

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Conference Paper, Published Version

**Bader, Sebastian; Rutschmann, Peter**

## **Kraftwerke an Bundeswasserstraßen: Datenerhebung und Untersuchung der UW-Strömungsstrukturen**

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102423>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Bader, Sebastian; Rutschmann, Peter (2014): Kraftwerke an Bundeswasserstraßen: Datenerhebung und Untersuchung der UW-Strömungsstrukturen. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Forschung und Entwicklung zur Qualitätssicherung von Maßnahmen an Bundeswasserstraßen. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau; Bundesanstalt für Gewässerkunde. S. 79-86.

### **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.



# Kraftwerke an Bundeswasserstraßen: Datenerhebung und Untersuchung der UW-Strömungsstrukturen

Sebastian Bader und Peter Rutschmann

## 1 Einleitung

Das Dieter-Thoma-Labor der Technischen Universität München (TUM) forscht derzeit im Auftrag der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) an der Auffindbarkeit von Fischaufstiegsanlagen (FAA) der Bundeswasserstraßen.

Diese können nur dann ausreichend funktionieren, wenn sie von Fischen mit geringem Zeit- und Energieverlust aufgefunden werden. Dies erfordert – aufgrund des im Vergleich zum Flussquerschnitt kleinskaligen Einstiegs – nach heutigem Stand des Wissens ein für den Fisch wahrnehmbares Strömungssignal, die sogenannte Leitströmung.

In einem Teilprojekt zur Unterstützung der stromaufwärts gewandten Wanderung wird die Situation speziell an Wehrstandorten mit Wasserkraftnutzung erforscht, um zum einen Aufschluss über die Beeinflussung der Strömungsstruktur im Unterlauf des Querbauwerks durch die Betriebsweise der Turbinen zu erhalten. Zum anderen soll gleichzeitig auch der Einfluss auf den Betrieb der Wasserkraftanlagen – speziell auf den Wirkungsgrad der Turbinen – bei denkbaren Änderungen in Bereich der Unterwasserströmungsstruktur untersucht werden.

Das erklärte Ziel der Projektpartner ist es hierbei, im Unterwasser „Win-Win“- bzw. „Win-No Lose“-Situationen zu schaffen, in denen ein Vorteil für die Auffindbarkeit der Einstiegsbereiche bei gleichzeitigem positiven oder mindestens neutralem Einfluss auf den Betrieb der Wasserkraftanlagen entsteht (BADER 2013).

Hierzu werden zunächst in einer umfangreichen Vorstudie die Wasserkraftanlagen an Bundeswasserstraßen auf anlagen- und turbinenspezifische Parameter abgefragt, um einerseits eine Kategorisierung der großen Menge an Anlagen zu ermöglichen und andererseits die Modellversuche entsprechend präzise planen und durchführen zu können.

Über die Modellversuche sollen Erkenntnisse über Geschwindigkeitsverteilungen sowie Wirbel- und Turbulenzverhalten bei unterschiedlichen Rand- und Betriebsbedingungen gewonnen werden, welche zu einem späteren Zeitpunkt an ausgewählten ausgeführten Anlagen verifiziert werden sollen (BADER 2013).

## 2 Vorstudie

### 2.1 Vorstudie – Motivation und Umfang

Mit Hilfe eines umfassenden Fragebogens, welcher an die Betreiber von Wasserkraftanlagen an Bundeswasserstraßen verschickt wurde, konnten Daten zur Maschinenausstattung sowie zur Anlage an sich abgefragt werden. Dabei werden zwei Ziele verfolgt:

Zum einen können durch eine umfangreiche Datensammlung Kraftwerkskategorien definiert und die einzelnen Anlagen entsprechend klassifiziert werden. Damit soll einerseits in einem weiteren Projekt die grundsätzliche Übertragbarkeit von Forschungs- und Planungsergebnissen zwischen einzelnen Anlagen untersucht werden. Wenn dies aussichtsreich erscheint, können dann andererseits klassenspezifische Beispielkraftwerke ausgewählt werden, an denen repräsentativ für eine größere Anzahl an ähnlichen Anlagen Messungen, sowie detaillierte Planungen zur Auffindbarkeit von FAA durchgeführt werden (BADER 2013).

