

Bildgebende Durchflussmessung in einem breiten Gewässer mittels eines Multi-View-Systems

Maxence Carrel, Salvador Peña-Haro, Beat Lüthi, Robert Lukes

Zusammenfassung

Die Entwicklung eines Multi-View-Systems für die Surface-Structure-Image-Velocimetry-Methode (SSIV) erlaubt Abflussmessungen in breiten Gewässern. Der Einsatz einer sogenannten Pan-Tilt-Zoom-Kamera erlaubt das optische Messen des Wasserpegels und der Oberflächengeschwindigkeit an verschiedenen vordefinierten Stellen des Flussquerschnittes mit einer einzigen Kamera. Das Messgerät misst von der Zollbrücke auf dem Alpenrhein in der Nähe von Montlingen, wo der Flussquerschnitt bei Niedrigwasserbedingungen ca. 100 m beträgt. Die Rohergebnisse einer ersten Messkampagne mit Messintervallen von 10 Minuten ergeben einen mittleren Abfluss von 190 m³/s. Ein Vergleich mit Abflussdaten, die mit einer Pegel-Abfluss-Beziehung bestimmt wurden, zeigt einen mittleren quadratischen Fehler von 8.4 m³/s, was einem relativen Unterschied von 4.4 % entspricht.

Résumé

Un système d'hydrométrie vidéo multi-vues a été développé dans le but d'effectuer de la mesure de débit dans de larges cours d'eau en utilisant la technique de vélocimétrie par image des structures de surfaces. Ce système multi-vues est rendu possible par l'utilisation d'une caméra motorisée performante permettant de mesurer le niveau d'eau et la vitesse d'écoulement en surface à différents endroits prédéfinis de la section du cours d'eau considéré de manière fiable et précise. Ce système est installé sur le Zollbrücke sur le Rhin dans la région de Montlingen, où la largeur de ce fleuve mesure environ 100 m en conditions d'étiage. Sur une première campagne de mesures d'un mois avec intervalle de 10 minutes, les données brutes obtenues donnent un débit moyen de 190 m³/s. Une comparaison avec des données radar révèlent une erreur quadratique moyenne de 8.4 m³/s, ce qui représente une différence relative de 4.4%.

1. Einführung

Der Volumenstrom oder Abfluss ist eine wichtige Variable für diverse Aufgaben, wie die Analyse von hydrologischen Prozessen, die Planung und der Betrieb von wasserbaulichen Bauwerken oder die Dimensionierung von Hochwasserschutzbauten oder Wasserkraftwerken. Dabei sind kontinuierliche Abflussdaten je nach Messstandort schwierig und kostenintensiv.

Um kontinuierliche Abflussdaten zu bestimmen, kommen oft intrusive Messgeräte wie Druck- oder akustische Sensoren zum Einsatz, die im Gerinne eingebaut werden müssen. Anhand von Pegel-Abfluss-Beziehungen ist es möglich, mit dem gemessenen Wasserpegel den Abfluss empirisch mithilfe eines Potenzsatzes zu

ermitteln (*Turnispeed et al., 2010*). Dabei sind die notwendigen konstruktiven Massnahmen, um diese Sensoren im Gerinne einzubauen und vor Hochwasser zu schützen, oft kostenintensiv.

Ein alternativer und innovativer Ansatz sind bildgebenden Messverfahren, bei denen der Abfluss anhand von kurzen Videosequenzen berechnet wird. Dieses Verfahren wird oft als Large Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV) bezeichnet (*Hauet et al., 2008, Muste et al., 2011*) und ist sehr versatil, weil die dazu notwendigen Kameras ganz einfach an Brückenpfeilern oder sonstigen schon bestehenden Strukturen installierbar sind. LSPIV-Methoden benötigen aber den Zusatz von Tracerpartikeln, was bei kontinuierlichen Messungen ungünstig ist. Kürzlich wurde aber

die Surface-Structure-Image-Velocimetry (SSIV-)Methode entwickelt, bei der natürliche Strukturen wie Schaum oder Wirbel, die sich an der Gewässeroberfläche bilden, als Tracers benutzt werden können, sodass der Einsatz von künstlichen Tracerpartikeln nicht mehr erforderlich ist (*Leitão et al., 2018*). Solche Systeme wurden bereits erfolgreich an alpinen Wildbächen, an kleineren Flüssen oder in Kanalisationen eingesetzt (*Carrel et al., 2019, Peña et al., 2019*), aber noch nie an Gewässern, die deutlich breiter sind als 50 m.

Dieser Beitrag stellt nun ein SSIV-Messsystem vor, welches mit einer einzigen Pan-Tilt-Zoom-Kamera automatisch durch vorprogrammierte Schwenk- und Neigerichtungen patrouilliert und so nacheinander mehrere Flussausschnitte filmt, ausgewertet und schliesslich für die Durchflussberechnung kombiniert. Mit diesem Multi-View-Verfahren kann somit das gesamte Oberflächengeschwindigkeitsfeld und der Wasserpegel eines 100 m breiten Gewässers gemessen werden, was kombiniert die Berechnung des Abflusses erlaubt.

