Quadrokopterbasierte Messung von Oberflächengeschwindigkeit

Autor(en): **Detert, Martin / Trachsel, Jürg / Weitbrecht, Volker**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria**

Band (Jahr): **107 (2015)**

Heft 3

PDF erstellt am: **04.06.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-941853

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Quadrokopterbasierte Messung von Oberflächengeschwindigkeiten

Martin Detert, Jürg Trachsel, Volker Weitbrecht

Zusammenfassung

Dieser Beitrag zeigt die Möglichkeit, Low-Cost-Quadrokopter in Kombination mit handelsüblichen Actioncams zur Vermessung von Oberflächengeschwindigkeitsfeldern typischer Mittellandflüsse einzusetzen. Zur Auswertung des Videomaterials wurde jedes Einzelbild automatisiert orthorektifiziert und mittels Bodenreferenzpunkten georeferenziert. Die so stabilisierten Videoaufnahmen wurden mithilfe eines Particle-Image-Velocimetry-Verfahrens, welches einzelne zeitlich aufeinanderfolgende Bildbereiche miteinander korreliert, in Oberflächengeschwindigkeitsfelder umgerechnet. Ein Vergleich mit zeitgleich aufgenommenen, akustischen Geschwindigkeitsmessungen verdeutlicht sowohl das generelle Potenzial der neuen Technik, als auch ihre für Feldmessungen hohe Genauigkeit. Anwendungsbereiche sind z.B. die Dokumentation von grossflächigen Geschwindigkeitsfeldern vor und nach Massnahmen zur Dynamisierung eines Gewässers oder die Schätzung von Abflussraten.

Résumé

Cet article présente l'application d'un quadricoptère équipé d'une caméra miniature comme instrument à faible coût pour déterminer les vitesses de surface d'une rivière type du plateau suisse. Au cours du traitement des données, chaque image du flux vidéo est automatiquement rectifiée et géoréférencée grâce à l'utilisation de points de référence distribués dans le périmètre. Ces images stabilisées sont évaluées par vélocimétrie des images des particules (PIV), qui permet de déterminer les champs de vitesse de la surface de l'eau en corrélant les images consécutives. La comparaison avec des mesures de vitesse d'écoulement acoustiques effectuées simultanément montre une haute précision pour des données relevées sur site et prouve le potentiel de cette nouvelle méthode. Celle-ci ouvre la voie de plusieurs applications prometteuses, parmi lesquelles le calcul des vitesses d'écoulement avant et après des mesures de dynamisation d'un cours d'eau ainsi que l'estimation des débits d'eau.

1. Einleitung

Die Verbreitung von sog. Unpiloted Aerial Vehicles (UAV, auch Drohnen) hat in den letzten Jahren in vielen zivilen Bereichen Einzug gehalten. Durch die einfache Steuerbarkeit, die ruhige Fluglage und die stark gesunkenen Anschaffungskosten sind sie für jedermann erschwinglich und zu bedienen.

Auch dem Flussbauingenieur eröffnen sich dadurch neue Möglichkeiten zur Fernerkundung, Datenakquisition und -analyse. Eine anspruchsvolle Anwendung liegt in der bildbasierten Geschwindigkeitsmessung, wie der Particle Image Velocimetry (PIV, z.B. *Adrian*, 2005). Für den Einsatz im hydraulischen Versuchswesen ist diese Methode Stand der Technik. Ein Einsatz für Feldmessungen ist jedoch die Ausnahme, da erforderliche Tracerpartikel meist keinen adäquaten Kontrast zur Wasseroberfläche geben. Daher verwendeten *Sukhodolov* et al., (2007) z. B. Schwimmkerzen bei Nacht. In anderen Studien wird auch die Bewegungsinformation von Oberflächenreflexionen, natürlichem Geschwemmsel oder Schaumkronen an der Oberfläche genutzt (*Hauet* et al., 2008, *Dramais* et al., 2011). Eine weitere Herausforderung besteht darin, einen optischen Zugang zu einem aussagekräftigen Bildbereich zu erhalten. *Muste* et al. (2008) haben PIV-Messungen mit fixierter Kamera von Brücken per Messfahrzeug mit Kragarm durchgeführt. Auch Hubschrauberbasiertes Oberflächen-PIV wurde bereits erfolgreich von *Fujita* und *Kunita* (2011) eingesetzt. Die Georeferenzierung erfolgte hier per Hand über markante Geländepunkte wie Strassenkreuzungen, Häuser oder Strommasten. Der Schwerpunkt ihrer Untersuchungen lag in der Abschätzung von Hochwasserabflüssen und nicht in der Beschreibung vollständiger Geschwindigkeitsfelder, sodass der Anspruch an die Genauigkeit deutlich geringer ist. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen haben *Detert* und *Weitbrecht* (2014 a, b) demonstriert, dass auch räumlich hochaufgelöste Geschwindigkeitsmessungen aus Helikoptern möglich sind, wenn eine Orthorektifizierung von Einzelbildern vorgenommen wird, die idealerweise auch automatisiert ist.

Kürzlich haben *Pagano* et al. (2014) eine an einen Quadrokopter montierte Actioncam eingesetzt, um eine grobe Abschätzung der Oberflächengeschwindigkeiten an einem Bach anhand von Bildsequenzen von wenigen Sekunden zu klassifizieren. Tatsächlich fehlt jedoch eine standardisierte Methode, um qualifizierte, UAV-basierte Videos auszuwerten. Die VAW hat daher ein Messsystem entwickelt und getestet, das aus Actioncam, Quadrokopter, Tracerpartikel (sogenanntes «Seeding») und Georeferenzpunkten (GRP) besteht. Nachstehend werden die Messtechnik sowie die notwendigen Schritte der Bildbearbeitung beschrieben. Der Einfluss der Aufnahmen auf die Genauigkeit der berechneten, grossskaligen Oberflächengeschwindigkeitsfelder wird exemplarisch anhand von Messungen an der Thur im Kanton Zürich quantifiziert. Zusätzlich wird auf Basis dieser Daten eine Schätzung des Durchflusses vorgenommen.

