

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Conference Paper, Published Version

**Gisen, David**

## **Untersuchung einer ADCP-Interpolation im hochturbulenten Bereich mit dem numerischen 3D-Tool OpenFOAM®**

Schriftenreihe zur Wasserwirtschaft

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/100875>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Gisen, David (2013): Untersuchung einer ADCP-Interpolation im hochturbulenten Bereich mit dem numerischen 3D-Tool OpenFOAM®. In: 15. JUWI Treffen. Fachbeiträge zur Tagung vom 31. Juli bis 2. August 2013. Schriftenreihe zur Wasserwirtschaft 70. Graz: Technische Universität Graz. S. 181-186.

### **Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



# Untersuchung einer ADCP-Interpolation im hochturbulenten Bereich mit dem numerischen 3D-Tool OpenFOAM®

D. Gisen<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Bundesanstalt für Wasserbau, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich,  
Referat Flusssysteme I, Kußmaulstr. 17, D-76187 Karlsruhe, GERMANY

E-Mail: [david.gisen@baw.de](mailto:david.gisen@baw.de)

## Kurzfassung

Für die dreidimensionale numerische Simulation der Abströmung eines Wasserkraftwerks, wie sie zur Untersuchung bestimmter Fragestellungen der ökologischen Durchgängigkeit erforderlich ist, sind Naturmessungen zur Kalibrierung unabdingbar. Der für Naturmessungen in hochturbulenten Bereichen von der Bundesanstalt für Wasserbau eingesetzte Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) sendet vier Beams (Ultraschallsignale) in einem Winkel von 20° zur Vertikalachse aus, um daraus die Geschwindigkeitsverteilung über die Gewässertiefe zu ermitteln. Mit zunehmender Wassertiefe steigt dabei der Abstand zwischen den Beams.

Die vorliegende Untersuchung soll zeigen, ob die Interpolation über das entstehende Messvolumen zwischen den Beams sinnvoll sein kann. Es werden dabei keine Daten aus Naturmessungen, sondern ausschließlich numerisch erzeugte, zeitgemittelte Werte verwendet, die untereinander verglichen werden. Diese werden mit der quelloffenen, frei verfügbaren Toolbox OpenFOAM® generiert.

Turbulenzeflüsse werden durch Detached-Eddy-Simulation modelliert. Die absoluten Abweichungen zwischen den interpolierten Werten aus den Beams und den direkt ausgelesenen Werten sind überwiegend sehr gering und steigen erwartungsgemäß nur in Richtung Sohle tendenziell leicht an. Daraus wird geschlossen, dass die Interpolation auch im hochturbulenten Bereich zu belastbaren Ergebnissen führt.

## Einleitung

Für die dreidimensionale numerische Simulation der Abströmung eines Wasserkraftwerks, wie sie zur Untersuchung bestimmter Fragestellungen der ökologischen Durchgängigkeit erforderlich ist, sind Naturmessungen zur Kalibrierung der Einlassrandbedingung unabdingbar. Von der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) wird zur Geschwindigkeitsmessung ein Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) eingesetzt, da er von der Oberfläche aus ohne Beeinflussung der Strömung die Geschwindigkeiten in mehreren Höhenebenen bis zur Sohle hin messen kann. Details zur Technik und dem Vorgehen der BAW bei der Messung beschreiben (Klüber et al., 2013).

Der ADCP sendet vier sich auffächernde Beams (Ultraschallsignale) in einem Winkel von jeweils 20° zu einer gedachten vertikalen Achse unter dem Gerät aus, um daraus die Geschwindigkeiten in dieser Achse zu interpolieren (Abbildung 1). Durch die örtliche Wassertiefe  $h = 4,8$  m ergibt sich ein maximaler diagonaler Abstand von 3,5 m, über den an der Sohle interpoliert wird. Die vorliegende Untersuchung soll zeigen, ob die Interpolation über ein so großes Messvolumen sinnvoll sein kann. Ein unmittelbarer Vergleich in der Natur ist mit dem vorhandenen ADCP nicht möglich. Daher werden keine Daten aus Naturmessungen, sondern numerisch erzeugte Werte verwendet.