2. Methoden

Sichtbare Punkte mit bekannten Koordinaten (sog. Ground Control Points [GCP]) an den Ufern im Sichtfeld sind bei bildgebenden Messverfahren für die Kamerakalibrierung erforderlich (*Creutin et al., 2003, Kim et al., 2006, Jodeau et al., 2008*). Die Kamerakalibrierung erlaubt sowohl den genauen Standort der Kamera zu ermitteln als auch deren optische Verzerrung zu korrigieren. Da die GCP bei Messungen an breiteren Gewässern mit einem Multi-View-Verfahren für gewisse Ansichten nicht im Sichtfeld zu erkennen sind (z.B. wenn die Kamera nur Wasser sieht), wurde eine neue Kalibrierungsmethodik entwickelt.

Bei PTZ-Kameras sind für jede Kamera-Einstellung sowohl die Schwenk- und Neigungsposition als auch der Zoomfaktor bekannt. Bei der PTZ-Kalibrierung geht es darum, die ursprüngliche Orientierung der



Kamera zu bestimmen, um so eine Beziehung zwischen den gemessenen Kamerawinkeln, dem Zoomfaktor, der Fokusslänge und der tatsächlichen Ausrichtung der Kamera zu bestimmen. Dafür werden im Minimum die Koordinaten von 6 GCPs mit ihren dazugehörigen Schwenk- und Neigungspositionen eingemessen. Nach erfolgter Kalibrierung ist es bei bekanntem Wasserpegel möglich, für jede Kameraansicht und bei beliebigem Zoomfaktor jedes Pixel im Sichtfeld einem Punkt im 3-D-Raum zuzuordnen.

Nach der Kamerakalibrierung kann der Abfluss folgendermassen berechnet werden: Der Wasserpegel wird zuerst automatisch mit einer sogenannten Segmentierung (Erkennung der Grenzlinie zwischen dem Wasser und dem Ufer) am Ufer ermittelt. Dann ist es mit der SSIV-Technologie möglich, in mehreren, die ganze Flussbreite abdeckenden Ansichten die Geschwindigkeit an der Gewässeroberfläche zu messen. Um die Geschwindigkeit

zu bestimmen, kommt eine Kreuzkorrelationsmethode zum Einsatz. Dafür werden die einzelnen Bilder der Videosequenz in sogenannte Subwindows unterteilt. Bei der Kreuzkorrelation wird für jedes einzelne Subwindow eines Bildes in den entsprechenden Subwindows des nächsten Bildes nach Mustern gesucht, die im ursprünglichen Fenster auch vorhanden waren. Diese Muster werden typischerweise durch Wellen, Schaum oder turbulente Wirbel gebildet, die sich an der Oberfläche befinden. Somit ist es möglich, für jedes Fenster einen Verschiebungsvektor mit Einheit Pixel/Bild zu bestimmen. Da jedes Pixel einem Punkt im 3-D-Raum entspricht und die Aufnahmegeschwindigkeit der Kamera bekannt ist, kann diese Verschiebung in einen Geschwindigkeitsvektor mit Einheit in m/s umgerechnet werden.

Die Anwendung der SSIV-Methode bei den Videosequenzen aller Kameraansichten liefert ein Geschwindigkeitsfeld an der

Oberfläche des betrachteten Flussabschnitts. Die gemessenen Geschwindigkeiten in Strömungsrichtung erlauben, ein Geschwindigkeitsprofil an der Oberfläche zu bestimmen. Dann wird angenommen, dass der Flussquerschnitt sich im Flussabschnitt nicht verändert. Falls der Flussabschnitt sich verändern sollte, als Folge eines Hochwasserereignisses zum Beispiel, muss er neu, z. B. mit klassischen Verfahren erfasst werden. Schliesslich kommt die ISO-Norm 748:2007 zum Einsatz, um die mittlere Geschwindigkeit in diskreten Abschnitten zu bestimmen. ISO 748:2007 ist ein Standard, der die mittlere Geschwindigkeit eines Querschnittsabschnitts als Funktion der Tiefe, der Oberflächengeschwindigkeit und eines Strickler-Rauigkeitskoeffizients ausdrückt. Eine Integration der mittleren Geschwindigkeit über die Tiefe und den Flussquerschnitt führt dann zum Abfluss.