2 Messtechnik

2.1 Aufnahme der Videos

Messungen wurden an der Eggrankkurve der Thur (691 144/271 605) durchgeführt. Bis 2020 soll dort ein 4.5 km langer Abschnitt bis zur Mündung in den Hochrhein im Rahmen des Projektes «Hochwasser-

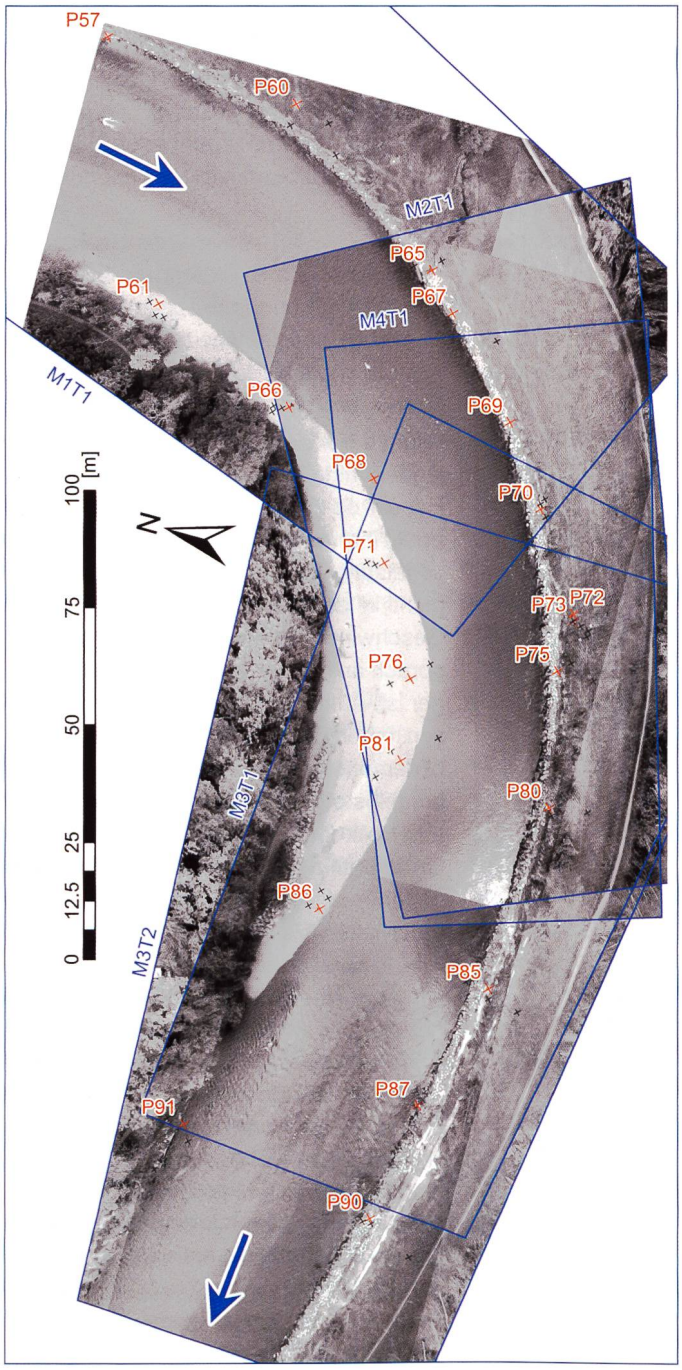


Bild 1. Untersuchungsbereich, mit am Ufer liegenden GRP (rotes x = Messung mit Leica GPS 1200, schwarzes x = einzelne, über den Tag verteilte Handmessungen mit Garmin eTrex) und fünf charakteristischen Einzelbildfeldern aus verschiedenen Messflügen (blaue Umrandung).

Flug #	Δt (s)	h_g (m)	*PPM**	
			$\mu_{n,i}$ (px m^{-1})	$\sigma_{n,i}$ (px m^{-1})
M1T1	138	72.5 – 74.0	21.9	1.2
M2T1	182	52.5 – 53.5	29.0	1.9
M3T1	147	58.0 – 59.0	25.9	1.0
M3T2	97	66.5 – 67.5	21.7	1.9
M4T1	217	45.5 – 46.5	32.5	1.5

* Berechnet aus sämtlichen Distanzen der mittels Objekterkennung detektierten GRP (Beschreibung: s. Kap. 3)

Tabelle 1. Charakteristische Parameter der verschiedenen Flüge und der dazugehörigen Videoaufnahmen.

Bild 2. Quadrokopter DJI Phantom FC40 mit montierter 4K-Kamera GoPro Hero3+ Black-Edition (Orientierungsrichtung zum Boden, inkl. wasserdichtem Schutzgehäuse).

schutz und Auenlandschaft Thurmündung» ökologisch aufgewertet werden (*Mende* et al., 2014). *Bild 1* gibt einen Überblick vom Messgebiet, bei dem auch die nummerierten GRP und einzelne Bildausschnitte charakteristischer, während der Messflüge beobachteter Bildfelder dargestellt werden. In Summe wurden fünf Flüge durchgeführt (M1T1, M2T1, M3T1, M3T2, M4T1), mit jeweils einer Dauer zwischen 1.5–3.5 min. Jeder Flug hat einen Fokus auf ein einzelnes, spezifisches Areal mit mehreren GRP auf beiden Flussuferbereichen.

Tabelle 1 fasst die spezifischen Parameter der Flüge und der Videoaufnahmen zusammen, d.h. die Flughöhe über Grund h_g, die Messdauer Δt und statistische Kennwerte der berechneten Auflösung in Pixel Per Meter (*PPM*). Letztere wird nachstehend über den Bildsequenz-Median m für jeden GRP charakterisiert als (1) Mittelwert über alle GRP pro Messflug, d.h. $\mu_{n,i}$ als $\mu(m\{n\})\{i\}$, und (2) die darauf bezogene Standardabweichung $\sigma_{n,i}$ als $\sigma(m\{n\})\{i\}$, mit n als Ganzzahl der Bildernummer und i als Ganzzahl der GRP-Nummer.

2.2 Kamera und Quadrokopter

Bild 2 zeigt die verwendete Kamera und den Quadrokopter. Das Gesamtfluggewicht beträgt etwa 1200 g, wovon Kamera inkl. Schutzgehäuse etwa 130 g ausmachen.

Videoaufnahmen wurden mit einer *GoPro Hero3+ Black-Edition* durchgeführt, deren Kosten etwa CHF 400.– betragen (Februar 2015). Die Kameraeinstellungen wurden zu einer Auflösung von 4096×2160 px^2 und einer Bildrate von 11.988 Hz gewählt. Das Videobild wurde unter Verwendung des Wi-Fi 2.4 Ghz-Band von der Kamera live auf ein Smartphone am Boden übertragen, um die passende Aufnahmeposition zu finden. Während der Aufnahme selbst stand kein Videobild zur Verfügung.

Als Quadrokopter wurde ein *DJI Phantom FC40* eingesetzt, welcher leicht modifiziert wurde durch eine leistungsstärkere LiPo-Batterie, den Einbau eines Flugschreibers *Flytrex Core V1* sowie eines zusätzlichen Dämpfungssystems der Kamerabefestigung. Auf eine kardanische Aufhängung (Gimbal) der Kamera wurde bewusst verzichtet, um dem Grundsatz eines Low-Cost-Projekts gerecht zu werden. Dies hat den Vorteil, dass durch das kleinere Fluggewicht die Flugdauer ver-

längert wird. Typischerweise konnten so Flugzeiten von rund 6 min erreicht werden. Die Kosten für das Flugsystem belaufen sich auf etwa CHF 400.– (Februar 2015).

