

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Bensing, Katharina; Tuhtan, Jeffrey A.; Lehmann, Boris Fischverhalten besser verstehen mithilfe von Multiparameterdaten

Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/108930>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Bensing, Katharina; Tuhtan, Jeffrey A.; Lehmann, Boris (2022): Fischverhalten besser verstehen mithilfe von Multiparameterdaten. In: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hg.): Nachhaltigkeit im Wasserbau - Umwelt, Transport, Energie. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 68. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik. S. 103-113.

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.



Fischverhalten besser verstehen mithilfe von Multiparameterdaten

Katharina Bensing
Jeffrey A. Tuhtan
Boris Lehmann

Um Fischverhalten besser mit abiotischen Parametern verknüpfen zu können, sind Daten zu den reizauslösenden Parametern als auch zu den vom Tier gezeigten Reaktionsweisen notwendig. Für die Aufzeichnung dieser sog. Multiparameterdaten muss entsprechende Messtechnik weiterentwickelt und zielführend eingesetzt werden. Im folgenden Beitrag wird eine dazu entwickelte neuartige, fischförmige Sonde vorgestellt und auf einige Aspekte zu deren Nutzen hinsichtlich eines besseren Verständnisses der Fischwahrnehmung eingegangen. Aufgrund der großen Datenmengen ist eine zukünftige Einbindung weiterer Methoden aus dem Bereich der Data Science wie z.B. die künstliche Intelligenz sinnvoll, um bspw. im Praxiseinsatz die Umweltverträglichkeit von wasserbaulichen Anlagen zu verbessern.

Stichworte: Ethohydraulik, Fischsinnessonde, wasserbauliches Messwesen

1 Einleitung

Die Wiederherstellung der Durchgängigkeit für die aquatische Fauna ist ein essenzieller Aspekt, um Stau- und Wasserkraftanlagen umweltverträglicher zu gestalten. Dazu wird im Rahmen der Transdisziplin Ethohydraulik sowohl anwendungsorientiert an geeigneten Systemen zur Gewährleistung des Auf- und Abstiegs aquatischer Organismen als auch grundlagenorientiert an wesentlichen Zusammenhängen zwischen dem Verhalten der Lebewesen und den auslösenden Umweltparametern geforscht. Gerade jene reproduzierbaren hydraulisch-reaktiven Grundlagen sollen genutzt werden, um den Tieren durch entsprechende bauliche Anpassungen einen geeigneten „hydraulischen Wegweiser“ zu bieten. Quantitative Richt- und Grenz-

werte wurden bisher jedoch nur bezüglich des Parameters „Geschwindigkeit“ definiert, wobei lediglich die zeitgemittelte Geschwindigkeit berücksichtigt wird. Zwar gibt es weitere Studien, welche auch deren zeitliche Fluktuationen in Form verschiedener Turbulenzparameter untersuchen, jedoch werden hier nur qualitative Rückschlüsse gezogen. Weitere Parameter, wie bspw. der hydrodynamische Druck, das Magnetfeld oder die Temperatur, werden nur sehr selten berücksichtigt. Ein Grund dafür mag unter anderem der Mangel an geeigneten Messgeräten für jene Umweltparameter sein (*Lacey et al. 2012*).

Dabei ist jedoch nachgewiesen, dass Fische mithilfe verschiedenster Sinne – z.B. dem Seitenlinienorgan, dem Gleichgewichtssinn oder bei manchen Arten auch dem Magnetsinn – fortlaufend vielfältige Umweltreize gleichzeitig wahrnehmen, deren Konstellation situativ auswerten und darauf reagieren. Zusätzlich beeinflussen sie selbst auch ihr körpurnahes Strömungsfeld und nutzen diese Beeinflussung sogar, um sich zu orientieren (*Montgomery et al. 1997*) oder die Beeinflussung der Strömung durch Fressfeinde zu detektieren und entsprechend zu flüchten (*Stewart et al. 2014*).

