

BAWEmpfehlung

Empfehlung für die Bemessung der Leitströmung von Fischaufstiegsanlagen an Standorten mit Wasserkraftnutzung für den kraftwerksnahen Einstieg

Ausgabe 2019

BAW-Merkblätter, -Empfehlungen und -Richtlinien Herausgeber

Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)
Kußmaulstraße 17
76187 Karlsruhe

Postfach 21 02 53
76152 Karlsruhe

Tel.: 0721 9726-0
Fax: 0721 9726-4540

info@baw.de
www.baw.de

Verfasser

Bearbeitung: P. Heneka, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

Übersetzung, Nachdruck – auch auszugsweise – nur mit Genehmigung des Herausgebers: © BAW 2019

Inhaltsverzeichnis		Seite
1	Vorbemerkungen	1
2	Anwendungsbereich	1
3	Bemessung der Leitströmung	2
3.1	Grundsätze	2
3.2	Bemessungskriterien	2
3.3	Benötigte Eingangsdaten	3
3.4	Bemessungsrelevante Ausdehnung der turbulenten Zone	3
3.5	Hydraulisch erforderliche Einstiegsbreite	4
3.6	Leitdurchfluss	5
4	Hinweise	6
4.1	Anbindung des Einstiegs an das Gewässer	6
4.2	Einstiegsschlitz	6
4.3	Dotation	7
5	Literaturverzeichnis	7

Anlagenverzeichnis

Anlage 1:	Erläuterungen zu den Festlegungen der Empfehlung für die Leitströmung an Standorten mit WKA	11
Anlage 2:	Benötigte Eingangsdaten	24
Anlage 3:	Rechenbeispiel	25

Die BAWEmpfehlung ist mit der Projektgruppe „Ökologische Durchgängigkeit“ des Referats U 4 der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) abgestimmt.

Das Dokument ist folgendermaßen aufgebaut: Der Hauptteil besteht aus den benötigten Festlegungen. In Anlage 1 sind Erläuterungen zu den einzelnen Festlegungen beschrieben. In den weiteren Anlagen befinden sich ein Überblick über die benötigten Eingangsdaten sowie ein Rechenbeispiel.

1 Vorbemerkungen

- (1) Die Leitströmung einer Fischaufstiegsanlage (FAA) ist neben der Lage der Einstiege entscheidend für die kleinräumige Auffindbarkeit und damit für die Funktionsfähigkeit der gesamten FAA.
- (2) Die vorliegende Empfehlung dient an Standorten mit Wasserkraftnutzung der Ermittlung der erforderlichen Leitströmung für den kraftwerksnahen Einstieg einer FAA und der damit verbundenen geometrischen Gestaltung des Einstiegs.
- (3) Die Empfehlung ersetzt im beschriebenen Anwendungsbereich sowohl die bisherige Empfehlung von BfG/BAW, nach der der Leitdurchfluss für den Bemessungsfall eines UW_{330} 5% des Ausbaudurchflusses der FAA-nahen Turbine betragen soll („5%-Empfehlung“), als auch projektspezifische Modellierungen der Leitströmung.
- (4) Es werden ausschließlich die Leitströmung betreffende Empfehlungen gegeben. Weitere Hinweise und Festlegungen zur Gestaltung von FAA und deren Einstiegen sind den einschlägigen Merkblättern (DWA 2014) zu entnehmen.
- (5) Die vorliegende Empfehlung ist für Standorte an Bundeswasserstraßen mit hohem Abfluss entwickelt worden. Bei der Anwendung an kleinen Gewässern sind im besonderen Maß der Anwendungsbereich und die Randbedingungen zu berücksichtigen.
- (6) Abweichungen von dieser Empfehlung sind zulässig, wenn sie ausreichend begründet werden können oder neuere Erkenntnisse vorliegen. Eine Abstimmung mit BAW/BfG ist erforderlich.

2 Anwendungsbereich

- (1) Die Empfehlung ist anwendbar, wenn die folgenden Randbedingungen eingehalten werden:
 - Die Wasserkraftanlage (WKA) liegt unmittelbar am Ufer.
 - Der Einstieg in die FAA liegt am Ufer und bündig zum Querbauwerk.
 - Der Einstieg ist als Schlitz ausgeführt.
 - Die Hinweise zum Einstieg in Kap. 4 sind berücksichtigt.
- (2) Wenn eine hydraulische Barriere im Unterwasser vorliegt, können gesonderte Festlegungen notwendig sein.
- (3) Die Empfehlung ist nicht anwendbar, wenn die FAA an einem Wehr ohne WKA liegt oder den obigen Anforderungen nicht genügt. Hier sind gesonderte Überlegungen zur Bemessung der Leitströmung erforderlich.

3 Bemessung der Leitströmung

3.1 Grundsätze

- (1) Um Fischen das Auffinden des FAA-Einstiegs ohne zeitliche Verzögerungen zu ermöglichen, ist eine gerichtete und wahrnehmbare Strömung unterstrom des Einstiegs erforderlich. Die stark turbulente Abströmung einer WKA erzeugt jedoch eine Zone (turbulente Zone TZ), in der diese Bedingungen nicht während des gesamten erforderlichen Abflussspektrums gegeben sind.
- (2) In der Einstiegsbucht der FAA neben der turbulenten Zone im Kraftwerksunterwasser sollen durch die Leitströmung eine kontinuierliche Strömung in Fließrichtung des Gewässers erzeugt und ufernahe Rückströmungen minimiert werden (Bild 1).
- (3) Um eine stabile Leitströmung bis in eine ausreichende Entfernung vom Einstieg zu gewährleisten, ist es erforderlich, dass sich die Leitströmung entlang des Ufers ausbreitet.
- (4) Die benötigte Ausbreitungslänge der Leitströmung ist standortspezifisch anhand der bemessungsrelevanten Ausdehnung der turbulenten Zone im Unterwasser der WKA zu ermitteln.
- (5) Im Einstiegsschlitz ist die Bemessungsgeschwindigkeit der Fischaufstiegsanlage zu gewährleisten und i. d. R. auch bei Einstau durch das Unterwasser mittels Dotation konstant zu halten.

3.2 Bemessungskriterien

- (1) Die Bemessung der Leitströmung richtet sich nach den Abflussbedingungen bei Ausbaudurchfluss der Wasserkraftanlage, d. h. unter Berücksichtigung von Q_{Ausbau} und dem korrespondierenden niedrigsten Unterwasserstand UW_{Ausbau} (Bemessungszustand).
- (2) Im Bemessungszustand muss die Leitströmungslänge L_{LS} aus einem FAA-Einstieg mindestens gleich der Ausdehnungslänge der turbulenten Zone L_{TZ} sein, d. h.

$$L_{LS} \geq L_{TZ} \quad (1)$$

- (3) Die Leitströmung ist definiert als die in das Unterwasser gerichtete Strömung aus dem Einstiegsschlitz, die durchgehend eine Fließgeschwindigkeit aufweist, welche größer als eine Mindestfließgeschwindigkeit $v_{LS,min}$ ist.
- (4) Als Länge der Leitströmung L_{LS} wird der lotrechte Abstand zwischen dem Ende der Leitströmung und Saugrohraustrittsfläche definiert.
- (5) Die Länge der Leitströmung lässt sich bei festgelegter Strömungsgeschwindigkeit im Einstieg über die Breite des Einstiegsschlitzes variieren.

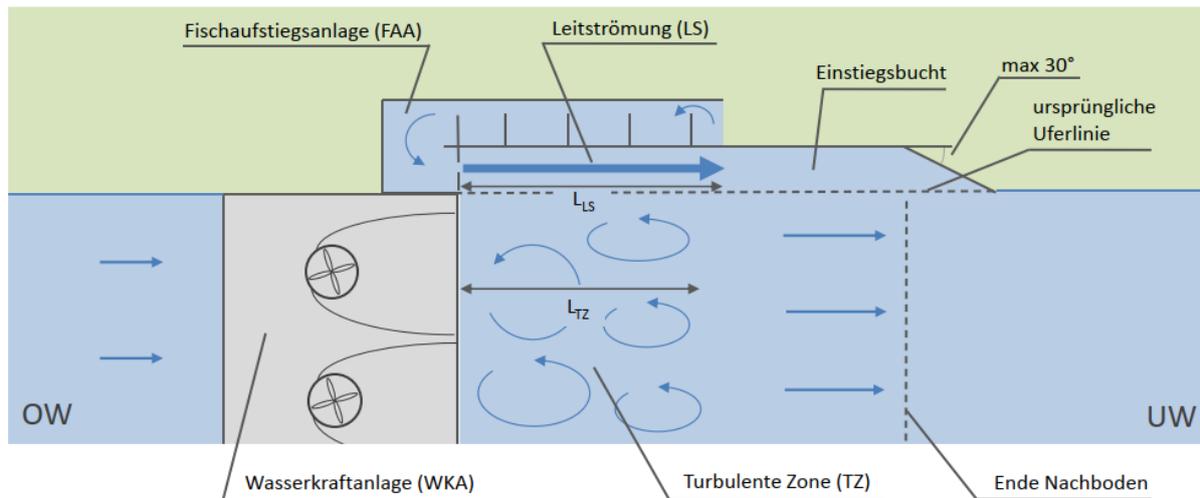


Bild 1: Schematische Darstellung einer Fischaufstiegsanlage an einer Wasserkraftanlage

3.3 Benötigte Eingangsdaten

- (1) Eine Zusammenstellung der für die Anwendung der Empfehlung benötigten Eingangsdaten befindet sich in Anlage 2.
- (2) Die Angaben zur Wasserkraftanlage in den Bestandsunterlagen sind vor Ort zu plausibilisieren.
- (3) Die Angaben zu hydrologischen Kennwerten, fischbiologischen Anforderungen und Bemessungswerten der FAA sind standortspezifisch zu ermitteln.
- (4) Zur Qualitätssicherung müssen sämtliche verwendete Daten mit Metadaten versehen sein.

3.4 Bemessungsrelevante Ausdehnung der turbulenten Zone

- (1) Für den Bemessungsfall ist die Ausdehnung der turbulenten Zone L_{TZ} nach Gl. (2) zu ermitteln.

$$L_{TZ} = \frac{1}{v_{\text{vertikal}}} (UW_{\text{Ausbau}} - HS_{SR}) \frac{Q_{\text{Ausbau}}}{NT \cdot ASR} \quad (\text{m}) \quad (2)$$

Dabei ist

- | | |
|-----------------------|---|
| v_{vertikal} | mittlere Vertikalgeschwindigkeit im Austrittsquerschnitt des Saugrohrs,
= 0,56 m/s für vertikal eingebaute Turbinen
= 0,70 m/s für horizontal eingebaute Rohrturbinen |
| UW_{Ausbau} | Niedrigster Unterwasserstand bei Ausbaudurchfluss, |
| HS_{SR} | Sohlhöhe Unterkante Austrittsfläche Saugrohr, |
| Q_{Ausbau} | Ausbaudurchfluss Wasserkraftanlage, |

N_T	Anzahl Turbinen,
A_{SR}	Fläche des Saugrohrs im Austrittsquerschnitt.

3.5 Hydraulisch erforderliche Einstiegsbreite

(1) Die hydraulisch erforderliche Breite b_{hyd} eines FAA-Einstiegs ist nach Gl. (3) zu ermitteln:

$$b_{hyd} = \frac{1}{2} \cdot k \cdot \frac{L_{TZ}}{c_1 \cdot c_2} \cdot \tan(\alpha_i) \cdot \left(\frac{2 v_{LS,min}}{v_{ES}} \right)^2 \quad (\text{m}) \quad (3)$$

Dabei ist

k	Formbeiwert der Strahlausbreitung,
L_{TZ}	bemessungsrelevante Ausdehnung der turbulenten Zone,
C_1	Korrekturfaktor für den Einfluss einer ufernahen Rückströmung,
C_2	Korrekturfaktor für den Einfluss des Schlitzes und einer naheliegenden Wand,
α_i	innerer Diffusionswinkel eines oberflächennahen Freistrahls,
$v_{LS,min}$	Mindestgeschwindigkeit der Leitströmung,
v_{ES}	Strömungsgeschwindigkeit im Einstiegsschlitz.

