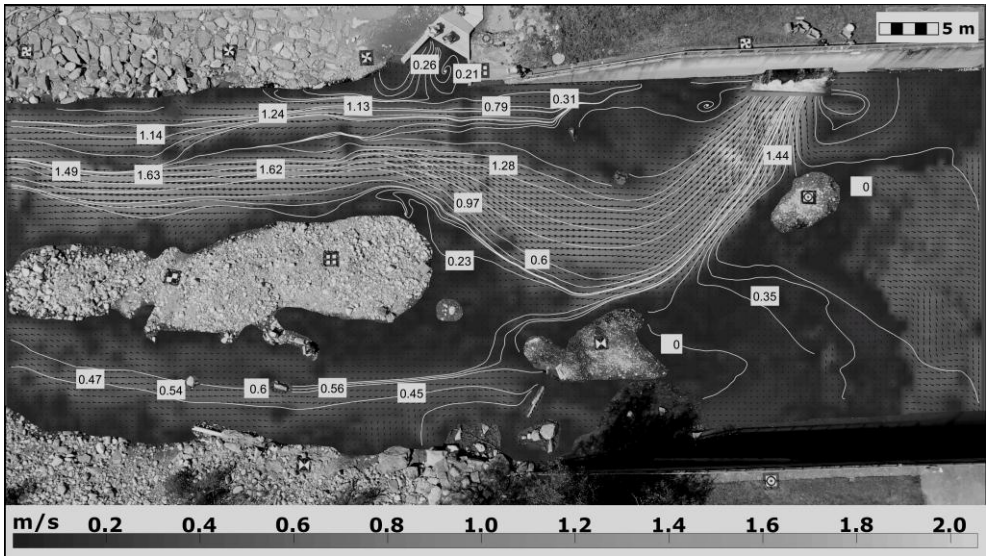

Abb. 2: Das mit PIV berechnete Geschwindigkeitsfeld der Oberflächenströmung

Abb. 2 stellt das Oberflächengeschwindigkeitsfeld dar, welches mithilfe von PIV in PIVlab berechnet wurde. Die PIV hat die wichtigen Elemente der Strömungsstruktur korrekt ermittelt: die dominante Strömung, die Strömung vom Einstieg in die FAH und die kreisförmigen Strömungsmuster in der Nähe der FAH, in der Nähe des Turbinenauslasses und in der Nähe der größeren Insel. Änderungen der Strömungsrichtung und Strömungsgeschwindigkeit, welche durch Hindernisse verursacht wurden, wurden eindeutig angezeigt. Auch der Übergang der Strömung vom FAH-Einstieg zur Hauptströmung war erkennbar. Der Bereich im rechten unteren Teil des Sichtfeldes lag im Schatten und wurde daher bei der PIV-Analyse ausgeblendet. Rechts vom Turbinenauslass,

unterhalb des nahe liegenden Wirbels, konnten in der Videoaufzeichnung fast keine Tracer beobachtet werden. Die in diesem Bereich berechneten Geschwindigkeitsvektoren basieren ausschließlich auf dem Wellenmuster und sind ungenau.

In der Tabelle 1 werden die berechneten Geschwindigkeiten und die Referenzmessungen einander gegenübergestellt. Die Strömungsgeschwindigkeit im Punkt 17 (Referenzwert 0,35 m/s) ist die einzige stark unterschätzte. Dies lässt sich dadurch erklären, dass in diesem Bereich fast keine sichtbare Tracerbewegung beobachtet wurde. Auch die Fließgeschwindigkeit im Wirbel in der Nähe von FAH (Messpunkt 8, Referenzwert 0,21 m/s) ist unterschätzt. Die durchschnittliche absolute Differenz zwischen den berechneten und den gemessenen Fließgeschwindigkeiten beträgt 0,07 m/s, der RMSE beträgt 0,10 m/s, und der Median liegt bei -0,04 m/s.