Nicht zuletzt ist die Analyse des Fischverhaltens selbst keine leichte Aufgabe, da dieses für eine multivariate Analyse quantifiziert werden muss. Oft findet dies dann durch einfaches Zählen von Ereignissen statt (z.B. Passage des Bypasses), woraus das komplexe hydraulisch-reaktive Verhalten, welches zu dem Ereignis geführt hat, nicht abgeleitet werden kann.

Damit besteht der erste Schritt für zukünftige Multiparameteranalysen in der Aufnahme eines großen Datenpools aus verschiedenen ethologischen und hydraulischen Parametern, wozu folglich geeignete Messtechnik nötig ist.

2 Multiparameterdaten

Multiparameterdaten können unterschiedliche Arten von Daten umfassen: multi- bzw. mehrdimensionale Daten und multivariate Daten. Dabei werden die Begriffe laut *Wong und Bergeron (1997)* und *Schumann und Müller (2000)* in der Literatur nicht ganz konsistent verwendet. Gemein haben sie das Präfix „multi“, das impliziert, dass es sich um mehr als einen betrachteten Parameter handelt. Bei mehrdimensionalen Daten handelt es sich um unabhängige Variablen, die im Bereich der Ingenieurwissenschaften einen

Beobachtungsraum charakterisieren, während multivariate Daten abhängige Variablen in einer Art Merkmalsraum charakterisieren. Eine mögliche Schreibweise zur Angabe der betrachteten Dimensionalität d sowie der Anzahl multivariater Daten v sieht bspw. für zweidimensional betrachtete Daten dreier abhängiger Parameter folgendermaßen aus: $2d3v$.

Wie *Lehmann et al. (2021)* darlegen, können abiotische Parameter bspw. mit etablierter Messtechnik räumlich und zeitlich aufgelöst aufgezeichnet oder mithilfe von Strömungssimulationen berechnet werden. Physiologische Parameter, die den inneren Zustand des Tieres beschreiben, werden bspw. durch Biologger aufgezeichnet und können Informationen über Muskelaktivität und damit wiederum über die aktuelle Leistung oder das Stresslevel des Tieres geben. Zuletzt geben von außen betrachtet auch die Art der Fortbewegung und die Raumnutzung Aufschluss über mögliche reaktionsauslösende Reize. Dies kann bspw. durch Aufenthaltsdauern, Richtungsänderungen, der Körperorientierung zur Strömung, der Schwimmgeschwindigkeit oder der Schwanzflossenschlagfrequenz parametrisiert werden. Letzteres stellt sich als keine triviale Aufgabe heraus und wird häufig durch genaue Beobachtungen und spätere Analysen oder durch erste Ansätze des automatisierten Trackings umgesetzt. Dadurch ergibt sich eine enorme, zeit- und ortsabhängige Datenmenge, welche multivariat untersucht sowie multidimensional oder zeitabhängig ausgewertet werden kann. Multivariate Analysen wurden zwar in einigen Studien angewendet (z.B. *Beck et al. 2020*, *Cuchet 2014*), deren Möglichkeiten – gerade auch hinsichtlich der Visualisierung – wurden jedoch bisher nur ansatzweise ausgeschöpft. Dies mag u.a. an dem genannten Mangel geeigneter hydraulischer als auch ethologischer Messtechnik liegen.

In der aktuellen Literatur findet man bezüglich ethohydraulischer Analysen meist zwei Vorgehensweisen, die teilweise auch kombiniert werden:

- Vergleich zwischen unterschiedlichen Tests: durchführen und statistische multivariate Gegenüberstellung einer Vielzahl verschiedener Tests mit Variation einzelner hydraulischer, geometrischer oder biologischer Parameter (z.B. Anströmgeschwindigkeit, bauliche Anpassung, Fischart),
- Analyse innerhalb eines Tests: untersuchen der Raumnutzung und genauen Bewegungen der Tiere sowie detaillierte hydraulische Analyse der Strömung innerhalb eines Testsetups.

