Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 107 (2015)

Heft: 1

Artikel: Massnahmen zur Gewährleistung eines schonenden Fischabstiegs an grösseren mitteleuropäischen Flusskraftwerken

Autor: Kriewitz, Carl Robert / Albayrak, Ismail / Flügel, David

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-941833

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 16.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Massnahmen zur Gewährleistung eines schonenden Fischabstiegs an grösseren mitteleuropäischen Flusskraftwerken

Carl Robert Kriewitz, Ismail Albayrak, David Flügel, Tamara Bös, Armin Peter, Robert M. Boes

Zusammenfassung

Querbauwerke wie z.B. Flusskraftwerke können Wanderhindernisse für flussauf- oder -abwärts migrierende Fische darstellen. Aus diesem Grund werden bereits seit Jahrzehnten erfolgreich Anstrengungen unternommen, Wasserkraftwerke für Fische in beide Richtungen passierbar zu machen. Durch den Verband Aare-Rheinwerke (VAR) und die Forschungsinstitute Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich, sowie das Wasserforschungsinstitut des ETH-Bereichs (Eawag) wurde 2011 speziell zur Verbesserung der Abstiegsbedingungen ein transdisziplinäres Forschungsprojekt lanciert, das sich der innovativen Weiterentwicklung von Fischschutzeinrichtungen und deren Adaption an die Betriebsverhältnisse typischer Mittellandflusskraftwerke widmete. Gegenstand der Untersuchung waren mechanische Verhaltensbarrieren, sogenannte Fischleitrechen, mit deren Hilfe stromabwärts migrierende Fische über Bypässe um grosse Niederdruck-Wasserkraftanlagen (WKA) geführt werden sollen. Im Rahmen der mittlerweile abgeschlossenen Arbeit wurden auf Grundlage von physikalischen Modellversuchen ein Bemessungsvorschlag zur Ermittlung der durch Leitrechen verursachten Fallhöhenverluste, ihre Auswirkunken auf den Kraftwerksbetrieb und die Effizienz der Leitwirkung für einheimische Fischarten erarbeitet.

1. Ausgangslage

Rund 56% des Strombedarfs können in der Schweiz durch die erneuerbare und nachhaltige Produktion aus Wasserkraft gedeckt werden. Die grossen Niederdruck-WKA an Aare, Reuss, Limmat und Hochrhein steuern dazu wiederum ca. 25% bei. Sie sind damit ein wichtiges Standbein der Stromversorgung und werden auch in Zukunft ihre zentrale Stellung in der Schweizerischen Elektrizitätswirtschaft beibehalten (*Pfammatter* und *Piot* 2014). Dabei müssen sie sich aber neuen Herausforderungen im Zusammenhang mit der Weiterentwicklung der Gesetzgebung stellen, die mit dem Inkrafttreten des revidierten Gewässerschutzgesetzes im Januar 2011 einen ambitionierten Plan zur Beseitigung der wesentlichen, durch den Menschen verursachten Gewässerbeeinträchtigungen innert 20 Jahren vorgibt.

Ein wichtiger Teilaspekt der Gewässersanierung umfasst die Wiederherstellung der Längsvernetzung von Fischhabitaten. Der für die Arterhaltung einiger mitteleuropäischer Fischarten wichtige Fischabstieg ist beim aktuellen Ausbaustandard der Anlagen beeinträchtigt. Fische passieren bei der Abwärtswanderung, der stärksten Lockströmung folgend, Flusskraftwerke via Turbinen, Grundablass oder Wehrüberfall und sind dabei einer Verletzungs- oder Tötungsgefahr ausgesetzt. Bekannt ist, dass die verschiedenen, heute an der Mehrzahl der Kraftwerksanlagen vorhandenen technischen Fischaufstiegshilfen oder naturnahen Umgehungsgerinnen von Fischen nur in beschränktem Umfang zur Abwärtswanderung genutzt werden (*Agostinho et al.*, 2007; *Pelicice* und *Agostinho,* 2012). Insbesondere zum Schutz grosser Langstreckenwanderer besitzt daher die Implementierung von Fischschutzmassnahmen hohe Priorität.