(2) Der Formbeiwert der Strahlausbreitung k errechnet sich zu

$$k = 1,0 \quad \text{für} \quad \frac{L_{TZ}}{c_1 \cdot c_2} \cdot \tan(\alpha_i) \leq h_{Ausbau} \quad (4)$$

$$k = \frac{L_{TZ} \cdot \tan(\alpha_i)}{c_1 \cdot c_2 \cdot h_{Ausbau}} \quad \text{für} \quad \frac{L_{TZ}}{c_1 \cdot c_2} \cdot \tan(\alpha_i) > h_{Ausbau} \quad (5)$$

Dabei ist

h_{Ausbau} Wassertiefe im Einstiegsschlitz bei Q_{Ausbau} bezogen auf den Unterwasserstand, d. h.

$$h_{Ausbau} = UW_{Ausbau} - HS_{ES} \quad \text{mit}$$

HS_{ES} Höhe der Sohle im Einstiegsschlitz

(3) Für den inneren Diffusionswinkel der Leitströmung ist $\alpha_i = 5^\circ$ zu verwenden.

(4) Die Mindestgeschwindigkeit der Leitströmung ist mit $v_{LS,min} = 0,8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ anzusetzen.

(5) Die Strömungsgeschwindigkeit im Einstiegsschlitz v_{ES} berechnet sich für eine FAA mit Dotation zu

$$v_{ES} = S_{RD} v_{bem} \quad (6)$$

Dabei ist

S_{RD}	Beiwert für die Regelung des Dotationsdurchflusses ($S_{RD} = 0,95$)
v_{bem}	Bemessungsgeschwindigkeit der FAA.

- (6) Der Korrekturfaktor für den Einfluss einer ufernahen Rückströmung C_1 , welche sich durch die Kraftwerksabströmung beim Durchfluss Q_{Ausbau} der WKA einstellt, ist nach Gl. (7) zu ermitteln.

$$C_1 = \exp\left(-\frac{13}{23} \frac{Q_{Ausbau}}{N_T \cdot A_{SR} \cdot v_{ES}}\right) \quad (7)$$

Dabei ist

Q_{Ausbau}	Ausbaudurchfluss Wasserkraftanlage,
N_T	Anzahl Turbinen,
A_{SR}	Fläche des Saugrohrs im Austrittsquerschnitt,
v_{ES}	Strömungsgeschwindigkeit im Einstiegsschlitz.

- (7) Der Korrekturfaktor für den Einfluss des Schlitzes und einer naheliegenden Wand C_2 ist zu $C_2 = 1,2$ anzunehmen. Die Hinweise zu Schlitzgeometrie und Wandabstand in Kap. 4 sind zu berücksichtigen.
- (8) Bei sehr großen Ausdehnungen der turbulenten Zone (ab ca. 20 m) werden zunehmend große Einstiegsbreiten und Durchflüsse notwendig, damit die erforderliche Distanz mit einer Leitströmung aus dem kraftwerksnahen Einstieg überwunden werden kann. Dies kann zu Problemen bei der praktischen Umsetzung führen z. B. durch den hohen Platzbedarf des Einstiegs- oder Dotationsbereichs. Falls dieser Fall auftritt, sind BAW/BfG zur Ermittlung der Einstiegsbreite einzubinden.

3.6 Leitdurchfluss

- (1) Der Leitdurchfluss für den kraftwerksnahen Einstieg kann in Abhängigkeit des Unterwasserstands nach Gl. (8) ermittelt werden:

$$Q_{Leit} = b \cdot (UW - HS_{ES}) \cdot v_{ES} \cdot c_d \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (8)$$

Dabei ist

b	Breite des Einstiegsschlitzes,
UW	Unterwasserstand,
HS_{ES}	Höhe der Sohle am Einstiegsschlitz,
v_{ES}	Strömungsgeschwindigkeit im Einstiegsschlitz,
c_d	Durchflussbeiwert des Einstiegsschlitzes ($c_d = 0,92$).

- (2) Die Breite des Einstiegsschlitzes b darf nicht kleiner sein als der Maximalwert aus der hydraulisch erforderlichen Einstiegsbreite b_{hyd} und der fischökologischen Mindestbreite b_{min} , d. h.

$$b \geq \max(b_{hyd}, b_{min}) \quad (9)$$

- (3) Die Ermittlung des Jahresmittelwerts des Leitdurchflusses erfolgt durch Integration der Leitdurchflüsse nach Gl. (8) über die Dauerlinie der Unterwasserstände.
- (4) Unterschreitet $b_{hy,d}$ die fischökologische Mindestbreite b_{min} und sinkt zudem die Geschwindigkeit im Einstiegsschlitz bei UW_{330} nicht unter 1,0 m/s, kann ggf. auf eine zusätzliche Dotation verzichtet werden.

4 Hinweise

4.1 Anbindung des Einstiegs an das Gewässer

- (1) Damit sich die Leitströmung neben der turbulenten Zone ausbreiten kann, muss – wenn nicht bereits vorhanden – eine uferseitige Einstiegsbucht errichtet werden (Bild 1).
- (2) Die Breite der Einstiegsbucht soll in etwa dem Dreifachen der Breite des Einstiegsschlitzes entsprechen (Bild 2).
- (3) Die Rückführung der Einstiegsbucht zum Gewässerufer beginnt nach Möglichkeit am Ende des Kraftwerks-Nachbodens, jedoch mindestens im Abstand L_{TZ} vom Einstieg. Der horizontale Winkel der Ufermauer soll dabei 30° nicht überschreiten.
- (4) Der Einstieg muss eine Anbindung an die Gewässersohle nach den Vorgaben des DWA (2014) besitzen.

4.2 Einstiegsschlitz

- (1) Die Gestaltung des Einstiegsschlitzes ist nach Bild 2 auszuführen.
- (2) Die Entfernung des Schlitzes zur Uferwand bzw. zum Ufer b_{Ufer} soll näherungsweise der Schlitzbreite b entsprechen.
- (3) Die Breite des Einstiegsbeckens soll nach Möglichkeit mindestens das Dreifache der Schlitzbreite b betragen, damit eine ausreichende Schlitzwirkung gegeben ist.
- (4) Die Wandstärke des Einstiegsschlitzes d im Grundriss sollte so gering wie möglich ausgeführt werden, jedoch 0,2 m nicht unterschreiten.
- (5) Die oberstromigen Kanten des Einstiegsschlitzes sind nach den Angaben in Bild 2 zu fassen. Eine scharfkantige Ausführung ist nicht zulässig.
- (6) Einrichtungen für den Revisionsverschluss sind so zu platzieren, dass die Leitströmung nicht beeinflusst wird.

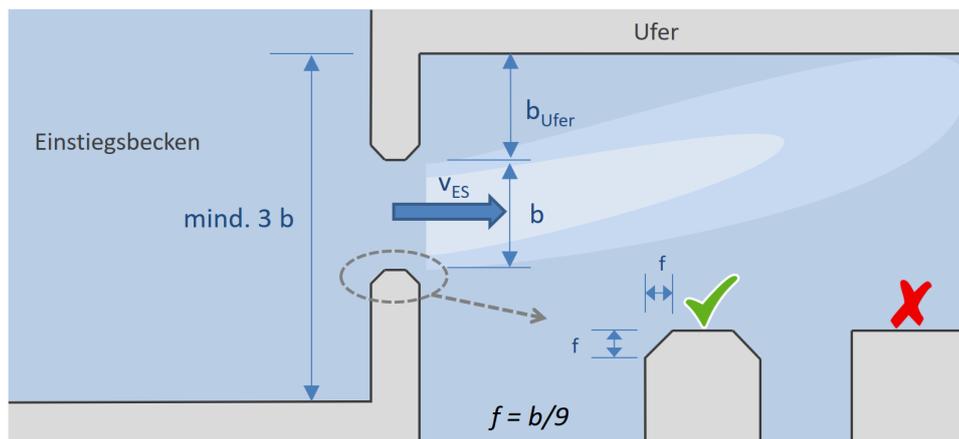


Bild 2: Schematische Darstellung des Einstiegs in eine FAA

4.3 Dotation

- (1) Der Leitdurchfluss setzt sich aus dem Betriebsdurchfluss der FAA sowie dem Dotationsdurchfluss zusammen.
- (2) Für die konstruktive Ausgestaltung des Einleitungsbereiches des Dotationsdurchflusses ist die Bemessungsempfehlung Dotation zu berücksichtigen (BAW und BfG 2017).

5 Literaturverzeichnis

Adam, Beate; Schwevers, Ulrich; Dumont, Ulrich (1999): Beiträge zum Schutz abwandernder Fische. Verhaltensbeobachtungen in einem Modellgerinne. Solingen: Verlag Natur & Wissenschaft (Bibliothek Natur & Wissenschaft, Bd. 16).

Adam, Beate.; Schwevers, Ulrich (1997): Aspekte des Schwimmverhaltens rheophiler Fischarten. In: *Österreichs Fischerei* 50, S. 256–260.

Adams, E. W.; Johnston, J. P. (1988): Effects of the separating shear layer on the reattachment flow structure part 2. Reattachment length and wall shear stress. In: *Experiments in Fluids* 6 (7), S. 493–499. DOI: 10.1007/BF00196511.

Arbeitsgruppe Fischaufstiegshilfen (AG-FAH) (2011): Grundlagen für einen österreichischen Leitfaden zum Bau von Fischaufstiegshilfen (FAHs). Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Wien.

Arnold, G. P. (1974): Rheotropism in fishes. In: *Biological Reviews* 49 (4), S. 515–576. DOI: 10.1111/j.1469-185X.1974.tb01173.x.

BAW und BfG (2015): Arbeitshilfe Fischaufstiegsanlagen an Bundeswasserstraßen (AH FAA). Version 2.0, 26.06.2015.

BAW und BfG (2017): Bemessungsempfehlungen zur Dotation in Becken einer Fischaufstiegsanlage. BAW/BfG.

Bergmann, Linda (2017): Numerische Modellierung der Strömung aus dem Einstieg einer Fischaufstiegsanlage mittels OpenFOAM. Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe. Institut für Hydromechanik.

Blake, R. W.; Chan, K. H. (2010): Biomechanics of Rheotactic Behaviour in Fishes. 2. In: Paolo Domenici und B. G. Kapoor (Hg.): Fish locomotion. An eco-ethological perspective. Enfield, New Hampshire: Science Publishers, S. 40–61.

Bleninger, Tobias (2017): Literaturstudie über dreidimensionale, oberflächennahe, rechteckige Freistrahlen. Abschlussbericht. MixSys.

Chen, Y. T.; Nie, J. H.; Armaly, B. F.; Hsieh, H. T. (2006): Turbulent separated convection flow adjacent to backward-facing step—effects of step height. In: *International Journal of Heat and Mass Transfer* 49 (19-20), S. 3670–3680. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.02.024.

Cotel, Aline J.; Webb, Paul W. (2015): Living in a Turbulent World-A New Conceptual Framework for the Interactions of Fish and Eddies. In: *Integrative and comparative biology* 55 (4), S. 662–672. DOI: 10.1093/icb/icv085.

Deniz, Sabri; Bosshard, Max; Speerli, Jürg; Volkart, Peter (1990): Saugrohre bei Flusskraftwerken. Hg. v. D. Vischer. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich. Zürich (Mitteilungen, 106).

DWA (2014): Merkblatt DWA-M 509. Fischaufstiegsanlagen und fischpassierbare Bauwerke - Gestaltung, Bemessung, Qualitätssicherung. Hg. v. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA). Hennef (DWA-Regelwerk).

Eiff, O.; Lang, C.; Herrero, M. (2017): Literaturstudie über dreidimensionale, oberflächennahe Freistrahlen. Abschlussbericht. Institut für Hydromechanik KIT. Karlsruhe (IfH-Bericht, Nr. 854).