Während ersteres keine detaillierten Aussagen über hydraulisch-reaktive Zusammenhänge und Verhaltensweisen zulässt, sondern eher Unterschiede herausstellt und praktische Empfehlungen liefern kann, bedarf es bei der genaueren Analyse im zweiten Punkt einer hochaufgelösten Untersuchung der ethologischen und hydraulischen Aspekte.

3 Die Fischesinnessonde

Die Fischesinnessonde (FSS, Abbildung 1) wurde im Rahmen des F+E-Projektes „MeMo Fischabstieg“ (Az. 33867/01 gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt 2019-2022) durch das Department of Computer Systems der Technischen Universität Tallinn basierend auf der bestehenden ALL-Messtechnik (Artificial Lateral Line) weiterentwickelt. Die Bezeichnung der FSS ergibt sich aus der Tatsache, dass eine Sonde ein Messgerät darstellt, welches mit mehreren verschiedenen Sensoren ausgestattet ist und dadurch eine Vielzahl verschiedener Parameter zeitgleich aufgezeichnet werden können. Neben der Berücksichtigung der Strömungsbeeinflussung durch ihren fischförmigen Körper selbst kann mit der verbauten Sensorik sowohl das vestibuläre System (Gleichgewichtssinn; durch inertielle Messeinheit) als auch das Seitenlinienorgan (Strömungssinn; durch drei Drucksensoren) nachempfunden werden.

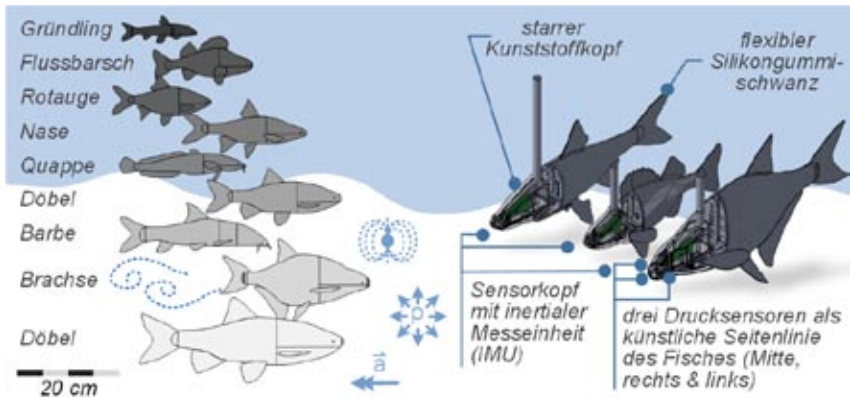


Abbildung 1: Übersicht zu den im Projekt MeMo weiterentwickelten Fischesinnessonden: Es wurden neun verschiedene Fischkörper additiv gefertigt,

die jeweils drei Drucksensoren und eine inertielle Messeinheit beinhalten. (verändert nach *Lehmann et al. 2021*)

Im Projekt wurden dabei mit Fokus auf einen Schrägrechen mit horizontaler Stabausrichtung eine Vielzahl verschiedener Tests im Wasserbaulichen Forschungslabor der TU Darmstadt durchgeführt, von denen einige ausgewählte im Folgenden vorgestellt werden. Während die FSS per Bluetooth 15 verschiedene Parameter mit einer Frequenz von 50 Hz übertrug, wurden in vielen Setups parallel Geschwindigkeitsdaten zeitsynchronisiert mit einem Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) in drei Raumrichtungen und einer Frequenz von 25 Hz ausgegeben. Daraus ergaben sich in den Untersuchungen eine Vielzahl multivariater, mehrdimensionaler und zeitabhängiger Daten.

Die Studien zur FSS zeigten zusätzlich, dass nicht nur stationäre Punktmessungen, sondern auch eine Messung mit bewegter Sonde sinnvoll ist, um in kurzer Zeit räumlich höher aufgelöste Daten zu erzeugen und somit keinen ausschlaggebenden räumlichen Informationsverlust zu erhalten.

