Bemessung und Gestaltung von Fischschutz- und Fischabstiegssystemen – eine kritische Diskussion aktueller ethohydraulischer Befunde

Guntram Ebel

Im Rahmen einer aktuellen ethohydraulischen Studie (LEHMANN et al. 2016) wurden Untersuchungen an unterschiedlichen Rechen- und Bypasskonfigurationen mit dem Ziel durchgeführt, den Kenntnisstand zum Fischverhalten an derartigen Vorrichtungen zu verbessern sowie Regeln und Grenzwerte für nachhaltig wirksame Abwanderkorridore abzuleiten. Aufgrund des somit bestehenden Praxisbezuges ist die Validität des Untersuchungsansatzes sowie der Methodik und der Ergebnisse dieser Studie von besonderem Interesse. Ausgehend hiervon werden diese Aspekte in vorliegender Arbeit einer kritischen Prüfung unterzogen.

1 Einleitung

Während das Problem des Fischschutzes und Fischabstieges im nordamerikanischen und osteuropäischen Raum bereits seit den 1960er Jahren den Gegenstand zahlreicher Forschungsarbeiten bildet, setzte dessen intensivere wissenschaftliche Bearbeitung in West-, Nord- und Mitteleuropa erst in den 1980er Jahren ein. In Deutschland ist eine verstärkte Forschungsaktivität seit etwa 20 Jahren zu verzeichnen. Diese umfasst im Wesentlichen folgende Themenkomplexe: Biologie der Fischabwanderung, Mortalität in unterschiedlichen Triebwerkstypen, Verhalten von Fischen an Schutz- und Abbiologische Wirksamkeit stiegssystemen, ausgeführter Schutz- und Abstiegssysteme, Entwicklung von neuen Schutz- und Abstiegssystemen sowie von ökologisch angepassten Kraftwerkskonzepten. Darüber hinaus erfolgten Aufarbeitungen des internationalen Kenntnisstandes, wobei zugleich die Beschreibung komplexer Fragestellungen durch aussagefähige Modelle gelang. Auf dieser Grundlage wurden Bemessungs- und Gestaltungsempfehlungen für Fischschutz- und Fischabstiegssysteme abgeleitet.

Kürzlich erschien eine weitere Arbeit zum Fischschutz und Fischabstieg (LEHMANN et al. 2016), im Rahmen derer verschiedene Rechen- und Bypasskonfigurationen im Hinblick auf ihre hydraulischen Eigenschaften und ihre biologische Wirkung in einem Laborgerinne sowie an einer Wasserkraftanlage untersucht wurden. Entsprechend den Darstellungen zu den wesentlichen Zielen und Inhalten dieser Arbeit (vgl. Klappentext bzw. Rücktitel) werden aus den Ergebnissen "...praxisrelevante Regeln und Grenzwerte für die Anordnung, die Konstruktion und den Betrieb nachhaltig wirksamer Abwanderkorridore abgeleitet". Aufgrund des somit gegebenen Bezuges zur Planungs- und Genehmigungspraxis kommt der Validität des Untersuchungsansatzes, der Methodik und der Ergebnisse dieser Studie eine besondere Bedeutung zu. Ausgehend hiervon ist es erforderlich, diese Aspekte einer kritischen Prüfung zu unterziehen.

In vorliegender Arbeit werden ausgewählte Ergebnisse dieser Prüfung in Kurzform dargestellt und diskutiert sowie Empfehlungen für das künftige Vorgehen bei der Erarbeitung von Bemessungs- und Gestaltungsregeln für Fischschutz- und Fischabstiegssysteme unterbreitet. Den Ausführungen vorangestellt wird eine Kurzbeschreibung der durch LEHMANN et al. (2016) vorgenommenen Untersuchungen.

2 Gegenstand der ethohydraulischen Untersuchungen

Die ethohydraulischen Untersuchungen erfolgten in einem Laborgerinne mit einer Länge von 40 m, einer Breite von 2 m, einer Höhe von 1 m und einer Durchflusskapazität von 0,850 m³/s. Die jeweiligen Tests unterschieden sich im Hinblick auf die betrachteten Barriere- und Bypasstypen, die Anzahl und Anordnung der Bypässe, die Anströmgeschwindigkeiten sowie die Fischarten bzw. Artengruppen.

Folgende Barrieretypen wurden untersucht: Wand ohne Schräganströmung, Rechen ohne Schräganströmung mit vertikaler Stabausrichtung (lichte Stabweite 12 mm, Rechenlänge 1 m), Rechen mit horizontaler Schräganströmung (Anströmwinkel 30° oder 40°) und horizontaler Stabausrichtung (lichte Stabweite 12 mm, Rechenlänge 3 m). Die Bypässe waren entweder als Kontur (Ausschnitt in einer Blende) oder als Kontur mit angesetzter Kubatur (Röhre oder Tunnel mit jeweils 1,5 m Länge) konzipiert. Folgende Konturen wurden untersucht: Kreis (Durchmesser 0,3 m), Quadrat (Kantenlänge 0,3 m), Rechteck (Breite 0,3 m, Höhe 0,5 m). Die Anordnung der Eintrittsprofile bzw. Konturen erfolgte sohlnah oder oberflächennah im 0°- oder 90°-Winkel zur Längsachse des Laborgerinnes.

Die Untersuchungen wurden mit folgenden Arten bzw. Artengruppen ausgeführt: Lachs-Smolts (Körperlänge 11 – 19 cm), Aale (Körperlänge 50 – 100 cm), Potamodrome (12 Arten, Körperlänge 9 – 50 cm). Das Fischverhalten wurde direkt beobachtet und in deskriptiver Form protokolliert sowie durch Videound Fotoaufnahmen dokumentiert (Beobachtungsdauer i. d. R. jeweils 30 min). Nahezu zeitgleich zu den ethohydraulischen Laborstudien erfolgten Freilanduntersuchungen am Ausleitungskraftwerk "Auer Kotten" (Ausbaudurchfluss 14 m³/s) im Unterlauf der Wupper. Deren Zielstellung bestand einerseits in der Identifizierung der von abwandernden Fischen präferierten Korridore sowie andererseits in der Validierung der Laborbefunde und der hieraus abgeleiteten Bemessungs- und Gestaltungsempfehlungen.