2.3 Seeding

Zur Visualisierung des Strömungsfelds ist es notwendig, einen adäquaten Tracer zu finden. Dieser sollte so gleichmässig wie möglich auf der Wasseroberfläche aufgebracht werden, um im Anschluss eine PIV-Analyse der Videoaufnahmen durchführen zu können. Die Tracerpartikel sollten folgende Eigenschaften aufweisen: ein hinreichendes Schwimmverhalten, einen signifikanten Farbkontrast, eine passive Reaktion zur Strömung, die Möglichkeit zur einfachen Massenproduktion, adäquate Dimensionen (idealerweise > 3×3 px^2 auf dem Kamerachip) und keine Beeinträchtigung der Wasserqualität. Gewählt wurden Fichtenholzschindeln mit einer Stärke von 2 bis 3 mm, zugeschnitten auf Abmessungen von 60×60 mm^2. Für jede Videosequenz wurden einzelne Chargen von rund 1500 Stück zur Strömung gegeben. Die Schindeln wurden zuvor für einige Minuten in Eimern gewässert, um ihr Gewicht und die mögliche Wurfweite bei der Zugabe zu erhöhen.

2.4 Georeferenzpunkte (GRP)

Ufernahe GRP werden als Ankerpunkte gebraucht, um die einzelnen Videobilder zu einer einheitlichen Referenz zu skalieren und zu transformieren. Die GRP wurden aus fabrikationstechnischen Gründen auf das Format A1 (594×841 mm^2) mit einem schwarzen Mittelkreis von 90 mm Durchmesser und einem schwarzen Ring mit innerem und äusserem Radius von 130 mm bzw. 240 mm auf PVC-Banner gedruckt. *Bilder 3a + b* zeigen in der oberen linken Ecke einen solchen GRP. Die Mittelpunktkoordinaten der GRP wurden mit einem *Leica GNSS-1200 System* mit einer Standardabweichung von $\sigma \leq 0.05$ m terrestrisch eingemessen.

3. Bildbearbeitung

3.1 Notwendigkeit der Bildbearbeitung

Die aufgenommenen Kamerabilder haben in ihrer Rohversion für eine PIV-Auswertung im Wesentlichen zwei Unzulänglichkeiten. Zum einen erzeugt die asphärische Glaslinse einen Fischaugeneffekt, der mit der kostenfreien Software GoPro-Studio nachträglich im Rahmen des Postprocessings korrigiert wurde. Zum anderen führen die Schwankungen des fliegenden

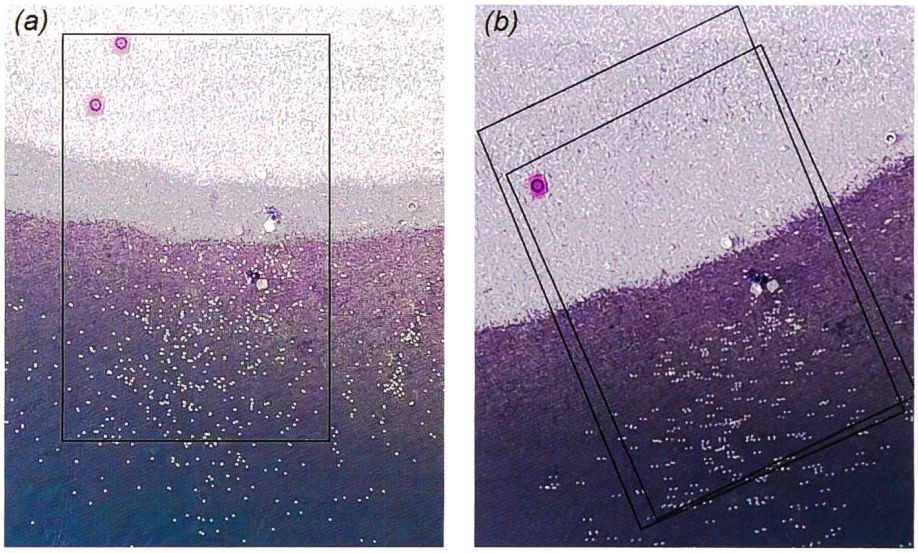


Bild 3. Überblendung von je zwei Bildausschnitten bei Zeitabstand von 500.5 ms, (a) offensichtlicher Versatz verursacht durch unvermeidliche instabile Position des UAV, (b) nach Georeferenzierung, wodurch auch die Bewegung der Tracer deutlich wird; schwarze Rechtecke beziehen sich auf gleiche Areale von 300×450 px^2 bzw. ~10.3×15.5 m^2 und zeigen die Verformung der Ausschnitte im Zuge der Georefenzierung (Verdrehung und Stauchung).

Quadrokopters zu einem instabilen Kamerabild, sodass jedes Einzelbild einen leicht anderen Bildausschnitt zeigt. *Bild 3* zeigt jeweils zwei überblendete, Linsen-korrigierte Ausschnitte aus einer Videoaufnahme mit einem Zeitabstand 500.5 ms. *Bild 3a* zeigt den starken Versatz, der trotz des Einsatzes einer Gyrostabilisierung und einer vibrationsdämpfenden Kamerabefestigung entsteht. *Bild 3b* zeigt den, mit dem nachfolgend beschriebenen Verfahren stabilisierten, Ausschnitt der überblendeten Bilder. In den *Bildern 3a + b* ist je ein Areal einer Fläche von 300×450 px^2 (~10.3×15.5 m^2) markiert, in dem neben dem GRP und den Seedingpartikeln eine Person sichtbarist. Auf Basis der rechnerisch stabilisierten Aufnahmen *(Bild 3b)* kann im Anschluss eine bildbasierte Geschwindigkeitsberechnung durchgeführt werden.

3.2 Methode zur Einzelbildstabilisierung

Die Grundidee zur Stabilisierung der Videos besteht darin, jedes Einzelbild mittels der ufernahen GRP zu georeferenzieren. Die dreistufige Prozedur lässt sich wie folgt zusammenfassen:

- Vordefinition von sog. Regions Of Interests (ROIs) für jeden einzelnen, sichtbaren GRP
- Identifizierung der ROIs-Umrandungen und der entsprechenden GRP-Koordinaten [*x, y*] (px) auf sämtlichen Bildern der Videosequenz (Speeded-Up-Robust-Features-(SURF-Schema, *Herbert* et al., 2008)
- Georeferenzierung von jedem Einzelbild mittels projektiver Transformation auf Hoch- und Rechtswertkoordinaten [*N, E*] (m).

Das Verfahren wurde mithilfe des Softwarepaketes MATLAB (Mathworks) implementiert (*Detert* und *Weitbrecht* 2015a).

Das Ergebnis ist eine weitgehende Eliminierung der Relativbewegung des Kamerabilds, so dass die Überblendung zweier Kamerabilder nur noch die strömungsbedingte Tracerbewegung zeigt. Positive Nebeneffekte sind, dass die Bilder georeferenziert und skaliert werden. Im Hinblick auf die finale Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit wurde hier für die Rasterinterpolation eine Skalierung von $PPM = 32$ px m^{-1} gewählt.

3.3 Genauigkeit der Videostabilisierung

Nachstehend werden drei Fehlereinflüsse diskutiert, die nach der Videostabilisierung verbleiben. Sie haben direkten Einfluss auf die Genauigkeit der Geschwindigkeitsmessungen und entstehen aufgrund des approximativen, d.h. nicht idealen Charakters der durchgeführten projektiven Transformation.