3.1 1d2v-Analyse: Geschwindigkeit und Fischgeometrie

Ein wichtiger Aspekt der FSS besteht in der Berücksichtigung des Fischkörpers selbst. Um den oberstromigen Einfluss auf die Fließgeschwindigkeiten zu untersuchen, wurden in *Bensing et al. (2022)* ADV-Messungen in variierenden Abständen vor den Fischkörpern vorgestellt. Auf Basis allometrischer Beziehungen zwischen den untersuchten Arten sowie zwischen angeströmtem Körperquerschnitt und -länge wurde ein Zusammenhang zwischen der Fischlänge und dem eindimensionalen Geschwindigkeitsverlauf (1d2v) vor dem Fisch gefunden (Abbildung 2). Für das untersuchte Arten- und Größenspektrum konnte damit eine Formel zur Geschwindigkeitskorrektur vor dem Fisch in Abhängigkeit der Fischlänge L_{Fisch} , der betrachteten Distanz d sowie der unbeeinflussten Geschwindigkeit v_{∞} aufgestellt werden. Auch bei der Gegenüberstellung mit anderen Studien (z.B. *Stewart et al. 2014*) zeigt sich eine gute Übereinstimmung der Daten. Zu betrachten ist dabei die Relativgeschwindigkeit zwischen dem fließenden Wasser und dem (un-)bewegten Fischkörper. Die beobachtete Beeinflussung der Geschwindigkeit wird in der Literatur als Bugwelle bezeichnet – wie auch *Stewart et al. (2014)* schreiben, wird der Begriff aktuell aus einem Mangel passenderer Begriffe verwendet. Diese Bugwelle nimmt nach *Bensing et al. (2022)* ab einer Distanz von einer Fischlänge einen vernachlässigbar kleinen Wert an, sodass für das getestete Geschwindigkeitsspektrum (0,35 bis

0,65 m/s, strömender Zustand) vereinfacht von einer maximalen Reichweite der Beeinflussung von einer Fischlänge ausgegangen werden kann. Auch andere Studien nutzen die Fischlänge als Skalierungsfaktor für bi- oder multivariate Zusammenhänge. *Coombs (1999)* beschreibt bspw. die Abhängigkeit des „Wahrnehmungsraums“ (Sensory Space) von der Fischlänge. Die vorliegenden Ergebnisse gepaart mit der Tatsache, dass *Montgomery et al. (1997)* darlegen, dass der Fisch seine selbsterzeugte Bugwelle nutzt, um in stillem Wasser Objekte in seiner Umgebung zu detektieren, bekräftigen diese Ergebnisse.

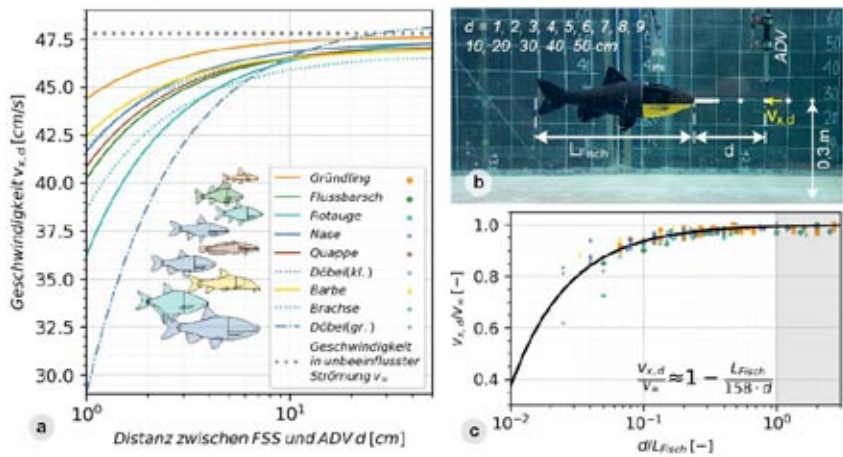


Abbildung 2: Geschwindigkeitsprofile vor verschiedenen Fischkörpern mit logarithmischer x-Achsenskalierung; a) Geschwindigkeitsprofile in Abhängigkeit der Distanz d vom vordersten Punkt der FSS; b) Versuchsaufbau in der Laborrinne mit $h = 0,75$ m; c) interspezifischer Zusammenhang zwischen der normierten Geschwindigkeit und dem Verhältnis aus Abstand d und Fischlänge L_{Fisch} (verändert nach *Bensing et al. 2022*)

