

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Report, Published Version

**Zinkhahn, Markus; Henning, Martin**

## **Auffindbarkeit von Fischaufstiegsanlagen. FuE- Abschlussbericht B3953.01.04.70004**

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/107407>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2019): Auffindbarkeit von Fischaufstiegsanlagen. FuE-  
Abschlussbericht B3953.01.04.70004. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau.

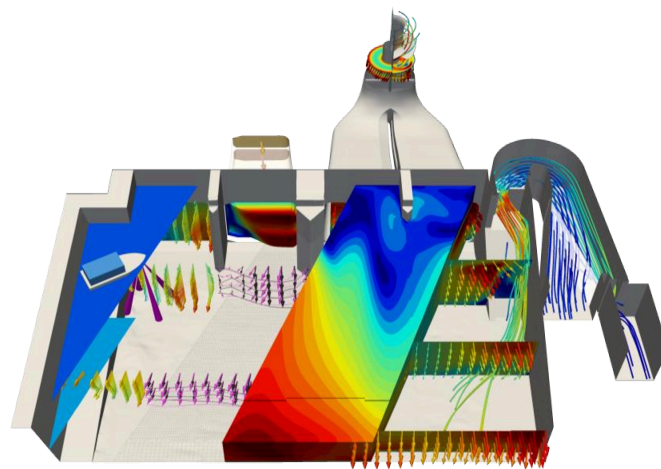
### **Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

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.

Verwertungsrechte: Alle Rechte vorbehalten

**FuE-Abschlussbericht**  
**Auffindbarkeit von Fischaufstiegsanlagen**  
**B3953.01.04.70004**



**Juni 2019**



**FuE-Abschlussbericht**  
**Auffindbarkeit von Fischaufstiegsanlagen**

Beginn des Vorhabens: 01.01.2012

Auftrags-Nr.: BAW-Nr. B3953.01.04.70004

Aufgestellt von:           Abteilung:       Wasserbau  
                                  Referat:         W1  
                                  Projektleiter:  Markus Zinkhahn  
                                  Bearbeiter:     Martin Henning

Karlsruhe, Juni 2019

Der Bericht darf nur ungekürzt vervielfältigt werden. Die Vervielfältigung und eine Veröffentlichung bedürfen der schriftlichen Genehmigung der BAW.



## **Zusammenfassung**

Die Auffindbarkeit einer Fischaufstiegsanlage (FAA) hängt davon ab, ob wandernde Fische in der Lage sind, den Einstieg in die FAA verzögerungsfrei zu finden. Eine große Herausforderung an Bundeswasserstraßen mit Wasserkraft ist, parallel der dominanten Kraftwerksabströmung eine für den Fisch wahrnehmbare Leitströmung zu erzeugen. Für die Prognose der Leitströmung vor dem Bau der FAA mittels Modellierung ist somit die Kenntnis der Kraftwerksabströmung essentiell. Deren Modellierung ist äußerst komplex und es besteht kein Wissensstand zur Parametrisierung von Turbinen in wasserbaulichen Modellen. Die Vermessung der Strömung im Unterwasser in der Natur ist schwierig und wegen schwankender Randbedingungen mit Unsicherheiten verbunden. Zudem ist eine Übertragbarkeit gewonnener Erkenntnisse wegen der großen Unterschiede zwischen verschiedenen Kraftwerksstandorten nur sehr bedingt möglich. Das vorliegende Forschungsprojekt konzentriert sich auf die Erzeugung bzw. die Beurteilung einer guten Leitströmung durch Modellierung unter der Berücksichtigung von Standortrandbedingungen und der Kraftwerksabströmung.

In einem ersten Schritt wurde durch die Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU München (TUM) eine Bestandsaufnahme der an Bundeswasserstraßen bestehenden Wasserkraftanlagen durchgeführt. Weiterhin wurde durch die TUM eine detaillierte Vermessung der Unterwasserströmung einer Kaplan-Halbspiralturbine im Niederdruckversuchsstand des Dieter-Thoma-Labors (DTL) durchgeführt. Die Ergebnisse wurden durch die BAW genutzt, um die Kalibrierung bzw. eine Sensitivitätsanalyse von hydrodynamisch-numerischen-Modellen (HN-Modellen) vorzunehmen. Parallel dazu fanden an der BAW gegenständliche Modellversuche zur Ausbreitung der Leitströmung statt. In einem weiteren Projekt mit der TUM wurde an der Versuchsanstalt Oberrach die Eignung von ADCP-Messungen im Kraftwerksunterwasser für die Modellkalibrierung untersucht.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Datenerhebung und die Modellierung der Strömung im Unterwasser von Wasserkraftanlagen komplex und stark von den Turbinenrandbedingungen abhängig sind. Damit sind allgemeingültige Hinweise zur Modellierung nur bedingt möglich. Aus dem Projekt wurden jedoch wichtige Erkenntnisse für die standortspezifische Modellierung gewonnen, die bisher hauptsächlich der Beratung der WSV-Pilotstandorte zugutekam. Die Ergebnisse der Teilprojekte werden hier kurz zusammengefasst. Für detaillierte Ergebnisse sei auf die angegebenen Quellen verwiesen.



<b>Inhaltsverzeichnis</b>		<b>Seite</b>
1	Untersuchungsziele	1
2	Durchgeführte Untersuchungen	3
2.1	Bestandsaufnahme Wasserkraftanlagen an Bundeswasserstraßen	3
2.2	Versuche im Dieter-Thoma-Labor der TU München	3
2.3	Numerische Modellierung an der BAW	6
2.4	Versuche an der Versuchsanstalt Obernach der TU München	9
2.5	Gegenständliche Modellierung an der BAW	10
3	Entwicklung eines Berechnungsansatzes für die Leitströmung	11
4	Zusammenfassung und Ausblick	12
5	Literatur	13



<b>Bildverzeichnis</b>	<b>Seite</b>
Bild 1: CAD-Modell des Versuchsstandes am DTL; Ansicht des Versuchsstands	3
Bild 2: Föhnchensondenmessung unterhalb des Laufrades der Turbine; Versuchsaufbau mit Conradsonde	4
Bild 3: Off-cam Varianten des Betriebspunktes BP01	5
Bild 4: Seitenansicht des Umbaus in MP03; Foto des Umbaus	5
Bild 5: Beispiele für die Einlaufrandbedingung nach dem Drallfaktoransatz (Drallfaktor = 0,5) und dem Zweiparameteransatz (Drallfaktor = 1,0 und Laufradmanteldrall = 0,5)	7
Bild 6: Vergleich von Messung und Simulation mit unterschiedlich dichten Einlassrandbedingungen 0,1 m unterhalb des Saugschlauchaustritts	8
Bild 7: ADCP und ADV-Anordnung im Turbinenversuchsstand Obernach	9
Bild 8: Blick ins Unterwasser des Kraftwerkskanals in Lahnstein/Lahn. Links ist das gegenständliche Modell sowie gemessene ADV-Daten dargestellt. Rechts das Messboot während der Vor-Ort-Messungen und die entsprechenden ADCP- Daten	10
Bild 9: Gegenständliches Modell der Wasserkraftanlage Lauffen/Neckar mit geplantem Einstieg der Fischaufstiegsanlage, Blick vom Unterwasser in Richtung der Wasserkraftanlage	11