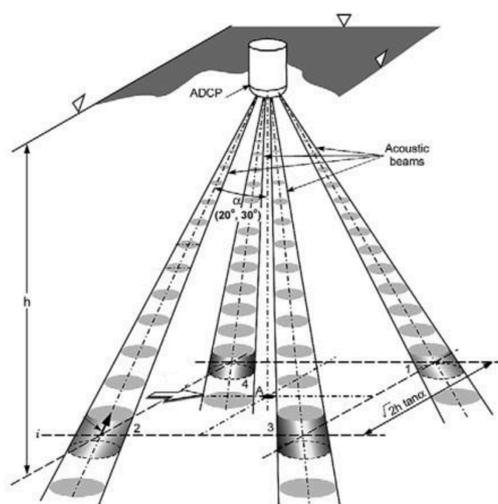


Abbildung 1: Messprinzip eines ADCP mit vier Beams (modifiziert nach Muste et al., 2004).

## Untersuchungsmethode

Zur Einschätzung der Genauigkeit der ADCP-Interpolation werden Daten aus dem dreidimensionalen numerischen Modell eines Kraftwerksunterwassers mit  $Q = 100 \text{ m}^3/\text{s}$  herangezogen (Abbildung 2). Ein direkter Vergleich in der Natur könnte beispielsweise unter größerem Aufwand mit einem fünfstrahligen ADCP durchgeführt werden.

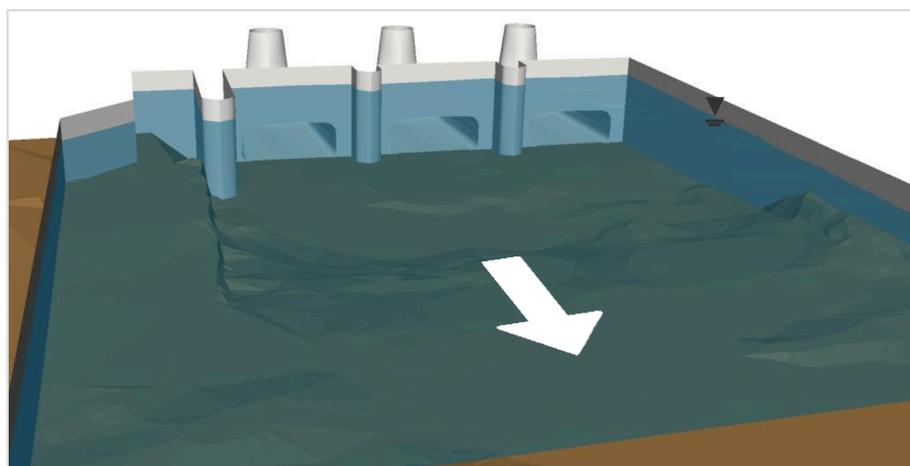


Abbildung 2: Ansicht des Kraftwerksunterwassers im numerischen Modell.

Zur Simulation wird der in der frei verfügbaren, quelloffenen Toolbox OpenFOAM (Weller et al., 1998) enthaltene instationäre Gleichungslöser *interFoam* eingesetzt. Er diskretisiert die inkompressiblen Navier-Stokes-Gleichungen basierend auf der Finite-Volumen-Methode und löst sie anschließend. Die Wasseroberfläche wird mittels der Volume-of-Fluid-Methode (VOF) bestimmt.

Das Rechengitter besteht primär aus Würfeln der Kantenlänge 0,1 m bis 0,8 m. An den Modellgrenzen werden diese automatisiert verformt, um die Geometrie möglichst exakt abzubilden.