3.2 Zeitabhängige 1d2v-Analyse: Geschwindigkeit und Druck

Um die durch die Drucksensoren gewonnene Strömungsinformation zu untersuchen, wurden die mittels ADV erhobenen Geschwindigkeiten mit den synchron aufgenommenen Druckdaten des mittigen Sensors (an der Nasenspitze) gegenübergestellt. Da der Druck bei Ausrichtung der FSS entgegen der Strömungsrichtung den Staudruck beinhaltet, ergibt sich eine Korrelation zwischen den ADV- und FSS-Daten (Abbildung 3). Mit zunehmendem Abstand zwischen den Messgeräten nimmt dabei das globale

Maximum der Korrelation ab, was der Natur der Turbulenz entspricht. Der dargelegte konvektive Transport der Strömungsinformation spricht für die gute Informationsaufnahme der Drucksensoren, zeigt jedoch auch, dass aquatische Lebewesen mit dem komplexen Aufbau des Seitenlinienorgans im Kopfbereich (Ristroph *et al.* 2015) die aus einer bestimmten Reichweite oberstromig auf sie zusteuernde Strömungsinformation zeitlich hoch aufgelöst empfangen können – was auch andere (u.a. ethologische) Studien bestätigen (Chagnaud *et al.* 2008, Liao *et al.* 2003).

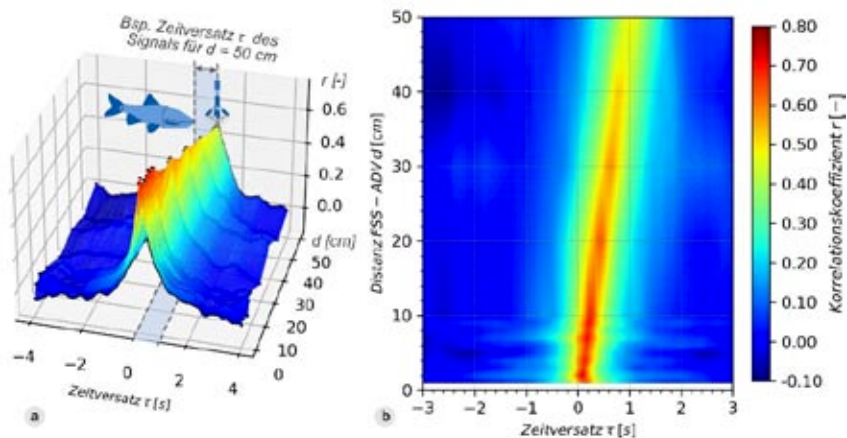


Abbildung 3: Korrelationsfunktion zwischen ADV-Daten sowie den zeitsynchronisierten FSS-Daten des mittigen Drucksensors: a) 3-D Ansicht mit Beispiel zum Zeitversatz der beiden hydraulischen Signale; b) Konturdarstellung

3.3 Multivariate Analyse

Zur multivariaten Analyse gibt es viele Methoden von denen hier nur eine exemplarisch näher vorgestellt wird. Die Erstellung einer Scatterplot-Matrix gilt als einfache stark visuelle Möglichkeit (Abbildung 4, zugehörig zu den sog. Clusteranalysen), welche die Zusammenhänge verschiedener Parameter in einer Matrix aus Punktdiagrammen darstellt. Die Diagonale zeigt eine univariate Verteilung der Daten, welche aus Histogrammen und/oder einer Kerndichteschätzung (KDE) bestehen kann. In dem hier betrachteten Fall spielt die räumliche Zuordnung der Messpunkte eine untergeordnete Rolle und es wurden lediglich zeitgleich gemessene Parameter gruppiert und gegenübergestellt. Dazu wurden zeitsynchrone, gemittelte ADV- und FSS-