2. Fischschutzmassnahmen

Die Projektierung von Fischschutzeinrichtungen bewegt sich im Spannungsfeld zwischen den Anforderungen, die einerseits durch die Energiestrategie 2050 und andererseits durch das revidierte Gewässerschutzgesetz (GSchG) gestellt werden. Es stehen sich dabei die intensivierte Nutzung des Wasserkraftpotenzials und die geforderte Reduktion der negativen Auswirkungen der Wasserkraftnutzung gegenüber. Aus diesem Grund sollen Fischschutzeinrichtungen für den Einsatz an grossen Mittellandflusskraftwerken im Hinblick auf die schadlose Abwärtswanderung von Fischen eine Anzahl sehr weitreichender Anforderungen erfüllen:

- Schutz aller einheimischen Fischarten
- Geringe Energieerzeugungsverluste und verhältnismässige Investitionskosten bei hoher Planungssicherheit
- Einsatzsicherheit bei Geschiebe-, Schwemmholz- und Eisaufkommen

In einem breit angelegten Literatur- und Massnahmenstudium erfolgte deshalb in der ersten Projektphase die Evaluation bekannter Fischschutzprinzipien. Diese wurden durch Forschungsreisen in die USA und den fachlichen Austausch, insbesondere mit nordamerikanischen Experten unterstützt. Ziel des Grundlagenstudiums war die Identifikation von Massnahmentypen, deren Einsatz unter den gegebenen Zielvorgaben für grosse Mittellandflusskraftwerke entweder direkt möglich oder deren Weiterentwicklung vielversprechend ist. Die Ergebnisse der Vorstudie wurden im Rahmen von Projektzwischenberichten veröffentlicht und zeigten auf, dass mit den gegenwärtig verfügbaren Schutzkonzepten nicht alle der oben gesetzten Ziele parallel und gleichgewichtet erfüllt werden können. (*Bös et al.*, 2012; *Kriewitz et al.*, 2012).

Tabelle 1 zeigt im Überblick die im Rahmen der Vorstudie beurteilten, wichtigsten Prinzipien des Fischschutzes und nennt zugehörige Beispielmassnahmen. Grundsätzlich lassen sich zwei Ansätze unterscheiden.

2.1 Abschirmen und Umleiten

Für das Abschirmen und Umleiten von Fischen aus den Gefahrenbereichen von hydroelektrischen WKA steht eine Vielzahl von Barrieretypen zur Verfügung. Diese sind entweder physische Barrieren, die das Einschwimmen in Gefahrenbereiche durch die Wahl kleiner Öffnungsweiten ausschliessen, oder mechanische und sensorische Verhaltensbarrieren, die die Abstossungs- und Fluchtreaktion von Fischen ausnutzen, physisch aber durchgängig sind (*EPRI* und *Dominion Millstone Laboratories,* 2001; *Dumont,* 2011; *Ebel,* 2013). Bei jeder Art von Barriere ist die Anordnung alternativer Abwanderungskorridore, wie z.B. Bypässen oder geöffneten Wehrfeldern, zwingend notwendig. Ansonsten wird die Abwanderung verzögert oder unterbrochen, und kann von negativen Effekten wie erhöhtem Prädatorendruck, Nahrungsmangel und negativer Energiebilanz der Fische begleitet sein.