Die möglichst genaue Erfassung der Turbulenz wird wegen ihrer Intensität im betrachteten Gebiet als besonders wichtig erachtet. Zur Turbulenzmodellierung wird die Detached-Eddy-

Simulation (DES, Spalart, 2009) verwendet. Diese kombiniert einen Reynolds-gemittelten Ansatz (RANS) in unmittelbarer Wandnähe mit einer Large-Eddy-Simulation (LES) im übrigen Gebiet. Dadurch werden einerseits die Anforderungen an die Auflösung des Rechengitters moderat gehalten, andererseits kann von einer vergleichsweise detaillierten Turbulenzmodellierung ausgegangen werden.

Durch die drei Einlassrandbedingungen unterhalb der Turbinen strömt ein Zufluss von insgesamt  $100 \text{ m}^3/\text{s}$  in das Modell. Der Wasserstand am Auslassrand wird über eine hydrostatische Druckrandbedingung konstant gehalten. Der Turbinendrall wird nicht modelliert. Eine Validierung anhand von Naturdaten ist nicht erforderlich, da ein relativer Vergleich zwischen numerisch erzeugten Daten durchgeführt wird. Dieser wird im Folgenden beschrieben.

Für die Analyse werden die lokalen Geschwindigkeitsvektoren an zwei gedachten ADCP-Positionen in der Kraftwerksabströmung ausgelesen. Diese befinden sich 10 m vom Saugrohrende entfernt auf Höhe des Wasserspiegels, also hier 4,8 m über der Sohle. Position 1 befindet sich 2 m links von der Turbinenachse, Position 2 befindet sich 3 m rechts davon, jeweils in Strömungsrichtung gesehen. Von den beiden Positionen aus werden jeweils vier gedachte Geraden im Winkel von  $20^\circ$  zur vertikalen Achse unter den ADCP-Positionen gezogen. Diese nähern die Beams in der Naturmessung an, fächern sich jedoch nicht zur Sohle hin auf wie diese (vgl. Abbildung 3). Die Auswirkungen dieser notwendigen Vereinfachung werden als gering eingeschätzt.

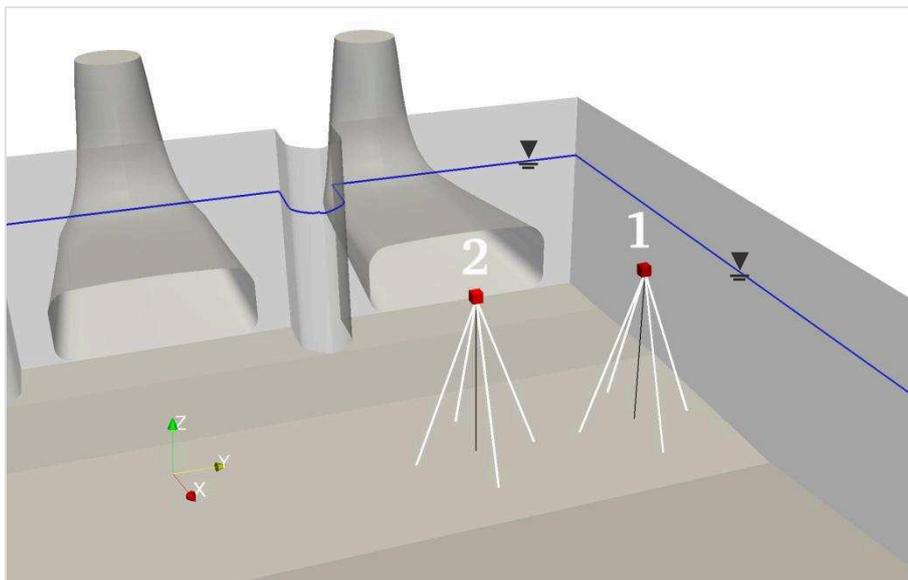


Abbildung 3: Darstellung der beiden ADCP-Positionen 1 und 2 sowie der vertikalen Achse (schwarz) im Mittelpunkt der vier seitlichen Beams (weiß).