Tabelle 1: PIV-Ergebnisse im Vergleich zu den Referenzmessungen

ID	Geschwindigkeit, m/s				Strömungsrichtung, °		
	Referenz	PIV	Absolute Differenz	Relative Differenz	Referenz	PIV	Betrag der Differenz
1	1,49	1,40	-0,09	-6,0%	180	178	2
2	1,14	0,88	-0,26	-22,8%	170	176	6
3	1,63	1,59	-0,04	-2,5%	170	171	1
4	1,24	1,12	-0,12	-9,7%	170	168	2
5	1,62	1,58	-0,04	-2,5%	170	167	3
6	1,13	0,97	-0,16	-14,2%	160	157	3
7	0,26	0,27	0,01	3,8%	140	120	20
8	0,21	0,14	-0,07	-33,3%	170	309	139
9	0,79	0,70	-0,09	-11,4%	160	168	8
10	0,31	0,30	-0,01	-3,2%	180	161	19
11	1,28	1,19	-0,09	-7,0%	180	177	3
12	0,97	0,93	-0,04	-4,1%	190	218	28
13	0,23	0,21	-0,02	-8,7%	230	205	25
14	0,6	0,53	-0,07	-11,7%	230	176	54
15	1,44	1,43	-0,01	-0,7%	90	115	25
16	0	0,08	0,08	n/a	n/a	n/a	n/a
17	0,35	0,08	-0,27	-77,1%	60	20	40
18	0	0,08	0,08	n/a	n/a	n/a	n/a
19	0,45	0,46	0,01	2,2%	150	148	2
20	0,56	0,57	0,01	1,8%	140	158	18
21	0,6	0,63	0,03	5,0%	190	199	9
22	0,54	0,5	-0,04	-7,4%	180	193	13
23	0,47	0,41	-0,06	-12,8%	160	193	33
Mittelwert (ohne Vorzeichen)			0,07	11,8%	Mittelwert		22
Median			-0,04	-7,0%	Median		13
Standardabweichung			0,09	17,7%	Standardabweichung		31

Die durchschnittliche relative Differenz zwischen den Referenzgeschwindigkeiten und den PIV-Werten beträgt 11,8% (RMSE 20,2%). Dieser Wert wird stark durch eine große relative Differenz von -77,1% beeinflusst, die in dem Gebiet ohne Tracer beobachtet wurde. In den Gebieten, wo die Tracer vorhanden waren, beträgt die durchschnittliche relative Differenz 8,5% (RMSE 11,5% relativ, 0,09 m/s absolut). Insgesamt wurden mittels PIV 86% (18 von 23) aller Referenzwerte mit einer Genauigkeit von ±15% geschätzt.

Die Mehrheit der durch PIV bestimmten Richtungen stimmt mit Referenzmessungen überein, wobei die durchschnittliche Differenz zwischen dem Referenzwinkel und dem gemessenen Winkel 22° ausmacht (12,2 % der maximal möglichen Differenz von 180°), und die Mediandifferenz 13° beträgt (7,2 %). Die größte Differenz zwischen der gemessenen und der berechneten Strömungsrichtungen war mit dem Messpunkt 8 in der Nähe von FAH verbunden (Referenzrichtung 170°, PIV-Richtung 309°). Ein möglicher Grund dafür ist, dass dieser Referenzwert innerhalb eines Wirbels gemessen wurde. Ein detaillierter Vergleich mit Referenzwerten unter Berücksichtigung von Messgenauigkeiten und Stabilisierungsfehlern findet man in Strelnikova et al. (2020).