Faghani, Ehsan; Saemi, Simin Dokht; Maddahian, Reza; Farhanieh, Bijan (2011): On the effect of inflow conditions in simulation of a turbulent round jet. In: *Arch Appl Mech* 81 (10), S. 1439–1453. DOI: 10.1007/s00419-010-0494-8.

Gholamreza-Kashi, Soheil; Martinuzzi, Robert J.; Baddour, Raouf E. (2007): Mean Flow Field of a Nonbuoyant Rectangular Surface Jet. In: *J. Hydraul. Eng.* 133 (2), S. 234–239. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:2(234).

Hefti, Daniel (2012): Wiederherstellung der Fischauf- und -abwanderung bei Wasserkraftwerken. Checkliste Best practice. Bundesamt für Umwelt (BAFU). Bern (Umwelt-Wissen, Nr. 1210).

Hinch, Scott G.; Cooke, Steven J.; Healey, Michael C.; Farrell, A. P. (2005): Behavioural Physiology of Fish Migrations. Salmon as a model approach. In: *Fish Physiology* 24, S. 239–295. DOI: 10.1016/S1546-5098(05)24007-4.

Khorsandi, B.; Gaskin, S.; Mydlarski, L. (2013): Effect of background turbulence on an axisymmetric turbulent jet. In: *J. Fluid Mech.* 736, S. 250–286. DOI: 10.1017/jfm.2013.465.

Kraatz, Willi (1975): Ausbreitungs- und Mischvorgänge in Strömungen. Dissertation. Technische Universität Dresden, Dresden.

Lacey, J. R. W.; 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. Special Issue Paper. In: *River Res. Applic.* 28 (4), S. 429–443. DOI: 10.1002/rra.1584.

Larinier, Michel (2002): Location of fishways. In: *Bull. Fr. Pêche Piscic.* (364 supplément), S. 39–53. DOI: 10.1051/kmae/2002106.

Liao, James C. (2007): A review of fish swimming mechanics and behaviour in altered flows. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 362 (1487), S. 1973–1993. DOI: 10.1098/rstb.2007.2082.

Lupandin, A. I. (2005): Effect of Flow Turbulence on Swimming Speed of Fish. In: *Biology Bulletin* 32 (5), S. 461–466. DOI: 10.1007/s10525-005-0125-z.

Madnia, C. K.; Bernal, L. P. (1994): Interaction of a turbulent round jet with the free surface. In: *J. Fluid Mech.* 261 (-1), S. 305. DOI: 10.1017/S0022112094000352.

Mahl, Lena; Heneka, Patrick (2020): Effect of Slot Geometry on Propagation of Turbulent Rectangular Surface Jets. in preparation.

Miozzi, M.; Lalli, F.; Romano, G. P. (2010): Experimental investigation of a free-surface turbulent jet with Coanda effect. In: *Experiments in Fluids* 49 (1), S. 341–353. DOI: 10.1007/s00348-010-0885-1.

Odeh, Mufeed; Noreika, John F.; Haro, Alex; Maynard, Aubin; Castro-Santos, Theodore; Čada, Glenn F. (2002): Evaluation Of The Effects Of Turbulence On The Behavior Of Migratory Fish. Final Report 2002. Bonneville Power Administration (BPA), U.S. Department of Energy (BPA Report, DOE/BP-0000022-1).

Pani, B. S.; Parameswaran, P. V. (1994): Momentum and heat flux characteristics of three dimensional jets based on point-source concept. In: *Journal of Hydraulic Research* 32 (1), S. 53–66. DOI: 10.1080/00221689409498789.

Pavlov, D.; Lupandin, A.; Skorobogatov, M. (2000): The Effects of Flow Turbulence on the Behavior and Distribution of Fish. In: *Journal of Ichthyology*.

Pavlov, D. S. (1989): Structures assisting the migrations of non-salmonid fish: USSR. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome (FAO fisheries technical paper, 308).

Perez Alvarado, Alejandro (2016): Effect of background turbulence on the scalar field of a turbulent jet. PHD-Thesis. Montreal, Canada.

Prych, E. A. (1973): An analysis of a jet into a turbulent ambient fluid. In: *Water Research* 7 (4), S. 647–657. DOI: 10.1016/0043-1354(73)90064-X.

Quinn, W. R. (2006): Upstream nozzle shaping effects on near field flow in round turbulent free jets. In: *European Journal of Mechanics - B/Fluids* 25 (3), S. 279–301. DOI: 10.1016/j.euromechflu.2005.10.002.

Rajaratnam, N.; Humphries, J. A. (1984): Turbulent non-buoyant surface jets. In: *Journal of Hydraulic Research* 22 (2), S. 103–115. DOI: 10.1080/00221688409499387.

Schmieder, Henrik (2018): Experimentelle Untersuchung von oberflächennahen Freistrahlen bei Variation der Einlassgeometrie eines Fischpasses. Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe. Institut für Hydromechanik.

Sforza, P. M.; Steiger, M. H.; Trentacoste, N. (1966): Studies on three-dimensional viscous jets. In: *AIAA Journal* 4 (5), S. 800–806. DOI: 10.2514/3.3549.

Silva, Ana T.; Katopodis, Christos; Santos, José M.; Ferreira, Maria Teresa; Pinheiro, António N. (2012): Cypriid swimming behaviour in response to turbulent flow. In: *Ecological Engineering* 44, S. 314–328. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2012.04.015.

Silva, Ana T.; Lucas, Martyn C.; Castro-Santos, Theodore; Katopodis, Christos; Baumgartner, Lee J.; Thiem, Jason D. et al. (2018): The future of fish passage science, engineering, and practice. In: *Fish and Fisheries* 19 (2), S. 340–362. DOI: 10.1111/faf.12258.

Tihon, J.; Legrand, J.; Legentilhomme, P. (2001): Near-wall investigation of backward-facing step flows. In: *Experiments in Fluids* 31 (5), S. 484–493. DOI: 10.1007/s003480100300.

Tritico, Hans M.; Cotel, Aline J. (2010): The effects of turbulent eddies on the stability and critical swimming speed of creek chub (*Semotilus atromaculatus*). In: *Journal of Experimental Biology* 213 (13), S. 2284–2293. DOI: 10.1242/jeb.041806.

Tudorache, C.; Viaene, P.; Blust, R.; Vereecken, H.; Boeck, G. de (2008): A comparison of swimming capacity and energy use in seven European freshwater fish species. In: *Ecology of Freshwater Fish* 17 (2), S. 284–291. DOI: 10.1111/j.1600-0633.2007.00280.x.

Webb, Paul W.; Cotel, Aline J.; Meadows, Lorelle A. (2010): Waves and Eddies: Effects on Fish Behavior and Habitat Distribution. 1. In: Paolo Domenici und B. G. Kapoor (Hg.): *Fish locomotion. An eco-ethological perspective*. Enfield, New Hampshire: Science Publishers.

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. RWTH Aachen. Aachen.

Wiering, Veronica; Heneka, Patrick; Bergmann, Linda (2019): Effect of Aspect Ratio on the Propagation of Turbulent Rectangular Surface Jets. in preparation.

Anlagen

Anlage 1: Erläuterungen zu den Festlegungen der Empfehlung für die Leitströmung an Standorten mit WKA

zu 1 Vorbemerkungen

zu (1)

Für eine gute Funktionsfähigkeit einer Fischaufstiegsanlage sind insbesondere drei Punkte wichtig: die großräumige und kleinräumige Auffindbarkeit sowie die Passierbarkeit. Um großräumig auffindbar zu sein, muss die FAA richtig im Gewässer positioniert werden, d. h. in der Regel unmittelbar neben der Hauptströmung. Für die kleinräumige Auffindbarkeit sind die hydraulischen und geometrischen Verhältnisse unmittelbar im Bereich des Einstiegs wesentlich, d. h. die Lage des Einstiegs und die Leitströmung aus dem Einstieg. Die Leitströmung wird durch den Leitdurchfluss erzeugt, welcher sich aus dem Betriebsdurchfluss der FAA sowie ggf. einem zusätzlichen Dotationsdurchfluss zusammensetzt. Die Passierbarkeit der FAA stellt sicher, dass die relevanten Fischarten die FAA durchschwimmen können.

zu (3)

In den einschlägigen Merkblättern (z. B. DWA 2014; Hefti 2012; Arbeitsgruppe Fischaufstiegshilfen (AG-FAH 2011) mangelt es an konkreten Vorgaben zur Bemessung einer Leitströmung. Aus diesem Grund wurde 2015 mit der Arbeitshilfe AH FAA (BAW und BfG 2015) die – häufig so genannte – 5%-Empfehlung eingeführt (siehe auch Weichert et al. 2013), um den Leitdurchfluss zu ermitteln. Voraussetzung für die Anwendbarkeit sind vergleichbare Eigenschaften des jeweiligen Standorts zur Staustufe Lauffen am Neckar, für welche die Empfehlung erstellt wurde. Bei größeren Abweichungen zum Vergleichsstandort wird die Prognose der 5%-Empfehlung unschärfer.

Mit der vorliegenden Empfehlung wird für alle Standorte mit WKA eine einheitliche Bemessung der Leitströmung und des kraftwerksnahen Einstiegs ermöglicht, sodass eine vergleichbare Ausprägung der Leitströmung jeweils in Bezug zu den Strömungseigenschaften des Unterwassers sichergestellt werden kann.

zu (5)

Die kleinräumige Auffindbarkeit und damit die Auslegung einer Leitströmung basiert gemäß DWA (2014) darauf, dass mit der Leitströmung an einen bestehenden Wanderkorridor der Fische im Unterwasser von Stauanlagen angeschlossen wird. Die Strömung unterhalb von Wasserkraftanlagen wird dabei von einer Vielzahl an Parametern beeinflusst. Eine Auslegung der Leitströmung auf alle denkbaren Parameter ist jedoch nicht möglich. Es wird vielmehr bei der Bemessung der Leitströmung auf die wesentlichen Bemessungsfälle der FAA fokussiert. Im Gegensatz zur bisher gültigen 5%-Empfehlung werden in dieser Empfehlung die wesentlichen auf die Leitströmung einwirkenden Parameter berücksichtigt. Wegen der unterschiedlichen Ausprägung der Standorte an Bundeswasserstraßen kann es allerdings Situationen geben, für die die beschriebenen Randbedingungen nicht eindeutig bzw. Grundlagendaten schwierig zu ermitteln sind. In solchen Situationen ist eine sorgfältige Anwendung der Empfehlung erforderlich.

zu 2 Anwendungsbereich

zu (1)

Für eine optimale Auffindbarkeit muss der FAA-Einstieg bündig zum Querbauwerk angeordnet werden, d. h. bei Standorten mit Wasserkraftnutzung ist dies i. d. R. die Saugrohraustrittsfläche (DWA 2014). Damit wird vermieden, dass der Einstieg infolge einer longitudinalen Sackgasse zum Wanderhindernis nicht bzw. schlecht auffindbar ist. In Fällen, bei denen eine solche Anordnung aus konstruktiven Gründen (z. B. aufgrund von Bestandsbauwerken) nicht möglich ist, darf der Einstieg geringfügig ins Unterwasser verlegt werden. Als Grenze gilt derzeit ein Abstand von der Länge eines Wendebeckens, also in einer Größenordnung von ca. 4 m.