Die Geschwindigkeitsvektoren werden auf jeweils sieben Höhenebenen ausgelesen. Vergleichbar zum beim ADCP eingesetzten Verfahren werden daraus sieben Geschwindigkeitsvektoren interpoliert. Die Höhenebenen haben einen vertikalen Abstand von  $0,80 \text{ m}$  zueinander. Dieser wird bei der obersten und untersten Höhenebene auf  $0,60 \text{ m}$  verringert, sodass ähnlich wie beim ADCP an der Wasseroberfläche und zur Sohle ein nicht erfasster Bereich von  $0,20 \text{ m}$  Höhe auftritt. Da vom ADCP nur ein Geschwindigkeitsvektor in Richtung des Beams erfasst wird, werden dort mithilfe von trigonometrischen Funktionen die x-Komponente aus den beiden Beams in x-Richtung, die y-Komponente aus den beiden Beams in y-Richtung und die z-Komponente aus allen vier Beams berechnet.

In dieser Untersuchung wird ein vergleichbares Verfahren angewandt, bei dem auch die richtungsabhängige Interpolation verwendet wird. Unterschiedlich ist, dass der Geschwindigkeitsvektor in der Simulation bereits komponentenweise vorliegt und nicht trigonometrisch von der Beam-Richtung aus in x-, y- und z-Komponente zerlegt werden muss.

Die instationären Ergebnisse werden über 300 Sekunden zeitgemittelt, um repräsentativ zu werden. Anschließend werden die interpolierten Geschwindigkeitsvektoren mit den direkt ausgelesenen Geschwindigkeitsvektoren in der vertikalen Achse unter den ADCP-Positionen verglichen.

## Resultate und Diskussion

Die Resultate können Tabelle 1 entnommen werden. Die zeitgemittelten gemessenen und interpolierten Geschwindigkeitskomponenten  $u$ ,  $v$  und  $w$  werden gegenübergestellt. Zur Auswertung werden ihre relative Abweichung und ihre absolute Abweichung voneinander berechnet. Diese sind definiert als

$$A_{rel} = \frac{V_{int} - V_{gem}}{V_{gem}} \cdot 100 [\%] \quad (1)$$

$$A_{abs} = V_{int} - V_{gem} [m/s]. \quad (2)$$

Tabelle 1: Gemessene und interpolierte Geschwindigkeitskomponenten im Vergleich.