3. Fallstudie

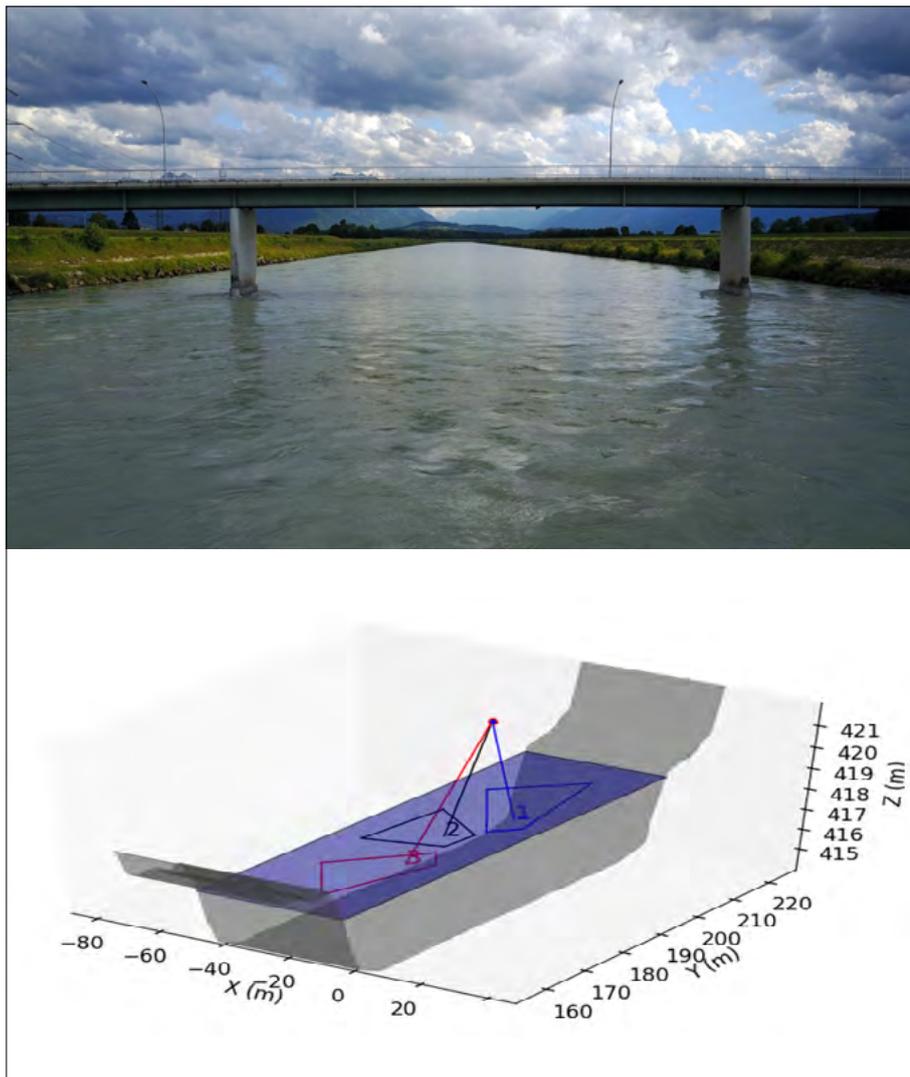


Abbildung 1: Luftbild des Alpenrheins und der Zollbrücke, auf der die Kamera installiert ist (links). Kamera Standort und die verschiedene Kameraansichten auf der die Oberflächengeschwindigkeitmessungen durchgeführt werden (rechts).

Das hier vorgeführte Messsystem ist auf der Zollbrücke auf dem Alpenrhein an der schweizerischen-österreichischen Grenze installiert. Die Breite des Flussbettes beträgt an dieser Stelle ca. 100m unter Niedrigabflussbedingungen und die Breite des Überflutungsgebietes beträgt ca. 200m (siehe Abbildung 1, oben). Eine Messstelle des BAFU ist auch auf dieser Brücke vorhanden und mit einem SOMMER-RQ-30-Radar ausgerüstet.

Die PTZ-Kamera (Vivotek SD9364-EH) patrouilliert zwischen drei verschiedenen Ansichten, die so angeordnet sind, dass das gesamte Oberflächengeschwindigkeitsfeld mit genügend starkem Zoom gemessen werden kann (Abbildung 1). Eine zusätzliche Ansicht erlaubt noch, den Wasserpegel am rechten Ufer zu messen (Abbildung 2A). Die Kamera nimmt alle 10 Minuten eine 5 Sekunden lange Videosequenz für jede Ansicht auf. Die Videos werden mit eHD-Auflösung und einer Frequenz von 30 Bildern per Sekunde aufgenommen.

Mithilfe eines von der Kamera mitgeführten und mitgezoozten Infrarot-Beamers lassen sich Messungen auch nachtsüber zuverlässig durchführen. Dies erlaubt, den Wasserpegel auch nachtsüber optisch am Ufer zu messen (Abbildung 2B). Der Infrarot-Beamer ist aber zu schwach, um die Geschwindigkeit in allen Ansichten zu messen, deswegen wird die Geschwindigkeit nachtsüber nur unmittelbar unter der Brücke gemessen, wo die Beleuchtung des Beamers zufriedenstellende Messungen erlaubt.