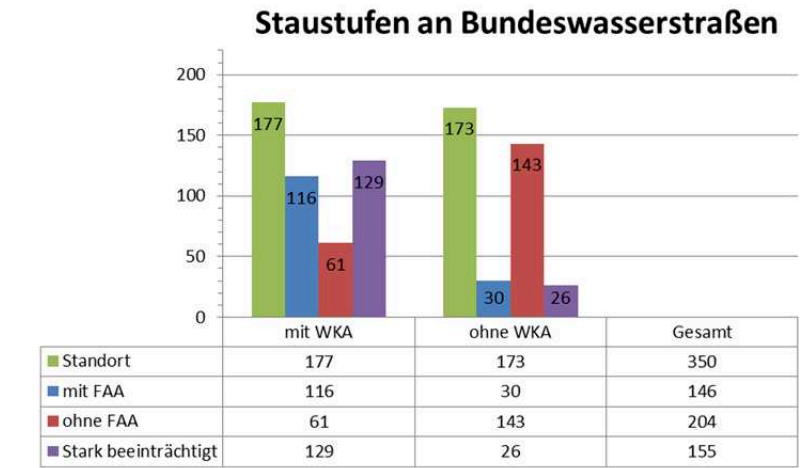
Zum anderen liefern die Daten eine Grundlage für die Ausrichtung von Messreihen sowie für die Definition von zu untersuchenden Parametern bei den geplanten Labormessungen.

Unter anderem sind folgende Parameter Bestandteil der Datenabfrage:

- Daten zum Kraftwerk allgemein → *Zweck: Kategorisierung, Informationen über den Betrieb*
  - Stauziel
  - UW-Stände bei  $Q_{30}$ ,  $Q_{330}$
  - Fallhöhe
  - Ausbauabfluss und -leistung
- Daten zur Turbinenausstattung → *Zweck: Drall, Steuerungsmöglichkeiten, Geschwindigkeiten, Klassifizierung*
  - Typ (Kaplan-Halbspirale, Rohrturbinen)
  - Anzahl
  - Regelung (Leit- und Laufapparat, Drehzahl)
  - Laufradgeometrien (Durchmesser)
- Daten zum Saugrohr / UW → *Zweck: Geschwindigkeiten, Abströmungsrichtung, Lage, Einfluss von UW-Strukturen, Klassifizierung*
  - Öffnungsgeometrie
  - Lage des Saugrohrs
  - UW-Geometrien (Steigung der Sohle)

Die Datenabfrage beschränkt sich – momentan – auf die großen Betreiber von Wasserkraftanlagen. Das bedeutet, dass nicht alle Kraftwerke an Bundeswasserstraßen in der Datenabfrage berücksichtigt werden. Aufgrund der großen Anzahl an Betreibern, welche beispielsweise lediglich eine Anlage betreiben, ist diese Vorgehensweise im Rahmen und vorgesehenem zeitlichen Umfang der Projektvorstudie alternativlos.