Positionsfehler

Die Residuen [*r, s*] und ihre Euklidische Distanz R_{EN} geben Aufschluss über den Positionsfehler der Geolokalisierung. Sie quantifizieren, wie präzise das Ergebnis nach projektiver Transformation (Weltkoordinaten [N_T, E_T]) mit den «exakten» Punktko-

ordinaten aus terrestrischer Vermessung (Weltkoordinaten [*N, E*]) übereinstimmt. Die mathematische Definition lautet

$$[r, s] = [N_T, E_T] - [N, E] \quad (1)$$

$$R_{EN} = (r^2 + s^2)^{1/2}. \quad (2)$$

Als Kennwert des mittleren Positionsfehlers für jeden GRP wurde $\mu_{n,i}$ (R_{EN}) für die Testflüge berechnet und weist typische Werte zwischen 0.17–0.39 m auf. Die ermittelte Streuung $\sigma_{n,i}$ (R_{EN}) für eine Zeitreihe der Lage eines einzelnen GRP rangiert jedoch lediglich zwischen 0.03–0.05 m. Damit liegt auch der absolute Fehler der Position von im Anschluss berechneten Geschwindigkeitsvektoren bei rund 0.17–0.39 m, bleibt jedoch für den Einzelvektor näherungsweise konstant.

Deskalierungsfehler

Ein Folgeeffekt des Positionsfehlers ist eine Deskalierung der realen Distanzen in jedem Einzelbild. Ein Mass für die Intensität D_{EN} resultiert aus allen Kombinationen der Distanzen innerhalb eines Einzelbildes der transformierten GRP im Verhältnis zu den tatsächlich vor Ort geoterrestrisch vermessenen Distanzen. Die berechnete Standardabweichung $\sigma_{n,i}$ (D_{EN}) zeigt, dass dieser Fehler die Genauigkeit pro Einzelbild mit weniger als 1% beeinflusst, wobei einzelne Distanzunterschiede als Extremwert um bis zu ±2% schwanken können. Deskalierungsfehler können daher vernachlässigt werden.

Verbleibende Versatzgeschwindigkeit nach Videostabilisierung

Auch nach der Einzelbildstabilisierung verbleibt eine geringe Relativbewegung auf der Videosequenz und somit eine scheinbare Geschwindigkeit über Grund [u_{EN}, v_{EN}]. Diese und ihr euklidischer Wert U_{EN}, sind definiert als

$$[u_{EN}, v_{EN}] = [(r_{n+i} - r_n), (s_{n+i} - s_n)] / (t_{n+i} - t_n) \quad (3)$$

$$U_{EN} = (u_{EN}^2 + v_{EN}^2)^{1/2}. \quad (4)$$

Ein exemplarischer Whiskerplot für U_{EN} eines Einzelflugs wird in *Bild 4* gezeigt. Der Median von neun Werten für U_{EN} liegt zwischen 0.02–0.05 m/s. Der Streubereich für einen Einzelwert von U_{EN} kann relativ gross werden: Maximalwerte erreichen bis zum Dreifachen des Medians (ohne Betrachtung der Ausreisser).

In *Tabelle 2* sind die statistischen Parameter für U_{EN} aus allen fünf Flügen zusammengestellt. Typischerweise ergibt sich für $\mu_{n,i}$ (U_{EN}) als Kennzahl des mittleren Geschwindigkeitsfehlers ein Wert von ~0.03 m s^{-1}, mit einer kleinen Streuung von $\sigma_{n,i}$ (U_{EN}) ≤ 0.01 m s^{-1}. Absolute Maxima liegen näherungsweise zwischen 0.06–0.11 m s^{-1}, was in der Grössenordnung der langsamsten erwarteten Oberflächengeschwindigkeiten liegt. Im Vergleich mit der scheinbaren Geschwindigkeit über Grund vor der Videostabilisierung ist der verbleibende Fehler um den Faktor 50–100 reduziert. Der vorliegende Fehler erlaubt nun eine exakte Auswertung hinsichtlich der zeitlich gemittelten Fliessgeschwindigkeiten.

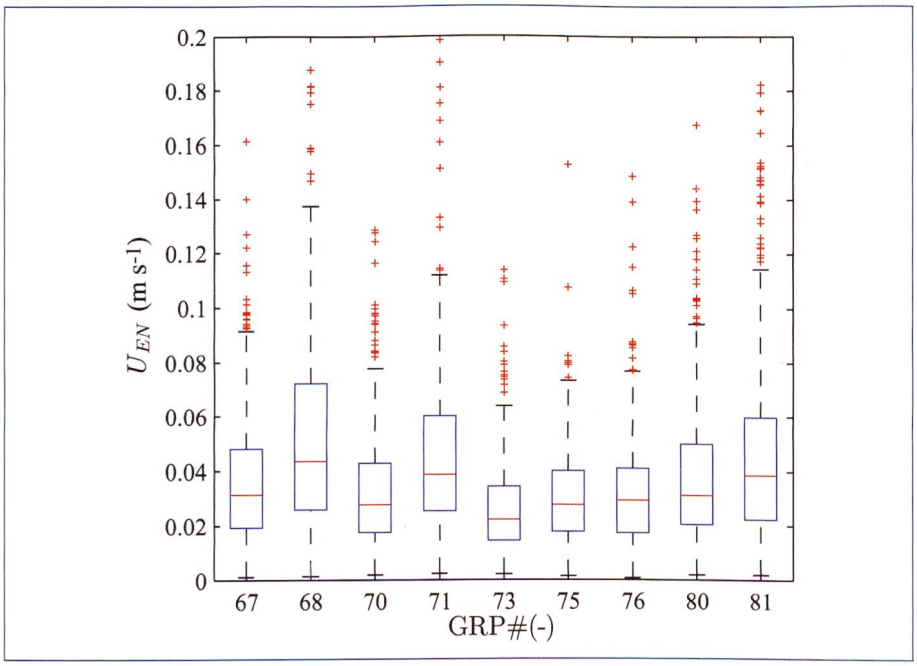


Bild 4. Exemplarische Whiskerplot-Darstellung der verbleibenden Versatzgeschwindigkeiten U_{EN} für alle im Video zum Flug M2T1 detektierten GRP; horizontale (rote) Linie = Median, (blaue) Box = 25- und 75-Perzentile, (schwarze) Whiskers = Extremwerte, (rote) Pluszeichen = Ausreisser.

4. Oberflächengeschwindigkeiten

4.1 Bearbeitung der Bildqualität

Das wesentliche Ziel dieses Arbeitsschritts ist, die Seedingpartikel im Bild optisch hervorzuheben. Dazu wurde jedes Bild in ein 8-bit-Graustufenbild umgewandelt sowie anschliessend mit einem 7×7 Gaussfilter und einem Highpassfilter bearbeitet. Weiter wurde der Bildkontrast durch Filterung mit einem kontrastlimitierenden adaptiven Histogrammabgleich verstärkt. Uferbereiche wurden ausgeblendet.