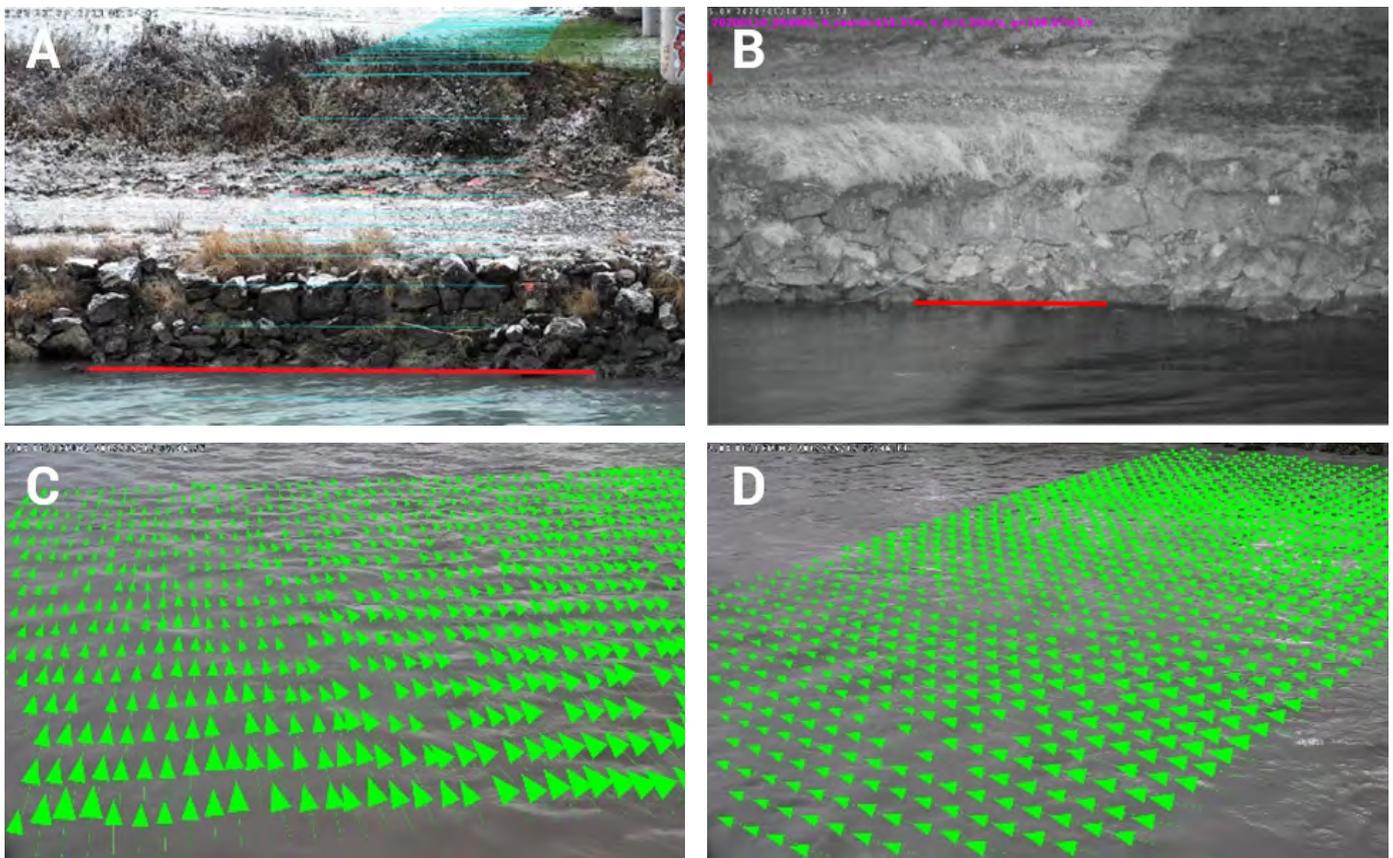


Abbildung 2: (A) Beispiel eines Bildes der Kameraansicht, die für die automatische Wasserpegelerkennung gebraucht wird (rote Linie). Die rosa Punkte stellen GCP und die türkisen Linien Isolinien des Flussquerschnitts dar. (B) Beispiel einer nächtlichen Wasserpegelmessung. Oberflächengeschwindigkeitsfelder für die Ansichten, die sich in der Mitte (C) und auf der rechten Seite (D) des Flusses befinden.