<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>Seite</b>
Tabelle 1: Charakteristische Hauptwerte des Niederdruckversuchsstands	4
Tabelle 2: Anlagendaten Turbinenversuchsstand Obernach	9

### **Anlagenverzeichnis**

Anlage 1	Bericht: Abbildung der Strömungscharakteristik eines Kraftwerksunterwasser im 3D-HN-Modell – Möglichkeiten und Grenzen	CD, EWisA
Anlage 2	Kurzbericht: ADCP-Geschwindigkeiten im Unterwasser von Wasserkraft- anlagen – Anwendung und Unsicherheitsanalyse	CD, EWisA
Anlage 3	FuE externe Berichte: TUM (2016a, 2016b, 2017a, 2017b, 2017c, 2018)	CD, EWisA
Anlage 4	FuE externer Bericht: TUM (2017d)	CD, EWisA
Anlage 5	Literaturstudie Jets: Bleninger (2017), IfH (2017)	CD, EWisA

## 1 Untersuchungsziele

Die große Herausforderung für die Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit an Bundeswasserstraßen mit Wasserkraft ist, die Auffindbarkeit durch eine für den Fisch wahrnehmbare Leitströmung zu gewährleisten. Um die Ausbreitung der Leitströmung im Vorfeld des Baus der Fischaufstiegsanlage (FAA) abschätzen zu können, müssen zunächst die relevanten Standortfaktoren in ausreichender Güte bekannt sein. Diese sind maßgeblich geprägt von der Turbinenabströmung der Wasserkraftanlage (WKA). Die Ausprägung der Turbinenabströmung ist dabei von den wechselnden hydrologischen Randbedingungen (Unterwasserstand, Abfluss) abhängig. Die Dimensionierung von FAA ist auf Grenzwerte ausgelegt, die zu relevanten hydrologischen Randbedingungen auftreten können. Auf diese Grenzwerte ist auch die Leitströmung auszulegen. Die Vermessung der Kraftwerksabströmung während des Auftretens dieser relevanten hydrologischen Randbedingungen scheitert in den meisten Fällen daran, dass diese meistens nur für wenige Stunden herrschen und eine Messung nicht genau zum richtigen Zeitpunkt durchgeführt werden kann. Zudem kann durch eine Messung im Zeitraum weniger Stunden nur ein kleiner räumlicher Ausschnitt vermessen werden. Für diesen Fall wird im Wasserbau die Modellierung eingesetzt. Darin wird ein zeitlicher und räumlicher Ausschnitt des Gesamtprozesses im Feld vermessen und die gewonnenen Ergebnisse werden für die Modellkalibrierung genutzt. Das kalibrierte Modell wird dann genutzt, um die Strömung im ganzen maßgeblichen räumlichen Ausschnitt zu relevanten Zeitpunkten abzubilden (stationäre Randbedingungen). Dabei müssen Unsicherheiten und Vereinfachungen, wie bspw. Maßstabeffekte (in gegenständlichen Modellen) oder Turbulenzmodellierung (in HN-Modellen), hingenommen werden.

Im vorliegenden Fall bedeutet das, dass die hochturbulente Turbinenabströmung unter mehr oder weniger stationären Randbedingungen so vermessen werden muss, dass ein repräsentativer räumlicher Ausschnitt vorhanden ist. Gegenüber der Datenerhebung für die Kalibrierung von konventionellen Flussmodellen stellt dies eine große Herausforderung dar. Einerseits ist die Kraftwerksabströmung selbst bei stationären Randbedingungen hochturbulent, so dass eine Mittelwertbildung nur bei entsprechend langen Messzeiträumen erfolgen kann (dynamisches Gleichgewicht, Stationarität der Daten). Andererseits schwanken die Randbedingungen für gewöhnlich, so dass für die Vermessung oft nur ein relativ kurzer Zeitraum zur Verfügung steht. Zudem hat die Charakterisierung eines turbulenten Strömungsfeldes anhand zeitlicher Mittelwerte an sich Grenzen. Eine Vermessung zusammenhängender Strömungsstrukturen (instantane Strömungsbilder), wie sie im gegenständlichen Versuch z. B. mittels PIV erfolgen kann, ist wegen der Größe der betrachteten räumlichen Ausschnitte nicht möglich.

Die Modellkalibrierung erfolgt für den vermessenen Zustand unter den herrschenden Randbedingungen. Am kalibrierten Modell können dann die eigentlichen Untersuchungen durchgeführt werden; im vorliegenden Fall Varianten der Lage und Größe des Einstieges in die FAA und die resultierende Ausbreitung der Leitströmung. Da sowohl gegenständliche als auch hydrodynamisch-numerische Modelle (HN-Modelle) bisher nicht für vergleichbare Fragestellungen eingesetzt wurden, musste zunächst deren Prognosegüte ermittelt werden. Dabei war vor allem wichtig, ob und wie Turbinenparameter in der Modellierung berücksichtigt werden können.

Es ergaben sich vier Teilprojekte, die in einer Forschungsk Kooperation mit der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU München (Prof. Rutschmann) bearbeitet wurden:

- 1) Bestandsaufnahme der Kraftwerkparameter an Standorten mit Wasserkraft an Bundeswasserstraßen für die Priorisierung der Untersuchungen und eine Übertragbarkeit der Ergebnisse.
- 2) Vermessung der Hydraulik im Unterwasser des Turbinenversuchsstandes im Dieter-Thoma-Labor zur Erkenntnis von Wirkzusammenhängen zwischen Turbinenparametern sowie geometrischen Parametern auf die Strömung im Unterwasser und zur Verfahrensentwicklung in der 3D-HN-Modellierung.
- 3) Anwendung und Weiterentwicklung der gewonnenen Erkenntnisse durch standortspezifische Modellierung an der BAW.
- 4) Überprüfung der Anwendbarkeit des Ultraschall-Doppler-Profil-Strömungsmessers (engl.: Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP)) bei instationärer, ungleichförmiger Strömung im Unterwasser bestehender WKA an Bundeswasserstraßen zur Datengewinnung für die Modellkalibrierung an der Versuchsanstalt Oberrach.