4 Diskussion

Die PIV Ergebnisse dieser Machbarkeitsstudie entsprechen den Erkenntnissen von früheren Studien, die PIV für die Strömungsanalyse unter Feldbedingungen mit einfacheren Strömungsmustern nutzten (Detert & Weitbrecht, 2015). Die Analyseergebnisse zeigen, dass eine optische Strömungsanalyse mittels PIV aufgrund der drohnenbasierten Bilder die Hauptelemente eines heterogenen Strömungsmusters in der Nähe einer FAH korrekt bestimmen konnte. Die Strömungsgeschwindigkeiten und Strömungsrichtungen wurden mit der Genauigkeit von im Durchschnitt ±0.07 m/s und ±22° bestimmt. Die größten Fehler wurden in einem Bereich ohne Tracer sowie in stark verwirbelten Abschnitten beobachtet.

In Bereichen ohne Tracer können die Strömungsmuster nur aus den Wellenmustern berechnet werden. Diese Idee sollte jedoch kritisch gesehen werden, insbesondere bei niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten und bei einer heterogenen Strömung. In unserer Studie wurden beispielsweise bestimmte Bereiche innerhalb des Sichtfeldes durch ein Wellenmuster charakterisiert, das sich signifikant vom tatsächlich beobachteten Strömungsmuster unterscheidet (Abb. 2 rechts: die berechnete Geschwindigkeit bis zu 0.8 m/s, obwohl das Wasser fast still ist).

In meisten Fällen wurde die Strömungsrichtung bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten genauer bestimmt. Bei Strömungsgeschwindigkeiten von mehr als 1 m/s (was ungefähr einer Partikelverschiebung von 4 px entspricht) war die vorzeichenlose Differenz zwischen den Referenzströmungsrichtungen und den PIV-Strömungsrichtungen bei allen Messungen bis auf eine weniger als 10°. Die einzige größere Differenz (25°) war mit einem Wert verbunden, der in einem turbulenten Bereich in der Nähe des Turbinenauslasses gemessen wurde, wo die korrekte Identifizierung der Strömungsrichtung für jeden Messansatz eine Herausforderung darstellt. In homogenen Strömungsbedingungen kann in Abhängigkeit von Fließgeschwindigkeiten eine höhere Genauigkeit der Strömungsrichtungsberechnung mithilfe von PIV durch Vergrößerung (bei niederen Fließgeschwindigkeiten) bzw. Verkleinerung des Zeitintervalls der Bildextraktion (bei höheren Fließgeschwindigkeiten) zwischen aufeinanderfolgenden Bildern erreicht werden.

Die Ergebnisse der PIV-Analyse zeigen eindeutig an, welche der Teilbereiche durch die höchsten und die niedrigsten Geschwindigkeiten gekennzeichnet sind. Sie zeigen, dass nach der Aufspaltung die Geschwindigkeit der Hauptströmung in der Nähe der FAH höher ist als die Geschwindigkeit der Strömung aus dem FAH-Einstieg, und dass der zweite Zweig der Hauptströmung durch niedrigere Geschwindigkeiten charakterisiert ist. Für die vorliegende Aufgabe ist die Möglichkeit der schnellen und effizienten Bestimmung von relativen Strömungsmustern von großem Wert.

In der gegenwärtigen Phase der Methodenentwicklung kann die Leistung der PIV in Hinsicht auf das Hauptziel der Forschung als akzeptabel gesehen werden: Sie bestimmt die Hauptelemente der Strömung im Sichtfeld korrekt und identifiziert Unterschiede zwischen den Teilbereichen des Sichtfeldes. Die Weiterentwicklung des Ansatzes wird sich mit der Verbesserung der Messgenauigkeit befassen. Mögliche Richtungen der Verbesserung können die Optimierung der Tracerverteilung und lokale Anpassungen der PIV-Einstellungen sein. Generell wird die Entwicklung eines Analyseansatzes, der variable Bildraten und PIV-Einstellungen für Teilbereiche des Sichtfeldes unterstützt, für die PIV-Leistung in heterogenen Strömungsbedingungen, die in der Nähe von FAH beobachtet werden, von Vorteil sein.