Das im Jahr 2012 modernisierte Kraftwerk ist mit einem Fischschutz- und Fischabstiegssystem ausgestattet. Als Schutzsystem wurde ein schräg angeströmter Horizontalrechen (horizontaler Anströmwinkel 30°, lichte Stabweite 12 mm) mit Sohlleitwand und damit jenes Rechenkonzept gewählt, das Bestandteil des Leitrechen-Bypass-Systems nach EBEL, GLUCH & KEHL (2001) ist (vgl. z.B. EBEL et al. 2015). Als Abstiegssystem wurden drei Bypässe installiert, an deren tunnelförmigen Eintrittsbereichen teilweise erhebliche Verlegungsprobleme auftraten (LEHMANN et al. 2016, ENGLER & ADAM 2014). Die Untersuchung der biologischen Nutzungsfrequenz dieser und weiterer potentieller Passagewege erfolgte durch Einsatz telemetrischer Methoden (HDX-Technologie).

Die hydraulischen Verhältnisse im Laborgerinne sowie am Kraftwerk "Auer Kotten" wurden mit unterschiedlichen Methoden erfasst und durch numerische Modellierung beschrieben. Für weiterführende Informationen zu den ausgeführten Labor- und Freilanduntersuchungen wird auf die Arbeiten von LEHMANN et al. (2016), ENGLER & ADAM (2014) sowie ENGLER et al. (2016) verwiesen.

3 Diskussion der ethohydraulischen Untersuchungen

3.1 Versuchsanordnungen

Wie bei jeder anderen experimentellen Studie konnten auch bei der hier gegenständlichen ethohydraulischen Laboruntersuchung von LEHMANN et al. (2016) aufgrund der gebotenen Begrenzung des Aufwandes lediglich ausgewählte Versuchsanordnungen bearbeitet werden. Dennoch ist darauf hinzuweisen, dass sich die Studie in weiten Teilen mit jenen Bypasstypen befasst, die besonders verlegungsanfällig sind und daher nicht die Vorzugslösung für den Praxiseinsatz darstellen (EBEL 2013). Insofern ist auch die in Tab. 9 der ethohydraulischen Studie dargestellte Empfehlung, in der Praxis ausschließlich Bypässe mit röhrenförmiger Kubatur einzusetzen, kritisch zu hinterfragen.

Zwar verweisen die Autoren der ethohydraulischen Untersuchung darauf, "... dass Bypässe insbesondere nach einem Hochwasser grundsätzlich einer regelmäßigen Wartung und Reinigung bedürfen". Jedoch zeigen praktische Erfahrungen, dass die Rei-



Abb. 1: Aufgrund ihrer starken Verlegungsanfälligkeit sollten rohrartige Bypässe (im Bild DN 400) möglichst nicht als Fischabstiegssysteme eingesetzt werden (Foto: G. Ebel).

nigung rohrartiger Bypässe in einem Turnus von nur wenigen Tagen erforderlich werden kann und zudem aufgrund der schlechten Zugänglichkeit häufig extrem erschwert ist (EBEL 2013). Aus diesem Grund ist für rohrartige Bypässe in der Praxis ein schneller Funktionsverlust zu erwarten, sofern nicht durch permanente Kontrolle und aufwändige Reinigung eine Freihaltung gewährleistet werden kann. Da die Verlegungen vordergründig das Eintrittsprofil betreffen, ist das Risiko des Funktionsverlustes weitgehend unabhängig von der Frage, ob die Rohrleitung mit gerader oder gekrümmter Linienführung in das Unterwasser geführt wird (**Abb. 1**).

Die kaum verlegungsanfälligen schachtartigen Bypässe, die als Bestandteil des o.g. Leitrechen-Bypass-Systems bereits seit dem Jahr 2006 an verschiedenen europäischen Wasserkraftanlagen im Praxiseinsatz sind (vgl. z.B. GLUCH 2007, 2014 und 2017, EBEL 2013, HEIß 2015, EBEL et al. 2015), waren leider

3.2 Ergebnisse

3.2.1 Fischverhalten im Anströmbereich von Rechenanlagen

Soweit den Darstellungen in LEHMANN et al. (2016) zu entnehmen ist, wurden die verhaltensbiologischen Tests bei Tages- bzw. Kunstlicht ausgeführt. Da die Abwanderung von Fischen in Fließgewässern jedoch überwiegend nachts erfolgt (vgl. z.B. VOLLESTAD et al. nicht Gegenstand der Untersuchungen. Derartige Bypässe sind mit speziellen Regelorganen ausgestattet, die einerseits die Einhaltung von biologischen Zielgrößen für die verhaltensbiologische Akzeptanz und die verletzungsfreie Passage sowie andererseits die Weiterleitung des am Leitrechen horizontal abgereinigten Treibgutes ermöglichen (**Abb. 2**).

Angemerkt wird darüber hinaus, dass die am Rechenfuß der Wasserkraftanlage "Auer Kotten" vorhandene Sohlleitwand bei der Laborstudie trotz der angestrebten situativen Ähnlichkeit von Freiland- und Laborverhältnissen offenbar nicht realisiert wurde. Dieser Sachverhalt ist bedauerlich, da Laborstudien anderer Autoren (AMARAL et al. 2001, KRIEWITZ-BYUN 2015, FLÜGEL et al. 2015) belegen, dass die biologische Wirkung von Leitrechen-Bypass-Systemen durch Sohlleitwände maßgeblich gefördert wird **(Abb. 3)**.