Ein Projektziel war es, aus den Erkenntnissen allgemeine Empfehlungen für die Modellierung durch Dritte abzuleiten (Modellierungsleitfaden), da seitens Dritter mitunter erhebliche Defizite bzgl. der Wahrnehmung der Komplexität der Aufgabe und der angemessenen Durchführung der Modellierung bestanden und bestehen. Zudem waren bzw. sind Auftraggeber solcher Modellierungen häufig nicht ausreichend qualifiziert, um die Ergebnisse der Modelle richtig einzuordnen. Im Projektverlauf bzw. durch die Modellierung der WSV-Pilotstandorte (siehe BfG/BAW 2017) zeigte sich, dass die Standortrandbedingungen zu verschieden und die Aufgabe dafür zu komplex ist, so dass dieses Ziel aufgegeben wurde und der Fokus auf die optimale Modellierung spezifischer Standorte durch die BAW selbst gelegt wurde.

Darüber hinaus wurde die Entwicklung eines einfacheren, allgemein anwendbaren Ansatzes verfolgt. Hierzu wurde im vorliegenden Projekt in Zusammenarbeit mit dem Institut für Hydromechanik (IfH) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) und Professor Bleninger (Mixing and Transport in Environmental Fluid Systems, Curitiba, Brasilien) überprüft, inwiefern sich, aufbauend auf der Theorie der Ausbreitung von Freistrahlen, eine Methode für die Anwendung auf das Unterwasser von Wasserkraftanlagen entwickeln lässt. In diesem Rahmen wurden studentische Arbeiten mit dem IfH (Bergmann 2017, Schmieder 2018) und dem Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen (Wiering 2017) betreut.

Die Ergebnisse der Teilprojekte sind im Folgenden kurz zusammengefasst, für Details sei auf die angegebenen Berichte und Veröffentlichungen verwiesen.

## 2 Durchgeführte Untersuchungen

### 2.1 Bestandsaufnahme Wasserkraftanlagen an Bundeswasserstraßen

Zur Bestandsaufnahme der Wasserkraftanlagen an Bundeswasserstraßen wurde durch die TUM eine umfangreiche Datenabfrage bei allen großen Wasserkraftanlagenbetreibern durchgeführt (TUM 2017a). Darin wurden Pläne und Daten der Kraftwerke erfasst, um die Anlagen kategorisieren und Untersuchungsfälle für die Modellversuche ableiten zu können. Abgefragt wurden alle strömungsrelevanten Turbinen- und Anlagenparameter. Insgesamt konnten von 88 Kraftwerken und somit etwa 50 % der Staustufen mit energetischer Nutzung an den Bundeswasserstraßen Daten erhoben und ausgewertet werden. Mit einer Rücklaufquote von ca. 60 bis 90 % (je nach abgefragtem Parameter) konnte eine sehr umfangreiche und ausführliche Datengrundlage geschaffen werden, welche auch im BAW-Projekt „Kategorisierung von Stauanlagen“ (B3953.01.01.10123) genutzt wird. Die Ergebnisse der Datenanalyse zeigen aber auch, dass eine Kategorisierung in einfache Anlagen-Cluster wegen des breiten Spektrums der strömungsrelevanten Parameter an den unterschiedlichen Anlagen (z. B. Nachbodengeometrie, Saugrohrabmessungen, Austrittsgeschwindigkeiten, Turbinenparameter, Turbinenanzahl, Standortspezifika, hydrologische Randbedingungen) mit Schwierigkeiten verbunden ist.

### 2.2 Versuche im Dieter-Thoma-Labor der TU München

Für die Beurteilung der Einflussfaktoren auf die Unterwasserströmung und die Entwicklung der 3D-HN-Modellierung erfolgten im Dieter-Thoma-Labor (DTL) der Technischen Universität München (TUM) detaillierte Strömungsmessungen mittels einer ADV-Sonde (Acoustic Doppler Velocimeter) am dort vorhandenen Niederdruckversuchsstand mit einer Kaplan-Halbspiralturbine (Bild 1, Tabelle 1). Es wurden insgesamt drei Messprogramme (MP) mit unterschiedlichen Untersuchungsschwerpunkten gefahren.



Bild 1: CAD-Modell des Versuchsstandes am DTL (links); Ansicht des Versuchsstandes (rechts) (TUM 2017b)

*Tabelle 1: Charakteristische Hauptwerte des Niederdruckversuchsstands (TUM 2016b)*

Abfluss	ca. 1000 l/s (max.)
Fallhöhe	ca. 2.6 m (min.) ca. 3.5 m (max.)
Gerinnebreite	ca. 2.5 m
Gerinnelänge (Messstrecke)	ca. 5.0 m
Fließtiefe	ca. 1.6 m (max.)
Turbinendrehzahl	ca. 1600 U/min (max.)
Turbinendrehrichtung	rechts / links
Messung von	OW- & UW-Pegel, Abfluss, Turbinen- drehzahl, -moment, -reibmoment, Pumpenleistung, Turbinenleistung

Zunächst wurde im Messprogramm MP01 die Auswirkung der Variation regulärer Betriebspunkte („on-cam“) der Turbine auf die Strömungscharakteristik im Unterwasser untersucht (TUM 2016b). Die Drallwinkel der Laufradabströmung wurden zunächst nur mit einer Fähnchensonde erfasst (TUM 2016a, Bild 2). Da für die Verwendung der Ergebnisse der Drallwinkel-messung mittels Fähnchensonde im numerischen Modell Fragen nach den absoluten Strömungsgeschwindigkeiten und radialen Drallwinkeln offen blieben, wurde mit der TUM eine Vermessung der Strömung unterhalb des Laufrades mittels Conradsonde vereinbart und durchgeführt (TUM 2017b).



*Bild 2: Fähnchensondenmessung unterhalb des Laufrades der Turbine (links; TUM 2016a); Versuchsaufbau mit Conradsonde (rechts; TUM 2017b)*

In Messprogramm MP02 wurde untersucht, inwieweit sich die Strömungsstrukturen im Unterwasserbereich eines Flusskraftwerks durch Einstellen eines veränderten Zusammenhangs von Leit- und Laufradstellung der Turbine gezielt beeinflussen lassen („off-cam“; TUM 2017c; Bild 3). Die Motivation dieser Untersuchungen war, festzustellen, ob sich dadurch Möglichkeiten ergeben, die Strömungsbedingungen derart zu verändern, dass die Auffindbarkeit gefördert wird.