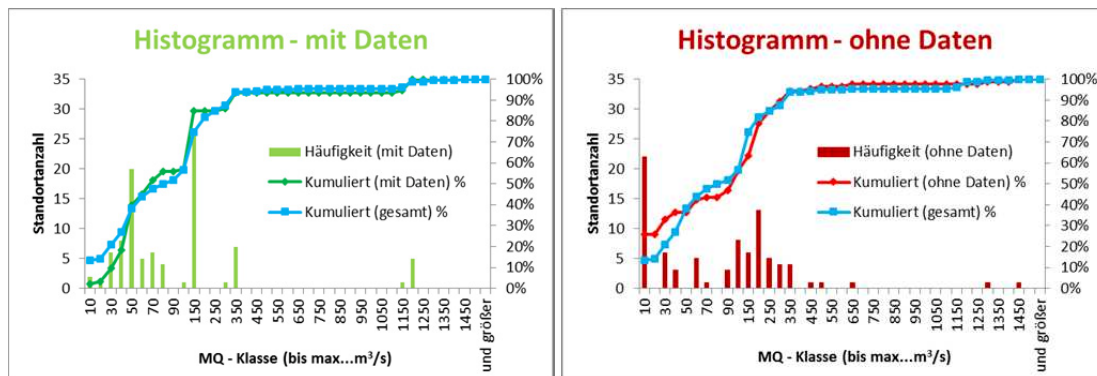
Insgesamt gibt es ca. 350 Stauanlagen an Bundeswasserstraßen, davon weist ungefähr die Hälfte eine angeschlossene Wasserkraftanlage auf. Von diesen 177 Kraftwerken sind über die Datenabfrage ca. 100-105 Anlagen abgedeckt, was einer Quote von ca. 55 % entspricht (siehe Abb. 1).



**Abb. 1:** Stautufen an Bundeswasserstraßen; Standorte mit bzw. ohne Fischaufstiegsanlage unterteilt in Anlagen mit bzw. ohne Wasserkraftnutzung (Quelle der Rohdaten: KÖNIG & BfG 2012)

Die Abbildungen 2a.) und 2b.) zeigen die Verteilung der Kraftwerke, von denen Daten bereits vorhanden sind bzw. erwartet werden. In den Histogrammen sind die Kraftwerke in Klassen nach ihrem mittleren Abfluss MQ eingeteilt. Dies soll stellvertretend für die Größe des Kraftwerks stehen.

An der kumulierten Linie ist zu erkennen, dass die Kraftwerke, von denen KEINE Daten erwartet werden, sich eher im kleinen Abflussbereich ( $MQ \leq 50 \text{ m}^3/\text{s}$ ) befinden. Im Umkehrschluss liegen die abgefragten Kraftwerke damit eher im mittleren und größeren Abflussbereich ( $MQ \geq 50 \text{ m}^3/\text{s}$ ).



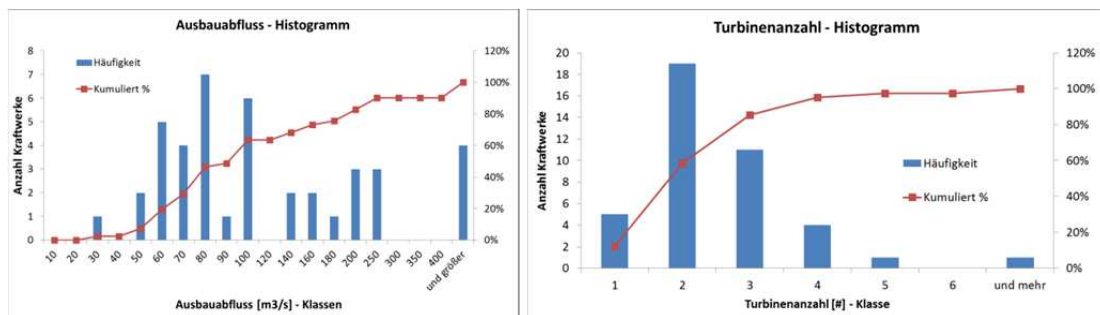
**Abb. 2a.) und b.):** Verteilung der Anlagen von denen Daten vorhanden sind bzw. erwartet werden nach der Größe des mittleren Abflusses MQ (Quelle der Rohdaten: KÖNIG & BfG 2012)

Da es bei der Untersuchung der Kraftwerke an Bundeswasserstraßen im Rahmen dieses Projekts insbesondere auch darum geht, Unterschiede zu bereits vorhandenem Wissen der Umsetzung der ökologischen Durchgängigkeit an kleineren Kraftwerken (siehe u. a. DWA-M 509, 2014), festzustellen, ist die Beschränkung auf größere Kraftwerksanlagen an Bundeswasserstraßen für das Ziel der Projektvorstudie gerechtfertigt.