2.2 Durchleiten

Bei der schonenden Durchleitung von Fischen werden verschiedene Ansätze verfolgt. Der Einsatz fischschonender Turbinen als permanenter Migrationskorridor kann soweit zur Erhöhung der Überlebensraten führen, dass für den Populationserhalt unkritische Schädigungsraten erreicht werden (*Hogan et al.*, 2014). Einen ähnlichen Ansatz verfolgt auch das fischschonende Anlagenmanagement. Allfällig durch Frühwarnsysteme unterstützt, wird zeitweise auf den Teillastbetrieb verzichtet und damit die Überlebensrate an konventionellen Turbinen gesteigert. Alternativ werden durch gezielten Wehrbetrieb Konkurrenzströmungen geschaffen, sodass Fische die Wehrüberfälle zur Abwanderung nutzen (*Ebel* 2013). Schliesslich können Bypass-Systeme auch ohne die Anordnung zusätzlicher Barrieren erfolgreich eingesetzt werden. In Bereichen typischer Fischagglomerationen angeordnet, wird die Präferenz verschiedener Fischarten für spezifische Abwanderungshorizonte oder -korridore genutzt und ein alternativer Abwanderungsweg zur Verfügung gestellt (*Arnekleiv et al.*, 2007; *Hassinger* und *Hübner* 2009; *Calles et al.*, 2011).

Während die beschriebenen Fischschutzsysteme sämtlich Ansätze für die Verbesserung der Fischdurchgängigkeit liefern, sind sie teilweise mit erheblichen betrieblichen oder fischbiologischen Nachteilen verbunden. Der Einsatz von physischen Barrieren ist zurzeit aufgrund der ungelösten Reinigungsproblematik in Zeiten hohen Anfalls von Geschwemmsel, Schwemmholz oder Geschiebe an grossen Kraftwerksanlagen nicht umsetzbar. Sensorische Verhaltensbarrieren, fischschonendes Anlagenmanagement und Bypass-Systeme sind stets nur für eine begrenzte Anzahl an Fischspezies geeignet, und fischschonende Turbinen bieten sich aufgrund der hohen Investitionskosten in der Regel nur bei neuen Anlagen oder am Lebensdauerende der Turbinen/Maschinen an. Vielversprechend hingegen ist der Einsatz mechanischer Verhaltensbarrieren, sogenannter vertikaler, schräg angeordneter Leitrechen. Diese nachfolgend als Leitrechen bezeichneten Systeme besitzen ausreichend grosse Stababstände (≥ 5 cm), um für einen Teil des Geschwemmsels und Geschiebes durchlässig zu sein, und erleichtern damit den Unterhalt. Ferner ist ihre Effizienz für die Ableitung einer Vielzahl von Fischspezies bereits in umfangreichen Studien sowohl experimentell als auch an Pilotanlagen nachgewiesen (*Bates* und *Vinsonhaler,* 1957; *Harza Engineering Company* und *RMC Environmental Services Inc.*, 1993; *Kynard* und *Buerkett* 1997; *EPRI* und *Dominion Millstone Laboratories,* 2001; *Amaral* und *Taft,* 2003). Im Rahmen des hier vorgestellten Forschungsprojektes wurden aus diesen Gründen Leitrechen im Hinblick auf ihre fischbiologischen und hydraulischen Eigenschaften mit dem Fokus des Einsatzes an grossen Mittellandflusskraftwerken untersucht und weiterentwickelt.

Fischschutzsysteme	Abschirmen und Umleiten	Physische Barrieren	- Feinrechen - Eicher Rechen - Trommelrechen
		Mechanische Verhaltensbarrieren	- Grobrechen - Louver - Bar Racks
		Sensorische Verhaltensbarrieren	- Luftvorhänge - Niederfrequenter Schall - Elektrische Scheuchsysteme
	Durchleiten	Fischschonende Turbinen	- Alden Turbine - Voith - Minimum Gap Runner - Alstom - Fischschonende Kaplanturbine
		Fischschonendes Anlagenmanagement	- Frühwarnsysteme - Kein Teillastbetrieb - Wehrüberfall
		Bypass-Systeme	- Oberflächennahe Sammelrinnen - Trap and Truck - Modifizierte Wehrfelder

Tabelle 1. Prinzipien des Fischschutzes und ausgesuchte Beispielmassnahmen.