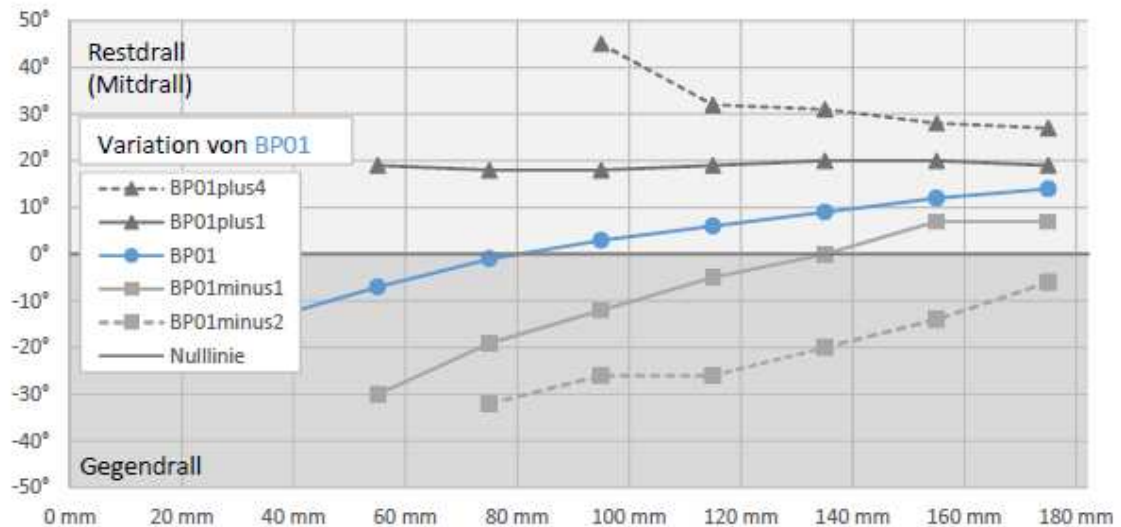


Bild 3: Off-cam Varianten des Betriebspunktes BP01 (TUM 2017c)

In Messprogramm MP03 wurde der Einfluss der Unterwassergeometrie auf die Saugrohrabströmung untersucht (TUM 2018). Hierzu wurden zu Beginn des Messprogramms umfangreiche Umbaumaßnahmen im Gerinne des Versuchsstands durchgeführt. Dazu zählen die Anhebung der Sohle auf Saugrohrbodenniveau und der Einbau einer stirnseitigen Abschlusswand auf Höhe der Saugrohrauslassenebene (Bild 4). Darüber hinaus wurden die Untersuchungen bei einer geringeren Überdeckung des Saugrohrs durchgeführt. Der Messaufbau entspricht somit deutlich eher der Situation an einem Laufwasserkraftwerk, wie es typischerweise auch an Bundeswasserstraßen vorkommt.

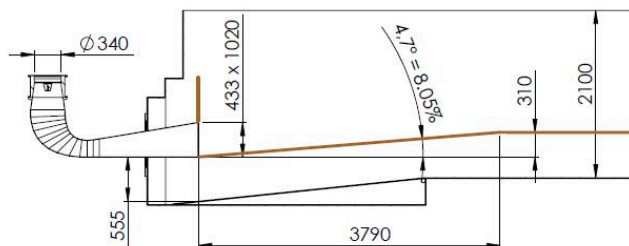


Bild 4: Seitenansicht des Umbaus in MP03 (braun hervorgehoben; links); Foto des Umbaus (rechts) (TUM 2018)

Eine Zusammenfassung der umfangreichen Untersuchungen ist in TUM (2018) gegeben. Für MP01 zeigte sich, dass bei regulären Betriebspunkten mit Durchflüssen nahe dem Optimaldurchfluss und darüber die Lage des Betriebspunktes im Kennfeld der untersuchten Turbine kaum Einfluss auf die Strömungscharakteristik im Unterwasser hat. Als zusammenfassendes Ergebnis von MP01 wurde festgehalten, dass die absolute Ausprägung von Strömungsstrukturen sehr stark mit der hydraulischen Gestaltung der Turbinen- und Saugrohrgeometrie und deren Zusammenwirken verknüpft ist. Das bedeutet, dass jedes Turbinendesign eine unterschiedlich

ausgeprägte Nachströmung erzeugt, welche dann aber über einen weiten Betriebsbereich sehr ähnlich bleibt.

Die untersuchten off-cam-Betriebspunkte in MP02 zeigten, dass mit der Variation des Leit-Laufradzusammenhangs die Möglichkeit besteht, auf die Strömungsstruktur im Unterwasser von Wasserkraftanlagen einzuwirken. Da diese Variation grundsätzlich an allen Laufwasserkraftwerken mit Kaplan-Turbinen ohne jeglichen konstruktiven Eingriff durchführbar ist, steht somit ein Werkzeug zur gezielten Beeinflussung des Unterwassers im Hinblick auf eine Optimierung der Auffindbarkeit von Fischaufstiegsanlagen zur Verfügung. Allerdings ist ein off-cam-Betrieb mit Leistungseinbußen verbunden, weswegen ein solcher Betrieb standortspezifisch mit den Betreibern der WKA abzustimmen wäre. Der Nutzen solcher Maßnahmen wäre in Feldmessungen an Pilotstandorten weiter zu erproben.

Messprogramm MP03 hat bestätigt, dass die Strömungsstruktur im Nachlauf von Laufwasserkraftwerken zu sehr großen Teilen durch das vorhandene Turbinen- und Saugrohrdesign bestimmt wird. Die geringen Auswirkungen auf die Strömungsstruktur durch geometrische Veränderungen im Unterwassergerinne lassen den Schluss zu, dass das gleiche Turbinen-Saugrohrsystem auch immer wieder vergleichbare Strömungsstrukturen im Nachlauf eines Kraftwerks erzeugen wird - nahezu unabhängig von der spezifischen Gestaltung der Unterwasserzone am Kraftwerkstandort. Da die Turbinen- und Saugschlauchspezifika an nahezu allen Standorten unterschiedlich sind (TUM 2017a), wird eine Standardisierung der Leitströmung für eine optimale Auffindbarkeit ohne weiteres nicht möglich sein.

### **2.3 Numerische Modellierung an der BAW**

Um das Ziel einer möglichst realitätsnahen Abbildung der Strömungscharakteristik im Kraftwerksunterwasser im 3D-HN-Modell zu erreichen, wurden Simulationen mit verschiedenen Randbedingungsansätzen durchgeführt und die Ergebnisse mit Messdaten aus dem Turbinenversuchsstand (s. Abschnitt 2.2) verglichen (BAW 2019a).