## 2.2 Vorstudie – Erste Ergebnisse

Im Folgenden werden die ersten Ergebnisse der Vorstudie vorgestellt. Dabei wurden lediglich die 41 Kraftwerke herangezogen, deren Daten bereits ausgewertet werden konnten. Darunter finden sich jeweils 6 Kraftwerke an Donau und Weser, 27 Kraftwerke am Neckar und je ein Kraftwerk an Werra und Fulda. Die Daten der weiteren Kraftwerke werden später sukzessive in die Statistiken mit eingearbeitet.

Da es sich bisher nur um einen Teil der untersuchten Kraftwerke handelt, sollen in diesem Beitrag lediglich die Ergebnisse dieser – vorläufigen – Auswertung vorgestellt werden. Somit stellen die hier vorgestellten Ergebnisse einen Ausblick auf die Vorstudie dar und sollen aufzeigen, welche Ziele durch die Datenabfrage erreicht werden sollen. Um fundierte statistische Aussagen bzw. Rückschlüsse aus diesen Daten ziehen zu können, müssen erst noch die weiteren Anlagen mit in die Datengrundlage aufgenommen werden.



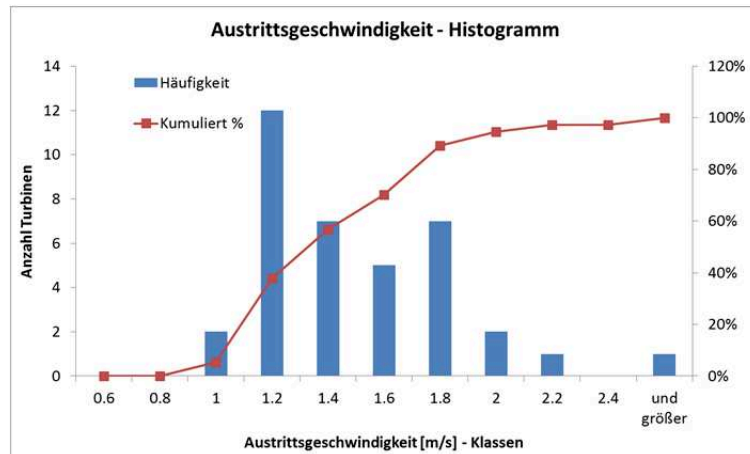
**Abb. 3a.) und b.):** Verteilung der Anlagen nach der Größe des Ausbauabflusses bzw. der Turbinenanzahl (Quelle der Rohdaten: E.ON, EnBW, Statkraft, TUM, 2014)

In Abbildung 3a.) sind die Kraftwerke nach ihrem Ausbauabfluss geordnet in Klassen unterteilt. Die kleineren Kraftwerke werden in der Vorstudie kaum berücksichtigt (siehe auch Abb. 2b.). Daher ist es zu erklären, dass sich auch beim Ausbauabfluss wenige Kraftwerke mit Abflüssen  $\leq 50 \text{ m}^3/\text{s}$  wiederfinden. Ungefähr  $\frac{2}{3}$  der untersuchten Anlagen weisen Ausbauabflüsse von  $\leq 100 \text{ m}^3/\text{s}$  auf. Sehr wenige Anlagen haben sehr hohe Ausbauabflüsse  $\geq 400 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Bei der Turbinenanzahl finden sich entsprechend auch meistens lediglich 2 oder 3 Turbinen pro Kraftwerk. Beim eingesetzten Turbinentyp zeigt sich folgendes Bild:

- > Kaplan-Halbspiral-Turbine: 33 Stück
- > Kaplan-Rohrturbine: 7 Stück
- > Sonstiges (Francis-Schachtturbine etc.): 7 Stück