|            | Höhe über Sohle (m) | Geschwindigkeitskomponenten (m/s) |       |      |              |       |      | Relative Abweichung (%) |      |     | Absolute Abweichung (m/s) |       |       |
|------------|---------------------|-----------------------------------|-------|------|--------------|-------|------|-------------------------|------|-----|---------------------------|-------|-------|
|            |                     | Gemessen                          |       |      | Interpoliert |       |      | u                       | v    | w   | u                         | v     | w     |
|            |                     | u                                 | v     | w    | u            | v     | w    |                         |      |     |                           |       |       |
| Position 1 | 4,60                | 0,47                              | -0,41 | 0,08 | 0,47         | -0,41 | 0,08 | 0                       | 0    | -1  | 0,00                      | 0,00  | 0,00  |
|            | 4,00                | 0,79                              | -0,21 | 0,22 | 0,78         | -0,20 | 0,21 | -1                      | -4   | -5  | -0,01                     | 0,01  | -0,01 |
|            | 3,20                | 1,20                              | -0,05 | 0,29 | 1,19         | -0,05 | 0,26 | -1                      | -10  | -11 | -0,01                     | 0,01  | -0,03 |
|            | 2,40                | 1,22                              | -0,06 | 0,16 | 1,25         | -0,04 | 0,16 | 2                       | -39  | -2  | 0,03                      | 0,02  | 0,00  |
|            | 1,60                | 1,11                              | 0,06  | 0,11 | 1,10         | 0,01  | 0,09 | 0                       | -76  | -19 | 0,00                      | -0,05 | -0,02 |
|            | 0,80                | 0,98                              | 0,17  | 0,06 | 1,00         | 0,10  | 0,05 | 2                       | -43  | -26 | 0,02                      | -0,07 | -0,02 |
|            | 0,20                | 0,95                              | 0,30  | 0,01 | 0,96         | 0,08  | 0,01 | 1                       | -75  | -34 | 0,01                      | -0,23 | 0,00  |
| Position 2 | 4,60                | 0,09                              | -0,13 | 0,03 | 0,09         | -0,13 | 0,03 | 0                       | -1   | 2   | 0,00                      | 0,00  | 0,00  |
|            | 4,00                | 0,36                              | -0,16 | 0,15 | 0,35         | -0,16 | 0,15 | -2                      | 0    | 1   | -0,01                     | 0,00  | 0,00  |
|            | 3,20                | 0,67                              | -0,13 | 0,23 | 0,67         | -0,11 | 0,23 | 0                       | -18  | 0   | 0,00                      | 0,02  | 0,00  |
|            | 2,40                | 0,97                              | -0,12 | 0,30 | 0,96         | -0,09 | 0,25 | 0                       | -25  | -17 | 0,00                      | 0,03  | -0,05 |
|            | 1,60                | 1,14                              | -0,13 | 0,26 | 1,14         | -0,08 | 0,20 | 0                       | -39  | -22 | 0,00                      | 0,05  | -0,06 |
|            | 0,80                | 1,21                              | -0,09 | 0,17 | 1,24         | -0,01 | 0,12 | 3                       | -88  | -29 | 0,04                      | 0,08  | -0,05 |
|            | 0,20                | 1,05                              | -0,01 | 0,04 | 1,13         | 0,06  | 0,03 | 8                       | -552 | -17 | 0,08                      | 0,07  | -0,01 |

Die Komponente  $u$  liegt an beiden ADCP-Positionen größtenteils zwischen 0,8 und 1,2 m/s, fällt jedoch zur Oberfläche hin stark ab. Die Komponente  $v$  liegt an Position 1 zwischen -0,4 und +0,3 m/s und hat an Position 2 die Größenordnung 0,1 m/s. Die Komponente  $w$  ist mit 0,3 m/s in der Mitte am größten und nimmt zur Sohle und zur Wasseroberfläche hin fast bis auf 0 m/s ab.

Der relative Vergleich der räumlich interpolierten Werte mit den direkt ausgelesenen Werten zeigt an beiden Positionen sehr gute Übereinstimmungen der Komponente  $u$ . Die relative Abweichung  $A_{rel}$  beträgt in fast allen Höhenebenen zwischen 0 und 2 Prozent. Die

Komponenten  $v$  und  $w$  stimmen von der Oberfläche bis zur Höhenebene 4,0 Meter über der Sohle sehr gut überein. In tieferen Höhenebenen nimmt die relative Abweichung fast kontinuierlich zu und erreicht bis zu 552 Prozent Unterschied von  $v$  an der Sohle an Position 2.

Erklären lässt sich dieses Verhalten durch Betrachtung der Absolutwerte. An den Orten mit hoher Abweichung liegen ausnahmslos geringe Absolutgeschwindigkeiten zwischen 0 m/s und 0,3 m/s vor. Dadurch verursachen bereits kleine absolute Abweichungen hohe relative Abweichungen.

Die Betrachtung der absoluten Abweichung in Tabelle 1 zeigt, dass diese nur in einem Ort mehr als 0,08 m/s beträgt und an den meisten Orten nahe 0 m/s ist. Tendenziell steigt die absolute Abweichung erwartungsgemäß mit steigendem Abstand der Beams voneinander leicht an. Die Mittelwerte der absoluten Abweichungen über alle Orte betragen für Position 1 -0,02 m/s und für Position 2 +0,01 m/s. Diese äußerst geringen Abweichungen sind weitaus kleiner als die Auswirkung weiterer potenzieller Störeinflüsse bei einer ADCP-Messung in der Natur, wie z. B. Durchfluss- und Wasserspiegelschwankungen oder Bewegungen des Messboots.