Im ersten Teil der Untersuchung bezogen sich diese Randbedingungsansätze auf die Abschätzung der drallbehafteten Turbinenlaufradabströmung, wobei sich die Komplexität der Ansätze unterschied. Der Drallfaktor-Ansatz kommt mit einem Kalibrierungsparameter aus und ist damit der einfachste getestete Ansatz. Grundsätzlich ist mit diesem Ansatz eine Beeinflussung der Strömungscharakteristik im Unterwasser möglich, die Flexibilität in der Kalibrierung ist jedoch eingeschränkt. Die Erweiterung dieses Ansatzes um eine Drallrandbedingung am Laufradmantel erhöht die Flexibilität (Bild 5). Durch diesen Zweiparameteransatz ist es möglich, beliebige lineare Drallgeschwindigkeitsprofile abzubilden und somit eine bessere Ähnlichkeit zu gemessenen Drallprofilen zu erreichen. Die Ergebnisse zeigen einen deutlichen Zusammenhang zwischen dem Drallprofil und der Geschwindigkeitsverteilung im Saugrohraustritt, der gezielt durch die Wahl der Parameter zur Kalibrierung genutzt werden kann. Mit einem dritten Ansatz kann jedes beliebige, auch nicht lineare umfangsgemittelte Geschwindigkeitsprofil am Saugrohrinlass vorgegeben werden. Mit diesem Ansatz wurde das mittels einer Conradsonde im Versuchsstand gemessene Geschwindigkeitsprofil in der Laufradabströmung direkt als Geschwindigkeitsrandbedingung vorgegeben.

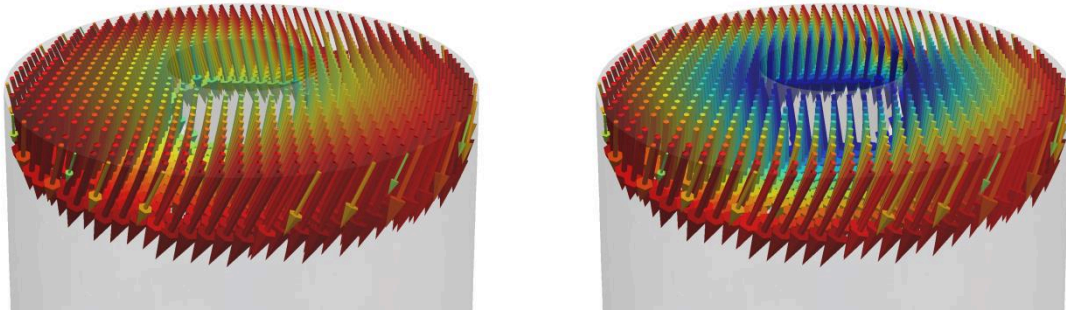


Bild 5: Beispiele für die Einlauffrandbedingung nach dem Drallfaktoransatz (links; Drallfaktor = 0,5) und dem Zweiparameteransatz (rechts; Drallfaktor = 1,0 und Laufradmantel-drall = 0,5) (BAW 2019a)

Die Simulationsergebnisse des dritten Ansatzes zeigen jedoch gegenüber dem Zweiparameteransatz keine verbesserte Ähnlichkeit mit den Geschwindigkeitsmessungen im Unterwasser des Versuchsstands.

Dies lässt den Schluss zu, dass die große Herausforderung sowohl in der geeigneten Definition der Einlassrandbedingung als auch in der adäquaten Modellierung der Strömungsprozesse im Saugrohr liegt. Dabei spielen neben der Geschwindigkeitsverteilung der Laufradabströmung auch Prozesse eine Rolle, die hier nicht untersucht wurden. Diese sind beispielsweise die durch die Laufradflügel induzierte hohe Instationarität der Strömung, die in dem verwendeten RANS-Modell (Reynolds-averaged Navier-Stokes) nicht berücksichtigt wurde, die Spaltströmung zwischen Laufradflügel und Laufradnabe bzw. dem Laufradmantel und ggf. auch eine über den Umfang betrachtete ungleichmäßige Beaufschlagung des Laufrads.

Im zweiten Teil wurde daher untersucht, welche Abbildungsgüte im Kraftwerksunterwasser mit dem 3D-HN-Modell erreicht werden kann, wenn die komplexe Saugrohrströmung ausgeklammert wird. Dazu wurde ein Modell ohne Saugrohr verwendet, dessen Einlassrandbedingung das im Unterwasser des Versuchsstands gemessene Geschwindigkeitsfeld ist, welches sich am nächsten zum Saugrohrauslass befindet. Die mit diesem Modell durchgeführten Simulationen erzielen eine sehr gute Übereinstimmung mit den übrigen, weiter unterstrom liegenden Messprofilen. Somit lassen sich für ein bekanntes Geschwindigkeitsfeld am Modelleinlassrand die mittleren Strömungsgrößen im Unterwasser sehr gut in einem 3D-HN Modell abbilden.

Von dieser Erkenntnis ausgehend wurden weitere Untersuchungen durchgeführt, mit denen das Potential von saugrohrnahen Geschwindigkeitsmessungen im Unterwasser realer Wasserkraftanlagen für die 3D-HN Modellierung abgeschätzt werden sollte. Dazu wurden die Daten am Modelleinlassrand sowohl in ihrer räumlichen Dichte als auch in ihrem Informationsgehalt (Vernachlässigung der Querströmungskomponenten und der räumlichen Verteilung der Geschwindigkeitsschwankungen) reduziert (Bild 6). Die Ergebnisse zeigen, dass die für eine gute Abbildung des Unterwassers notwendige Datendichte maßgeblich von der Heterogenität des Geschwindigkeitsfeldes abhängt, welches a priori nicht bekannt ist. Ungeachtet der messtechnischen Schwierigkeiten, die eine solche saugrohrnahe Geschwindigkeitsmessung im Feld mit sich bringt, könnten auf diese Weise wesentlich einfachere HN-Modelle verwendet werden, da sie kleiner und geometrisch sowie hydraulisch weniger komplex sind.