Einen weiteren interessanten Parameter bei der Beschreibung der Strömungsstruktur stellt die mittlere Austrittsgeschwindigkeit dar, mit der der turbinierete Abfluss in das Unterwasser der Staustufe eintritt. Um diesen Parameter zu errechnen, wurde mit Hilfe der geometrischen Daten des Saugrohraustritts und des Ausbauabflusses der Turbinen die – als homogen verteilt angenommene – Strömungsgeschwindigkeit errechnet. Die Ergebnisse zeigt Abb. 4.



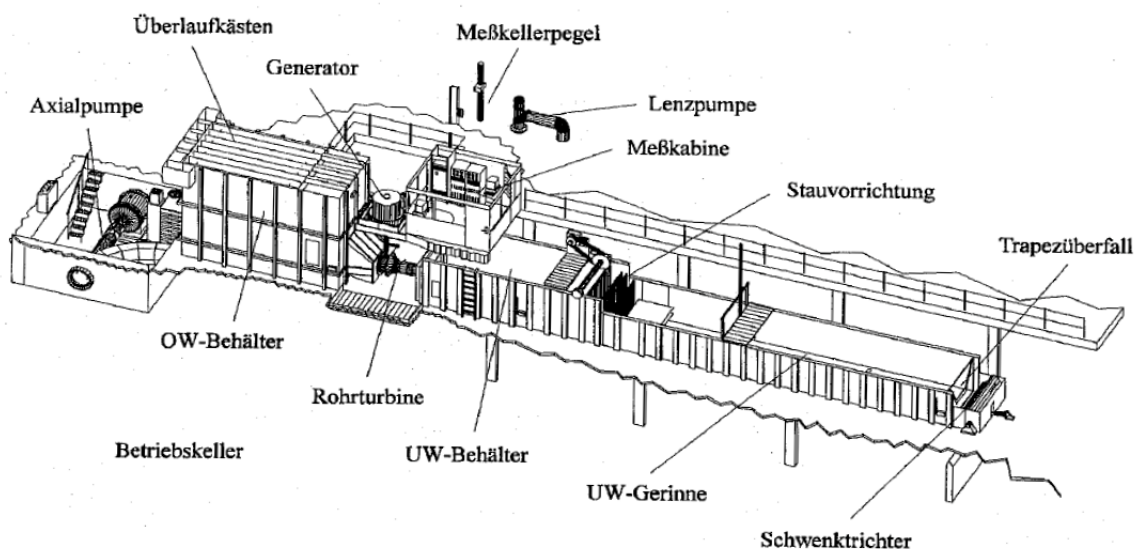
**Abb. 4:** Verteilung der Anlagen nach der Größe der Austrittsgeschwindigkeit am Ende des Saugrohrs (Quelle der Rohdaten: E.ON, EnBW, Statkraft; Auswertung: TUM 2014)

### 3 Modellversuche

#### 3.1 Modellversuche – Motivation und Versuchsstand

Durch die Modellversuche, welche im Dieter-Thoma-Labor der TU München durchgeführt werden, sollen Erkenntnisse über Geschwindigkeitsverteilungen, sowie Wirbel- und Turbulenzverhalten bei unterschiedlichen Randbedingungen der Turbine gewonnen werden.

Dazu steht ein voll funktionsfähiger Turbinenversuchsstand in offener Bauweise zur Verfügung, welcher realistische Strömungssituationen nachbilden kann, da eine voll funktionsfähige Turbine und kein Drallerzeuger oder ähnliches verwendet wird.