4. Resultate und Diskussion

Die gemessenen Oberflächengeschwindigkeiten in Strömungsrichtung der verschiedenen Kameraansichten und das damit bestimmte Geschwindigkeitsprofil sind in der *Abbildung 3* dargestellt. Für jede Kameraansicht wird ein 5 Sekunden langer Film aufgenommen und ausgewertet. Jeder farbige Punkt auf der Abbildung entspricht der Messung in einem Subwindow. Die Streuung, die sich beobachten lässt, ist einerseits auf ausschliesslich turbulente Fluktuationen und andererseits auf eine von den Brückenpfeilern verursachte **?** der Karman-Strasse zurückzuführen. Der Fit des Geschwindigkeitsprofils ist so parametrisiert, dass er diese Fluktuationen optimal ausmitteln kann. Das Messsystem merkt sich die Parameter des Fits tagsüber, wenn Messungen in alle Ansichten durchgeführt werden. Nachtsüber wird dann nur in der mittleren Ansicht gemessen, aber der Fit wird mit den gleichen Parametern durchgeführt, so dass die Beeinträchtigung durch die geringere Beleuchtung des Infrarot-Beamers optimal kompensiert werden kann.

Die optisch gemessenen Daten wurden mit den Abflussdaten verglichen, die

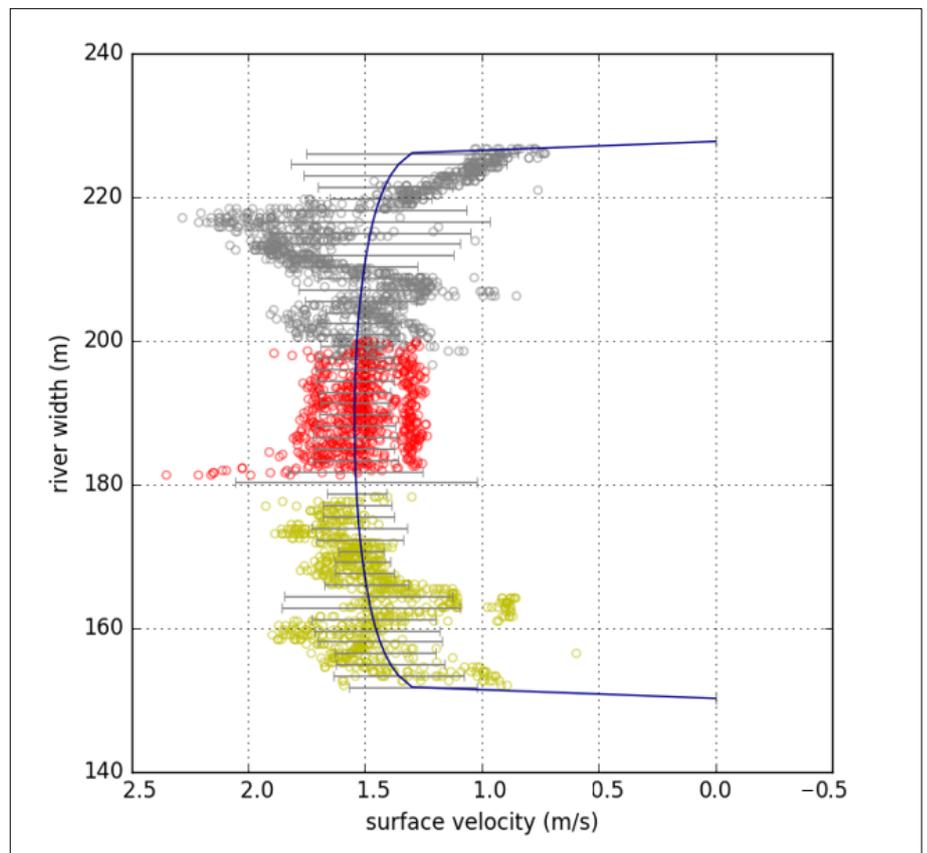


Abbildung 3: Geschwindigkeitskomponente, die auf der linken Seite (gelb), in der Mitte (rot) und auf der rechten Seite (grau) des Rheins gemessen wurden. Die blaue Kurve stellt der Fit der mit den gemessenen Daten angepasst wurde.