4.2 Bestimmung der Fliessgeschwindigkeiten mit Particle Image Velocimetry (PIV)

Die Fliessgeschwindigkeiten wurden unter Verwendung der georeferenzierten und gefilterten Bilder anhand eines PIV-Algorithmus bestimmt. Mit der Anwendung eines Kreuzkorrelationsverfahrens zwischen zwei Bildpaaren mit bekannter Zeitschrittweite wurde die Verschiebung von mehreren Partikeln bzw. Intensitätsmustern analysiert und die Geschwindigkeitsvektoren auf einem Raster dargestellt. Damit ist das gesamte Geschwindigkeitsfeld in Zeit und Raum diskretisiert, was im Vergleich zu Ergebnissen aus typischen Punktmessungen ein deutliches mehr an Information bei deutlich kürzerer Messdauer darstellt. Eine weiterführende Beschreibung der Methodik grossskaliger Oberflächen-PIV-Messungen wird z. B. in *Weitbrecht* et al. (2002) gegeben.

Im vorliegenden Fall wurde die MATLAB-basierte Open-Source-Software PIVlab von *Thielicke* und *Stamhuis* (2014) genutzt, um die Geschwindigkeiten zu bestimmen. Die Bildanalyse wurde an Bildsequenzpaaren von [(1:6), (6:12), (12:18), ...] durchgeführt, um einen hinreichenden Zeitversatz zu erreichen. So werden Fehler aufgrund von unzureichend kleinen Partikelverschiebungen minimiert. Der PIV-Algorithmus wurde auf einem Gitter von 32×32 px^2 mit 50% Überlappung angewendet. Mit einer Rasterskala von *PPM* = 32 px m^{-1} für die georeferenzierten Einzelbilder führt dies zu einem Vektorabstand von 0.5 m und einer zeitlichen Auflösung von 2.0 Hz. Sowohl unrealistisch grosse Strömungsvektoren als auch Fehlvektoren im Uferbereich wurden automatisch herausgefiltert.

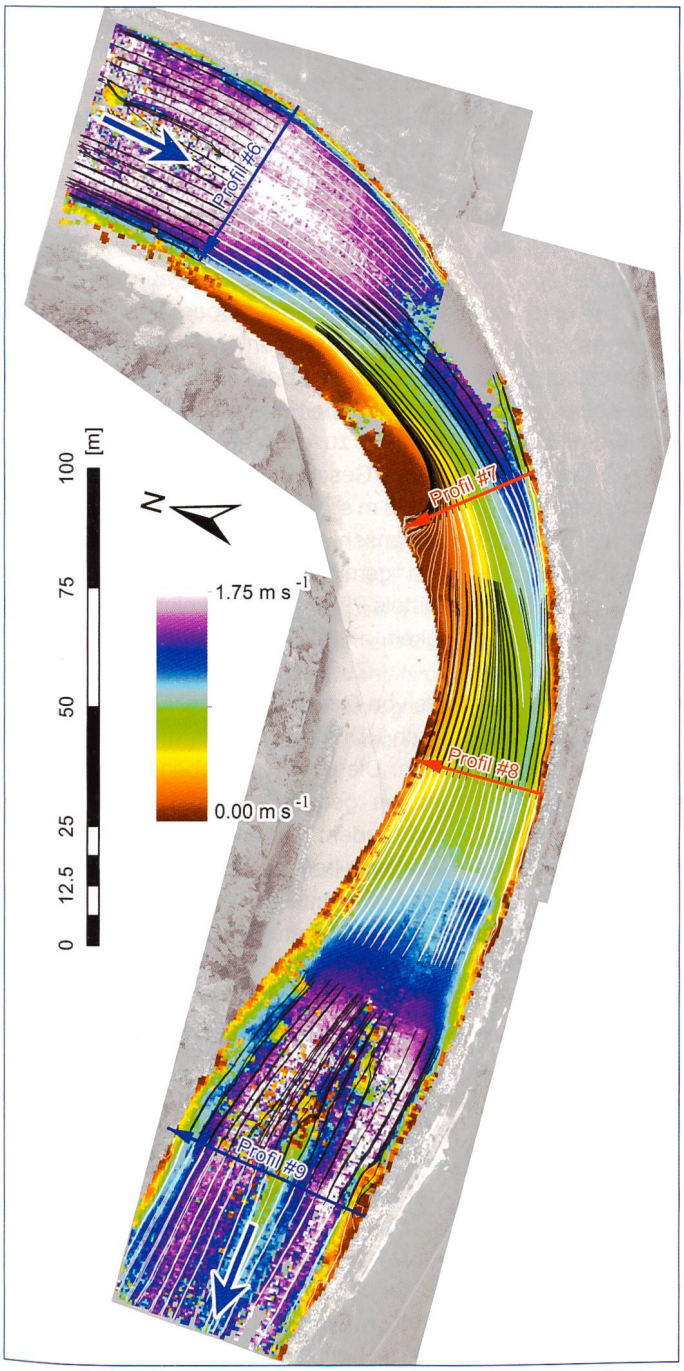


Bild 5. Zeitlich gemitteltes Feld der Oberflächenströmung in einer Rasterauflösung von 1.0×1.0 m² und 50% Überlappung, entsprechend einem Vektorabstand von 0.5 m, sowie Stromlinien.

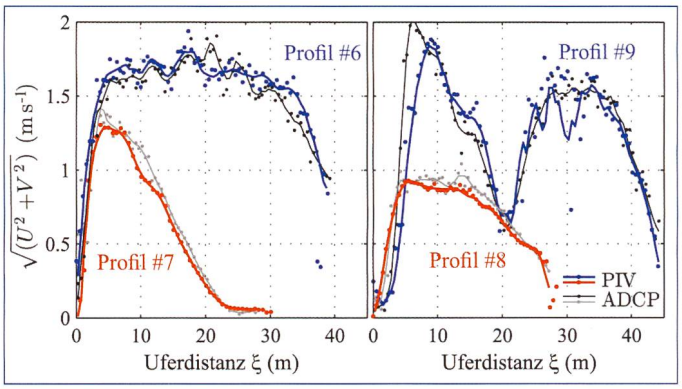


Bild 6. Vergleich von Geschwindigkeitsprofilen aus 3D-ACDP Messung in den obersten 0.25 m der Strömung und Airborne PIV (Punkte: Rohdaten, Linien: geglättet mit Savitzky-Golay Filter); Lage der Profile: siehe Bild 5.