**Abb. 5:** Übersicht über den Turbinenversuchsstand am Dieter-Thoma-Labor der TU München (SCHNEIDER 1997)

Der Versuchsstand besitzt eine Kaplan-Halbspiralturbine mit 4 Laufradschaufeln und einer Schnellläufigkeit von  $n_q = \text{ca. } 260 \text{ U/min}$ . Es können Fallhöhen zwischen ca. 2,65 m und ca. 3,55 m und Volumenströme bis max. ca. 850 l/s realisiert werden. Der Unterwasserbereich nach dem Saugrohraustritt ist messtechnisch gut zugänglich, hat seitlich einen optischen Zugang von 1,8 m x 3,8 m und weist ein Volumen von ca. 2,50 m x 5,00 m x 1,80 m (B x L x T) auf.

### 3.2 Modellversuche – Messtechnik

Es wurde eine vollständig automatisierte Traversiervorrichtung mit 3 Achsen aufgebaut, welche selbstständig ein vorgegebenes Messraster abfahren kann. Dies geschah insbesondere deshalb, da ADV-Messungen durchgeführt werden, welche lediglich die Geschwindigkeit in einem Punkt des Messvolumens aufzeigen können. Um nun ein möglichst repräsentatives Gesamtbild der Strömungen im Bereich hinter dem Saugrohraustritt zu erhalten, müssen an sehr vielen Punkten des Messvolumens Messungen durchgeführt werden. Da dies mehrere Stunden bis ganze Tage dauern kann, war ein automatisiertes Abfahren zwingend erforderlich.

Die Verwendung der ADV-Messtechnik bringt den Vorteil einer einfach durchführbaren, gleichzeitig aber genauen Messung. Allerdings beinhaltet dies den Nachteil, dass lediglich in einem Punkt gleichzeitig gemessen werden kann. Das hat zur Folge, dass das Gesamtbild der Strömungsvorgänge auf einer zeitlichen Mittelung an den einzelnen Messpunkten basiert. Um instationäre Vorgänge im gesamten Messvolumen aufzeigen zu können, müsste ein volumetrisches Verfahren (wie z. B. Tomo-PIV) eingesetzt werden. Der Einsatz solcher volumetrischen Messtechniken ist momentan allerdings noch auf kleine Volumina (Kantenlänge ca. 10 cm) beschränkt: Damit ist dies keine Option für das sehr große vorhandene Messvolumen.

Allerdings soll versucht werden, über die Darstellung der Standardabweichungen pro Messpunkt einen Eindruck der Geschwindigkeitsfluktuation und somit in eingeschränktem Maße auch über die Turbulenzcharakteristik in diesem Messpunkt zu erhalten.

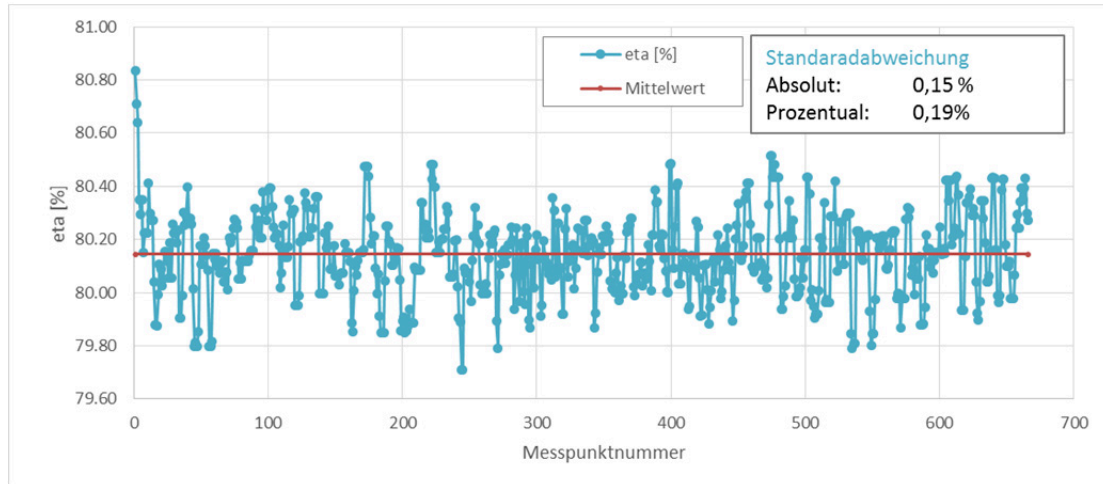
Später sollen in ausgewählten Betriebspunkten der Turbine und ausgewählten Stellen im Messvolumen 2D-PIV Messungen durchgeführt werden, um ebenso einen Einblick in instationäre Phänomene zwischen den einzelnen Messpunkten der ADV-Messung zu erhalten.