1986, STEINMANN & STAAS 2001, EBEL 2013), sind die Lichtverhältnisse während der ethohydraulischen Tests als unnatürlich anzusehen. Dass derartige Bedingungen das Fischverhalten im Anströmbereich von mechanischen Barrieren maßgeblich beeinflussen können, wird durch Studien von PAVLOV (1989) belegt, der signifikante Verhaltensunterschiede bei Licht und Dunkelheit beschreibt. Auf eine kritische Diskussion möglicher Auswirkungen der artifiziellen Lichtverhältnisse wird in der Studie von LEHMANN et



Abb. 2: Für schachtartige, mit speziellen Regelorganen ausgestattete Bypässe liegen seit mehr als 10 Jahren vorteilhafte Betriebserfahrungen vor (**links:** schachtartiger Bypass im Bau, Foto: M. Kehl); **rechts:** schachtartiger Bypass im Betrieb, Foto: G. Ebel).



Abb. 3: Leitrechen (lichte Stabweite 15 mm) mit Sohlleitwand an einer schwedischen Wasserkraftanlage mit einem Ausbaudurchfluss von 40 m³/s (Foto: M. Hebrand)

al. (2016) leider verzichtet. Gleichfalls unberücksichtigt bleibt auch die von RUSSON et al. (2010) ausgeführte Laborstudie zur biologischen Wirkung verschiedener Rechenkonstellationen auf Aale. Die in dieser Studie mittels Infrarot-Technologie an Leitrechen dokumentierten Verhaltensweisen unterscheiden sich erheblich von denen, die durch LEHMANN et al. (2016) beschrieben werden. Die von AMARAL et al. (2001) unter nächtlichen Bedingungen durchgeführten Laboruntersuchungen zur Effizienz der Bypassnutzung durch Aale und andere Arten werden in LEHMANN et al. (2016) gleichfalls nicht diskutiert. Bei ihren Untersuchungen beobachteten LEHMANN et al. (2016), dass Fische vor einem Leitrechen ihre Körperlängsachse nicht exakt gegen den Anströmvektor ausrichten. Vielmehr ist der durch Körperlängsachse und Rechen eingeschlossene Winkel etwas größer als der zwischen Anströmvektor und Rechen ausgebildete Winkel. Aufgrund dieser spezifischen Körperausrichtung gelangen die Fische entlang des Rechenfeldes zu dem am unterstromigen Ende angeordneten Bypass. Das diesem Mechanismus zugrunde liegende Verhalten bezeichnen LEHMANN et al. (2016) als "Gierverhalten" und verweisen darauf, dass dieses "... nicht durch tangential zum Rechen wirkende Strömungsvektoren initiiert wird...", da derartige Strömungsbedingungen an dem untersuchten Horizontalrechen nicht nachweisbar waren. Darüber hinaus führen LEHMANN et al. (2016) aus, dass "... ein Gierverhalten von Fischen bisher weder beschrieben, noch seine Bedeutung als Bewegungstyp erkannt [wurde]".

Hierzu sei angemerkt, dass bereits in den 1970er und 1980er Jahren durch russische Autoren eine analoge Körperausrichtung von Fischen im Anströmbereich von mechanischen Barrieren und die hieraus resultierende Bewegung zum Bypass sowohl deskriptiv als auch mathematisch dargestellt wurden (PAVLOV 1989 unter Bezugnahme auf PAVLOV & PAKHORUKOV 1973 und 1983 sowie PAKHORUKOV & KURAGINA 1978).

Ursächlich für die spezifische Körperausrichtung sind nach PAVLOV (1989) zwei sich gegenseitig überlagernde Reaktionstypen: (1) rheotaktische Reaktion

3.2.2 Anströmgeschwindigkeit von Rechenanlagen

Im Rahmen der ethohydraulischen Untersuchung wurden durch LEHMANN et al. (2016) Grenzwerte für die zulässige Anströmgeschwindigkeit von Rechenanlagen abgeleitet. Diese Geschwindigkeit steht ihrerseits in enger Beziehung zur Schwimmgeschwindigkeit der zu schützenden Fische. Die Schwimmgeschwindigkeit wird wiederum maßgeblich durch die Körperlänge, die Schwimmdauer und die Wassertemperatur bestimmt (Überblick in EBEL 2013 und 2014). Da die Wassertemperaturen bei den Untersuchungen von LEHMANN et al. (2016) offenbar teils deutlich höher als bei der natürlichen Abwanderung waren und zudem die untersuchten Rechen nur eine Länge von 1 bzw. 3 m aufwiesen, erscheint eine Übertragung der ethohydraulischen Befunde auf Praxisbedingungen problematisch.

In Tab. 9 der Arbeit von LEHMANN et al. (2016) wird für Aale unabhängig vom Rechentyp eine zulässige Anströmgeschwindigkeit von 0,5 m/s benannt. Der für Lachs-Smolts mit 1 m/s und für potamodrome Arten pauschal mit 0,8 m/s angegebene Grenzwert soll für einen unpassierbaren Leitrechen gelten. Auf eine Darstellung und Diskussion der durch andere Autoren vorgelegten Befunde zur maximal zulässigen Anströmgeschwindigkeit wird von LEHMANN et al. (2016) weitgehend verzichtet. (Anschwimmen gegen den Anströmvektor), (2) Vermeidungsreaktion gegenüber der Barriere (orthogonale Ausrichtung zur Barriere und Anschwimmen gegen die Normalkomponente des Anströmvektors). Aufgrund der resultierenden Schwimmrichtung verringert sich entsprechend den o.g. Autoren zugleich die Schwimmgeschwindigkeit, die vom Fisch aufgewendet werden muss, um einer Kollision mit der Barriere zu entgehen. Für den durch Körperlängsachse und Anströmvektor eingeschlossenen Winkel wurde bei experimentellen Studien ein Wert von 24,7° (± 3,2°) aufgefunden (PAVLOV 1989). Dabei ist anzunehmen, dass die Größe dieses Winkels sowohl mit der Anströmgeschwindigkeit als auch mit den geometrischen Eigenschaften der Barriere korreliert, da diese Parameter ursächlich für die Intensität der o.g. Reaktionstypen sind (vgl. Überblick in EBEL 2013).