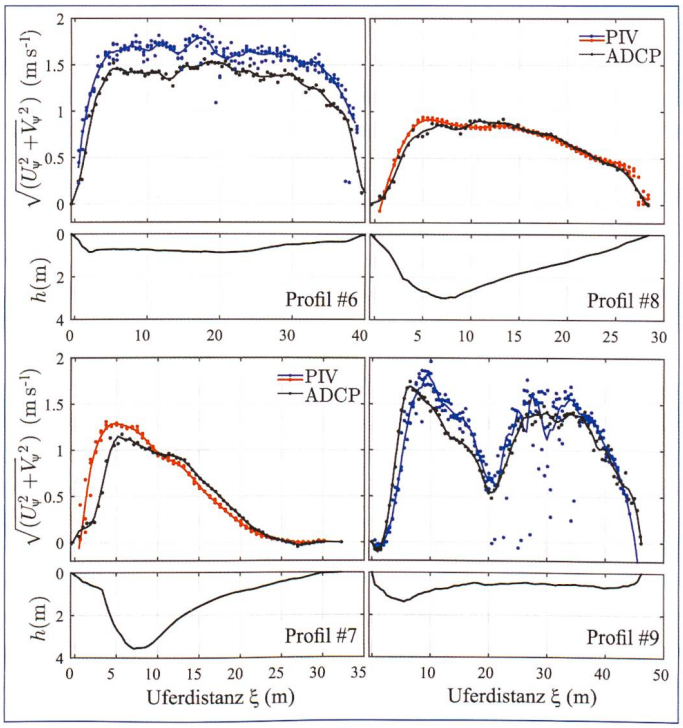


Bild 7. Vergleich von Geschwindigkeitsprofilen aus tiefengemittelter 3D-ACDP-Messung und Airborne-PIV an der Wasseroberfläche (Punkte: Rohdaten, Linien: geglättet mit Savitzky-Golay-Filter) sowie zugehörige Querprofile der Wassertiefen; Lage der Profile: siehe Bild 5; Hinweis: horizontale Achsen nicht äquidistant.

4.3 Zeitlich gemitteltes Strömungsfeld

Bild 5 gibt einen georeferenzierten Überblick über das zeitlich gemittelte Strömungsfeld innerhalb eines Flussabschnitts von 310 m Länge. Zusätzlich sind zugehörige Stromlinien dargestellt. Diese zeigen eine Strömungskonzentration zum äusseren Ufer hin. Auch Lage und Ausdehnung der Strömungsablösungszone entlang des inneren Kurvenbereiches sind deutlich erkennbar. Mit dem neuartigen Airborne-PIV-System können demnach zeitlich gemittelte Oberflächenströmungsfelder gut beschrieben werden.

Bild 6 zeigt vier Geschwindigkeitsprofile, die mit einem 3D-Acoustic-Doppler-Current-Profiler (ADCP, SonTek-River-Surveyor M9) nahe der Wasseroberfläche quasi simultan gemessen wurden. Im Vergleich mit den Geschwindigkeitsdaten aus den PIV-Ergebnissen zeigt sich durchweg eine gute Übereinstimmung. Allerdings werden in den *Bildern 5 + 6* auch Abschnitte mit grösseren Streuungen sichtbar, welche auf eine nicht hinreichende Dichte der Seedingpartikel oder auf den Einfluss von Wellen (Weisswasser und Oberflächenreflektionen) zurückzuführen sind.

Flug #	U_{EN}	
	$\mu_{n,i}$ (m/s)	$\sigma_{n,i}$ (m/s)
M1T1	0.032	0.009
M2T1	0.029	0.006
M3T1	0.018	0.005
M3T2	0.033	0.007
M4T1	0.031	0.011

Tabelle 2. Charakteristische Parameter der scheinbaren Geschwindigkeit über Grund U_{EN} (verbleibender Fehler aus Versatzgeschwindigkeit) sämtlicher Flüge nach Videostabilisierung.

4.4 Durchflussschätzung

Bild 7 zeigt über die gesamte Wassertiefe gemittelte ADCP-Geschwindigkeitsprofile im Vergleich zu den Oberflächengeschwindigkeiten aus den PIV-Ergebnissen. Im Gegensatz zu *Bild 6* zeigen hier beide Profile die Komponente von $(U_\Psi^2+V_\Psi^2)^{1/2}$, die senkrecht zur jeweiligen Profilachse ξ steht, wobei U bzw. V die jeweilige Geschwindigkeitskomponente nach Ost bzw. Nord ist und Ψ die Projektion indiziert. Weiter ist in *Bild 7* auch die mit dem ADCP gemessene Wassertiefe h angegeben. Damit wird der Durchfluss folgendermassen abgeschätzt

$$Q = \int\sqrt{(U_\Psi^2+V_\Psi^2)}\, h \, d\xi \qquad (5)$$

Das PIV-System gibt nur die Information zur Oberflächengeschwindigkeit, im Gegensatz zur in *Bild 7* ebenfalls dargestellten, über die ganze Wassertiefe gemittelten Geschwindigkeit aus den ADCP-Messungen. Der Einsatz der PIV-Ergebnisse ist bei der Bestimmung der Durchflussrate also limitiert. Um die daraus entstehenden Abweichungen näher zu betrachten, wird zunächst die Abweichung ϕ vom Durchfluss Q_{Gauge}, gemessen an der Pegelstation Andelfingen, definiert als

$$\phi_i = Q_{Gauge} / Q_j. \qquad (6)$$

Dabei gibt der Index j entweder die Bestimmung über ADCP oder PIV. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass die direkte Übertragung der Messdaten der Pegelstation unzureichend ist, da die Station 4.4 km oberstrom des PIV-Messbereiches liegt. Die Durchflussmessung Q_{Gauge} wird daher auf die Situation an der Eggrankkurve umgerechnet, indem pauschal ein zeitlicher Versatz von 1 h angesetzt wird, entsprechend einer mittleren Fliessgeschwindigkeit von 1.22 m s^{-1}. Es ergibt sich für die Messkampagne ein «in-situ»-Durchfluss abfallend von 36.0 m^3 s^{-1} um 13:00 Uhr bis 33.5 m^3 s^{-1} um 21:00 Uhr.

Tabelle 3 listet die Ergebnisse für Q_j und ϕ_j an den vier Querprofilen #6–9 auf (zur Lage siehe *Bild 5*). Die über die ADCP-Messungen ermittelte Durchflussrate stimmt gut mit den Angaben der Messstation überein, mit $\sigma(\phi_{ADCP})$ bei lediglich 1%. Das Verhältnis von Q_{Gauge} zu Q_{PIV}, d.h. ϕ_{PIV}, liegt bei 0.88–0.99. Die direkte Verwendung der Oberflächengeschwindigkeit führt also zu einer Überschätzung des Durchflusses. Ein typischer Korrekturwert aus der Literatur ist ϕ = 0.85, mit Werten von 0.9 für grössere Wassertiefen und 0.8 für geringere Wassertiefen (*Creutin* et al., 2003). Damit bestätigt der bei Profil #6 gefundene Wert von ϕ_{PIV} = 0.88 tendenziell diese Literaturangaben. Profil #6 liegt im Einströmbereich der Kurve und hat damit ein relativ ungestörtes Geschwindigkeitsprofil. Die Profile #7–9 liegen jedoch in der Kurve bzw. in deren Nachlaufbereich, die dort deutlich abweichenden (höheren) ϕ_{iPIV} Werte sind folglich erklärbar. Die Betrachtung der Situation zeigt, dass die Strömung deutlich von 3D-Effekten dominiert sein muss, sodass eine pauschale Abschätzung der tiefengemittelten Geschwindigkeiten über die Oberflächengeschwindigkeiten nicht genau ist. Im Fall einer homogenen Strömungsverteilung, wie bei Profil #6, erscheint die Annahme von ϕ_{PIV} = 0.85–0.90 jedoch zu einer befriedigenden Abschätzungen der Durchflussrate zu führen. Eine extensivere Messkampagne ist notwendig, um die volle Variabilität von ϕ_{PIV} zu interpretieren.