3. Forschungsbedarf und Projektidee

Grundlage der fischbiologischen Wirksamkeit von Leitrechen ist die schräge Orientierung von Rechenachse und Rechenstäben zur Anströmung *(Bild 1)*. Diese Anordnung verursacht zum einen Störungen des Abflusses, die von Fischen gemieden werden sollen, und produziert zum anderen eine rechenparallele Leitströmung, die zur aktiven Verdriftung der Fische in einen Bypass führen kann. Bisher unterscheidet man zwei Leitrechensysteme. *Louver* sind durch die orthogonale Ausrichtung der Rechenstäbe zur Anströmung charakterisiert, während bei *Bar-Racks* der Winkel zwischen Rechenachse und Stab mit 90° vorgegeben ist. Untersuchungen zeigten, dass die Leiteffizienz der Systeme zunimmt, wenn spitze Einbauwinkel verwendet werden (*Amaral,* 2003; *Amaral et al.*, 2003). In diesem Fall aber besitzen beide Leitrechensysteme ähnlich ungünstige hydraulische Eigenschaften, da bei *Bar-Racks* die Schrägstellung der Rechenstäbe mit spitzem Rechenwinkel zunimmt.

Die Forschungsidee des Projektes basiert darauf, durch die unabhängige Variation von Rechen- und Stabausrichtung Leitrechen so weiterzuentwickeln, dass ihr Einsatz an grossen Wasserkraftwerken wegen verbesserter hydraulischer Eigenschaften zu optimalen Ergebnissen führt und dabei zugleich die stromabwärts migrierenden Fische über Bypässe um diese Wasserkraftwerke geführt werden. Solche Systeme werden im Anschluss als modifizierte *Bar-Racks* bezeichnet. Sie besitzen stets eine geringere Ausrichtung der Rechenstäbe zur Hauptströmungsrichtung als die beiden klassischen Varianten.

Abgesehen von den Aspekten der Weiterentwicklung von Leitrechen fehlten auch für die bekannten Konfigurationen wichtige Bemessungsgrundlagen. So waren die verhaltensbiologische Wirkung im Hinblick auf wichtige potamodrome Schweizer Zielfischarten wie Barbe und

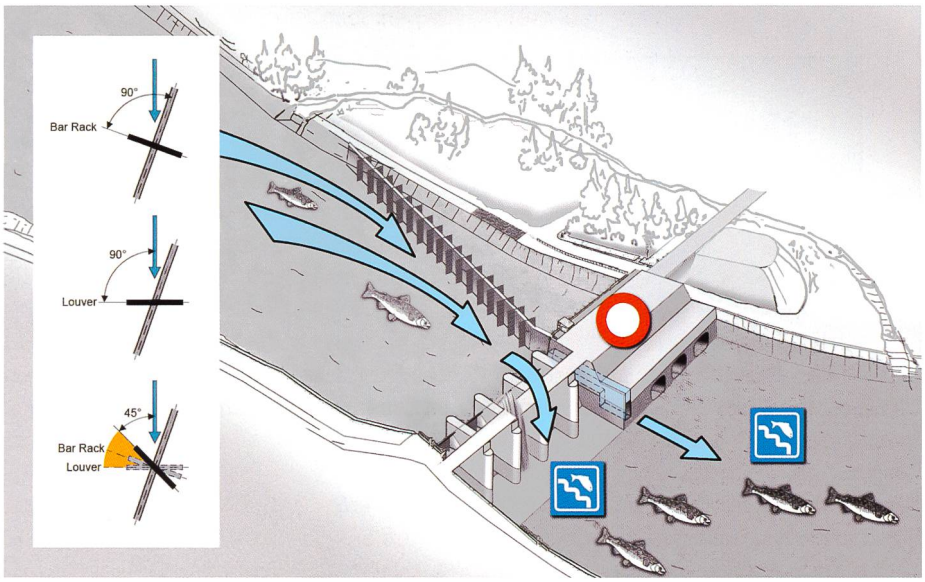

Bild 1. Projektidee mit Einsatz vertikaler Leitrechen und Detailansicht von Louver-, Bar-Rack- und modifizierten Bar-Rack-Systemen.