Die Empfehlung setzt einen Einstiegsschlitz mit einem Einstiegsbecken voraus. Aufgrund der schwankenden Unterwasserstände ist dies an den meisten Standorten der Fall. Für abweichende Bautypen (z. B. Raugerinne) gelten die Bemessungskriterien grundsätzlich ebenfalls; allerdings ist die geometrische Gestaltung des Einstiegsbereichs dann komplexer und die hier angegebenen Festlegungen teilweise nicht zutreffend und ausreichend.

zu (2)

Bei Vorliegen einer hydraulischen Barriere, wenn also die Strömungsgeschwindigkeiten im Unterwasser die Leistungsfähigkeit von Fischen überschreiten, ist nicht gewährleistet, dass der kraftwerksnahe Einstieg in eine FAA von schwimmschwachen Fischarten erreicht werden kann. In diesem Fall ist ggf. ein weiterer Einstieg weiter stromab unterhalb der hydraulischen Barriere erforderlich, für den ein zusätzlicher Durchfluss benötigt wird.

zu (3)

Die Situation an Wehren unterscheidet sich von den Standorten mit Wasserkraftanlage hinsichtlich der Strömungssituation im Unterwasser und den baulichen Randbedingungen. Eine Übertragung der Empfehlungen zur Lage des Einstiegs sowie zur erforderlichen Leitströmung ist nicht möglich.

zu 3 Bemessung der Leitströmung

zu 3.1 Grundsätze

zu (1)

Nach dem heutigen Stand des Wissens ist davon auszugehen, dass sich die turbulenten Strömungsbedingungen unterhalb einer Wasserkraftanlage für einige Fischarten negativ auf die gerichtete Aufwärtswanderung auswirken. Die vorhandenen Erkenntnisse zum Schwimmverhalten von Fischen in turbulenten Strömungen lassen sich dabei unter Berücksichtigung der vollständigen Beschreibung von Turbulenz mittels Intensität, Vorhersagbarkeit, Orientierung und Längenskalen einordnen (Webb et al. 2010; Lacey et al. 2012; Cotel und Webb 2015). Während durch eine Vielzahl von wissenschaftlichen Untersuchungen nachgewiesen wurde, dass sich eine hohe Turbulenzintensität und große turbulente Skalen ungünstig auf die Schwimmleistung auswirken (Pavlov et al. 2000; Larinier 2002; Lupandin 2005; Tritico und Cotel 2010; Silva et al. 2012), gibt es turbulente Eigenschaften wie Vorhersagbarkeit und Wirbelorientierung, die sich Fische zu nutzen machen können (Liao 2007). Allerdings sind solche speziellen Strömungseigenschaften in großräumigen Kraftwerks-

unterwassern durch chaotische Prozesse überlagert. Odeh et al. (2002) folgern, dass die ungleichmäßigen und instationären Strömungsbedingungen in Kraftwerksunterwassern Fische desorientieren und Wanderbewegung somit verzögern.

Über diese qualitativen Erkenntnisse hinaus ist eine quantitative Bewertung eines Kraftwerksunterwassers schwierig, da trotz der o. g. Untersuchungen Kriterien und Grenzwerte fehlen, mit welchen ein eindeutiger Einfluss der Strömungen auf das Fischverhalten bzw. die Auffindbarkeit der FAA festgestellt werden kann (Silva et al. 2018). Zudem sind Fische sowohl zwischen den Arten als auch innerhalb einer Fischart in ihrer Leistungsfähigkeit sehr unterschiedlich (Hinch et al. 2005; Tudorache et al. 2008), sodass jeder Grenzwert für Schwimmleistung oder Turbulenz zwangsläufig auch eine starke Vereinfachung der Realität darstellen würde. Allerdings lassen sich aus den vorliegenden Erkenntnissen zwei Mindestanforderungen ableiten, welche als Grundvoraussetzung für eine verzögerungsfreie Wanderbewegung gelten. Dies ist zum einen eine kontinuierliche, gerichtete Strömung in Fließrichtung des Gewässers ohne Rück- und Seitströmungen. Zum anderen muss die Geschwindigkeit der Leitströmung über Grund deutlich oberhalb der rheoaktiven Geschwindigkeit liegen, damit sie für Fische ausreichend wahrnehmbar ist (Arnold 1974; Pavlov 1989; Blake und Chan 2010).

zu (2)

Die turbulente Zone (TZ) bezeichnet den stark turbulenten Mischungsbereich von Turbinenströmung und Kraftwerksunterwasser direkt unterhalb einer WKA. Durch den hohen Energieeintrag sind sowohl Strömungsgeschwindigkeiten als auch Strömungsrichtungen sehr starken Schwankungen unterworfen. Sichtbare Zeichen der Vermischungsprozesse an der Wasseroberfläche werden als Aufpilzzonen bezeichnet. Diese räumlich zufälligen und zeitlich kurzen Aufwölbungen an der Wasseroberfläche werden durch Schwankungen der vertikalen und horizontalen Strömungsgeschwindigkeiten hervorgerufen. Auch am Ufer, also einem wichtigen Wanderkorridor vieler Fische (DWA 2014), liegen in der Regel stark schwankende Strömungszustände vor. Die o. g. Bedingungen für eine verzögerungsfreie Wanderung sind somit während eines Großteils der Abflusszustände nicht vorhanden.

Mit einer seitlich neben der turbulenten Zone gelegenen Einstiegsbucht, in der sich die Leitströmung ausbreitet, soll ein akzeptabler Bereich für eine verzögerungsfreie Wanderung geschaffen werden: Während durch das seitliche Versetzen der Uferwand die turbulente Zone umgangen bzw. der Einfluss reduziert wird, hat die Leitströmung die Aufgabe, Rückströmungen und Wirbel zu überlagern und somit kontinuierlich eine gerichtete Strömung in Hauptfließrichtung herzustellen.

zu (3)

Damit die Leitströmung die ufernahen Rückströmungen permanent überlagern kann, muss diese möglichst stabil sein. Dabei ist es hilfreich, wenn sich die Strömung aus dem FAA-Einstieg direkt an das Ufer anlegt und einen Wandstrahl ausbildet. Bei einer Leitströmung, welche in die Mitte des Kraftwerksunterwassers geleitet wird, besteht die Gefahr, dass sie sich nach einer gewissen Entfernung durch die hohe Turbulenz mit der Turbinenabströmung vermischt und die Anforderungen an eine gerichtete Strömung nicht mehr erfüllt.

zu (4)

Turbulenz und Rückströmungen im Kraftwerksunterwasser werden durch die Vermischungsprozesse ab einer gewissen Entfernung mit zunehmendem Abstand zum Saugrohr immer geringer. Die turbulente Zone hat also strenggenommen keine natürlich abgrenzbare Ausdehnung, da die turbulenten Schwankungen im

Verlauf des Unterwassers kontinuierlich abnehmen. Da die Leitströmung eine gerichtete Strömung unterhalb des FAA-Einstiegs erzeugen soll, wird die Ausdehnung der TZ so festgelegt, dass sie die Bereiche mit kurzzeitigen Schwankungen der Strömungsrichtungen (ausgeprägte Rück-, Vertikal- und Querströmungen) einschließt. Diese Ausdehnung wird in den Festlegungen als bemessungsrelevante Ausdehnung bezeichnet.

zu (5)

Um eine ausreichende Attraktivität der Leitströmung sowohl hinsichtlich der räumlichen Ausdehnung als auch hinsichtlich der Wahrnehmbarkeit durch schwimmstärkere Fischarten zu erreichen, ist es erforderlich, dass im Einstieg ausreichend hohe Strömungsgeschwindigkeiten herrschen. Als Grenzwert wird die Bemessungsgeschwindigkeit der FAA angesetzt. Bei Einstau aus dem Unterwasser ist diese Geschwindigkeit konstant zu halten, d. h. es wird i. d. R. eine regelbare Dotation erforderlich.

zu 3.2 Bemessungskriterien

zu (1)

Der Bemessungsfall bei Ausbaubedingungen der WKA stellt bzgl. der Kraftwerksdurchflüsse die ungünstigste Situation für die Leitströmung dar. Eine ausgeprägte turbulente Durchmischung mit sichtbaren Aufpilzzonen liegt zumeist ab ca. 70 % des Ausbaudurchflusses vor (Deniz et al. 1990). Bei Ausbaubedingungen der WKA ist der spezifische Energieeintrag in das Unterwasser am höchsten und somit die turbulente Durchmischung am stärksten. Bei größeren Gewässerdurchflüssen als dem Ausbaudurchfluss nimmt in der Regel der Unterwasserstand bis UW_{330} zu. Je nach Begrenzung der Turbinenleistung kann der Durchfluss ebenfalls leicht zunehmen, um die geringeren Fallhöhen zu kompensieren. Der spezifische Energieeintrag und die turbulente Durchmischung im Kraftwerksunterwasser bleiben allerdings bis zum maximalen Durchfluss annähernd konstant und nehmen weiterhin bei Zunahme des Unterwasserstands bis Q_{330} ab.

zu (2)

Mit der Anforderung nach Gl. (1) werden die in Kap. 3.1 beschriebenen Grundsätze zusammengefasst und es wird möglich, durch Ermittlung der charakteristischen Ausdehnung der turbulenten Zone an einem Standort eine Leitströmung so zu bemessen, dass sie sich mindestens bis in diese Entfernung ausbreitet.

zu (3)

Die Mindestfließgeschwindigkeit $v_{LS,min}$ wird so gewählt, dass die in der turbulenten Zone vorhandenen Rückströmungen durch Überlagerung der Strömungskomponenten kompensiert werden können und die resultierenden Strömungsgeschwindigkeiten in einen für Fische attraktiven Geschwindigkeitsbereich fallen. Da die Leitströmung in einem komplexen hydraulischen Umfeld wahrgenommen werden muss, sollte sie deutlich oberhalb der Geschwindigkeiten liegen, bei denen sich Fische erstmals rheoaktiv nach der Strömung ausrichten. Entsprechende Werte hierfür liegen für verschiedene Fischarten zwischen 0,1 m/s und 0,3 m/s (Pavlov 1989; Adam und Schwevers 1997; Adam et al. 1999). Die Mindestfließgeschwindigkeit muss zudem deutlich unterhalb des maximalen Grenzwertes der Fließgeschwindigkeiten in der FAA liegen, welcher je nach Fischregion und Gesamthöhenunterschied der FAA im Bereich von 1,5 bis 1,8 m/s liegt (DWA 2014). Als pragmatischer Wert wird – solange keine weiteren Untersuchungen hierzu vorliegen – 0,8 m/s gewählt, d. h. hiermit können (kurzzeitige) Rückströmungen bis 0,5 m/s kompensiert werden, sodass die verbleibende Strömung über Grund größer als die rheoaktive Geschwindigkeit ist. Der Wert der Mindestfließgeschwindigkeit liegt

zudem in einem Bereich, der für die Geschwindigkeit von Leitströmungen empfohlen wird. Laut Pavlov (1989) beträgt dieser je nach Fischart zwischen 0,7 und 1,2 m/s.

zu (4)

Die Berechnung der Leitströmungslänge erfolgt auch im Fall einer Sackgasse von der Saugrohraustrittfläche. Eine Verlegung des Einstiegs in das Unterwasser darf nicht günstig auf die Länge der Leitströmung angerechnet werden.

zu (5)

Numerische und gegenständliche Untersuchungen mit Freistrahlen aus rechteckigen Auslässen zeigen, dass eine größere Reichweite (und entsprechend höhere Strömungsgeschwindigkeiten) am effektivsten durch Vergrößerung der kürzeren Seite erreicht werden kann. Bei FAA-typischen Einstiegen gelingt dies in der Regel über breitere Öffnungsgeometrien als über tiefere Einstiege (Sforza et al. 1966; Pani und Parameswaran 1994; Bergmann 2017).

zu 3.3 Benötigte Eingangsdaten

zu (2)

- Im Regelfall sind an den Wasserkraftanlagen mit mehreren Turbinen identische Turbinentypen und Saugrohre verbaut. Ist dies nicht der Fall (z. B. bei unterschiedlichen Turbinentypen, Saugrohren oder großen Unterschieden in den jeweiligen Turbinendurchflüssen), ist die uferseitige Turbine maßgeblich.
- Es ist der Ausbaudurchfluss der WKA zu verwenden, sofern dieser unterhalb von Q_{330} des betrachteten Gewässerarms liegt, ansonsten Q_{330} .

zu (3)

- Die Mindestabmessungen und der Grenzwert der Fließgeschwindigkeit in Engstellen v_{max} sind unter Berücksichtigung der standortspezifischen Referenzfischfauna nach DWA (2014) zu ermitteln.
- Die Bemessungsgeschwindigkeit v_{bem} ist für beckenartige Fischeaufstiegsanlagen unter Berücksichtigung der entsprechenden Sicherheitsbeiwerte auf Basis des Grenzwerts der Fließgeschwindigkeit in Engstellen v_{max} nach DWA (2014) zu ermitteln.
- Die Höhe der Sohle am Einstiegsschlitz kann in frühen Planungsphasen zunächst aus UW_{30} und b_{min} ermittelt werden. Nach Vorliegen der endgültigen Planung sind die Werte zu überprüfen.

zu (4)

Metadaten sind u.a. Angaben zur Quelle, zum Datum, zum Erfassungszeitraum, ggf. zur Bearbeitung und bei Geodaten zum Koordinatensystem und zum Lage- sowie Höhenreferenzsystem.

zu 3.4 Bemessungsrelevante Ausdehnung der turbulenten Zone

zu (1)

Mit Gl. (2) kann ausschließlich die charakteristische Ausdehnung der turbulenten Zone im Bemessungsfall ermittelt werden. Die Berechnung von Zuständen bei anderen Durchflüssen als dem Ausbaudurchfluss der WKA ist nicht zulässig.