5 Resümee und Ausblick

Im Rahmen der Forschung zur Steigerung der Auffindbarkeit von Fischaufstiegshilfen durch Fische untersuchte diese Studie die Anwendung von drohnenbasierten Videoaufnahmen und der nicht-intrusiver Methode PIV zur Analyse von Strömungsmustern in der Nähe von FAH. Die Strömungsdaten wurden mittels eines kostengünstigen UAS mit einer eingebauten 4K-Kamera erfasst und berechnet. Punktweise Referenzmessungen wurden mit Hilfe eines Messflügels durchgeführt, und die Strömungsrichtungen mithilfe eines Kompasses ermittelt. Die PIV-Analyse wurde mithilfe der MATLAB-basierten Software PIVlab durchgeführt.

Die Analyseergebnisse zeigen, dass PIV erfolgreich angewendet werden kann, um Strömungsmuster in der Nähe von FAH zu analysieren. Obwohl es Abweichungen zwischen den berechneten PIV-Werten und gemessenen Referenzwerten gibt (mittlere vorzeichenlose Differenz von 11,8% für das gesamte Sichtfeld und 8,5% für die Bereiche mit Tracern), werden die Hauptelemente der Strömung korrekt bestimmt und die Unterschiede zwischen den Teilbereichen des Sichtfeldes eindeutig identifiziert. In Bereichen, wo Tracer vorhanden sind, stimmen die mit PIV abgeleiteten Strömungsgeschwindigkeiten und Richtungen mit Referenzmessungen gut überein, mit einer absoluten Differenz von 0,07 m/s und 22° im Durchschnitt. In Bereichen, in denen keine sichtbare Bewegung beobachtet werden kann, kann PIV nicht angewendet werden. Alle optischen Methoden der Strömungsanalyse haben jedoch diese Einschränkung.

PIV hat das Potenzial, als Teil einer Strömungsmonitoringmethodik eingesetzt zu werden, um die tatsächliche Strömungsmuster in der Nähe von FAH regelmäßig abzuleiten. Mit diesem Wissen ausgestattet, wird der Wasserkraftwerksbetreiber in der Lage sein, wenn möglich sicherzustellen, dass optimale Strömungsbedingungen für die Fischwanderung geschaffen werden. Zum Beispiel kann dafür gesorgt werden, dass zu Zeiten der Spitzenfischwanderung der optimale Betrieblastmodus der einzelnen Turbinen des Wasserkraftwerks gewählt wird. Andererseits ermöglicht die Strömungsanalyse nach Hochwasserereignissen eine rechtzeitige Reaktion auf unerwünschte Veränderungen der Strömungsverhältnisse, z.B. wenn die Lockströmung durch geänderte hydraulische Verhältnisse (z.B. durch Sedimentumlagerungen) ungünstig verändert wird.

Abschließend ist es wichtig zu betonen, dass Strömungsmuster nicht der einzige Faktor ist, welcher für die Auffindbarkeit von FAH sorgt. Zu den Faktoren, welche die FAH-Attraktivität beeinflussen können, gehören Turbulenz, Oxygenierung, Gerüche, Temperatur, Geräuscheffekte und Lichtverhältnisse (Larinier, 2002a; Piper et al., 2012;

Williams et al., 2012). Die ausschließliche Beschränkung der Untersuchungen auf die Strömungsmuster kann zu einer unzureichenden Leistung der FAH oder zu erhöhten Kosten für deren Bau und Betrieb führen. Weitere Studien sollen die Rolle aller relevanten Faktoren in der Auffindbarkeit von FAH untersuchen, um eine optimale Kombination von diesen Faktoren zu finden.

Im Rahmen der Weiterentwicklung der dargestellten Machbarkeitsstudie ist es vorgesehen, den Faktor Temperatur als weiteren wichtigen Indikator für die Auffindbarkeit von FAH im Detail zu untersuchen. Weiters ist eine hydraulische Modellierung aufgrund der Referenzmessungen und Modellkalibrierung über Fließgeschwindigkeitsvektoren geplant. Anschließend werden die erfassten Temperatur- und Strömungsdaten der Anzahl der beim Einstieg gezählten Fische gegenübergestellt, mit dem Ziel die Role der Faktoren Strömung und Temperatur bei der FAH-Auffindbarkeit empirisch zu untersuchen.