Detailmodell M 1:1 & 1:2	Ethohydraulisches Modell M 1:1	Kraftwerksmodell M 1:35
Energieverluste für breites Parameterspektrum von Leitrechenkonfigurationen	Leiteffizienzbestimmung für einheimische Arten in Lebendfischversuchen	Einfluss von Leitrechen auf die Kraftwerksanströmung und Energieproduktion
Hochaufgelöste Beschreibung der Strömungscharakteristika	Ethologische Auswertung verschiedener Leitrechenkonfigurationen	Betriebliche Aspekte, z.B. Schwemmholz- und Sedimentverhalten, Hochwassersicherheit

Tabelle 2. Bezeichnung, Funktion und geometrischer Massstab der Versuchsstände.

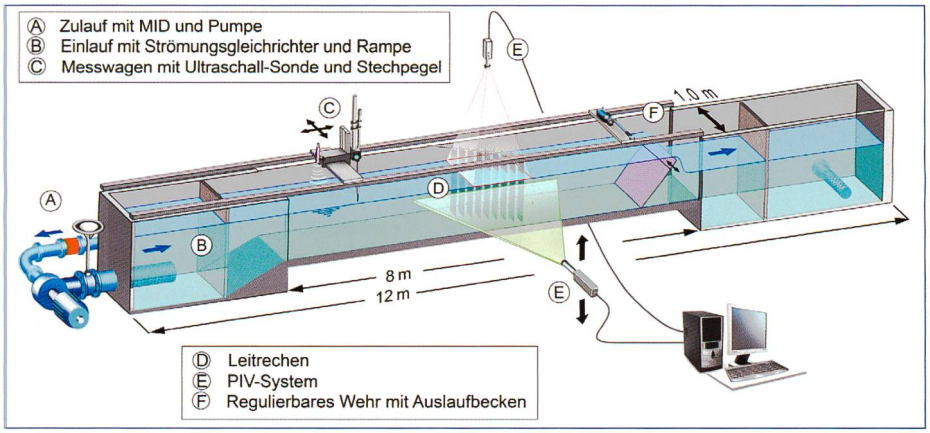

Bild 2. Prinzipskizze des Detailmodells mit Bezeichnung der wichtigsten Modellkomponenten und Messinstrumente.

Äsche, planungsrelevante Berechnungsvorschläge zur Beurteilung der zu erwartenden hydraulischen Verluste und belastbare Informationen zur für den Turbinenwirkungsgrad relevanten Veränderung der Strömungsfelder im Zufluss der Kraftwerkseinläufe nicht erforscht.

Zur Schliessung dieser Wissenslücken wurden im Rahmen physikalischer Modellversuche drei Forschungsschwerpunkte bearbeitet:

- Systematische Analyse der hydraulischen Eigenschaften bekannter und durch unabhängige Variation der Rechen- und Stabwinkel modifizierter Leitrechen
- Feststellung der Verhaltensmuster europäischer Zielfischarten an ausgesuchten bekannten und modifizierten Leitrechen
- Bestimmung der betrieblichen Auswirkungen des Leitrecheneinsatzes für eine typische Kraftwerkssituation der Mittellandflüsse

Das interdisziplinäre Forscherteam aus Ingenieuren und Biologen verfolgte damit das Ziel, Kraftwerksbetreibern und Behörden erste Bemessungsgrundlagen bereitzustellen, welche die Planung fischökologisch wirksamer, betriebssicherer und hydraulisch optimierter Fischschutzeinrichtungen ermöglichen.

4. Modelluntersuchungen

Die Erarbeitung aller Forschungsschwerpunkte erforderte Untersuchungen an mehreren physikalischen Modellen, da jede der Problemstellungen andere Anforderungen an die Modellgeometrie und -skalierung, die einzusetzende Messtechnik und die Wasserversorgung stellte. Aus diesem Grund wurden an der VAW drei Versuchsstände betrieben, über die *Tabelle 2* einen Überblick inklusive der mit ihnen verbunden Zielstellungen gibt.