Die für den Bemessungsfall anzusetzenden mittleren Vertikalgeschwindigkeiten wurden durch Kalibrierung von Gl. (2) an Beispielstandorten bei den hydrologischen Zuständen während Q_{Ausbau} ermittelt (Bild 3). Es zeigte sich, dass L_{TZ} bei horizontalen Rohrturbinen etwas kürzer ist als bei vertikal eingebauten Kaplan-Halbspiral-Turbinen, weshalb für diese beiden Turbinentypen unterschiedlichen $v_{vertikal}$ zu verwenden sind.

Abweichungen von einem linearen Zusammenhang lassen sich angesichts weiterer, nicht erfasster Randbedingungen an den Standorten vermuten (z. B. Einbauten in den Saugrohren, Austrittswinkel des Saugrohrs, Steigung der Sohle im Kraftwerkskanal), für welche allerdings bislang aufgrund der begrenzten Anzahl von Messwerten kein funktionaler Zusammenhang gefunden werden konnte.

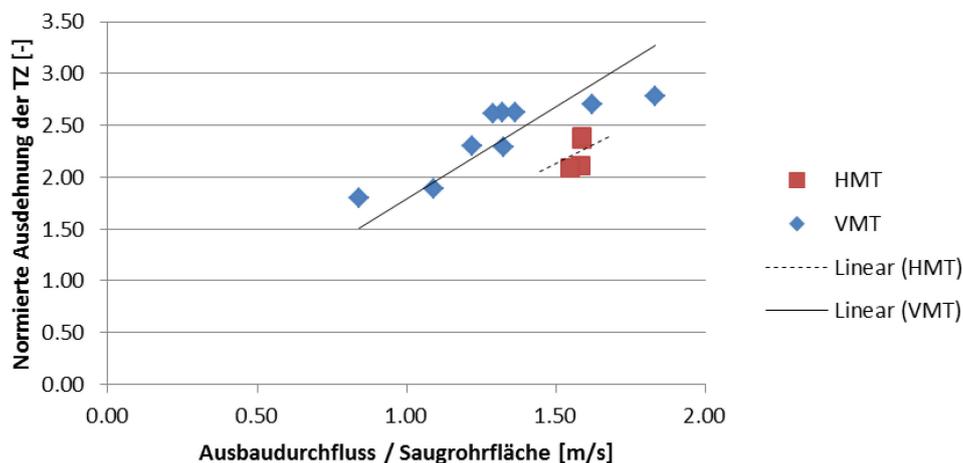


Bild 3: Grafischer Zusammenhang zwischen der mittleren Austrittsgeschwindigkeit aus dem Saugrohr (Q_{Ausbau}/A_{SR}) und der mit der Ausbauwassertiefe normierten Ausdehnung der turbulenten Zone für horizontal eingebaute Turbinen (HMT) und vertikal eingebaute Turbinen (VMT)

zu 3.5 Hydraulisch erforderliche Einstiegsbreite

zu (1)

Mit Gl. (3) wird die hydraulisch erforderliche Breite eines ufernahen FAA-Einstiegs unter Berücksichtigung der Ausbreitung eines turbulenten, rechteckigen Oberflächenstrahls in einem Kraftwerksunterwasser ermittelt. Die Einflüsse der Kraftwerksströmung und der Uferwand werden über die beiden Beiwerte C_1 und C_2 erfasst. Die verbleibende Gleichung beschreibt den Verlauf der Strömungsgeschwindigkeiten eines Oberflächenstrahls unterstrom des Einstiegs, wie in Bild 4 skizziert.

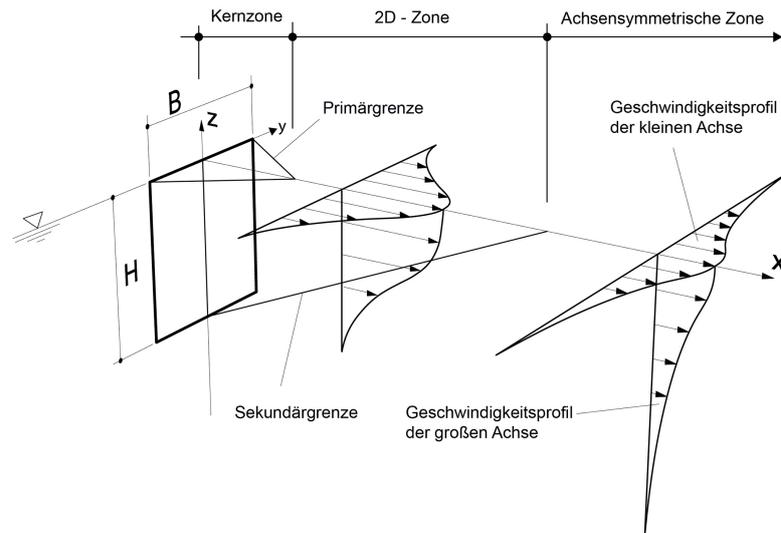


Bild 4: Schematischer Verlauf der lateralen und vertikalen Geschwindigkeitsverteilungen eines turbulenten, rechteckigen Oberflächenstrahls (Wiering et al. 2019)

Für die an FAA herrschenden Randbedingungen konnten in der Fachliteratur keine Berechnungsansätze für rechteckige Oberflächenstrahlen gefunden werden, welche eine sofortige Anwendung ohne weitere Anpassungen oder Validierung ermöglichen würden (Bleninger 2017; Eiff et al. 2017). Aus diesem Grund wurde ein bestehender analytischer Ansatz von Kraatz (1975) auf die Gegebenheiten an FAA erweitert. Ein Freistrah aus einem rechteckigen Öffnungsquerschnitt erzeugt ein Geschwindigkeitsfeld, welches sich in drei charakteristische Zonen einteilen lässt, in denen sich der Verlauf der Strömungsgeschwindigkeiten systematisch unterscheidet (siehe Bild 4): Eine Kernzone mit konstanten Geschwindigkeiten, eine zweidimensionale Zone mit einer Geschwindigkeitsabnahme entsprechend $1/\sqrt{x}$ und eine symmetrische Zone, in der die Geschwindigkeitsabnahme proportional zu $1/x$ ist. Die Lage der Übergänge zwischen den einzelnen Zonen lassen sich als Funktion der Breite B und Höhe H der rechteckigen Öffnung angeben:

$$\frac{x_0}{B} = \frac{1}{2 \tan(\alpha_i)}$$

$$\frac{x_1}{B} = \frac{1}{AR \tan(\alpha_i)}$$

Dabei ist

- x_0 Ortslage des Übergangs zwischen Kern- und zweidimensionaler Zone
- x_1 Ortslage des Übergangs zwischen zweidimensionaler und symmetrischer Zone,
- AR ($= B/H$) das Seitenverhältnis des rechteckigen Öffnungsquerschnitts,
- α_i der innere Diffusionswinkel, d. h. ein Maß für die turbulente Strahldurchmischung mit dem umgebenden Fluid.

Der Verlauf der Geschwindigkeiten in x-Richtung lässt sich für die einzelnen Zonen abschnittsweise berechnen zu

$$\frac{u}{u_0} = 1 \quad \text{für } x/B < x_0/B$$

$$\frac{u}{u_0} = \frac{1}{\sqrt{2 \tan(\alpha_i)}} \frac{1}{\sqrt{x/B}} \quad \text{für } x_0/B \leq x/B < x_1/B$$

$$\frac{u}{u_0} = \frac{1}{\sqrt{2 AR \tan(\alpha_i)}} \frac{1}{x/B} \quad \text{für } x/B \geq x_1/B$$

Dabei ist

- u_0 Geschwindigkeit im Öffnungsquerschnitt,
- u Geschwindigkeit in Strömungsrichtung auf der x-Achse.

Zur Validierung des Ansatzes wurde eine Reihe von numerischen Strömungssimulationen von Oberflächenstrahlen mit verschiedenen Seitenverhältnissen, so wie sie an FAA-Einstiegen üblicherweise zu erwarten sind, durchgeführt (Bergmann 2017). Zur Simulation wurde das Programmpaket OpenFOAM verwendet. Die Ergebnisse wurden mit den Prognosen der o. g. Gleichungen verglichen und zeigen eine sehr gute Übereinstimmung (Bild 5).

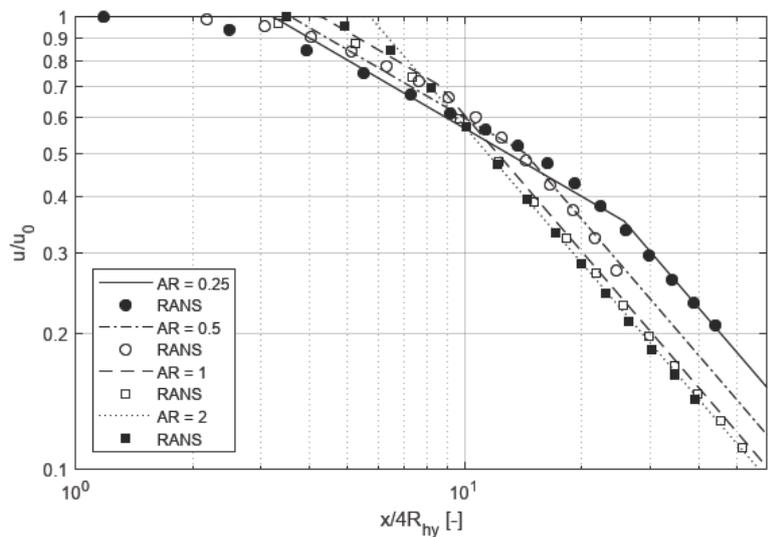


Bild 5: Analytischer Verlauf der normierten Geschwindigkeiten in Strömungsrichtungen für verschiedene Seitenverhältnisse $AR = 0.25$ bis 2 und Vergleich mit Werten aus numerischen Simulationen (RANS)

Für die Halbwertslänge, d. h. den Ort, an dem die Geschwindigkeit im Freistrahls nur noch die Hälfte der Auslassgeschwindigkeit beträgt ($u = \frac{1}{2}u_0$), sind eine Vielzahl von Untersuchungen bekannt, welche auch für die an FAA vorhandenen Randbedingungen Gültigkeit besitzen (Kraatz 1975; Rajaratnam und Humphries 1984; Madnia und Bernal 1994; Gholamreza-Kashi et al. 2007). Der entwickelte Ansatz stimmt gut mit den Ergebnissen der Untersuchungen überein (Bild 6). Auch für größere Seitenverhältnisse, also $B > H$, behält der Ansatz seine Gültigkeit, obwohl diese für Fischaufstiegsanlagen in der Regel keine Relevanz besitzen.