Vielpunktmessungen aus einer Ebene vor einem Schrägrechensetup verwendet. Zusätzlich wurden durch die verschiedenen Farben noch unterschiedliche Fischarten (unterschiedlichen FSS-Formen) berücksichtigt. Da die absoluten Druckwerte durch den Einfluss der anstehenden Wassersäule beeinflusst und damit stark lageabhängig waren, werden hier reine Differenzwerte betrachtet (z.B. p_{c-l} = Druck des mittigen Sensors (c = central) abzüglich Druck des linken Sensors (l = links/left)). Im Folgenden kann aus Platzgründen nur vereinfacht auf mögliche Erkenntnisse eingegangen werden, weshalb beispielhaft die in Abbildung 4 markierte Beziehung (grauer Kasten) herausgegriffen wird.

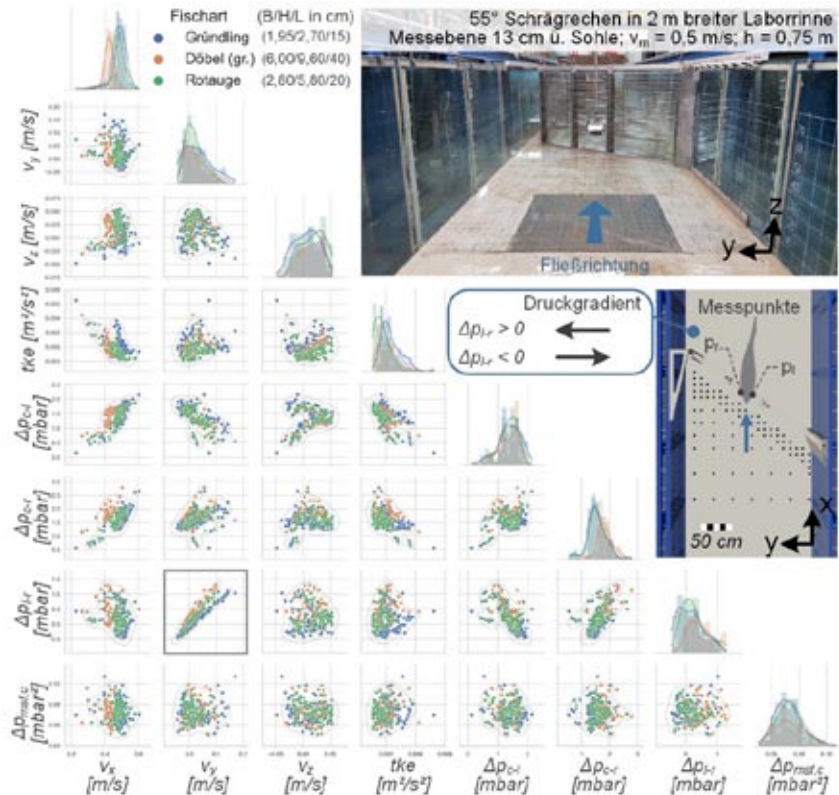


Abbildung 4: Scatterplot-Matrix zu verschiedenen Parametern der zeitsynchronisierten Punktmessungen von ADV-Geschwindigkeits- und FSS-

Druckdaten vor einem Schrägrechen in der 2 m breiten Laborrinne im Wasserbaulichen Forschungslabor der TU Darmstadt.