5. Hydraulik und Energieverluste

5.1 Versuchsaufbau und -bedingungen

Die hydraulischen Modellversuche zur Bestimmung der hydraulischen Energieverluste und der Strömungsfelder im Nahbereich von Leitrechen wurden bei einer geometrischen Skalierung M 1:2 an einem wasserbaulichen Versuchsstand durchgeführt. Er bietet die Möglichkeit, in einem breiten Spektrum von Abflusszuständen eine Vielzahl von Leitrechenkonfigurationen in relativ kurzer Zeit auf ihre hydraulischen Eigenschaften zu untersuchen. Für die Auswertung der Fallhöhenverluste erfolgte die Vermessung der Wasserspiegellagen durch Ultraschallsonden, während die Geschwindigkeitsfelder im Nahbereich der Leitrechen mittels optischer und berührungsfreier *Particle Image Velocimetry-Messungen (PIV)* bestimmt wurden *(Bild 2)*.

In *Bild 3* sind die hydraulischen und geometrischen Parameter dargestellt, die massgebend zur Verlustentstehung an Leitrechen beitragen. Diese sind im Hinblick auf die Rechengeometrie der Rechenwinkel a, der Stabwinkel β zur Hauptströmungsrichtung, der lichte bzw. axiale Stababstand b resp. B, die Stabdicke s, die Stabtiefe l, die Stabeintauchtiefe h_s und der Rechenstabformfaktor K. Die hydraulischen Bedingungen werden beschrieben mit den Fliessgeschwindigkeiten ober- und unterstrom des Leitrechens U_o resp. U_u sowie den entsprechenden Abflusstiefen h_o und h_u und der Abflussbreite W.

5.2 Strömungsfelder an Leitrechen

Für die Bildung des Prozessverständnisses, sowohl im Hinblick auf die Entstehung hydraulischer Verluste als auch die fischbiologische Wirksamkeit, ist die experi-

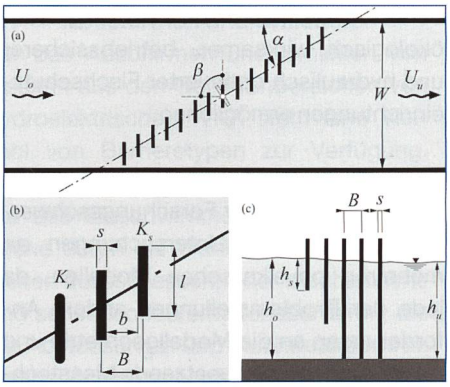

Bild 3. Geometrische und hydraulische Parameter der Leitrechenversuche.

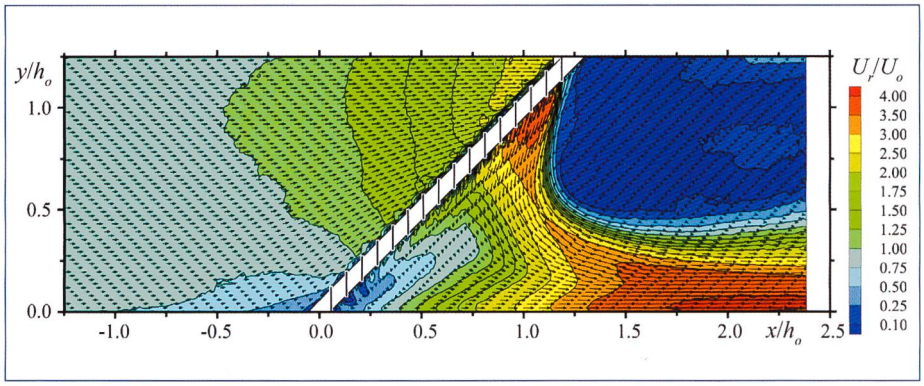

Bild 4. Mittlere, relative Fliesseschwindigkeiten Ober- und Unterstrom eines Louvers mit a = 45°, ß = 90° und B = 6 cm.