Um die oben dargestellten methodischen Probleme zu vermeiden, wählte EBEL (2013 und 2014) einen anderen Ansatz zur Ableitung von Grenzwerten für die maximal zulässige Anströmgeschwindigkeit. Zu diesem Zweck wurden zunächst auf der Grundlage der international verfügbaren Befunde zur Schwimmfähigkeit europäischer Fischarten (32 Studien, 245 Datensätze, 22 Arten) multivariate Modelle entwickelt. Diese beschreiben die erreichbare Schwimmgeschwindigkeit (u [m/s]) in Abhängigkeit von der Körperlänge (TL [m]), der Schwimmdauer (t [s]) und der Wassertemperatur (T [°C]). Sie besitzen ein hohes Erklärungsvermögen (R² ≥ 0,86) und sind mit p < 0,00001 jeweils höchst signifikant (**Abb. 4 – 6**). Die Modellgleichungen besitzen folgende allgemeine Form (a...d: art- bzw. artgruppenspezifische Konstanstanten):

$$\log(u) = a + b \cdot \log(TL) - c \cdot \log(t) + d \cdot \log(T)$$
 [1]

Diese Befunde wurden in weiteren Bearbeitungsschritten mit einschlägigen Modellen zur Beschreibung des Fischverhaltens im Anströmbereich von mechanischen Barrieren verknüpft. Dabei fanden die während der natürlichen Abwanderung ausgebildeten Wassertemperaturen Berücksichtigung. Auf dieser Grundlage erfolgte sodann die Ableitung von Empfehlungen zur Auslegung der Anströmgeschwin-









Abb. 5: Regression von beobachteten und durch Modellanwendung berechneten Schwimmgeschwindigkeiten (Details vgl. EBEL 2013)

Abb. 6: Visualisierung der Modellergebnisse zur Schwimmgeschwindigkeit am Beispiel rheophiler Arten und einer Wassertemperatur von 15 °C (nach Gleichung [1], Details vgl. EBEL 2013)

Tab. 1: Maximal zulässige Anströmgeschwindigkeit [m/s] von Rechenanlagen für ausgewählte Arten, gültig für eine Wassertemperatur von 5 ℃ (nach Gleichung [1], Details vgl. EBEL 2013)						
Art	TL [m]	Rechen ohne Schräganströmung	Leitrechen			
			Anströmwinkel 40°	Anströmwinkel 30°		
Diadrome Arten						
Aal (<i>Anguilla anguilla</i>)	0,30	0,27	0,42	0,54		
Aal (Anguilla anguilla)	0,60	0,41	0,64	0,82		
Lachs-Smolts (Salmo salar)	0,10	0,38	0,59	0,76		
Lachs-Smolts (Salmo salar)	0,15	0,53	0,82	1,06		
Potamodrome Arten						
Bachforelle (Salmo trutta)	0,15	0,53	0,82	1,06		
Elritze (<i>Phoxinus phoxinus</i>)	0,10	0,38	0,59	0,76		
Barbe (<i>Barbus barbus</i>)	0,15	0,53	0,82	1,06		
Plötze (<i>Rutilus rutilus</i>)	0,10	0,28	0,44	0,56		
Ukelei (<i>Alburnus alburnus</i>)	0,15	0,39	0,61	0,78		
Brasse (Abramis brama)	0,20	0,48	0,75	0,96		

digkeit und des Anströmwinkels von Rechen und anderen mechanischen Barrieren (EBEL 2013).

Diese Sachverhalte werden durch LEHMANN et al. (2016) nur sehr unvollständig und in unzutreffendem Kontext dargestellt. So basieren die Bemessungsempfehlungen von EBEL (2013) – im Gegensatz zu den Darstellungen in LEHMANN et al. (2016) – nicht auf der Annahme, dass entlang des Rechens ein tangentialer Strömungsvektor ausgebildet ist, welcher die Bewegung der Fische zum Bypass ermöglicht.

3.2.3 Anströmgeschwindigkeit und Auffindbarkeit von Bypässen

Gegenstand der Studie von LEHMANN et al. (2016) waren auch Untersuchungen zur verhaltensbiologischen Akzeptanz von Bypässen bei unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten im Eintrittsbereich. Die diesbezüglich als günstig bzw. zulässig angesehenen Geschwindigkeiten sind in den Tabellen 8 und 9 dieser Studie zusammenfassend dargestellt. Sie sind meist deutlich geringer als die für den Anströmbereich von Rechenanlagen angegebenen Geschwindigkeiten. Diese Empfehlungen stehen in erheblichem Widerspruch zu den diesbezüglichen Befunden anderer Autoren, nach denen eine negative Beschleunigung im Bereich des Bypasseintrittsprofils zu vermeiden ist (Literaturüberblick in EBEL 2013). **Tab. 1** vermittelt einen Überblick über die von EBEL (2013) erarbeiteten Bemessungsempfehlungen für ausgewählte Arten, wobei sowohl ein Rechen ohne Schräganströmung als auch Leitrechen mit Anströmwinkeln von 30° und 40° betrachtet werden. Wie die in Tab. 1 dargestellten Daten beispielhaft zeigen, bestehen zwischen den Bemessungsempfehlungen von EBEL (2013) sowie LEHMANN et al. (2016) deutliche Unterschiede.