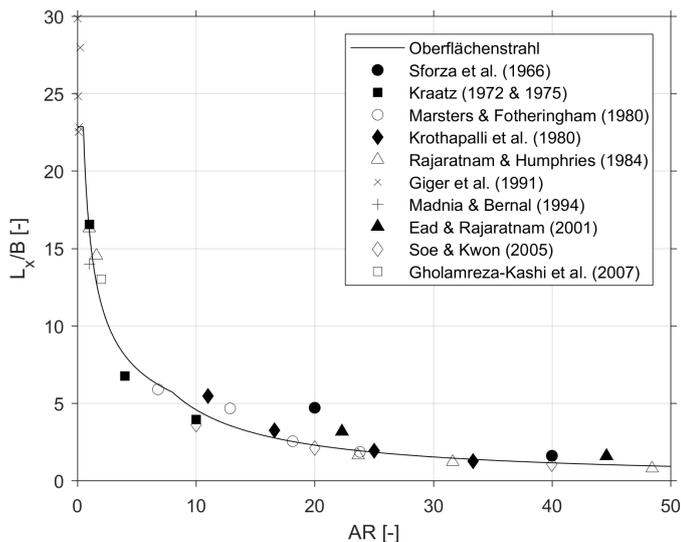


Bild 6: Grafischer Zusammenhang für die mit der Einstiegsbreite normierten Halbwertslänge eines Oberflächenstrahls L_x/B und dem Seitenverhältnis AR der rechteckigen Auslassöffnung (Oberflächenstrahl) und Vergleich mit Literaturangaben (Wiering et al. 2019)

zu (3)

Nach Untersuchungen von Kraatz (1975) liegt der innere Diffusionswinkel bei runden und ebenen Freistrahlen zwischen $4,0^\circ$ und $5,5^\circ$. Zur Präzisierung dieser Werte wurden numerische Strömungssimulationen von oberflächennahen Freistrahlen durchgeführt und für $\alpha_i = 5,0^\circ$ die beste Übereinstimmung mit den numerischen Ergebnissen erreicht.

zu (4)

Siehe Anmerkungen zu Kap. 3.2 (2).

zu (5)

Im Bemessungsfall soll die Geschwindigkeit am Einstiegsschlitz gleich der Bemessungsgeschwindigkeit in der FAA sein. Dies wird jedoch in der Praxis aufgrund der Schwankungen des Unterwasserstands und der damit erforderlichen Regelung des Dotationsdurchflusses nicht zu allen Zeitpunkten möglich sein, da aus regeltechnischen Gründen sicherheitshalber auf einen Wert unterhalb des Bemessungswerts geregelt werden muss, um diesen in keinem Fall zu überschreiten. Die Geschwindigkeiten am Einstiegsschlitz liegen somit unterhalb der Bemessungsgeschwindigkeit, d. h. auch die Leitströmung ist dementsprechend kürzer. Um Gl. (1) bei Anlagen mit regelbarer Dotation dennoch zu erfüllen, wird ein Beiwert bei der Ermittlung der erforderlichen Einstiegsbreite eingeführt, der die geringeren Geschwindigkeiten berücksichtigt und die Einstiegsbreite erhöht. Der gewählte Beiwert $S_d = 0,95$ entspricht in etwa einem Sollwert der Geschwindigkeit, welcher um ca. 10 % unterhalb der Bemessungsgeschwindigkeit der FAA liegt. Mittels numerischer Simulationen des Regelverhaltens der Dotation wurde festgestellt, dass mit diesem Beiwert die Grenzwerte der maximalen Strömungsgeschwindigkeiten im Schlitz bei den üblich zu erwartenden Wasserspiegelschwankungen im Unterwasser eingehalten werden.

Der Beiwert für die Regelung der Dotation darf nicht mit den Sicherheitsbeiwerten (z. B. S_b oder S_v) nach DWA (2014) verwechselt werden, welche aus anderen Gründen (z. B. Wartungsintervalle) zur Ermittlung der Bemessungsgeschwindigkeiten vorgesehen sind.

zu (6)

In der Einstiegsbucht entsteht ohne Leitströmung durch den Rücksprung der Uferlinie ein großräumiger Wirbel, welcher ufernahe Rückströmungen hervorruft. Diese Rückströmungen sind im zeitlichen Mittel vorhanden und im Regelfall durch chaotische, turbulente Schwankungen überlagert. Für die vorliegende Abschätzung werden zunächst nur die zeitlich gemittelten Strömungen betrachtet, der Einfluss der Turbulenz auf die Ausbreitung von Freistrahlen wird nachfolgend behandelt.

Für den Fall einer idealen um einen Abstand Y rückspringenden Stufe in einer Grundströmung mit der Strömungsgeschwindigkeit v wurden in verschiedenen Untersuchungen (Adams und Johnston 1988; Tihon et al. 2001; Chen et al. 2006) folgende Größenordnungen für die Länge der Rezirkulationszone X_r und die maximalen Geschwindigkeiten der Rückströmung $v_{r,max}$ ermittelt (vgl. Bild 7):

$$X_r/Y \approx 4 - 6$$

$$v_{r,max}/v \approx 0.2$$

Die Abmessung Y liegt für typische FAA-Einstiege zwischen 1,5 und 3 m und somit kann die Länge der Rückstromzone X_r zu 6 bis 18 m abgeschätzt werden. Daraus wird deutlich, dass sich die Leitströmung in einem großen Bereich in einer potentiellen Rückströmungszone befindet. Wird für die Geschwindigkeit der Grundströmung v näherungsweise die querschnittsgemittelte Strömungsgeschwindigkeit im Saugrohr angesetzt, ergeben sich maximale Rückströmungen von $v_{r,max} \approx 0,15 - 0,4 \text{ m/s}$, welche der Ausbreitung der Leitströmung entgegenwirken.

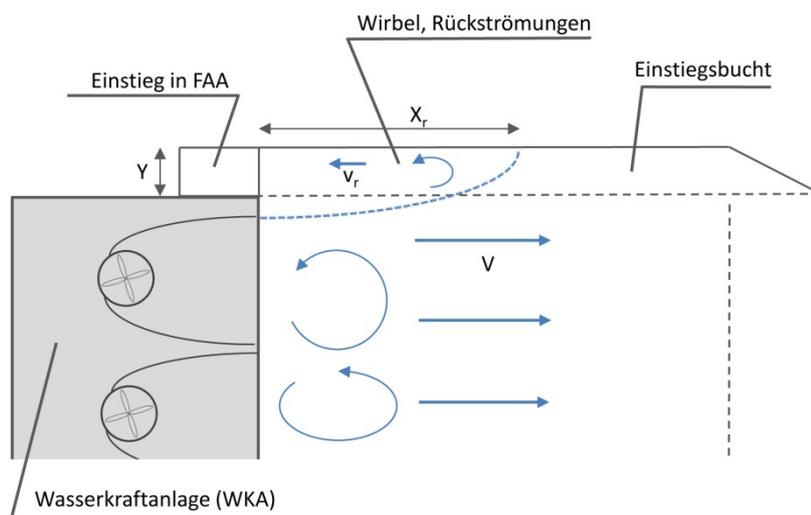


Bild 7: Schema der Rückströmungen in der Einstiegsbucht im Unterwasser von Wasserkraftanlagen ohne Leitströmung aus der FAA

Freistrahlen breiten sich in Rückströmungen weniger weit aus als in ruhiger Strömungsumgebung (Wiering 2017). Kraatz (1975) stellt für runde Freistrahle in homogener Rückströmung ein Nomogramm zur Verfügung, dem die Geschwindigkeitsabnahmen je nach Geschwindigkeitsverhältnis zwischen Freistrah v_0 und Rückströmung $v_{r,max}$ entnommen werden können. Die Werte dieses Nomogramms ergeben in dem für FAA relevanten Bereich einen annähernd exponentiellen Zusammenhang zwischen dem Geschwindigkeitsverhältnis $m = v_{r,max}/v_0$ und der Reduktion der Halbwertslänge L_x im Vergleich zu einem ungestörten Freistrah $L_{x,0}$ (Bild 8):

$$\frac{L_x}{L_{x,0}} = \exp\left(-\frac{13}{5}m\right)$$

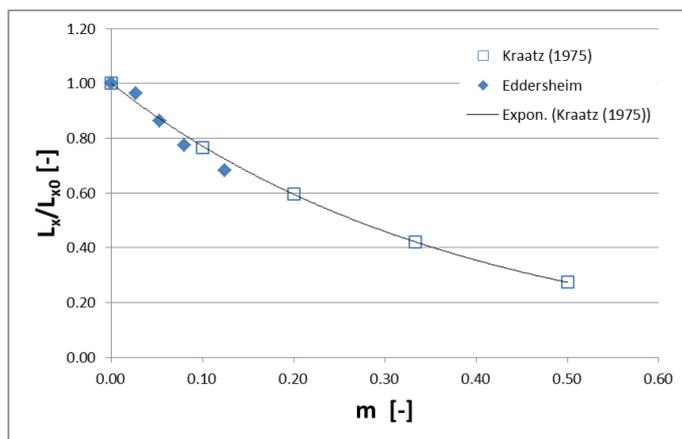


Bild 8: Geschwindigkeitsabnahme von Freistrahlen in homogener Rückströmung und angepasste exponentielle Funktion. Zusätzlich Abgleich mit Ergebnissen von 3D-HN Simulationen eines Freistrahls für die Wasserkraftanlage Eddersheim/Main

Einsetzen von m und der mittleren Geschwindigkeit des Freistrahls $v_0 = c_d \cdot v_{ES}$ sowie $c_d = 0,92$ ergibt die Gleichung für den Beiwert C_1

$$c_1 = \frac{L_x}{L_{x,0}} = \exp\left(-\frac{13}{23} \frac{Q_{Ausbau}}{A_{SR,gesamt}} \frac{1}{v_{ES}}\right)$$

Diese Gleichung berücksichtigt nur die zeitlich gemittelten Rückströmungen. Durch die bislang nicht berücksichtigten turbulenten Schwankungen ist darüber hinaus eine stärkere Durchmischung eines Freistrahles zu erwarten, was zu einer weiteren Abnahme der Reichweite von Freistrahlen führt, wie in einer Reihe von Laborstudien gezeigt wurde (Prych 1973; Khorsandi et al. 2013; Perez Alvarado 2016). Allerdings lassen sich diese Erkenntnisse in der Praxis kaum anwenden, da die turbulenten Eigenschaften der Strömung im Kraftwerksunterwasser nicht in der erforderlichen Weise erfassbar sind. Daher wurde die Gleichung für c_1 etwas konservativer gestaltet, indem der maximale Wert der Rückströmung berücksichtigt wird, was zu einer größeren Abnahme der Geschwindigkeiten führt. Um diesen Ansatz zu plausibilisieren, wurde der Einfluss einer Rückströmung auf die Ausbreitung von Freistrahlen für die Strömungssituation an der Staustufe Eddersheim mittels numerischer Untersuchungen verglichen (Bild 8).

zu (7)

An einem FAA-Einstieg liegen aufgrund der Geometrie des Einstieges (Schlitz) und der Nähe zu einer seitlichen Uferwand spezielle Randbedingungen vor, welche einen Einfluss auf die Ausbreitung der Leitströmung haben. Hierzu wurde an numerischen und gegenständlichen Modellen untersucht, ob und wie diese in der Bemessung zu berücksichtigen sind (Schmieder 2018; Mahl und Heneka 2020).

In einem angeströmten Schlitz stellt sich durch die Einschnürung der Stromfäden eine inhomogene Geschwindigkeitsverteilung im Querschnitt ein (Quinn 2006). Die maximalen Geschwindigkeiten entsprechen für die vorliegenden Schlitzgeometrien der Bemessungsgeschwindigkeit einer FAA. Die mittleren Geschwindigkeiten liegen um den Durchflussbeiwert des Schlitzes niedriger. Quinn (2006) und Faghani et al. (2011) zeigen, dass die Ausbreitung der Freistrahlen aus einem Schlitz außerhalb des Nahfelds ähnlich zu der aus einer Düse ist und somit die Freistrahlgleichungen auch für den Fall eines Schlitzes anwendbar sind, sofern die mittlere Geschwindigkeit im Querschnitt als Austrittsgeschwindigkeit angesetzt wird.