mentelle Analyse der Strömungsfelder im Nahbereich von Leitrechen ein sehr hilfreiches Werkzeug. Vor diesem Hintergrund wurden horizontale 2D-Strömungsfelder Ober- und Unterstrom verschiedener Leitrechenkonfigurationen räumlich und zeitlich hoch aufgelöst durch die Anwendung des PIV-Messverfahrens bestimmt. *Bild 4* zeigt am Beispiel eines klassischen *Louvers* die zeitlich über den Versuchszeitraum gemittelte, resultierende Fliessgeschwindigkeit U_r relativ zur tiefengemittelten Zulaufgeschwindigkeit U_o in der Situation. Die Konturdarstellung von U_r ist zudem mit dem Vektorfeld überlagert.

Im Oberwasser werden zwei wesentliche Aspekte ersichtlich. Erstens ist dies die inhomogene Verteilung der Fliessgeschwindigkeiten im Abflussquerschnitt. Während die Strömung am Rechenkopf verzögert wird, erfolgt eine gegengelagerte, stetige Beschleunigung des Abflusses in den Rechenkeil. Dieser Effekt ist zum Zweiten begleitet durch eine über den Grossteil der Rechenlänge bestehende, rechenparallele Umlenkung der Strömung. Beide Aspekte können grundsätzlich im Hinblick auf die fischleitende Wirkung als positiv eingestuft werden, da sie dem Grundverhalten von Fischen, der Hauptströmung zu folgen, zuträglich sind.

Die Verhältnisse im Unterwasser sind aus fischbiologischer Sicht weniger entscheidend. Sie zeigen aber deutlich auf, weshalb klassische *Louver* hohe hydraulische Verluste verursachen. Während bereits im Zuge der Abflusseinschnürung im Oberwasser gewisse Energieumwandlungs- und Dissipationsprozesse stattfinden, ist der Massen- und Impulsaustausch im Unterwasser stark erhöht. Prominent ausgebildet treten hier unmittelbar benachbart Zonen hoher und niedriger Fliessgeschwindigkeiten auf, zwischen denen starke Geschwindigkeitsgradienten existieren und es zur Ausbildung ausgeprägter Scherschichten kommt. Auffällig ist insbesondere der den Rechenfuss orthogonal zur Hauptströmungsrichtung verlassende Abflussstrahl, der erst an der orografisch rechten Kanalwand wieder in die ursprüngliche Orientierung umgelenkt wird. Ihm entgegengestellt ist auf der orografisch linken Kanalseite eine ausgeprägte Rückströmungszone zu erkennen. In diesem Bereich kommt es nicht nur zu Rückströmungen, sondern aufgrund der insgesamt sehr geringen Fliessgeschwindigkeiten trägt dieser Abflussbereich auch nur marginal zum Volumentransport bei. Dies bedeutet, dass der effektive Abflussquerschnitt im Unterwasser auf ca. 30–40% eingeengt sein kann. Ursache dieser als hydraulisch sehr ungünstig zu beurteilenden Situation ist die durch den Leitrechen verursachte, vollständige Umleitung der Strömung; ein Effekt, der an Einlaufrechen mit b/l < 1 bereits durch *Spangler* (1928) beobachtet wurde.