Um die bestmöglichen Ergebnisse der ADV-Messung zu erhalten, werden in einem Vorversuch die optimalen Einstellungen der ADV-Sonde ermittelt. Erste Ergebnisse dieser Voruntersuchung empfehlen folgende Einstellungen der ADV-Sonde:

- > Ziel: *3D Geschwindigkeitsmessungen*
- > Sondentyp: *Profiler*
- > Beams: *4 (2x z-Geschwindigkeit)*
- > Messfrequenz: *20 Hz*
- > Messzeit: *100 s*
- > Zellenanzahl: *1 Zelle*
- > Zellengröße *6mm Durchmesser*  
*4mm Zellhöhe*

Um sicherzustellen, dass der Betriebspunkt der Turbine (Drehzahl, Fallhöhe, Abfluss, Wirkungsgrad etc.) während der Gesamtmessung der einzelnen Messpunkte sich nicht bzw. nur wenig verändert, werden neben den Strömungsgeschwindigkeiten parallel auch sämtliche

Messdaten des Versuchsstands mit aufgezeichnet. Dies ermöglicht eine Aussage darüber, wie konstant der Betriebspunkt während der langwierigen ADV-Messung gehalten werden konnte. Abbildung 6 zeigt exemplarisch den Verlauf des Wirkungsgrades der eingesetzten Turbine über einen Messzeitraum von 6 h. Die Standardabweichung betrug dabei lediglich 0,15 % absolut.



**Abb. 6:** Messschrieb des Wirkungsgrades der Turbine während einer Messzeit von ca. 6 h

## 4 Ausblick

Der Versuchsstand inklusive Aufbau der Traversierung und des Messsystems konnte bereits abgeschlossen und erste Testmessungen durchgeführt werden. Erste Ergebnisse der Laborversuche sollen gegen Ende Oktober 2014 präsentiert werden können – zusammen mit der abgeschlossenen Auswertung der Datenerhebung an Kraftwerken der Bundeswasserstraßen.

Im Anschluss werden neben den ausgewählten regulären Betriebspunkten der Turbine weitere Betriebspunkte mit veränderten Randbedingungen wie z. B. deoptimiertem Leit-Laufapparat-Zusammenhang oder Variationen der Drehzahl vermessen, sowie ausgewählte Strukturen im Unterwasserbereich des Kraftwerks, wie z. B. die Steigung des Sohlanstiegs nach dem Saugrohr, modifiziert, um deren Auswirkung auf Strömungsgeschwindigkeiten und Wirbelverteilung untersuchen zu können.

## Literatur

- BADER, S. (2013): Strömungsstruktur im Unterwasser von Niederdruckwasserkraftanlagen, Ökohydraulik. Leben im, am und mit dem Fluss. Beiträge zur Fachtagung am 27. und 28. Juni 2013 in der Versuchsanstalt Obernach TU München, München.
- SCHNEIDER, C. (1997): Untersuchung der Wechselwirkung schnellläufiger Wasserturbinen mit dem Unterwasser, Dissertation des Lehrstuhls für Hydraulische Maschinen und Anlagen der TU München, München.
- KÖNIG, B. & BfG (2012): BfG-Datenbank zur Kategorisierung der Staustufen an den Bundeswasserstraßen, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz.