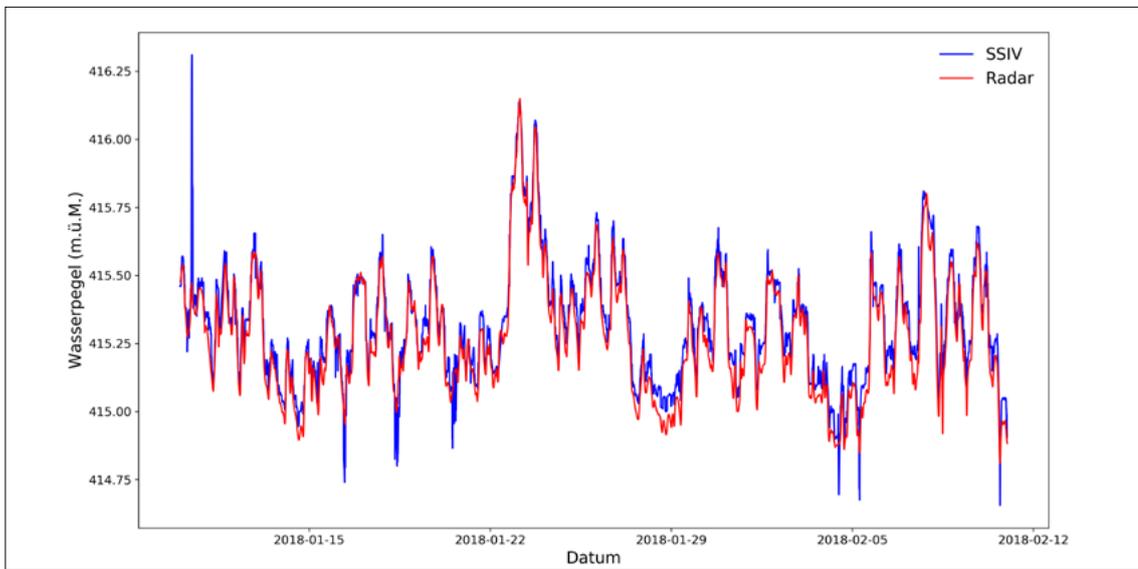


Abbildung 4: Zeitreihen der Wasserpegelmessungen mit dem optischen Verfahren (rot) und dem Radar (schwarz) für eine Zeitperiode vom 10. Januar bis zum 10. Februar 2019.

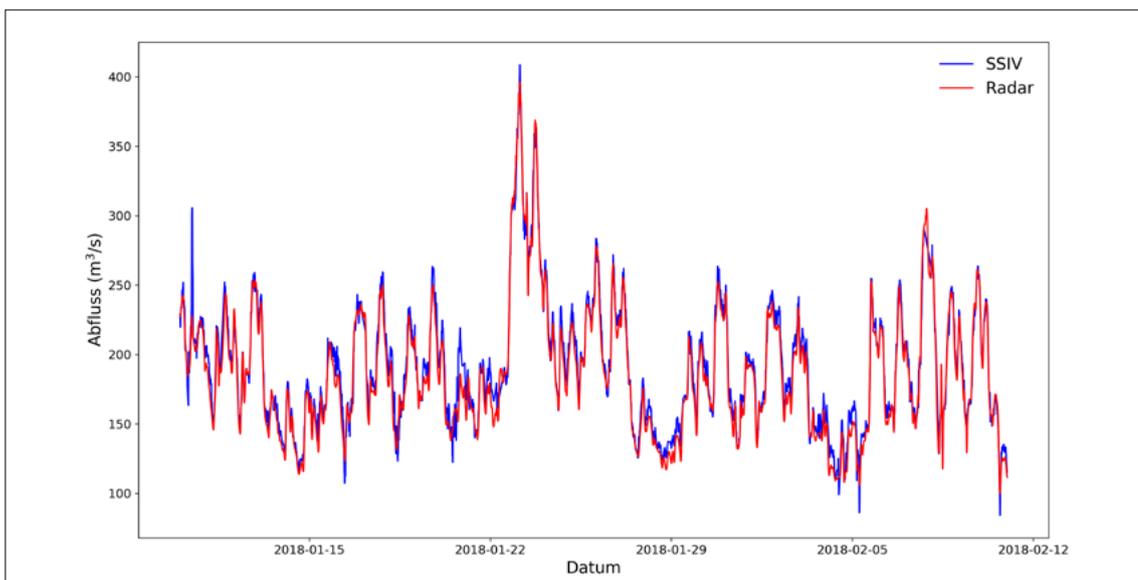


Abbildung 5: Zeitreihen der Abflussmessungen mit der SSIV (rot) und dem Radar (schwarz) für eine Zeitperiode vom 10. Januar bis zum 10. Februar 2019.