5. Schlussfolgerungen und Ausblick

Das Konzept einer Quadrokopter-basierten Geschwindigkeitsmessung konnte erfolgreich geprüft werden. Damit ist der Grundstein für eine neue Low-Cost-Messtechnik gelegt. Die Anschaffungskosten des getesteten Messsystems, bestehend aus modifiziertem Quadrokopter, Actioncam und Seedingmaterial betragen rund CHF 1000.–. Das eingesetzte Fluggerät in Kombination mit der Kamera eignet sich unter optimalen Bedingungen zur Erfassung hochwertiger Videoaufnahmen. Das angewendete Verfahren zur Bildstabilisierung anhand der automatisierten Georeferenzierung über Erkennung von Bodenreferenzpunkten bewährt sich zur Aufbereitung der Videoaufnahmen. Unvermeidbare Kameraschwankungen werden bis zu einer verbleibenden scheinbaren Geschwindigkeit über Grund von ~0.03 m s^{-1} bzw. ~1 px s^{-1} herausgefiltert. Die anschliessende Berechnung der zeitlich gemittelten Geschwindigkeitsfelder mittels PIV liefert somit eine hohe Genauigkeit.

Zusätzlich lassen sich mit Kenntnis von Geometrie- bzw. Querprofildaten auch Durchflussschätzungen vornehmen. Die quasi als Nebenprodukt anfallenden georeferenzierten Bilder eignen sich zudem zur Dokumentation des Ist-Zustands bei Revitalisierungs- oder sonstigen Baumassnahmen. In Kombination mit der Software BASEGRAIN (*Detert* und *Weitbrecht*, 2012; *Detert* und *Weitbrecht*, 2013) lassen sich bei gröberen Kiesbänken auch Korngrössenanalysen mit den aufgenommenen Videosequenzen durchführen.

Verbesserungs- und Optimierungspotenzial des Verfahrens ist bei folgenden Punkten gegeben:

- Verwendung eines Gimbals zur Reduktion von Kameraschwankungen
- Vergrösserte GRP zur verbesserten Detektion von Referenzpunkten
- Korrektur der Linsenverzerrung durch Bestimmung der effektiven Kameraparameter anstelle von pauschalen Black-Box-Korrekturwerten gemäss Kamerahersteller
- Gleichmässige Verteilung, Erhöhung der Anzahl und Variation der Abmessungen der Tracerpartikel je nach Flussbreite und Flughöhe (alternativ: Nutzung von Lichtreflexionen an Oberflächenwellen)
- Einbezug vollständiger Zeitreihen anstelle der Nutzung nur jedes sechsten Videobilds (wie im vorliegenden Fall) zur Herausfilterung unpräziser Datenpunkte bei GRP-Detektion oder einzelner PIV-Fehlvektoren analog Despiking-Methode (*Goring* und *Nikora*, 2002)
- Durchflussschätzungen nach *Johnson* und *Cowen* (2014), wobei die lokale Abflusstiefe über turbulente Län-

Profil #	ADCP				PIV			
	Zeit (h:min)	Q_{ADCP} (m^3/s)	Q_{Gauge} (m^3/s)	ϕ_{ADCP} (-)	Zeit (h:min)	Q_{PIV} (m^3/s)	Q_{Gauge} (m^3/s)	ϕ_{PIV} (-)
6	17:30	34.3	34.6	1.01	15:00	40.3	35.3	0.88
7	18:15	34.7	34.4	0.99	[16:45;17:30;18:15]	36.8	~34.5	0.94
8	19:00	34.5	34.1	0.99	[16:45;17:30;18:15]	35.5	~34.5	0.97
9	19:45	34.4	33.9	0.99	17:30	34.7	34.5	0.99

Tabelle 3. Vergleich der Abflussschätzungen Q_j und deren Korrekturfaktoren ϕ_j, j, Lage der Profile: siehe Bild 3.

genskalen geschätzt wird und somit keine direkte Messung der aktuellen Abflusstiefe erforderlich ist.

Ziel ist es nun, dieses Verfahren zur Anwendungsreife zu bringen. Es soll einsetzbar sein für Zwecke des flussbaulichen Monitorings, zur Durchflussschätzung oder für weitere Fragestellungen bei grossräumigen Strömungsstrukturen. Dem Endnutzer soll damit in naher Zukunft ein möglichst universelles Bildbearbeitungs-Tool für UAV-basierte Luftbildvideos zur Anwendung im Fluss- und Wasserbau zur Verfügung gestellt werden.

Danksagung

Wir danken der Monitron AG, Altdorf, für die Messung und Aufbereitung der 3D-ADCP-Daten und für die terrestrische Einmessung der GRP. Ebenfalls möchten wir die wertvolle Einführung in die UAV-Technologie durch *Maros Bláha* (Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich) sowie *Dominik Smaniotto* wertschätzen.

Finanzierung

Teile dieser Arbeit wurden unterstützt durch das Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL) des Kantons Zürich.

Bemerkung

Der vorliegende Aufsatz orientiert sich stark an der Masterarbeit von *Jürg Trachsel* (2014) und an zwei englischsprachigen Veröffentlichungen von *Detert* und *Weitbrecht* (2015a+b).

Parameter

D_{EN}	= Deskalierungsfehler (-)
GRP	= Georeferenzpunkt (-)
h	= Wassertiefe (m)
h_g	= Flughöhe über Grund (m)
i, j, n	= Ganzzahlwerte (-)
m	= Median (..)
N, E	= Hochwert (Northing) und Rechtswert (Easting) (m)
N_T, E_T	= Hochwert (Northing) und Rechtswert (Easting) berechnet über Transformation (m)
PPM	= Pixel pro Meter (px m^{-1})
Q	= Durchfluss ($m^3 s^{-1}$)
r, s	= Residuen des Positionsfehlers (m)
R_{EN}	= $(r^2 +_s^2)^{1/2}$ (m)
t	= Zeit (s)
U, V	= Oberflächengeschwindigkeit (m s^{-1})
u_{EN}, v_{EN}	= Scheinbare Geschwindigkeit über Grund nach Videostabilisierung (m s^{-1})
U_{EN}	= $(u_{EN}{}^2 + v_{EN}{}^2)^{1/2}$ (m s^{-1})
x, y	= Bildkoordinaten (px)
μ	= Mittelwert (..)
ϕ_j	= Tiefengemittelter Korrekturwert zur Abschätzung von Q aus Oberflächengeschwindigkeiten (-)
ξ	= Profilachse (m)
Ψ	= Achse senkrecht zur Profilachse (m)
σ	= Standardabweichung (..)

Referenzen

Adrian, R.J. (2005). Twenty years of particle image velocimetry. Exp. Fluids 39(2), 159–169.

Creutin, J.D., Muste, M., Bradley, A.A., Kim, S.C., Kruger, A. (2003). River gauging using PIV-technique: proof of concept experiment on the Iowa River. J. Hydrol. (277), 182–194.