Eine Bezugnahme auf die Arbeiten anderer Autoren findet sich in LEHMANN et al. (2016) in Form eines Zitats, das der Arbeit von EBEL (2013) entnommen ist. Dieses gibt die Ergebnisse zahlreicher Studien zur absoluten und relativen Eintrittsgeschwindigkeit von Bypässen summarisch wieder. Wie in EBEL (2013) dargestellt, beschreiben diese Angaben die hydraulischen Voraussetzungen für die Minimierung von Vermeidungsreaktionen und zielen damit auf eine hohe verhaltensbiologische Akzeptanz des Bypasses ab. Allerdings werden diese Angaben durch LEHMANN (2016) in einen unzutreffenden Kontext gesetzt und mit Bezug zur Auffindbarkeit von Bypässen diskutiert.

Die Auffindbarkeit eines Bypasses wird jedoch primär durch den Typ der eingesetzten Barriere bestimmt, wogegen die Eintrittsgeschwindigkeit in den Bypass eine untergeordnete Bedeutung für die Auffindbarkeit besitzt. So ist, wie auch von LEHMANN et al. (2016) dargestellt, selbst bei hoher Eintrittsgeschwindigkeit der korrespondierende hydraulische Impuls im Regelfall um ein Vielfaches geringer als der im Turbinenanstrom ausgebildete Impuls. Aus diesem Grund ist eine vorteilhafte Auffindbarkeit von Bypässen prinzipiell nur durch solche Barrieren zu erzielen, die den Fisch aufgrund ihrer spezifischen

3.2.4 Mindestgröße von Bypassprofilen

Von LEHMANN et al. (2016) wurden drei Bypasskonturen (Kreis, Quadrat, Rechteck) untersucht, die sämtlich eine konstante Breite (0,3 m) aufwiesen. Die Höhe der Konturen betrug 0,3 m (Kreis, Quadrat) oder 0,5 m (Rechteck). Obwohl sich die untersuchten Profilbreiten und -höhen somit kaum voneinander unterscheiden, werden von den Autoren Schlussfolgerungen zu den biologisch erforderlichen Mindestdimensionen von Bypässen abgeleitet (vgl. Tab. 9 in LEHMANN et al. 2016). Unklar ist auch, aus welchem Grund sich die in Tab. 9 der ethohydraulischen Studie diesbezüglich angegebenen Werte teilweise von den tatsächlich untersuchten Dimensionen unterscheiden. Inwieweit diese Differenzen dadurch bedingt werden, dass bei der Erarbeitung von Tab. 9 auch "andere Quellen" genutzt wurden, ist nicht zu klären, da in LEHMANN et al. (2016) nicht angegeben wird, um welche Quellen es sich hierbei ggf. gehandelt hat.

Für potamodrome Arten werden die notwendigen Bypassdimensionen in LEHMANN et al. (2016) mit $0,5 \times 0,7$ m beziffert. Angesichts der Tatsache, dass potamodrome Arten sehr differenzierte Körpergrößen erreichen (z.B. Elritze 10 cm, Äsche 50 cm, Zander 100 cm), erscheint dieser Ansatz sehr pauschal und für die praktische Bemessung wenig zweckdienlich. Die einzige potamodrome Art, für die in LEHMANN et al. (2016) eine abweichende Empfehlung angegeben wird, ist der Wels. Allerdings ist bereits aus generellen Gründen fraglich, ob diese Empfehlung (0,3 x 0,3 m) die tatsächlichen Anforderungen dieser großwüchsigen Art beschreiben kann und in der Praxis angewendet werden sollte.

Die durch andere Autoren vorgelegten Untersuchungen zur Akzeptanz unterschiedlich dimensionierter Bypässe bleiben in LEHMANN et al. (2016) weitgehend unberücksichtigt. Das betrifft auch die von Exposition zum Bypasseintrittsprofil leiten. Infolgedessen wird durch EBEL (2013) und zahlreiche andere Autoren ausdrücklich empfohlen, in der Praxis schräg angeströmte Barrieren einzusetzen. Diese Kenntnisse finden im Ausland seit mehreren Jahrzehnten (Überblick in EBEL 2013) und in Deutschland seit dem Jahr 2001 praktische Anwendung (vgl. z.B. EBEL 2001 und 2013, GLUCH 2007, 2014 und 2017, EBEL et al. 2015).

EBEL (2013) entwickelten Bemessungsempfehlungen. Diese wurden auf der Grundlage der diesbezüglich verfügbaren Freiland- und Laborstudien (9 Studien, 38 Datensätze, 20 Arten) durch Regressionsanalyse ($R^2 = 0,78$) abgeleitet. Die erforderliche Breite des Bypassprofils (b_{BYPASS} [m]) ergibt sich demnach aus der absoluten Körperbreite ($b_{FISCH,MAX}$ [m]), die bedarfsweise auch aus der Körperlänge (TL [m]) und der relativen Körperbreite ($b_{FISCH,RELAT}$ [-]) abgeleitet werden kann. Die erforderliche Höhe (h_{BYPASS} [m]) wird als Funktion der Profilbreite beschrieben. Die bei der Regressionsanalyse aufgefundenen Beziehungen besitzen folgende allgemeine Form (a...c: Konstanten, Details in EBEL 2013):

$$\mathbf{b}_{\text{BYPASS}} = \mathbf{a} \cdot \mathbf{b}_{\text{FISCH,MAX}}^{b} = \mathbf{a} \cdot \left(\text{TL} \cdot \mathbf{b}_{\text{FISCH,RELAT}} \right)^{b}$$
 [2]

$$h_{BYPASS} = c \cdot b_{BYPASS}$$
[3]

Entsprechend diesen Ergebnissen besteht zwischen der Körpergröße des Fisches und der erforderlichen Dimension des Bypasseintrittsprofils eine positive Korrelation, die jedoch erwartungsgemäß nicht linear ist, sondern durch eine Potenzfunktion beschrieben wird (**Abb. 7**). Die aus Gleichung [2] und [3] resultierenden Bemessungsempfehlungen sind für ausgewählte potamodrome Arten in **Tab. 2** zusammenfassend dargestellt. Gleichfalls in die Tabelle aufgenommen wurden Bemessungsempfehlungen für Aal und Lachs (Ableitung vgl. EBEL 2013). Wie die Daten in Tab. 2 beispielhaft belegen, bestehen zwischen den Bemessungsempfehlungen von EBEL (2013) und LEHMANN et al. (2016) wiederum deutliche Unterschiede.