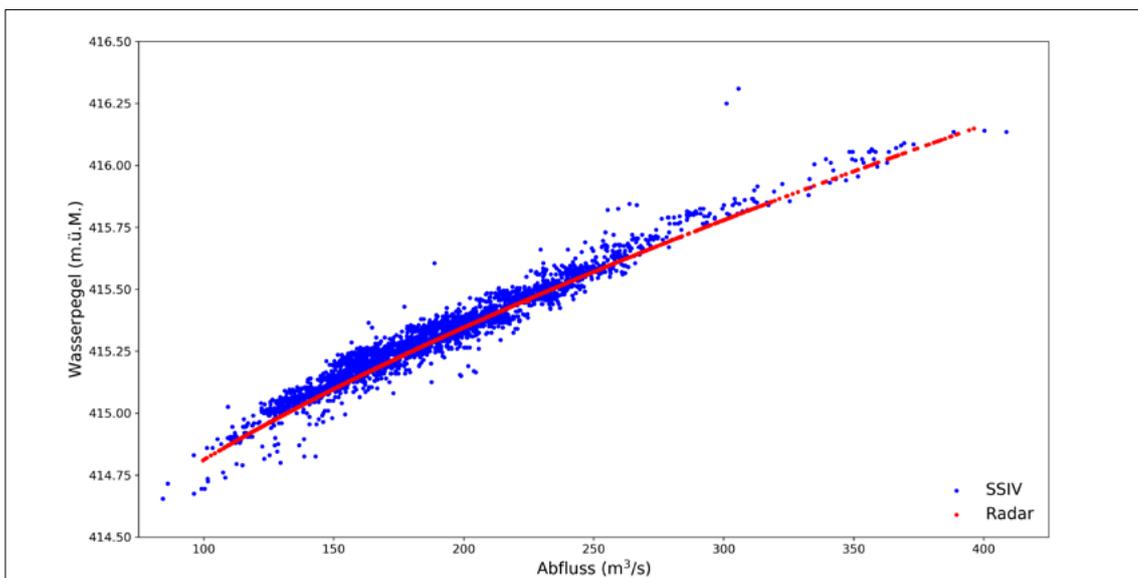


Abbildung 6: Gemessener Wasserpegel als Funktion des Abflusses für das optische System (rot) und für den Radar (schwarz).

mittels einer Pegel-Abfluss-Beziehung bestimmt wurden. Dabei ist aber wichtig zu betrachten, dass die optischen Daten nicht nachbearbeitet wurden, d.h., Ausreisser wurden nicht eliminiert. Die *Abbildungen 4 und 5* stellen Zeitreihen der gemessenen Wasserpegel- und Abflussdaten in 10-minütigen Intervallen für eine Zeitperiode vom 10. Januar bis zum 10. Februar 2019 dar. Auf den ersten Blick scheinen die optisch gemessenen und die Referenzdaten einigermassen gut übereinzustimmen. Die zum Teil starken täglichen Fluktuationen dieser Zeitreihen sind auf die Aktivität der grossen Anzahl Wasserkraftwerke zurückzuführen, die sich im Einzugsgebiet des Alpenrheins befinden. Diese hohen Fluktuationen erlauben, einen interessanten Vergleich über eine breite Spanne zwischen den beiden Messsystemen durchzuführen.

Um einen quantitativen Vergleich zwischen den Datenreihen durchzuführen, wurde der quadratische mittlere Fehler berechnet. Dieser beträgt 6.8 cm für den Wasserpegel, was auf die aus der *Abbildung 4* ersichtlichen Ausreisser zurückzuführen ist. Der quadratische mittlere Fehler des Abflusses beträgt $8.487 \text{ m}^3/\text{s}$, was relativ betrachtet nur 4.44 % des mittleren Abflusses für diese Zeitperiode ausmacht. Die beobachteten Ausreisser bei der optischen Wasserpegeldetektion könnten mit dem Einbau eines redundanten

Wasserpegelsensors (z.B. Radar- oder Drucksensor) oder mit einer automatischen Filterung aufgehoben werden.

Die Wasserpegelwerte sind in der *Abbildung 6* als Funktion der Abflusswerte dargestellt. Dabei fällt auf, dass die optische ermittelten Daten eine gewisse Streuung aufweisen. Das optische System erlaubt es, gleichzeitig den Durchfluss und den Wasserpegel zu messen, sodass laufend Pegel-Abfluss-Beziehungen generiert werden können. So können Änderungen des Querschnitts automatisch detektiert werden, wenn die gemessenen Daten zum Beispiel nach einem Hochwasserereignis plötzlich nicht mehr auf die vorher beobachtete Pegel-Abfluss-Beziehung zurückfallen.

Ein weiterer interessanter Aspekt der optischen Methode ist, dass für jede Messung und jede Kamerasicht ein sogenanntes Beweisbild gespeichert wird (*Abbildung 2*). Darauf sind die gemessenen Wasserpegel und Geschwindigkeitsfelder ersichtlich, sodass jede Messung bei Bedarf schnell plausibilisiert werden kann. Zusätzlich ist es möglich, in Echtzeit auf die Kamera des Messsystems zuzugreifen. Dies kann z.B. bei Hochwasser von Interesse sein, um z.B. die Umgebung der Messstelle zu beobachten. Im Hochwasserfall kann das System verwendet werden, um optisch Hochwassermeldungen zu plausibilisieren, dabei kann auch noch zusätz-

liche die Kontrolle über die Kamera übernommen werden, sodass die Umgebung der Messstelle inspiziert werden können.