Literatur

BMLFUW (2012). Leitfaden zum Bau von Fischaufstiegshilfen.

Buadoin, J.-M., Burgun, V., Chanseau, M., Larinier, M., Ovidio, M., Sremski, W., . . . Voegtle, B. (2015). *Assessing the passage of obstacles by fish: Concepts, design and application: the ICE protocol for ecological continuity*. *Knowledge for action: Vol. 11*. [Vincennes]: Onema.

Dal Sasso, S. F., Pizarro, A., Samela, C., Mita, L., & Manfreda, S. (2018). Exploring the optimal experimental setup for surface flow velocity measurements using PTV. *Environmental Monitoring and Assessment*, *190*(8), 460. https://doi.org/10.1007/s10661-018-6848-3

Detert, M., Johnson, E. D., & Weitbrecht, V. (2017). Proof-of-concept for low-cost and non-contact synoptic airborne river flow measurements. *International Journal of Remote Sensing*, *38*(8-10), 2780–2807. https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1294782

Detert, M., & Weitbrecht, V. (2015). A low-cost airborne velocimetry system: proof of concept. *Journal of Hydraulic Research*, *53*(4), 532–539. https://doi.org/10.1080/00221686.2015.1054322

Detert, M., & Weitbrecht, V. (2016). Quadrokoptergestütztes Oberflächen-PIV an der Töss. In P. Rutschmann (Ed.), *Berichte des Lehrstuhls und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft: Nr. 134. Wasserbau - mehr als Bauen im Wasser: Beiträge zum 18. Gemeinschafts-Symposium der Wasserbau-Institute TU München, TU Graz und ETH Zürich vom 29. bis 1. Juli 2016 in Wallgau, Oberbayern* (Vol. 134, pp. 924–932).

Goode, D. J. (1990). Particle velocity interpolation in block-centered finite difference groundwater flow models. *Water Resources Research*, *26*(5), 925–940. https://doi.org/10.1029/WR026i005p00925

Hauet, A., Morlot, T., & Daubagnan, L. (2018). Velocity profile and depth-averaged to surface velocity in natural streams: A review over alarge sample of rivers. *E3S Web of Conferences*, *40*(6), 6015. https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184006015

Larinier, M. (2001). Environmental issues, dams and fish migration. In G. Marmulla (Ed.), *FAO fisheries technical paper: Vol. 419. Dams, fish and fisheries: Opportunities, challenges and conflict resolution* (pp. 45–89). Rome: FAO.

Larinier, M. (2002a). Fishways - General considerations. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*. (364 supplément), 21–27. https://doi.org/10.1051/kmae/2002104

Larinier, M. (2002b). Location of fishways. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*. (364 supplément), 39–53. https://doi.org/10.1051/kmae/2002106

Le Coz, J., Hauet, A., Pierrefeu, G., Dramais, G., & Camenen, B. (2010). Performance of image-based velocimetry (LSPIV) applied to flash-flood discharge measurements in Mediterranean rivers. *Journal of Hydrology*, *394*(1-2), 42–52. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.05.049

Le Coz, J., Patalano, A., Collins, D., Guillén, N. F., García, C. M., Smart, G. M., Braud, I. (2016). Lessons learnt from recent citizen science initiatives to document floods in France, Argentina and New Zealand. *E3S Web of Conferences*, *7*(1), 16001. https://doi.org/10.1051/e3sconf/20160716001

Lewis, Q. W., & Rhoads, B. L. (2015). Resolving two-dimensional flow structure in rivers using large-scale particle image velocimetry: An example from a stream confluence. *Water Resources Research*, *51*(10), 7977–7994. https://doi.org/10.1002/2015WR017783