Detert, M., Weitbrecht, V. (2012). Automatic object detection to analyze the geometry of gravel grains – a free stand alone tool. River Flow 2012, R.M. Muños (Ed.), Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-62129-8, 595-600.

Detert, M., Weitbrecht, V. (2013). User guide to gravelometric image analysis by BASEGRAIN. Advances in Science and Research, S. Fukuoka, H. Nakagawa, T. Sumi, H. Zhang (Eds.), Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-00062-9, 1789–1795.

Detert, M., Weitbrecht, V. (2014a). Helicopter based surface PIV experiments at Thur River. Proc. 7th Int. Conf. River Flow Lausanne, Switzerland, 2003–2008.

Detert, M., Weitbrecht, V. (2014b). Oberflächen-PIV aus Helikopteraufnahmen. Intl. Symposium Wasser- und Flussbau im Alpenraum, R. Boes (Ed.), Zürich, 389–398.

Detert, M., Weitbrecht, V. (2015a). A low cost airborne velocimetry system: proof of concept. J. Hydr. Research, DOI: 10.1080/00221686.2015.1054322.

Detert, M., Weitbrecht, V. (2015b). Estimation of flow discharge by an airborne-velocimetry-system. Congrès SHF Drones et hydraulique. Paris, April 2015, im Druck (La Houille Blache, DRONES-6).

Dramais, G., Le Coz, J., Camenen, B., Hauet, A. (2011). Advantages of a mobile LSPIV method for measuring flood discharges and improving stage-discharge curves. J. Hydroenviron. Res. 5(4), 301–312.

Fujita, I., Kunita, Y. (2011). Application of aerial LSPIV to the 2002 flood of the Yodo River using a helicopter mounted high density video camera. J. Hydroenviron. Res. 5(4), 323–331.

Goring, D., Nikora, V. (2002). Despiking Acoustic Doppler Velocimeter data. J. Hydraul. Eng. 128(1), 117–126.

Hauet, A., Creutin, J.D., Belleudy, P. (2008). Sensitivity study of large-scale particle image velocimetry measurement of river discharge using numerical simulation, J. Hydrol. 349(1-2), 178–190.

Herbert, B., Ess, A., Tuytelaars, T., Van Gool, L. (2008). SURF: Speeded Up Robust Features. Comp. Vision Image Underst. 110(3), 346–359.

Johnson, E., Cowen, E. (2014). Remote monitoring of volumetric discharge based on surface mean and turbulent metrics. Proc. 7th Int. Conf. River Flow Lausanne, Switzerland, 1935–1941.

Mende, M., Pellandini, S., Grober, O., Lüthi, P., Oplatka, M. (2014). Ökologische Aufwertung der Thur an der Eggrankkurve bei Andelfingen ZH. «Wasser Energie Luft», 2014 (2), 123–128.

Muste, M., Fujita, I., Hauet, A. (2008). Large-scale Particle Image Velocimetry for measurements in riverine environments. Special Issue on Hydrologic Measurements, Water Resour. Res. 44, doi: 10.1029/2008WR006950.

Pagano, C., Tauro, F., Porfiri, M., Grimaldi, S. (2014). Development and testing of an unmanned aerial vehicle for large scale particle image velocimetry. Proc. ASME 2014 Dynamic Systems and Control Conf., San Antonio, USA, DSCC2014-5838.

Sukhodolov, A., Uijttewaal, W.S.J., Schnauder, I., Sukhodolova, T.A., Erdbrink, C., Brevis, W., Garcia, X.-F., Pusch, M.T., Gabel, F. (2007). Quantitative visual methods for natural stream: Examples and perspectives. Proc. 32nd IAHR Congress Venice, Italy, 68–78.

Thielicke, W., Stamhuis, E.J. (2014). PIVlab: Time-resolved digital Particle Image Velocimetry tool for MATLAB (version: 1.35). dx.doi.org/10.6084/m9.figshare.1092508

Trachsel, J. (2014). Grundlagenarbeiten für ein River Monitoring. Masterarbeit. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich, Zürich, unveröffentlicht

Weitbrecht, V., Kühn, G., Jirka, G.H. (2002). Large-scale PIV-measurements at the surface of shallow water flows. Flow Meas. Instr. 13(5-6), 237–245.

Anschrift der Verfasser

Martin Detert, Wiss. Mitarbeiter Abteilung Flussbau, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich, Hönggerbergring 26, CH-8093 Zürich
detert@vaw.baug.ethz.ch

Jürg Trachsel, Doktorand Abteilung Schnee und Permafrost, WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, SLF Davos, Flüelastr. 11, CH-7260 Davos Dorf, juerg.trachsel@slf.ch

Volker Weitbrecht, Leiter Abteilung Flussbau, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich, Hönggerbergring 26, CH-8093 Zürich
weitbrecht@vaw.baug.ethz.ch

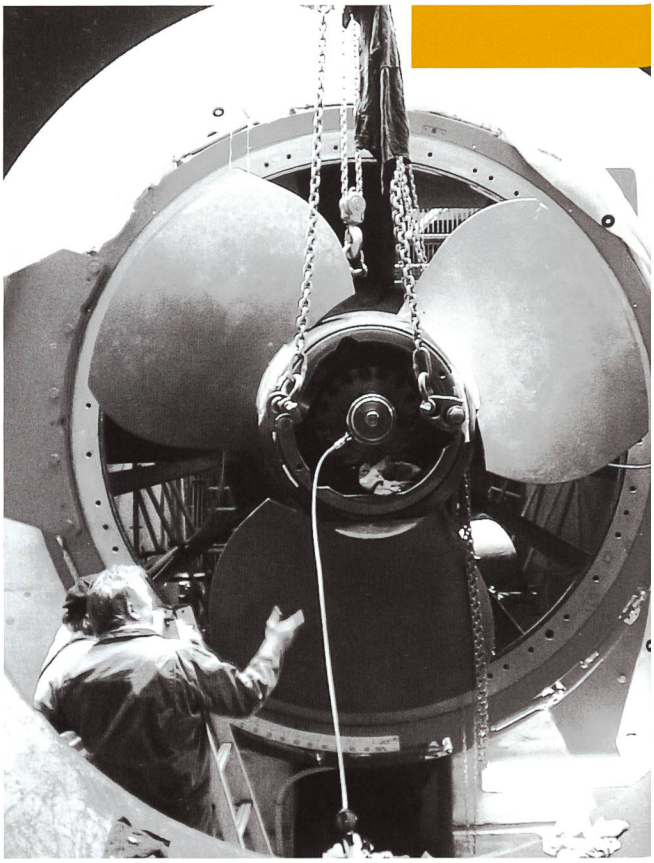
PROJEKTPLUS

Ihr Experte für Wasserkraftwerke

- Projektmanagement
- Jahres-Inspektionen und Revisionen
- Zustandsexpertisen und Abnahmen

Thomas Blau

PROJEKTPLUS AG
Kreuzstrasse 51
CH-6010 Kriens
078 638 06 78
www.projekt-plus.ch



KORROSIONSSCHUTZ
SPRITZBETON/SPRITZMÖRTEL
ABDICHTUNGEN

ISOPERMAPROOF

isopermaproof.ch