5. Fazit

Diese Studie stellt den Einsatz eines bildgebenden Verfahrens mit einer PTZ-Kamera am Alpenrhein in der Nähe der Zollbrücke vor. Mit einem automatischen Multi-View-SSIV-Verfahren können der Wasserpegel und das gesamte Oberflächengeschwindigkeitsfeld über eine Breite von 100m im Dauerbetrieb gemessen werden. Der Abfluss lässt sich aus der Kombination dieser gemessenen Daten, der Information über den Flussquerschnitt und dessen Rauigkeit berechnen. Das System misst kontinuierlich in einem 10-Minuten-Takt. Der mittlere Abfluss der betrachteten Messperiode beträgt $190 \text{ m}^3/\text{s}$, und ein Vergleich mit Referenzwerten zeigt einen mittleren quadratischen Fehler von $8.437 \text{ m}^3/\text{s}$, was einem relativen Unterschied von weniger als 5% entspricht. Insgesamt sind die Ergebnisse, die vom optischen Messverfahren geliefert werden, vielversprechend, und das System hat das Potenzial, an noch breiteren Gewässern angewendet zu werden. Nachfolgestudien werden die Robustheit des Systems und dessen Ergebnisse über längere Zeitperioden sowie den Einfluss von möglichen Störfaktoren wie Wind oder Schnee untersuchen.

Quellen:

Carrel, M., Peña-Haro S., Lüthi B., Hansen I. (2019). Berührungslose optische Durchflussmessung unter hochalpinen Verhältnissen. *Wasserwirtschaft* 11. 77 – 78.

Creutin, J. D., Muste, M., Bradley, A. A., Kim, S. C., Kruger, A. (2003). «River Gauging Using PIV Techniques: A Proof of Concept Experiment on the Iowa River.» *Journal of Hydrology* 277, no. 3–4. 182–94.

Fujita, I., Watanabe, H., Tsubaki, R. (2007). «Development of a Non-intrusive and Efficient Flow Monitoring Technique: The Space-time Image Velocimetry (STIV).» *International Journal of River Basin Management* 5, no. 2. 105–14.

Hauet, A., Creutin J.-D., Belleudy, P. (2008). «Sensitivity Study of Large-Scale Particle Image Velocimetry Measurement of River Discharge Using Numerical Simulation.» *Journal of Hydrology* 349, no. 1–2. 178–90.

Jodeau, M., Hauet, Paquier, A., Le Coz, J., Dramais, G. (2008). «Application and Evaluation of LS-PIV Technique for the Monitoring of River Surface Velocities in High Flow Conditions.» *Flow Measurement and Instrumentation* 19, no. 2: 117–27.

Jodeau, M., Hauet, A., Le Coz, J., Bercovitz, Y., Lebert, F. (2017). «Laboratory and Field LSPIV Measurements of Flow Velocities Using Fudaa-LSPIV a Free User-Friendly Software.» Madrid.

Leitão, J.P., Peña-Haro, S., Lüthi, B., Scheidegger, A., Moy de Vitry, M. (2018). «Urban Overland Runoff Velocity Measurement with Consumer-Grade Surveillance Cameras and Surface Structure Image Velocimetry.» *Journal of Hydrology* 565. 791–804.

Muste, M., Ho, H. -C., Kim, D. (2011). «Considerations on Direct Stream Flow Measurements Using Video Imagery: Outlook and Research Needs.» *Journal of Hydro-Environment Research* 5, no. 4. 289–300.

Patalano, A., Marcelo Garcia, C., Rodríguez, A. (2017). «Rectification of Image Velocity Results (RIV-eR): A Simple and User-Friendly Toolbox for Large Scale Water Surface Particle Image Velocimetry (PIV) and Particle Tracking Velocimetry (PTV).» *Computers & Geosciences* 109. 323–30.

Peña-Haro, S., Lüthi, B., Carrel, M., Scheidegger, A., Moy de Vitry, M., Leitão, J.P. (2019). «Es überschwemmt, und keiner sieht zu?! Oberflächenabflussmessungen im urbanen Raum mittels Videomaterial von Überwachungskameras.» *Aqua & Gas* (5).

Tauro, Flavia, Fabio Tosi, Stefano Mattoccia, Elena Toth, Rodolfo Piscopia, and Salvatore Grimaldi. «Optical Tracking Velocimetry (OTV): Leveraging Optical Flow and Trajectory-Based Filtering for Surface Streamflow Observations.» *Remote Sensing* 10, no. 12 (2018): 2010.

Turnipseed, D. Phil, and Vernon B. Sauer. «Discharge Measurements at Gaging Stations.» Reston, Virginia: U.S. Geological Survey, Techniques and Methods book 3, chap. A8, 87 p., 2010.

Autoren:

Maxence Carrel
Photrack AG, Ankerstrasse 16A, 8004 Zürich
carrel@photrack.ch

Salvador Peña-Haro
Photrack AG, Ankerstrasse 16A, 8004 Zürich

Beat Lüthi
Photrack AG, Ankerstrasse 16A, 8004 Zürich

Robert Lukes
Bundesamt für Umwelt, BAFU, Abteilung Hydrologie, Sektion Hydrometrie, Papiermühlstrasse 172, 3063 Ittigen