Die Interpolationsgenauigkeit an beiden ADCP-Positionen ist trotz des unterschiedlichen Abstands von der Turbinenachse und der unterschiedlichen lokalen Geschwindigkeiten ähnlich. Dies deutet darauf hin, dass die Interpolation gegenüber Änderungen der ADCP-Position robust ist.

Nach dieser vereinfachten Abschätzung ist die Interpolation der seitlichen vier ADCP-Beams auf eine mittlere Vertikalachse trotz der durch den Messwinkel von  $20^\circ$  großen Aufweitung der Beams zur Sohle hin sehr genau und eignet sich für Naturuntersuchungen von hochturbulenten Kraftwerksunterwassern in mit dieser Untersuchung vergleichbarer Größenordnung, d. h.  $Q = 100 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $h = 4,8 \text{ m}$ .

## **Zusammenfassung und Ausblick**

Das numerische dreidimensionale Modell eines hochturbulenten Kraftwerksunterwassers wurde verwendet, um die Genauigkeit einer ADCP-Interpolation zu untersuchen. Die sich auffächernden vier Beams des ADCP wurden durch vier gedachte Geraden angenähert, deren Daten auf eine mittlere vertikale Achse interpoliert und mit direkt dort ausgelesenen Daten verglichen wurden. Dabei zeigte sich eine sehr gute Übereinstimmung der Hauptkomponente  $u$  mit relativen Abweichungen zwischen 0 und 2 Prozent. Die Komponenten  $v$  und  $w$  wiesen zur Sohle hin deutlich höhere relative Abweichungen auf. Dies war in ihren geringen Absolutbeträgen begründet. Der Vergleich der absoluten Abweichungen zeigte eine über alle Punkte gemittelte Abweichung in der Größenordnung 0,02 m/s, die weit unter der Größenordnung anderer Störeinflüsse bei Naturmessungen liegt. Demnach ist die Interpolation der seitlichen vier ADCP-Beams auf eine mittlere vertikale Achse trotz des zunehmenden Abstands der Beams zur Sohle hin sehr genau und eignet sich für Naturuntersuchungen von hochturbulenten Kraftwerksunterwassern in mit dieser Untersuchung vergleichbarer Größenordnung.

Detailliertere Aufschlüsse könnte eine deutlich aufwändigere Art des Datenauslesens aus dem numerischen Modell liefern, bei der die Daten nicht entlang einer gedachten Geraden, sondern in einem gedachten kegelförmigen Beam ausgelesen werden und damit das ADCP-Verfahren besser annähern.

Auch eine Berücksichtigung des Turbinendralls könnte die Ergebnisse verfeinern. Dies erfordert jedoch eine sorgfältige Kalibrierung der Einlassrandbedingung mit Naturmessdaten.

## Quellenverzeichnis

Klüber Ch., Dumont U., Kampke W., Sokoray-Varga B., Weichert R. (2012) Near-field attractivity of fishways – Investigations of an innovative entrance design to enhance the attraction flow. Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Symposium on Ecohydraulics 2012, ed. Mader H. & Kraml J. Available from <http://www.ise2012.boku.ac.at/>. [30 April 2013].

Muste M., Yu K. & Spasojevic M. (2004). Practical aspects of ADCP data use for quantification of mean river flow characteristics; Part I: moving-vessel measurements. Flow Measurement and Instrumentation, Vol. 15, No. 1, pp. 1 – 16.

Spalart P. R. (2009). Detached-Eddy Simulation. Annual Review of Fluid Mechanic, Vol. 41, pp. 181 – 202.

Weller H. G., Tabor G., Jasak H. & Fureby C. (1998) A Tensorial Approach to CFD using Object Orientated Techniques, Computers in Physics, Vol. 12, No. 6, pp. 620 – 631.

Rechtlicher Hinweis: *OPENFOAM® is a registered trade mark of OpenCFD Limited, the producer of the OpenFOAM software.*