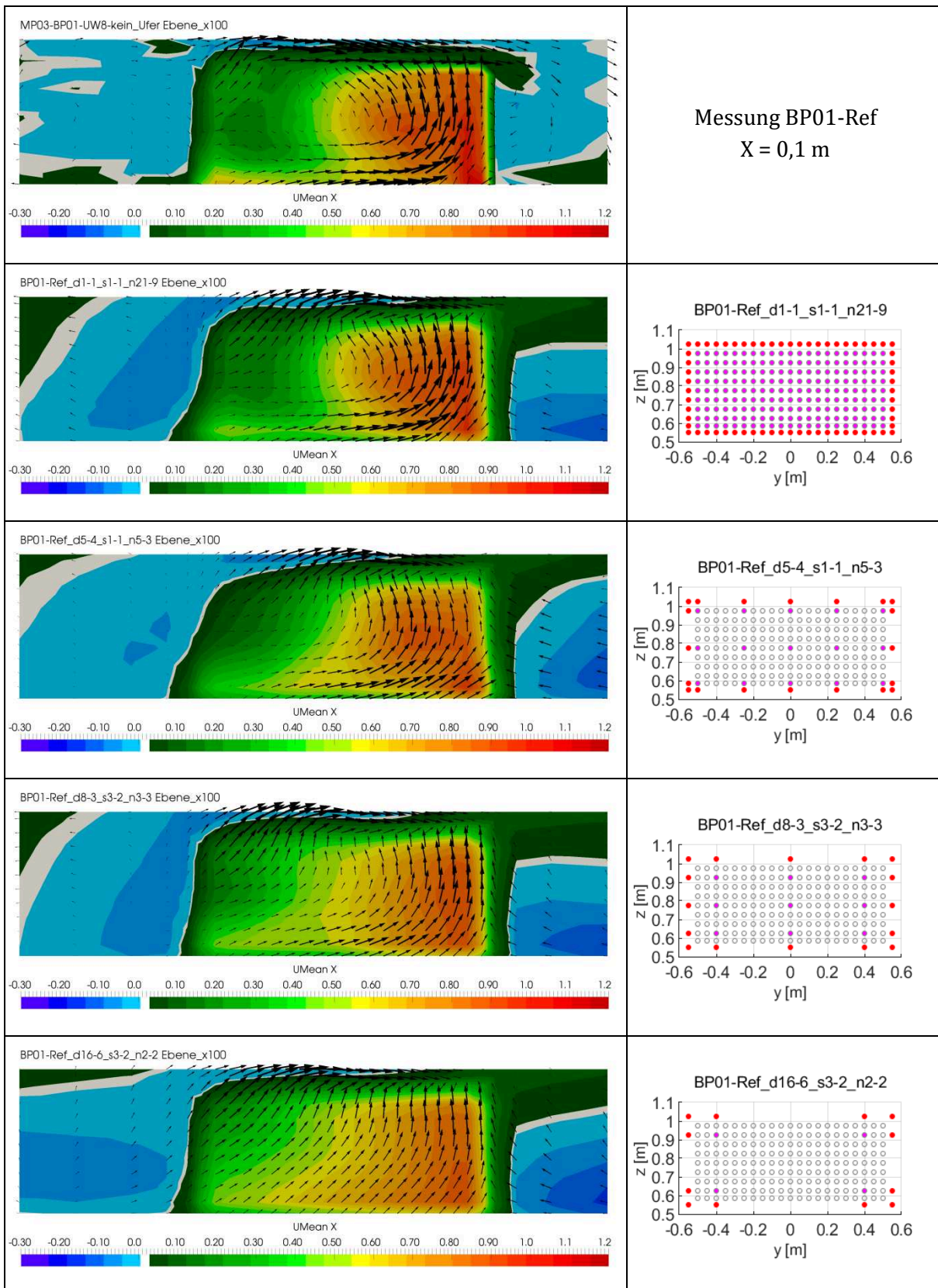


Bild 6: Vergleich von Messung (oben) und Simulation (links) mit unterschiedlich dichten Einlassrandbedingungen (magentafarbene Punkte rechts) 0,1 m unterhalb des Saugschlauchs (BAW 2019a)

Abschließend lässt sich festhalten, dass trotz einiger verbleibender Unsicherheiten numerische Modelle unter der Voraussetzung, dass sie an Messdaten kalibriert werden, ein geeignetes Werkzeug darstellen, um Fragen im Kontext der Auffindbarkeit von Fischaufstiegsanlagen zu beantworten. Numerische Modelle als Standardmethode zur Bemessung der Leitströmung zu verwenden, wird aber nicht als empfehlenswert erachtet, da die Modellbildung und dessen Kalibrierung erheblich von den gegebenen Standortbedingungen und der zur Verfügung stehenden Datenlage abhängen und somit diese Methode schwerlich zu standardisieren ist.

## 2.4 Versuche an der Versuchsanstalt Obernach der TU München

ADCP sind zur schnellen Vermessung zeitlich gemittelter Strömungsfeldern mit großer Ausdehnung derzeit alternativlos. Um die Güte der Vermessung von Kraftwerksunterwassern mit ADCP bzw. die Eignung der gewonnenen Daten für die Modellkalibrierung zu beurteilen, wurde in einem weiteren Projekt mit der TUM an der Versuchsanstalt Obernach (VAO) das Unterwasser der Turbine eines Schachtkraftwerks (Tabelle 2) vermessen. Darin wurden ADCP-Messungen mit Messungen mittels einer Anordnung von ADV-Sonden zur Aufnahme zusammenhängender Strömungsstrukturen verglichen (TUM 2017d, Bild 7). Es wurde hauptsächlich überprüft, ob sich die Messtechnik mit ihren verfahrensbedingten Einschränkungen (z. B. Auffächerung des Messvolumens, Mittelwertbildung in der Lotrechten) zur Erfassung turbulenter Strömungsstrukturen im Kraftwerksunterwasser eignet.

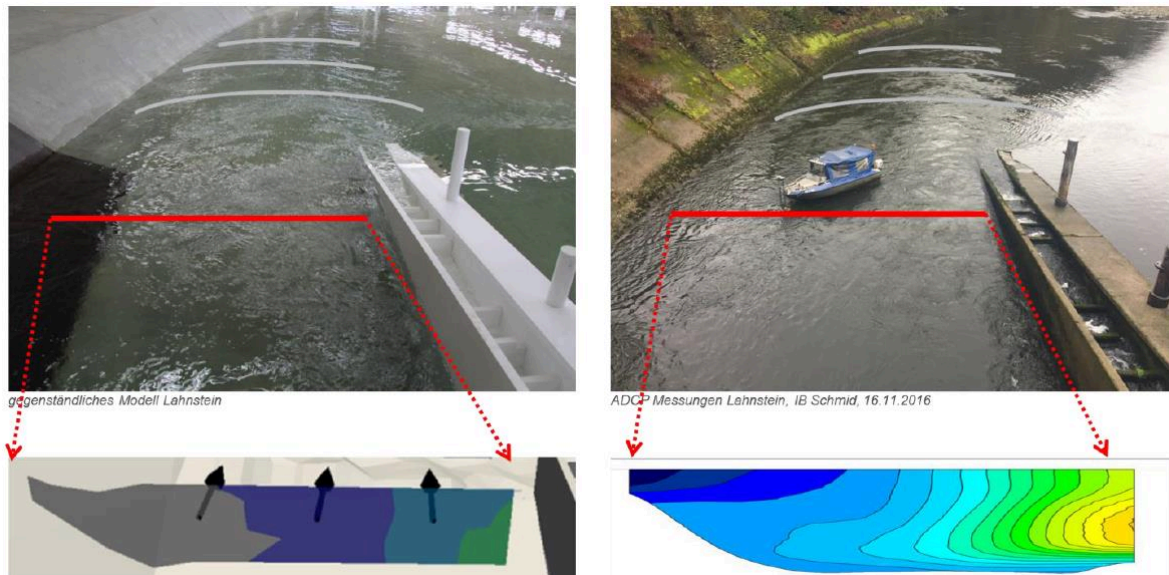
Tabelle 2: Anlagendaten Turbinenversuchsstand Obernach (TUM 2017d)