Abb. 7: Visualisierung der Modellergebnisse zur Profilbreite von Bypässen für Arten mit unterschiedlichen Körperproportionen (nach Gleichung [2], Details vgl. EBEL 2013)

Tab. 2: Mindestanforderungen an die Bypassdimensionen für ausgewählte Arten (nach Gleichung [2] und [3], Details vgl. EBEL 2013)						
A	Körperdimensionen		Bypassdimensionen			
Alt	TL [m]	b _{FISCH,RELAT} [-]	b _{BYPASS} [m]	h _{BYPASS} [m]		
Diadrome Arten						
Aal (<i>Anguilla anguilla</i>)	0,90	0,05	0,30	0,30		
Lachs-Smolts (Salmo salar)	0,20	0,10	0,45	0,45		
Potamodrome Arten						
Äsche (Thymallus thymallus)	0,50	0,10	0,30	0,45		
Bachforelle (Salmo trutta)	0,70	0,10	0,34	0,52		
Barbe (<i>Barbus barbus</i>)	0,80	0,11	0,38	0,56		
Elritze (<i>Phoxinus phoxinus</i>)	0,10	0,11	0,17	0,26		
Gründling (Gobio gobio)	0,15	0,12	0,21	0,31		
Plötze (<i>Rutilus rutilus</i>)	0,30	0,11	0,26	0,39		
Wels (Silurus glanis)	1,60	0,14	0,58	0,87		
Zander (Sander lucioperca)	1,00	0,10	0,39	0,59		

3.3 Reproduzierbarkeit

Eine Nachvollziehbarkeit der von LEHMANN et al. (2016) durchgeführten Untersuchungen ist trotz der umfangreichen Anhänge, die auf dem Datenträger zur ethohydraulischen Studie hinterlegt sind, nicht oder nur sehr eingeschränkt gegeben. So sind die Durchflüsse und Fließgeschwindigkeiten, die während der einzelnen Tests ausgebildet waren, aufgrund von Textverschiebungen in den Protokollbögen vielfach nicht vollständig lesbar oder fehlen völlig. Folglich besteht für Dritte auch keine Möglichkeit, die im Rahmen dieser Studie vorgenommenen Auswertungen nachzuvollziehen.

Nur bedingt reproduzierbar sind auch die Darstellungen in Tab. 9 der Arbeit von LEHMANN et al. (2016). Gemäß der Legende sind in dieser Tabelle folgende Sachverhalte dargestellt: "Aus dem vorliegenden F+E-Vorhaben ergänzt um andere Quellen resultierende Erkenntnisse und Empfehlungen für Abwanderbarrieren mit Bypässen sowie fischrelevante hydraulische Grenzwerte für deren Betrieb." Allerdings ist nicht angegeben, welche Sachverhalte aus dem F+E-Vorhaben und welche aus anderen Quellen

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Bei allen experimentellen Arbeiten sind spezifische methodische Einschränkungen unvermeidbar, welche die Aussagefähigkeit der Befunde mehr oder weniger deutlich beeinflussen. Entsprechend erfordert die Lösung komplexer wissenschaftlicher Fragestellungen zumeist die Durchführung zahlreicher Untersuchungen mit differenzierten methodischen Ansätzen. Deren Befunde sind in weiteren Bearbeitungsschritten nach inhaltlich geeigneten und reproduzierbaren Kriterien aufzuarbeiten und zu generalisieren (Metaanalyse).

Auch bei Laborstudien, bei denen die Wirkung von wasserbaulichen Einrichtungen auf Fische untersucht wird, treten spezifische methodische Probleme auf, da sowohl das Fischverhalten als auch die physiologische Leistungsfähigkeit der Tiere durch die Versuchsbedingungen deutlich beeinflusst werden können. Ursächlich hierfür sind vor allem folgende Aspekte: artifizielle Lichtbedingungen und Temperaturverhältnisse, artifizielle Geometrie und Morphologie des Gerinnes, vergleichsweise geringe Dimension des Wasserkörpers und des Bauwerks, Verzerrung der im Freiland ausgebildeten geometrischen Proportionen.

Der spezifische Vorteil von Laborstudien besteht hingegen darin, dass bei diesen eine Beobachtung des Fischverhaltens mit vergleichsweise geringem Aufwand an unterschiedlichen Bauwerkskonfigurationen erfolgen kann und eine einfache Verknüpfung dieser Befunde mit hydraulischen Daten möglich ist. Aus diesem Grund können Laborstudien trotz der o.g. methodischen Probleme eine nützliche Quelle für die Fortentwicklung des ingenieurbiologischen Wissens darstellen. Das gilt auch für die unlängst vorgelegte ethohydraulische Untersuchung von LEHMANN et al. (2016), die zur Verbesserung des gegenwärtigen Kenntnisstandes hinsichtlich des Fischschutzes und Fischabstieges an Wasserkraftanlagen beiträgt.