Deutlich zeigt sich der Zusammenhang zwischen dem Druckgradienten über die Breite des Fisches (Δp_{l-r}) und der y-Komponente der Geschwindigkeit. Abbildung 4 zeigt die Definition der y-Richtung sowie der Richtung des positiven Druckgradienten, die übereinstimmen. Interessant ist hierbei, dass die y-Komponente der Geschwindigkeit v_y nur einen sehr geringen Anteil an der resultierenden Geschwindigkeit nimmt (vgl. x-Achsenkalen für v_x , v_y , v_z), während die drei Druckdifferenzen zwischen den Sensoren (Δp_{l-r} , Δp_{c-l} , Δp_{c-r}) einen sehr ähnlichen Wertebereich abdecken. Somit ist v_y vergleichsweise wenig dominant, während der Druckunterschied zwischen den beiden Seiten deutlicher dominiert und sich am Körper eine asymmetrische Druckverteilung einstellt (Tuhtan et al. 2018). Hierzu wird die Hypothese aufgestellt, dass Fische diese Asymmetrie und die damit auf sie wirkende Kraft meiden, was sich mit durchgeführten Sichtbeobachtungen während der Fischversuche bestätigen ließ. Ebenso zeigt sich aus dem Diagramm, dass die Fischgeometrie einen Einfluss auf die Werte besitzt, da aufgrund der unterschiedlichen Breite der Fische auch eine andere räumliche Diskretisierung zwischen den Druckmessungen vorliegt. So ergeben sich bei demselben Wert für v_y für den größten Fisch (Döbel) auch die größten Druckgradienten bzw. eine stärkere Asymmetrie.

Obige Analysen wurden nun für die Verteilung hydraulischer Parameter in einer Ebene vor dem Schrägrechensetup durchgeführt (zeitgemittelt). Dasselbe kann auch für einen einzelnen Messpunkt (konstanter Ort) über den Faktor Zeit betrachtet werden, um turbulente Fluktuationen über die Dichteverteilung verschiedener Fischkörpergeometrien gegenüberstellen zu können. Analog kann auch eine multidimensionale Analyse durchgeführt werden, welche den Zusammenhang zu Raumkoordinaten ausgibt. Diese Werte können jedoch keine allgemeingültige Abhängigkeit zu hydraulischen oder Verhaltensparametern liefern, da sie situativ immer variieren.

4 Fazit und Ausblick

Die FSS stellt durch ihre Form, ihre Art der Anwendung sowie die ausgegebenen Daten eine Multiparametersonde dar, die dazu dient Fischverhalten besser zu verstehen, indem ein Einblick in mögliche Wahrnehmung gewährt wird. Dennoch sollte nicht vergessen werden, dass zunächst noch

essentielle Lebendtieruntersuchungen ergänzt werden müssen, um belastbare hydraulisch-reaktive Verknüpfungen in Form sog. ethohydraulischer Signaturen zu erarbeiten. Auch hierzu wird empfohlen nicht nur Ereignisse zu zählen, sondern zu versuchen das komplexe Verhalten durch neue „ethohydraulische Messtechnik“ und Multiparameteranalysen zu beschreiben, wofür auch weiter an sinnvollen Parametrisierungen für Fischverhalten geforscht werden muss. Diese große Menge an Multiparameterdaten (Big Data) kann zukünftig durch den Einsatz von Muster-/Strukturerkennung, neuronalen Netzen und künstlicher Intelligenz analysiert werden, um komplexe Zusammenhänge einfach (ggf. visuell) aufzubereiten und Korrelationen zwischen verschiedensten einwirkenden Reizen und der Reaktion der Fische zu ergründen. Letztendlich dient dies wiederum dem Zweck in der Praxis die Umweltverträglichkeit wasserbaulicher Anlagen zielorientierter umsetzen zu können.

In weiteren Veröffentlichungen zum Projekt „MeMo Fischabstieg“ wird ebenfalls näher auf die durchgeführten Lebendtierversuche sowie den Aspekt der computergestützten Modellierung eingegangen. Außerdem werden weitere Parameter, wie das Magnetfeld, noch genauer untersucht.