Laufreddurchmesser	DL	75 cm
Drehzahl	$n_T$	333 U/min
Ausbaufallhöhe	$H_A$	2,5 m
Ausbauabfluss	$Q_A$	1,5 m <sup>3</sup> /s



Bild 7: ADCP (links) und ADV-Anordnung im Turbinenversuchsstand Obernach (TUM 2017d)

Im Ergebnis lässt sich eine gute Übereinstimmung zwischen den Messungen mit ADCP und ADV feststellen. Bei einer ausreichend langen Messdauer und hinreichend konstanten Strömungsbedingungen im Unterwasser werden mit dem ADCP im Moving-Boat-Verfahren gute Mittelwerte der Strömung im Kraftwerksunterwasser erreicht (Heneka 2017). Die Ergebnisse wurden auch für die Beauftragung der Vermessung von Kraftwerksunterwassern für die Modellkalibrierung genutzt (Bild 8).



*Bild 8: Blick ins Unterwasser des Kraftwerkskanals in Lahnstein/Lahn. Links ist das gegenständliche Modell sowie gemessene ADV-Daten dargestellt. Rechts das Messboot während der Vor-Ort-Messungen und die entsprechenden ADCP-Daten (Bildquelle: IB Schmid, Kapsweyer 2016; in Heneka 2017)*

## 2.5 Gegenständliche Modellierung an der BAW

Im Projekt wurden zunächst gegenständliche Modelle für Leitströmungsuntersuchungen betrieben (z. B. BAW 2019c) bzw. wurden die Projektergebnisse für den Betrieb solcher Modelle genutzt (z. B. BAW 2017, s. Bild 8). In den Modellen wurde vor allem untersucht, wie sich durch Veränderungen der Einstiegsgestaltung und durch Variation der Leitdurchflüsse die Auffindbarkeit verbessern lässt. Mit den Ergebnissen der Modellierung der Einstiegsgestaltung und der Leitströmung der FAA Lauffen am Neckar (Bild 9) wurde eine vorläufige Bemessungsregel für die Leitströmung abgeleitet (Weichert et al. 2013).



*Bild 9: Gegenständliches Modell der Wasserkraftanlage Lauffen/Neckar mit geplantem Einstieg der Fischaufstiegsanlage, Blick vom Unterwasser in Richtung der Wasserkraftanlage (BAW 2019c)*

### **3 Entwicklung eines Berechnungsansatzes für die Leitströmung**

Da der aus gegenständlichen Modellversuchen gewonnene Ansatz zur Bemessung der Leitströmung (5%-Ansatz, s. Abschnitt 2.5) zu unspezifisch bezüglich der Standortrandbedingungen ist und numerische Modelle als Standardmethode zur Bemessung der Leitströmung ungeeignet sind (s. Abschnitt 2.3), wurde eine Bemessungsphilosophie zur Beurteilung der Leitströmung auf Grundlage weniger, leicht zugänglicher Standortparameter angestrebt. Der Grundidee folgend, dass die Strömung aus dem Einstiegsschlitz in die FAA hydraulisch einem Freistrahл entspricht, wurden Literaturstudien vergeben (Bleninger 2017, IfH 2017), in denen untersucht wurde, inwieweit sich für die Randbedingungen an FAA auf der bestehenden Freistrahл-Theorie aufbauen lässt. Nachdem das Ergebnis der beauftragten Studien positiv war, wurde in numerischen und gegenständlichen Modellversuchen ein Rahmenkonzept entworfen, durch das bestehende Ansätze auf die Situation von FAA im Unterwasser von WKA übertragen werden können (Henning et al. 2018). Der so erhaltene Ansatz wird derzeit gemeinsam mit der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) als Empfehlung für die Bemessung der Leitströmung mit der WSV abgestimmt.

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Das vorliegende FuE-Projekt war über seine Laufzeit wegen der Bedeutung der Auffindbarkeit für die Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit durch die WSV bzw. in der Forschung des Referats W1 ein zentraler Baustein.

Die Forschungsfragen beschäftigten sich mit der Entwicklung von Methoden zur Erzeugung und Beurteilung der Leitströmung von Fischaufstiegsanlagen. Da für die Leitströmungsausbreitung die Strömung im Kraftwerksunterwasser essentiell ist, zielte ein Großteil der Projektforschung auf die Möglichkeiten der Vermessung und Modellierung der Kraftwerksabströmung.

Durch die Bestandsaufnahme der Kraftwerksparameter an Standorten mit Wasserkraft an Bundeswasserstraßen wurde eine umfangreiche Datenbank gewonnen. Es zeigte sich jedoch auch, dass die angestrebte Standardisierung und Übertragbarkeit der Vermessung und Modellierung von Kraftwerksunterwassern wegen der Vielzahl unterschiedlicher Standortrandbedingungen mit Schwierigkeiten verbunden sein würde.

Umso wichtiger waren die Ergebnisse der Untersuchungen für die standortspezifische Modellierung an der BAW. Konkrete Anwendung fanden sie bisher vor allem in der Modellierung der WSV-Pilotstandorte (z. B. BAW 2013, Gisen et al. 2017, BAW 2019b).

Für die Gewinnung von Strömungsdaten in Kraftwerksunterwassern an großen Flüssen waren die Untersuchungen an der Versuchsanstalt Oberrach wichtig. Die Überprüfung dort ergab, dass das ADCP-Messverfahren trotz verfahrensbedingter Einschränkungen zuverlässige Strömungsmittelwerte liefert.

Da die Möglichkeit, numerische Modelle als Standardmethode zur Bemessung der Leitströmung zu verwenden wegen der Komplexität der Aufgabe verworfen werden musste, wurde stattdessen mit Hilfe der Projektergebnisse gemeinsam mit der BfG ein allgemeiner Ansatz zur übersichtlichen Berechnung der Größe der Leitströmung aufgestellt. Dieser wurde im Projektverlauf soweit verfeinert, dass er als Empfehlung für die Bemessung der Leitströmung eingeführt werden kann und sich derzeit mit der WSV in der Abstimmung befindet.