Da aus den Ergebnissen dieser Untersuchung "...praxisrelevante Regeln und Grenzwerte für die Anordnung, die Konstruktion und den Betrieb nachentnommen wurden. Die für die Erarbeitung der Tabelle verwendeten Quellen sind nicht benannt. Somit ist die Herkunft verschiedener Bemessungsempfehlungen unklar.

haltig wirksamer Abwanderkorridore abgeleitet [werden]", ist die Validität des Untersuchungsansatzes, der Methodik und der Befunde von hoher praktischer Bedeutung. Allerdings zeigen die Ergebnisse einer diesbezüglich durchgeführten und in vorliegender Arbeit in Kurzform dargestellten Prüfung verschiedene problematische Aspekte auf:

- (1) Die für die Anwendung empfohlenen rohrartigen Bypasstypen sind stark verlegungsanfällig, so dass bei deren Praxiseinsatz von erheblichen Unterhaltungsproblemen auszugehen ist.
- (2) Praxiserprobte Lösungen zur Verbesserung des Fischschutzes und Fischabstieges (vgl. z.B. EBEL 2013, GLUCH 2007 und 2017, EBEL et al. 2015) bleiben bei der Versuchsdurchführung und Ergebnisdiskussion unberücksichtigt: (a) Sohlleitwand am Rechenfuß zur Förderung der Leitwirkung für Fische und zur Verbesserung der Geschiebeweitergabe an das Unterwasser, (b) Regelorgane mit spezifischer Gestaltung im schachtartigen Bypass zur Einhaltung von hydraulischen Zielgrößen für die verhaltensbiologische Akzeptanz und für die verletzungsfreie Passierbarkeit.
- (3) Die Ableitung verschiedener Bemessungsempfehlungen erscheint aufgrund des gewählten Untersuchungsansatzes sowie der artifiziellen Versuchsbedingungen wenig valide. Die Bemessungsempfehlungen unterscheiden sich z.T. erheblich von diesbezüglichen Befunden anderer Autoren.
- (4) Eine Auseinandersetzung mit der Fachliteratur erfolgt nur in Ansätzen. Einschlägige Laboruntersuchungen anderer Autoren, die unter nächtlichen Bedingungen ausgeführt wurden, bleiben unberücksichtigt. Verschiedene Literaturbefunde werden in unzutreffendem Kontext wiedergegeben.
- (5) Die Untersuchungen, Datenauswertungen und Bemessungsempfehlungen sind in Teilen nicht reproduzierbar.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Ableitung von validen Bemessungs- und Gestaltungsregeln die Berücksichtigung zahlreicher Untersuchungen erfordert und daher nur im Rahmen von systematischen Analysen des internationalen Kenntnisstandes vorgenommen werden sollte. Eine Kurzdarstellung diesbezüglich verfügbarer Daten wird in **Tab. 3** gegeben.

Da die Zahl einschlägiger Studien seit einigen Jahren stark anwächst, vergrößert sich zugleich die Notwendigkeit, den internationalen Kenntnisstand durch derartige Metaanalysen regelmäßig aufzuarbeiten und durch die Ableitung von Bemessungs- und Gestaltungsregeln für die Planungspraxis zu erschließen. Einen besonderen Stellenwert sollte hierbei die Entwicklung von Modellen einnehmen, welche die Ergebnisse aller verfügbaren Studien integrieren und damit die Ableitung von bestmöglich gesicherten Grenzwerten für die Auslegung von Fischschutz- und Fischabstiegssystemen gestatten.

Tab. 3:	Bemessungsempfehlungen für Leitrechen-Bypass-Systeme entsprechend den Ergebnissen
	internationaler Metaanalysen (Details vgl. EBEL 2013 und EBEL et al. 2015)

Parameter	Ausprägung	Erläuterungen		
Rechen				
lichte Weite	≤ 15 mm	artspezifische Bemessung nach EBEL (2013)		
horizontaler Anströmwinkel	< 45°	artspezifische Bemessung nach EBEL (2013)		
Anströmgeschwindigkeit	≤ 0,80 m/s	artspezifische Bemessung nach EBEL (2013)		
Normalgeschwindigkeit	≤ 0,30 m/s	artspezifische Bemessung nach EBEL (2013)		
Tangentialgeschwindigkeit	> Normalgeschwindigkeit	bei Anströmwinkeln < 45° gewährleistet		
Höhe Sohlleitwand	≥ 0,15 · Oberwassertiefe	für physisch durchlässige Rechen, Mindestwert 0,50 m		
Eintauchtiefe Tauchwand	≥ 0,30 · Oberwassertiefe	für physisch durchlässige Rechen, Mindestwert 1,00 m		
Bypass				
lichte Profilbreite	0,30 0,60 m	artspezifische Bemessung nach EBEL (2013)		
lichte Profilhöhe bzw. Wassertiefe	0,45 0,90 m	artspezifische Bemessung nach EBEL (2013)		
Krümmungsradius	≥ 5,0 · Gerinnebreite	allgemeiner Bemessungswert		
Wassertiefe nach Überfall	≥ 0,25 · Fallhöhe	allgemeiner Bemessungswert, Mindestwert 0,90 m		
spezifische Leistung in Beckenstrukturen	≤ 500 W/m³	allgemeiner Bemessungswert		
Geschwindigkeit im Eintrittsprofil	0,30 1,50 m/s	allgemeiner Bemessungswert		
relat. Geschwindigkeit im Eintrittsprofil	1,0 2,0 · Anströmgeschwind.	allgemeiner Bemessungswert		
Geschwindigkeit im Gerinne	≤ 4,5 m/s	allgemeiner Bemessungswert		
Geschwindigkeit im Überfall	≤ 8,0 m/s	allgemeiner Bemessungswert		
Bypassdurchfluss	0,20 2,00 m³/s	abhängig von Rechen- und Bypasseigenschaften		
relat. Bypassdurchfluss (Orientierungswert)	0,02 0,10 · Q _{WKA}	abhängig von Rechen- und Bypasseigenschaften		

Autor

Dr. Guntram Ebel Büro für Gewässerökologie und Fischereibiologie Dr. Ebel Saalwerderstraße 10 D-06118 Halle (Saale) info@bgf-halle.de www.bgf-halle.de