**Kontakt:**

**Sebastian Bader**

Technische Universität München  
Lehrstuhl für Wasserbau und  
Wasserwirtschaft  
Arcisstr. 21, 80333 München  
Tel.: 089/ 289 23806  
E-Mail: [sebastian.bader@tum.de](mailto:sebastian.bader@tum.de)

Jahrgang 1985

**2004-2010**

Studium des Maschinenwesens an der TU München,  
Deutschland sowie an der Kungl Tekniska Högskolan  
Stockholm, Schweden

**2010**

Diplom der TU München

**seit 2011**

Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für  
Wasserbau und Wasserwirtschaft, Dieter-Thoma-  
Labor

**Ausgewählte Projekte**

- |           |  |
|-----------|--|
| 2010-2012 | Mitarbeit am Projekt Schachtkraftwerk,<br>insbesondere Rechenreinigung   |
| 2011-2012 | Feststoffstudie Krüner Wehr – 3D-numerische<br>Simulationen  |
| seit 2012 | Untersuchung der Strömungsstrukturen im<br>Nachlauf von Niederdruckwasserkraftanlagen im Hinblick auf die Optimierung der<br>Auffindbarkeit in Fischaufstiegsanlagen<br>an Bundeswasserstraßen |



**Kontakt:**

**Prof. Dr. sc. techn.**

**Peter Rutschmann**

Technische Universität München  
Lehrstuhl für Wasserbau und  
Wasserwirtschaft  
Arcisstr. 21, 80333 München  
Tel.: 089/ 289 23161  
E-Mail: [peter.rutschmann@tum.de](mailto:peter.rutschmann@tum.de)

Jahrgang 1954

**1973-1979**

Studium und Diplom als Bauingenieur, ETH Zürich,  
Schweiz

**1984-1988**

Versuchingenieur an der Versuchsanstalt für Wasserbau,  
Hydrologie und Glaziologie (VAW) der  
ETH Zürich, Schweiz Experimentelle Doktorarbeit  
“Spillway chute aerators – Operation, Design and  
Calculation”

**1980-2001**

Mitarbeiter an der VAW der ETH Zürich in ver-  
schiedenen Funktionen

**2002-2007**

Ordinarius für Hydraulik, Hydrologie und wasser-  
bauliches Versuchswesen am Institut für Wasserbau  
der Innsbruck (IWI), Österreich

**2004-2007**

Vorstand des IWI

**seit 2007**

Ordinarius für Wasserbau und Wasserwirtschaft,  
Direktor des Oskar-von-Miller-Instituts der TU  
München (Versuchsanstalt für Wasserbau, Ober-  
nach)

1/2015

## Veranstaltungen

### Kolloquiumsreihe **Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit der Bundeswasserstraßen**

4. Kolloquium

**Forschung und Entwicklung zur Qualitätssicherung von  
Maßnahmen an Bundeswasserstraßen**

9./10. Juli 2014 in Koblenz

Koblenz, Februar 2015

## **Impressum**

Herausgeber: Bundesanstalt für Gewässerkunde  
Am Mainzer Tor 1  
Postfach 20 02 53  
56002 Koblenz  
Tel.: +49 (0)261 1306-0  
Fax: +49 (0)261 1306 5302  
E-Mail: [posteingang@bafg.de](mailto:posteingang@bafg.de)  
Internet: <http://www.bafg.de>

Druck: Druckerei des BMVI, Bonn

**ISSN 1866 – 220X**

**DOI: 10.5675/BfG\_Veranst\_2015.1**

### *Zitiervorschlag:*

Bundesanstalt für Gewässerkunde (Hrsg.): Forschung und Entwicklung zur Qualitätssicherung von Maßnahmen an Bundeswasserstraßen. 4. Kolloquium zur Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit der Bundeswasserstraßen am 9./10. Juli 2014 in Koblenz. – Veranstaltungen 1/2015, Koblenz, Februar 2015, 156 S.;  
DOI: 10.5675/BfG\_Veranst\_2015.1