Es bestehen über den Projektabschluss hinaus offene Fragen, deren Beantwortung durch die Untersuchungen an den WSV-Pilotstandorten erfolgen soll (BfG und BAW 2017). Fragen der Standardisierung werden im Projekt „Kategorisierung von Stauanlagen“ (B3953.01.01.10123) weitergeführt.

## 5 Literatur

- BfG und BAW (2017): Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit für Fische an den Staustufen der Bundeswasserstraßen – Rahmenkonzept für Forschung und Entwicklung.
- BAW (2013): Gutachten über den Leitabfluss der geplanten Fischaufstiegsanlage am Kraftwerk Kochendorf/Neckar (BAW-Gutachten, B3953.01.31.10096).
- BAW (2017): Fischaufstiegsanlage Staustufe Lahnstein/Lahn: Modellversuche zur Ermittlung der Strömungscharakteristik im Unterwasser (BAW Gutachten, B3953.01.31.10118).
- BAW (2019a): Abbildung der Strömungscharakteristik eines Kraftwerksunterwassers im 3D-HN Modell – Möglichkeiten und Grenzen (BAW-Bericht, B3953.01.04.70004).
- BAW (2019b): Gutachten über die Bestimmung der Leitdurchflüsse für die FuE Szenarien an der Fischaufstiegsanlage Wallstadt/Main (BAW-Gutachten, B3953.01.31.10109).
- BAW (2019c): Gutachten über gegenständliche Modelluntersuchungen zur Einstiegsgestaltung und zur Leitströmung der Fischaufstiegsanlage Lauffen am Neckar (BAW-Gutachten, B3953.01.31.10096).
- Bergmann, Linda I. (2017): Numerische Modellierung der Strömung aus dem Einstieg einer Fischaufstiegsanlage mittels OpenFOAM; Masterarbeit angefertigt an der BAW und dem Institut für Hydromechanik, KIT.
- Bleninger, Tobias (2017): Literaturstudie über dreidimensionale, oberflächennahe, rechteckige Freistrahlen: Abschlussbericht, MixSys Tobias Bleninger.
- Gisen, David C.; Heneka, Patrick; Schütz, Cornelia (2016): Fish-size-based criteria for assessing attraction flow. Proc. Fish Passage Conference 2016, Amherst, USA.
- Gisen, David C.; Weichert, Roman B.; Nestler, John M. (2017): Optimizing attraction flow for upstream fish passage at a hydropower dam employing 3D Detached-Eddy Simulation. In: Ecological Engineering, 100, S. 344–353.
- Heneka, Patrick (2017): ADCP-Geschwindigkeiten im Unterwasser von Wasserkraftanlagen – Anwendung und Unsicherheitsanalyse; Kolloquium Naturuntersuchungen und Datenerhebungen für verkehrswasserbauliche Fragestellungen, geplant 18. bis 19. Mai 2017 an der BAW (abgesagt; daher unveröffentlicht).
- Henning, Martin; Heneka, Patrick; Schütz, Cornelia (2018): Hydraulic Approach for Dimensioning Fish Way Attraction Flow; International Conference on River Connectivity (Fish Passage 2018); Albury, Australia.
- IfH (2017); Literaturstudie über dreidimensionale, oberflächennahe Freistrahlen; Abschlussbericht; gefertigt durch Institut für Hydromechanik, KIT.
- Schmieder, Henrik (2018): Experimentelle Untersuchung von oberflächennahen Freistrahlen bei Variation der Einlassgeometrie eines Fischpasses; Bachelorarbeit angefertigt an der BAW und dem Institut für Hydromechanik, KIT.
- TUM (2016a): Strömungsstrukturen im Unterwasser von Niederdruckwasserkraftanlagen - Forschungsvorhaben der Technischen Universität München im Auftrag der Bundesanstalt für

Wasserbau. Drallwinkelmessungen Messprogramm 01. Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU München, München.

TUM (2016b): Strömungsstrukturen im Unterwasser von Niederdruckwasserkraftanlagen - Forschungsvorhaben der Technischen Universität München im Auftrag der Bundesanstalt für Wasserbau. Zwischenbericht Nr. 02 - Messprogramm MP01. Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU München, München.

TUM (2017a): Strömungsstrukturen im Unterwasser von Niederdruckwasserkraftanlagen - Forschungsvorhaben der Technischen Universität München im Auftrag der Bundesanstalt für Wasserbau. Zwischenbericht Nr. 01 - Vorstudie / Datenerhebung. Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU München, München.

TUM (2017b): Strömungsstrukturen im Unterwasser von Niederdruckwasserkraftanlagen - Forschungsvorhaben der Technischen Universität München im Auftrag der Bundesanstalt für Wasserbau. Conradsondenmessungen Messprogramm MP01 - Kurzbericht -. Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU München, München.

TUM (2017c): Strömungsstrukturen im Unterwasser von Niederdruckwasserkraftanlagen - Forschungsvorhaben der Technischen Universität München im Auftrag der Bundesanstalt für Wasserbau. Zwischenbericht Nr. 03 - Messprogramm MP02. Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU München, München.

TUM (2017d): Quantifizierung der Messungenauigkeiten des ADCP-Messverfahrens bei instationärer, ungleichförmiger Strömung": Versuchsbericht; gefertigt durch Lehrstuhl für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU München.

TUM (2018): Strömungsstrukturen im Unterwasser von Niederdruckwasserkraftanlagen - Forschungsvorhaben der Technischen Universität München im Auftrag der Bundesanstalt für Wasserbau. Zwischenbericht Nr. 04 - Messprogramm MP03 & Endbericht. Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU München, München.

Weichert, Roman; Kampke, Wolfgang; Deutsch, Lisa; Scholten, Matthias (2013): Zur Frage der Dotationswassermenge von Fischaufstiegsanlagen an großen Fließgewässern. In: Wasserwirtschaft, 1/2, S. 33-38.

Wiering, Veronica (2017): Experimentelle Untersuchungen eines oberflächennahen Freistrahls mit und ohne Konkurrenzströmung, Masterarbeit angefertigt an der BAW und dem Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, RWTH Aachen.



Kußmaulstraße 17 · 76187 Karlsruhe  
Tel. +49 (0) 721 97 26-0 · Fax +49 (0) 721 97 26-45 40

Wedeler Landstraße 157 · 22559 Hamburg  
Tel. +49 (0) 40 81 908-0 · Fax +49 (0) 40 81 908-373

[www.baw.de](http://www.baw.de)