Literatur

- AMARAL, S., S. CAIN, J. BLACK & B. MCMAHON, B. (2001): Evaluation of angled bar racks and louvers for guiding fish at water intakes. Report 1005193, Electric Power Research Institute (EPRI), 97 S. Palo Alto / California (Alden Research Laboratory, Inc.).
- EBEL, G. (2001): Fischereibiologisches Gutachten zum Neubau der Wasserkraftanlage Halle-Planena (Saale) – Teil I: Fischfauna und Fischabstiegsanlage. Gutachten im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens (Auftraggeber Martin und Andreas Kehl), 51 S., Halle (Saale) (Büro für Gewässerökologie und Fischereibiologie).
- EBEL, G. (2013): Fischschutz und Fischabstieg an Wasserkraftanlagen – Handbuch Rechen- und Bypasssysteme. Ingenieurbiologische Grundlagen, Modellierung und Prognose, Bemessung und Gestaltung. Mitteilungen aus dem Büro für Gewässerökologie und Fischereibiologie, Bd. 4., 483 S., Halle (Saale).
- EBEL, G. (2014): Modellierung der Schwimmfähigkeit europäischer Fischarten – Zielgrößen für die hydraulische Bemessung von Fischschutzsystemen. Wasserwirtschaft 7/8: 40 – 47.
- EBEL, G., A. GLUCH & M. KEHL (2015): Einsatz des Leitrechen-Bypass-Systems nach Ebel, Gluch & Kehl an Wasserkraftanlagen – Grundlagen, Erfahrungen und Perspektiven. Wasserwirtschaft 7/8: 44 – 50.
- ENGLER, O. & B. ADAM (2014): HDX-Monitoring Wupper Untersuchung der Wanderung von Fischen (Untersuchungszeitraum vom 31. Oktober 2013 bis 31. Mai 2014). Studie im Auftrag der Bezirksregierung Düsseldorf und des Wupperverbandes, 89 S., Kirtorf-Wahlen (Institut für angewandte Ökologie).
- ENGLER, O., V. STÖHR, C. DEFAWEUX & B. ADAM (2016): HDX-Monitoring Wupper II – Untersuchung der Wanderung von Fischen (Untersuchungszeitraum September 2014 bis Ende 2015). Studie im Auftrag der Bezirksregierung Düsseldorf, 86 S., Kirtorf-Wahlen (Institut für angewandte Ökologie).
- FLÜGEL, D., T. BÖS & A. PETER (2015): Forschungsprojekt: Maßnahmen zur Gewährleistung eines schonenden Fischabstiegs an größeren mitteleuropäischen Flusskraftwerken – Ethohydraulische Untersuchungen zum Fischabstieg entlang eines vertikalen, schräg ausgerichteten Fischleitrechens, 106 S. (Eawag).
- GLUCH, A. (2007): Kombinierter Fisch- und Treibgutableiter für Wasserkraftanlagen. Wasser und Abfall 9: 38 – 43.
- GLUCH, A. (2014): Leitrechen-Bypass-System Ebel, Gluch & Kehl – 10 Jahre Genehmigungs- und Betriebspraxis. DWA-Fachtagung (Energietage Bremen), 10. – 11.09. 2014, Bremen (www.lhw.sachsen-anhalt.de).

- GLUCH, A. (2017): Leitrechen-Bypass-System nach Ebel, Gluch & Kehl (Praxisbeispiele 0,05 – 2 MW). Fachtagung des Forums "Fischschutz und Fischabstieg", 16. – 17.05.2017, Dessau (www.forum-fischschutz.de).
- HEIB, M. (2015): Evaluation of innovative rehabilitation measures targeting downstream migrating Atlantic salmon smolt (*Salmo salar*) at a hydroelectric power plant in southern Sweden. Masterarbeit Ludwig-Maximilians-Universität München, 55 S.
- KRIEWITZ-BYUN, C. R. (2015): Leitrechen an Fischabstiegsanlagen: Hydraulik und fischbiologische Effizienz. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich 230, 350 S.
- LEHMANN, B., B. ADAM, O. ENGLER, V. HECHT & K. SCHNEI-DER (2016): Ethohydraulische Untersuchungen zur Verbesserung des Fischschutzes an Wasserkraftanlagen. Naturschutz und Biologische Vielfalt 151, 156 S.
- Ракновчкоv, A. M. & G. N. KURAGINA (1978): Biological investigation of some fish-protecting devices wich incorporate fish-diverters. In: Biologicheskie osnovy primeneniya rybozashchitnykh i rybopropusknykh sooruzheniy: 98 – 112 (in Russisch).
- PAVLOV, D. S. (1989): Structures assisting the migrations of non-salmonid fish: USSR. FAO Fisheries Technical Paper 308, 97 S.
- PAVLOV, D. S. & A. M. PAKHORUKOV (1973): The biological bases of preventing fish from entering water-intake devices. Pishchevaya Promyshlennost, 208 S., Moskau (in Russisch).
- PAVLOV, D. S. & A, M. PAKHORUKOV (1983).: The biological bases of preventing fish from entering water-intake devices. Legkaya i Pishchevaya Promyshlennost, 264 S., (in Russisch).
- RUSSON, I. J., P. S. KEMP & O. CALLES (2010): Response of downstream migrating adult European eels (*Anguilla anguilla*) to bar racks under experimental conditions. Ecology of Freshwater Fish: 197 – 205.
- STEINMANN, I. & S. STAAS (2001): Untersuchungen zur Quantifizierung der jährlichen Lachs-Smoltproduktion und zur Smoltabwanderung im Jahr 2001 im Siegsystem. Studie im Auftrag der Landesanstalt für Ökologie, Bodenordnung und Forsten Nordrhein-Westfalen (LÖBF), 41 S., Nörvenich (Limnoplan).
- VOLLESTAD, L. A., B. JONSSON, N. A. HVIDSTEN, T. F. NAESJE, O. HARALSTAD & J. RUUD-HANSEN (1986): Environmental factors regulating the seaward migration of European silver eels (*Anguilla anguilla*). Can. J. Fish. Aquat. Sci. 43: 1.909 – 1.916.