Die Geschwindigkeiten im Nahbereich sind jedoch stark beeinflusst von der Ausgestaltung des Schlitzes und hier insbesondere von der Beschaffenheit der Kanten. Bei scharfkantigen Schlitzes treten an den Kanten maximale Geschwindigkeiten auf, welche die mittlere Strömungsgeschwindigkeit um bis zu 25 % überschreiten, bei gefasteten Schlitzes je nach Ausführung zwischen 10 % und 20 % (Schmieder 2018). Damit der Bemessungswert der Geschwindigkeiten der FAA auch am Einstiegsschlitz eingehalten wird, ist es somit erforderlich, dass der Einstiegsschlitz die gleichen hydraulischen Eigenschaften wie die Schlitzes eines Schlitzpasses besitzt, d. h. die Durchflussbeiwerte müssen gleich sein. Dies wird über die vorgegebene Fase des Schlitzes erreicht (vergl. Kap. 4.2) und aus diesem Grund dürfen Schlitzes nicht scharfkantig ausgeführt werden. Aus DWA (2014) leitet sich ein Durchflussbeiwert von $c_d = 0,92$ ab.

Eine laterale Wand hat einen positiven Einfluss auf die Ausbreitungslänge eines Freistrahls, da die Durchmischung unterbunden wird. Kraatz (1975) gibt beispielsweise einen Faktor von 1,6 an für Wandstrahlen, welche sofort nach Austritt an einer Wand anliegen. Da sich der Schlitz bei einer FAA aus fischökologischen Gründen nicht direkt an der Wand befindet, legt sich der Freistrahls erst nach einer gewissen Lauflänge an eine laterale Wand an und der positive Einfluss auf die Ausbreitungslänge wird geringer (Miozzi et al. 2010). Beide Effekte (Schlitz und Wand) müssen gemeinsam betrachtet werden, da sich Freistrahlen aus einem Schlitz i. d. R. schneller an laterale Wände anlegen als Freistrahlen aus Kanälen oder Düsen. Aus den Untersuchungen wurde für die üblicherweise an FAA vorkommenden Randbedingungen ein pauschaler Faktor ermittelt, mit dem der Einfluss der genannten Effekte erfasst werden kann.

zu 3.6 Leitdurchfluss

zu (1)

Mit Gl. (8) kann der erforderliche Dotationsdurchfluss mit hinreichender Genauigkeit ermittelt werden. Je nach verwendeter Durchflussformel der FAA können hierbei in einzelnen Fällen kleinere rechnerische Abweichungen zu den FAA-Durchflüssen auftreten, welche jedoch im Bereich der Prognosegenauigkeit liegen.

zu (3)

Die Integrationsgrenzen zur Ermittlung des mittleren Jahresdurchflusses sind je nach Anwendung zu setzen.

zu 4 Hinweise

zu 4.2 Einstiegsschlitz

zu (2)

Die Leitströmung legt sich grundsätzlich bei kleineren Abständen b_{Ufer} an das Ufer an. Aus biologischen Gründen ist es jedoch erforderlich, dass der Abstand zum Ufer nicht zu klein gewählt wird, damit Fische den Einstiegsschlitz von beiden Seiten anschwimmen können.

zu (3)

Bei sehr großen Schlitzbreiten ist entsprechend viel Platz erforderlich. Aktuell werden an der BAW Einstiegsbecken bzgl. des Platzbedarfs mittels gegenständlicher und numerischer Versuche optimiert und die Ergebnisse zu gegebener Zeit veröffentlicht.

zu (4)

Die hydraulischen Eigenschaften eines Schlitzes mit der definierten Fase der oberstromigen Kante sind ähnlich denen eines Schlitzpassschlitzes. Damit ist sichergestellt, dass der benötigte Durchfluss bei Einhaltung der Wasserspiegeldifferenz zwischen den Becken Δh (und somit auch der Maximalgeschwindigkeiten) durch den Schlitz abgeführt werden kann. Bei scharfkantigeren Schlitzern erhöht sich das Δh . Insofern ist auf eine sorgfältige Ausführung des Einstiegsschlitzes zu achten. Die Fase der unterstromigen Kante dient zur Vermeidung von Verletzungen von Fischen.

zu 4.3 Dotation

zu (1)

Der maximale benötigte Dotationsdurchfluss wird in der Regel während Q_{330} benötigt und berechnet sich zu $Q_{Leit,330} - Q_{FAA}$. Eine Überdimensionierung der Zuleitungen für die Dotation aus Gründen der Leitströmung, so wie sie in manchen Fällen bei der 5 %-Empfehlung ausgeführt wurde, ist nicht notwendig.

Hinweis: Der Begriff Dotationsdurchfluss wird im DWA (2014) teilweise abweichend verwendet.

Anlage 2: Benötigte Eingangsdaten

Kenndaten der Wasserkraftanlage	Symbol	Einheit
Anzahl Turbinen	N_T	[-]
Ausbaudurchfluss	Q_{Ausbau}	[m ³ /s]
Fläche des Saugrohrs am Austrittsquerschnitt	A_{SR}	[m ²]
Höhe der Sohle des Saugrohrs am Austrittsquerschnitt	HS_{SR}	[m ü. NHN]
Turbinentyp (Einbau horizontal oder vertikal)		[-]

Hydrologische Kenndaten	Symbol	Einheit
Dauerlinie des Unterwasserstands	UW_τ	[m ü. NHN]
Unterwasserstand mit 30 Tage Unterschreitung	UW_{30}	[m ü. NHN]
Unterwasserstand mit 330 Tage Unterschreitung	UW_{330}	[m ü. NHN]
Unterwasserstand bei $Q_{Gewässer} = Q_{Ausbau}$ der WKA, d. h. niedrigster Wasserstand bei Q_{Ausbau}	UW_{Ausbau}	[m ü. NHN]

Biologische Anforderungen	Symbol	Einheit
Mindestbreite in Engstellen	b_{min}	[m]
Mindestfließtiefe in Engstellen	h_{min}	[m]
Grenzwert der Fließgeschwindigkeit in Engstellen	v_{max}	[m/s]

Planungsdaten der FAA	Symbol	Einheit
Bemessungsgeschwindigkeit der FAA	v_{bem}	[m/s]
Höhe der Sohle am Einstiegsschlitz	HS_{ES}	[m ü. NHN]

Anlage 3: Rechenbeispiel

An einer Bundeswasserstraße soll im Rahmen der Planung einer Fischaufstiegsanlage an einem Standort mit Wasserkraftnutzung die für die kleinräumige Auffindbarkeit notwendige Leitströmung ermittelt werden.

Anwendbarkeit

Bevor mit der vorliegenden Empfehlung zur Bemessung der Leitströmung für FAA an Standorten mit Wasserkraftnutzung die Leitströmung bemessen werden kann, ist ihre Anwendbarkeit nach Kap. 2 zu prüfen:

- ✓ Der kraftwerksnahe Einstieg ist zwischen Wasserkraftanlage (WKA) und Ufer platziert.
- ✓ Der Einstieg ist unmittelbar (d. h. in einem Abstand < 4 m) am Querbauwerk platziert.
- ✓ Der Einstieg in die FAA besteht aus einem Einstiegsschlitz.
- ✓ Die Hinweise aus Kap. 4 sind berücksichtigt.

Grundlagendaten

Sind alle genannten Voraussetzungen erfüllt, sind die Grundlagendaten nach Anlage 2 zusammenzustellen.

Am Beispielstandort befindet sich eine Wasserkraftanlage mit zwei identischen vertikal eingebauten Kaplanhalbspiralturbinen. Der Gesamtausbaudurchfluss beträgt $130 \text{ m}^3/\text{s}$. In den Bestandsplänen des Kraftwerks ist eine Saugrohraustrittsfläche von $54,9 \text{ m}^2$ angegeben. Die Sohlhöhe der Saugrohre liegt auf $140,83 \text{ m}$ ü. NHN, wobei die unterschiedlichen Höhenbezugssysteme zwischen den Bestandsplänen und der hydrologischen Daten berücksichtigt wurden.

Parameter	Wert	Einheit	Quelle/Bemerkung
N_T	2	-	Bestandsplan
Q_{Ausbau}	130	m^3/s	Angabe WKA-Betreiber
A_{SR}	54,9	m^2	Bestandsplan
HS_{SR}	140,83	m ü. NHN	Bestandsplan

Die hydrologischen Kenndaten am Beispielstandort werden aus einer auf langjährigen Messungen basierenden Dauerlinie ermittelt (Bild 9).

Parameter	Wert	Einheit	Quelle/Bemerkung
UW_{30}	147,15	m ü. NHN	Dauerlinie
UW_{330}	148,28	m ü. NHN	Dauerlinie
UW_{Ausbau}	147,48	m ü. NHN	Interpoliert aus Dauerlinie

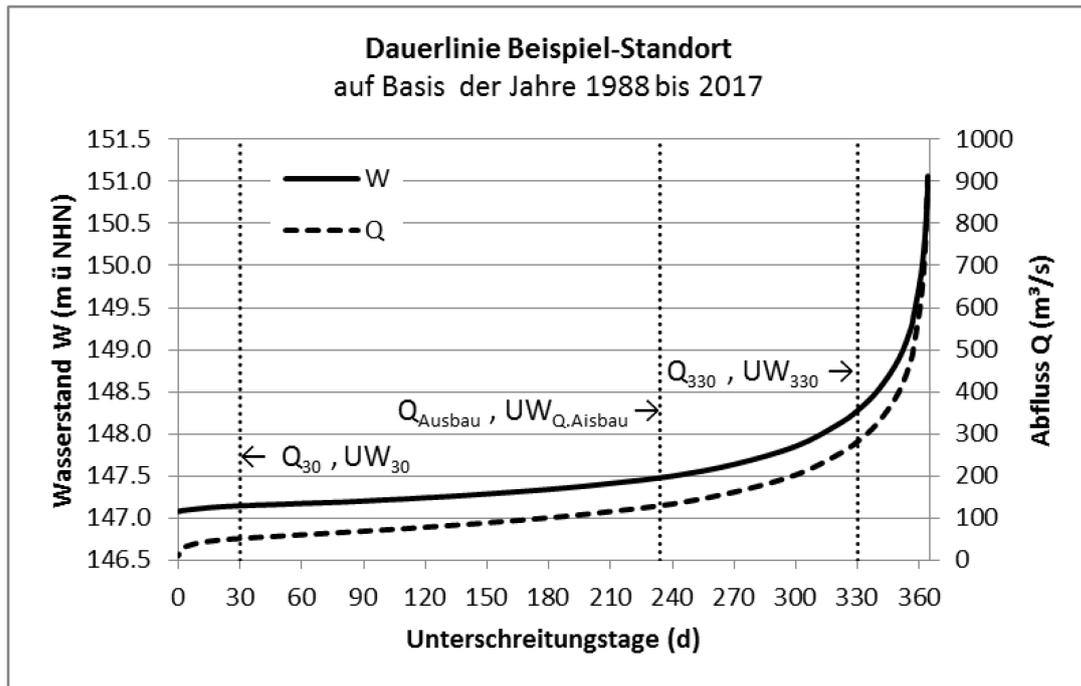


Bild 9: Beispiel einer Dauerlinie

An dem Standort sind folgende fischbiologischen Grenzwerte und Bemessungswerte einzuhalten.

Parameter	Wert	Einheit	Quelle/Bemerkung
b_{min}	0,45	m	Festlegung /Datum
h_{min}	1,20	m	Festlegung /Datum
v_{max}	1,7	m/s	DWA 2014
v_{bem}	1,6	m/s	Festlegung /Datum
HS_{ES}	145,95	m ü. NHN	Annahme: $UW_{30} - H_{min}$

Berechnung der bemessungsrelevanten Ausdehnung der turbulenten Zone

Die charakteristische Ausdehnung der turbulenten Zone wird nach Gl. (2) bestimmt. Da die Turbinen vertikal eingebaut sind, wird für $v_{vertikal} = 0,56$ m/s angesetzt.

$$\begin{aligned}
 L_{TZ} &= \frac{1}{v_{vertikal}} (UW_{Ausbau} - HS_{SR}) \frac{Q_{Ausbau}}{N_T A_{SR}} \\
 &= \frac{1}{0,56} (147,48 - 140,83) \frac{130}{2 \cdot 54,9} \\
 &= 14,06 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Es ergibt sich demnach eine rechnerische Ausdehnung der turbulenten Zone von ca. 14 m.