Lewis, Q. W., & Rhoads, B. L. (2018). LSPIV Measurements of Two-Dimensional Flow Structure in Streams Using Small Unmanned Aerial Systems: 1. Accuracy Assessment Based on Comparison With Stationary Camera Platforms and In-Stream Velocity Measurements. *Water Resources Research*, *23*(1), 261–279. https://doi.org/10.1029/2018WR022550

Muste, M. V. I., Hauet, A., Fujita, I., Legout, C., & Ho, H.-C. (2014). Capabilities of Large-scale Particle Image Velocimetry to characterize shallow free-surface flows. *Advances in Water Resources*, *70*, 160–171. https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2014.04.004

OTT (2019). OTT C31: Universalmessflügel (Prospekt). Verfügbar unter https://www.ott.com/de-at/produkte/download/prospekt-universalmessfluegel-ott-c31-1/

Perks, M. T., Russell, A. J., & Large, A. R. G. (2016). Technical Note: Advances in flash flood monitoring using unmanned aerial vehicles (UAVs). *Hydrology and Earth System Sciences*, *20*(10), 4005–4015. https://doi.org/10.5194/hess-20-4005-2016

Piper, A. T., Wright, R. M., & Kemp, P. S. (2012). The influence of attraction flow on upstream passage of European eel (Anguilla anguilla) at intertidal barriers. *Ecological Engineering*, *44*, 329–336. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.04.019

Raffel, M., Willert, C. E., Scarano, F., Kähler, C. J., Wereley, S. T., & Kompenhans, J. (2018). *Particle image velocimetry: A practical guide* (Third edition). Cham: Springer.

Silva, L. G. M. d., Nogueira, L. B., Maia, B. P., & Resende, L. B. d. (2012). Fish passage post-construction issues: analysis of distribution, attraction and passage efficiency metrics at the Baguari Dam fish ladder to approach the problem. *Neotropical Ichthyology*, *10*(4), 751–762. https://doi.org/10.1590/S1679-62252012000400008

Strelnikova, D., Paulus, G., Käfer, S., Anders, K.-H., Mayr, P., Mader, H., Schneeberger, R. (2020). Drone-Based Optical Measurements of Heterogeneous Surface Velocity Fields around Fish Passages at Hydropower Dams. *Remote Sensing*, *12*(3), 384. https://doi.org/10.3390/rs12030384

Thielicke, W., & Stamhuis, E. J. (2014). PIVlab – Towards User-friendly, Affordable and Accurate Digital Particle Image Velocimetry in MATLAB. *Journal of Open Research Software*, *2*, 1202. https://doi.org/10.5334/jors.bl

Tummers, J. S., Winter, E., Silva, S., O'Brien, P., Jang, M.-H., & Lucas, M. C. (2016). Evaluating the effectiveness of a Larinier super active baffle fish pass for European river lamprey Lampetra fluviatilis before and after modification with wall-mounted studded tiles. *Ecological Engineering*, *91*, 183–194. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.02.046

Wagner, R. L., Makrakis, S., Castro-Santos, T., Makrakis, M. C., Dias, J. H. P., & Belmont, R. F. (2012). Passage performance of long-distance upstream migrants at a large dam on the Paraná River and the compounding effects of entry and ascent. *Neotropical Ichthyology*, *10*(4), 785–795. https://doi.org/10.1590/S1679-62252012000400011

Westerweel, J., & Scarano, F. (2005). Universal outlier detection for PIV data. *Experiments in Fluids*, *39*(6), 1096–1100. https://doi.org/10.1007/s00348-005-0016-6

WFD 2000/60/EC (2000). Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. *Official Journal of the European Communities*, *327*, 1–73.

Williams, J. G., Armstrong, G., Katopodis, C., Larinier, M., & Travade, F. (2012). Thiking like a fish: A key ingredient for development of effective fish passage facilities at river obstructions. *River Research and Applications*, *28*(4), 407–417. https://doi.org/10.1002/rra.1551