5 Literatur

- Beck, C.; Albayrak, I.; Meister, J.; Peter, A.; Selz, O.M.; Leuch, C.; Vetsch, D.F.; Boes, R.M. (2020): Swimming Behavior of Downstream Moving Fish at Innovative Curved-Bar Rack Bypass Systems for Fish Protection at Water Intakes. In: *Water* 12:3244, DOI: 10.3390/w12113244
- Bensing, K.; Tuhtan, J.A.; Toming, G.; Khan, A.H.; Lehmann, B. (2022): Fish body geometry reduces the upstream velocity profile in subcritical flowing waters. In: *Aquatic Sciences* 84(3):32, DOI: 10.1007/s00027-022-00863-6
- Chagnaud, B. P.; Brücker, C.; Hofmann, M. H.; Bleckmann, H. (2008): Measuring flow velocity and flow direction by spatial and temporal analysis of flow fluctuations. In: *The Journal of Neuroscience* 28(17):4479-4487, DOI: 10.1523/JNEUROSCI.4959-07.2008
- Coombs, S. (1999): Signal detection theory, lateral-line excitation patterns and prey capture behaviour of mottled sculpin. In: *Animal Behaviour* 58(2):421-430. DOI: 10.1006/anbe.1999.1179
- Cuchet, M. (2014): Fish Protection and Downstream Migration at Hydropower Intakes. *Berichte des Lehrstuhls und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft (Hrsg.: Rutschmann, P.), TU München*

- Liao, J.C.; Beal, D.N.; Lauder, G.V.; Triantafyllou, M.S. (2003): The Kármán gait: novel body kinematics of rainbow trout swimming in a vortex street. In: *The Journal of Experimental Biology* 206:1059-1073, DOI: 0.1242/jeb.00209
- Lacey, R.W.J.; Neary, V.S.; Liao, J.C.; Enders, E.C.; Tritico, H.M. (2012): The IPOS framework: Linking fish swimming performance in altered flows from laboratory experiments to rivers. In: *River Research and Applications* 28:429-443, DOI: 10.1002/rra.1584
- Lehmann, B.; Bensing, K.; Adam, B.; Schwevers, U.; Tuhtan, J.A. (2021): Ethohydraulik. Eine Methode für naturverträglichen Wasserbau. Springer Spektrum, Wiesbaden 2021, DOI: 10.1007/978-3-658-32824-5
- Montgomery, J.C.; Baker, C.F.; Carton, A.G. (1997): The lateral line can mediate rheotaxis in fish. In: *Nature* 389:960–963. DOI: 10.1038/40135
- Ristroph, L.; Liao, J.C.; Zhan, J. (2015): Lateral Line Layout Correlates with the Differential Hydrodynamic Pressure on Swimming Fish. In: *Physical Review Letters* 114(1):018102(5). DOI: 10.1103/PhysRevLett.114.018102
- Schumann, H.; Müller, W. (2000): Visualisierung. Grundlagen und allgemeine Methoden. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2000
- Stewart, W.J.; Nair, A.; Jiang, H.; McHenry, M.J. (2014): Prey fish escape by sensing the bow wave of a predator. In: *Journal of Experimental Biology* 217(24):4328-4336. DOI: 10.1242/jeb.111773
- Tuhtan, J.A.; Fuentes-Perez, J.F.; Toming, G.; Schneider, M.; Schwarzenberger, R.; Schletterer, M.; Kruusmaa, M. (2018): Man-made flows from a fish's perspective: autonomous classification of turbulent fishway flows with field data collected using an artificial lateral line. In: *Bioinspiration & Biomimetics* 13:046006. DOI: 10.1088/1748-3190/aabc79
- Wong, P.C.; Bergeron, R.D. (1996): 30 Years of Multidimensional Multivariate Visualization. In: Nielson, G.M.; Hagen, H.; Müller, H. (eds.): *Scientific Visualization*. In: IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, 1997, 3-33

Autoren:

Katharina Bensing, M.Sc.
Prof. Dr.-Ing. habil. Boris Lehmann

Assoc. Prof. Dr.-Ing. Jeffrey A. Tuhtan

Technische Universität Darmstadt
Fachgebiet Wasserbau und Hydraulik
Franziska-Braun-Str. 7
64287 Darmstadt

Tallinn University of Technology
Department of Computer Systems
Akadeemia tee 15a
12618 Tallinn, Estonia

Tel.: +49 6151 16-211 65

E-Mail: k.bensing@wb.tu-darmstadt.de
b.lehmann@wb.tu-darmstadt.de

E-Mail: jeffrey.tuhtan@taltech.ee