Berechnung der Einstiegsbreite

Zuerst wird die Geschwindigkeit im Einstiegsschlitz v_{ES} berechnet. Da bei einer L_{TZ} von ca. 14 m mit einer Dotation für die Auffindbarkeit gerechnet werden muss, ist der Beiwert für die Dotationsregelung zu berücksichtigen:

$$\begin{aligned} v_{ES} &= v_{bem} \cdot S_{RD} \\ &= 1,6 \cdot 0,95 \\ &= 1,52 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Damit lässt sich der Korrekturfaktor für den Einfluss der ufernahen Rückströmung C_1 berechnen:

$$\begin{aligned} C_1 &= \exp\left(-\frac{13}{25} \frac{Q_{Ausbau}}{N_T A_{SR} v_{ES} c_d}\right) \\ &= \exp\left(-\frac{13}{25} \frac{130}{2 \cdot 54,9 \cdot 1,52 \cdot 0,92}\right) \\ &= 0,64 \end{aligned}$$

Da in der Planung die Hinweise zur Gestaltung des Einstiegsschlitzes in Kap. 4 berücksichtigt sind, kann hier der Korrekturbeiwert für den Einfluss des Schlitzes und einer naheliegenden Wand $C_2 = 1,2$ verwendet werden.

In der Fallunterscheidung für den Formbeiwert der Strahlausbreitung k muss geprüft werden, ob $\frac{L_{TZ}}{C_1 C_2} \cdot \tan(\alpha_i) \leq h$ oder $\frac{L_{TZ}}{C_1 C_2} \cdot \tan(\alpha_i) > h$ gilt. Dabei ist der innere Diffusionswinkel $\alpha_i = 5^\circ$ und $h = UW_{Q,Ausbau} - HS_{ES} = 1,53 \text{ m}$.

$$\begin{aligned} \frac{L_{TZ}}{C_1 C_2} \cdot \tan(\alpha_i) &= \frac{14,06}{0,64 \cdot 1,2} \cdot 0,0874 \\ &= 1,59 \text{ m} \\ &> h \end{aligned}$$

Somit berechnet sich k zu:

$$\begin{aligned} k &= \frac{L_{TZ}}{C_1 C_2} \tan(\alpha_i) \frac{1}{h} \\ &= \frac{14,06}{0,64 \cdot 1,2} \cdot 0,0874 \frac{1}{1,53} \\ &= 1,04 \end{aligned}$$

Durch Einsetzen der Werte in Gl. (3) lässt sich dann die Einstiegsbreite b berechnen, die bei der angenommenen Sohlhöhe im Einstiegsschlitz HS_{ES} nötig ist, damit die Mindestgeschwindigkeit der Leitströmung $V_{LS,min}$ von 0,8 m/s in der Entfernung L_{TZ} vom Einstiegsschlitz nicht unterschritten wird.

$$\begin{aligned}
 b_{hyd} &= \frac{1}{2} \cdot k \cdot \frac{L_{TZ}}{C_1 C_2} \cdot \tan(\alpha_i) \cdot \left(\frac{2 v_{LS,min}}{v_{ES}} \right)^2 \\
 &= \frac{1}{2} \cdot 1,04 \cdot \frac{14,06}{0,65 \cdot 1,2} \cdot 0,0874 \cdot \left(\frac{2 \cdot 0,8}{1,52} \right)^2 \\
 &= 0,92 \text{ m (aufgerundet)}
 \end{aligned}$$

Hinweis: Solange $k > 1$, kann die Breite b reduziert werden, indem die Sohle am Einstiegsbecken HS_{ES} vertieft wird. Im vorliegenden Beispiel kann b_{hyd} maximal um den Faktor $1/k = 1/1,04 = 0,96$ auf $b = 0,89$ m (aufgerundet) reduziert werden.

Abschließend erfolgt eine Prüfung ob $b_{hyd} < b_{min}$ ist. Dies ist nicht der Fall, und somit ist eine Dotation für die Auffindbarkeit erforderlich.

Berechnung des Leitdurchflusses und der Dotation

Mit der Kontinuitätsgleichung Gl. (8) lässt sich für die oben ermittelte Einstiegsbreite der maximale Leitdurchfluss für UW_{330} berechnen.

$$\begin{aligned}
 Q_{Leit} &= b \cdot (UW - HS_{ES}) \cdot v_{ES} \cdot c_d \\
 Q_{Leit,330} &= 0,92 \cdot (147,15 - 145,95) \cdot 1,52 \cdot 0,92 \\
 &= 3,0 \text{ m}^3/\text{s}
 \end{aligned}$$

Die Dotionsanlage ist auf $Q_{Dot} = Q_{Leit,330} - Q_{B,FAA}$ zu bemessen. In diesem Beispiel wird davon ausgegangen, dass der Betriebsabfluss der FAA $Q_{B,FAA} = 0,8 \text{ m}^3/\text{s}$ beträgt. Der maximale Durchfluss, auf den das Dotionsbauwerk ausgelegt werden muss, ist also:

$$\begin{aligned}
 Q_{Dot} &= Q_{Leit,330} - Q_{B,FAA} \\
 &= 3,0 - 0,8 \\
 &= 2,2 \text{ m}^3/\text{s}
 \end{aligned}$$

Statistische Abschätzung zum Wasserbedarf

Statistische Aussagen über den Wasserbedarf, der für Aufrechterhaltung der Leitströmung im Funktionsbereich der FAA nötig ist, werden durch die Integration von Gl. (8) über die Dauerlinie des UW_τ erhalten. Näherungsweise lässt sich das Integral mit folgender Summation lösen:

$$\overline{Q_{Leit}}_{\tau_u}^{\tau_o} = \frac{1}{365} \int_{\tau_u}^{\tau_o} Q_{Leit,\tau} d\tau \approx \frac{1}{365} \sum_{\tau=\tau_u}^{\tau_o} \Delta\tau Q_{Leit}^*$$

Dabei ist

- τ die Unterschreitungsdauer,
- τ_u bzw. τ_o die untere bzw. obere Grenze des betrachteten Intervalls,
- Q_{Leit} = $b \cdot (UW_\tau - HS_{ES}) \cdot v_{ES} \cdot c_d$ der korrespondierende Leitdurchfluss,
- $\Delta\tau$ das Intervall zwischen zwei Unterschreitungsdauern und
- Q_{Leit}^* = $0,5 \cdot (Q_{Leit,\tau+} - Q_{Leit,\tau-})$ der dazugehörige mittlere Leitdurchfluss.

Unterschreitungsdauer τ in Tagen (d)	Q in m ³ /s	UW in m ü. NHN	hES in m	Q_{Leit} in m ³ /s	$\Delta\tau$ in Tagen	Q_{Leit}^* in m ³ /s	$V_{Leit} = \Delta\tau Q_{Leit}^*$ Tage·m ³ /s
(365)				(3,00) ¹⁾			
364	912,9	150,94	5,00	3,00 ¹⁾	1	3,00	3,00
363	772,2	150,48	4,53	3,00 ¹⁾	1	3,00	3,00
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
330	282,3	148,28	2,33	3,00	⋮	⋮	⋮
320	250,0	148,11	2,16	2,78	10	2,89	28,89
300	202,8	147,85	1,91	2,45	20	2,62	52,32
270	161,7	147,64	1,69	2,18	30	2,32	69,45
240	133,6	147,50	1,55	2,00	30	2,09	62,61
210	115,7	147,41	1,47	1,88	30	1,94	58,23
183	102,1	147,35	1,40	1,80	27	1,84	49,77
150	88,8	147,29	1,34	1,73	33	1,76	58,20
130	81,8	147,26	1,31	1,68	20	1,70	34,09
120	78,5	147,24	1,30	1,67	10	1,68	16,75
110	75,0	147,23	1,28	1,65	10	1,66	16,57
100	72,0	147,22	1,27	1,63	10	1,64	16,40
90	68,9	147,20	1,26	1,62	10	1,62	16,25
80	66,1	147,19	1,24	1,60	10	1,61	16,08
70	63,2	147,18	1,24	1,59	10	1,59	15,95
60	60,5	147,17	1,23	1,58	10	1,58	15,84
50	57,6	147,16	1,22	1,57	10	1,57	15,72
40	54,8	147,16	1,21	1,56	10	1,56	15,61
30	51,7	147,15	1,20	1,54	10	1,55	15,50
25	49,9	147,14	1,19	1,54	5	1,54	7,70
20	47,8	147,13	1,19	1,53	5	1,53	7,65
15	44,9	147,12	1,18	1,51	5	1,52	7,60
10	41,1	147,11	1,17	1,50	5	1,51	7,53
9	40,2	147,11	1,16	1,50	1	1,50	1,50
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
1	24,4	147,08	1,14	1,46	⋮	⋮	⋮
0	10,7	147,08	1,13	1,46	1	1,46	1,46

1) Da die Anlage auf einen Funktionszeitraum von UW_{30} bis UW_{330} ausgelegt ist, bleibt der Leitdurchfluss für $UW > UW_{330}$ konstant bei $Q_{Leit,330} = 3,0 \text{ m}^3/\text{s}$.

Der statistisch mittlere jährliche Wasserbedarf für die Leitströmung an diesem Standort berechnet sich näherungsweise zu:

$$\begin{aligned}
 MQ_{Leit} &= \overline{Q_{Leit}}^{364} = \frac{1}{365} \sum_{\tau=0}^{364} \Delta\tau Q_{Leit}^* \\
 &= \frac{1}{365} (1 \cdot 1,46 + \dots + 33 \cdot 1,76 + \dots + 1 \cdot 3,00) \\
 &= 2,0 \text{ m}^3/\text{s}
 \end{aligned}$$

Dieser Wert entspricht i. d. R. nicht dem Minderdurchfluss der WKA, da hierfür nur diejenigen Zeiten zu berücksichtigen sind, in denen die Turbinen in Betrieb sind und kein zusätzlicher Wehrüberfall stattfindet und der Leitdurchfluss nicht in Konkurrenz zur WKA steht. Vereinfachend wird angenommen, dass die WKA erst ab einem Mindestdurchfluss hochgefahren wird und ab Q_{Ausbau} Wehrüberfall einsetzt.

Am Beispielstandort beträgt dieser Mindestdurchfluss $40 \text{ m}^3/\text{s}$ und Q_{Ausbau} der Anlage ist $130 \text{ m}^3/\text{s}$. Die Betroffenheit besteht also erst ab einem Abfluss von $40 \text{ m}^3/\text{s}$, was nach der Dauerlinientabelle ca. einer Unterschreitungsdauer von 9 Tagen entspricht. Der Ausbaudurchfluss wird etwa bei einer Unterschreitungsdauer von 240 Tagen erreicht (siehe Tabelle).

Hinweis: Weichen die gesuchten Abflüsse stark von den in der Tabelle der Dauerlinie aufgeführten Werten ab, empfiehlt es sich, die Unterschreitungsdauern durch eine Interpolation zu ermitteln.

Der Kraftwerksbetreiber an diesem Standort ist lediglich für die Dauer zwischen den in der Tabelle gestrichelten Linien betroffen. Der mittlere auf das Jahr bezogene Wasserverlust aufgrund der benötigten Leitströmung beträgt näherungsweise:

$$\begin{aligned}
 MQ_{WKA, \text{Verlust}} &\approx \overline{Q_{\text{Leit}}}_{9}^{240} = \frac{1}{365} \sum_{\tau=9}^{240} \Delta\tau \cdot Q_{\text{Leit}}^* \\
 &= \frac{1}{365} (1 \cdot 1,50 + \dots + 30 \cdot 1,94) \\
 &= 1,1 \text{ m}^3/\text{s}
 \end{aligned}$$