5.3 Berechnungsvorschlag zur Bestimmung der Energieverluste

In 316 Versuchsreihen wurden die Energieverluste für eine Vielzahl von Leitrechenkonfigurationen bestimmt und durch anschliessende Regressionsanalyse eine Gesamt-Energieverlustformel entwickelt. Darin wird der durch den Rechen verursachte, lokale Fallhöhenverlust durch den dimensionslosen Energieverlustbeiwert $\xi_R = \Delta h_R / (U^2_o / 2g)$ mit Δh_R = lokale Verlusthöhe am Rechen und $U^2_o / 2g$ = lokale Geschwindigkeitshöhe im Zulauf als Funktion der geometrischen Rechenparameter dargestellt:

$$\xi_R = \xi_B \cdot C_L \cdot C_K \cdot C_S \qquad (1)$$

Die Faktoren zur Berechnung des Energieverlustbeiwerts ξ_R sind folgendermassen definiert:

- **Basisverlustbeiwert** ξ_B in Abhängigkeit des Rechenwinkels α, des Stabwinkels β und des relativen Stababstandes $\sigma = s/B$

$$\xi_B = 245\left[0.0275 + (\sigma - 0.0815)\left(\frac{\alpha}{90°}\right)\right]\left(\frac{\beta}{90°}\right)^{5\sigma^{0.44}} \qquad (2)$$

- Stabtiefen-Verlustfaktor C_L in Abhängigkeit des Rechenwinkels α, des relativen Stababstandes $\sigma = s/B$ und der relativen Stabtiefe $\varepsilon = l/L$ mit L = 0.1 m

$$C_L = \varepsilon\left[1 + 9.4\sigma(1-\varepsilon) - 3.8(1-\varepsilon)\left(\frac{\alpha}{90°}\right)\right] \qquad (3)$$

- **Eintauchtiefen-Verlustfaktor** C_κ in Abhängigkeit des relativen Stababstandes $\sigma = s/B$ und der relativen Eintauchtiefe $\kappa = h_s/h_o$

$$C_\kappa = \kappa^{6.6\sqrt{\sigma}} \qquad (4)$$

- Stabform-Verlustfaktor C_S in Abhängigkeit des relativen Stababstandes $\sigma = s/B$ und des Rechenwinkels a, wenn Rechenstäbe mit halbkreisförmig abgerundeten Stabenden verwendet werden (sonst gilt C_S = 1)

$$C_S = 0.75 + \left(\frac{62° - \alpha}{90°}\right)4.5\sigma \qquad (5)$$

Mit diesem neuen Berechnungsvorschlag ist es nun möglich, die Fallhöhenverluste an Fischleitrechen bereits in der Planungsphase abzuschätzen und gegebenenfalls durch eine Anpassung der Rechenparameter zu optimieren. Auf die für den projektierenden Ingenieur wichtigen Randbedingungen wird im vorliegenden Artikel nicht näher eingegangen. Es sei darauf verwiesen, dass die das Thema ausführlich behandelnde VAW-Mitteilung 230 auf der Homepage http://www.vaw.ethz.ch zum Download angeboten wird (*Kriewitz*, 2015).

5.4 Planungsrelevante Aspekte

Fallhöhenverluste an Leitrechen variieren abhängig von der gewählten Konfiguration stark und können die Verluste her-

kömmlicher Einlaufrechen deutlich übersteigen. Zur Einordnung der Bandbreite sind in *Bild 5* die Energieverlustbeiwerte aller Testkonfigurationen dargestellt und einige wichtige Beispiele hervorgehoben. Ferner vermittelt die Abbildung einen optischen Eindruck von der Genauigkeit des neuen Berechnungsvorschlages. Es sind die berechneten Energieverlustbeiwerte $\xi_{R,K}$ auf der Abszisse und die gemessenen Energieverlustbeiwerte $\xi_{R,M}$ auf der Ordinate vergleichend dargestellt. Je näher die Datenpunkte an der Diagrammdiagonalen liegen, umso genauer werden die Messergebnisse durch den Berechnungsvorschlag widergespiegelt. Im Mittel beträgt die Standardabweichung ca. 15% und kann damit als gering eingestuft werden.

Auffällig ist im Hinblick auf die Energieverluste die starke Diskrepanz zwischen Gruppe (a), die klassische *Louver* enthält, und Gruppe (b), welche die Ergebnisse für modifizierte *Bar-Racks* anzeigt. *Louver* besitzen danach bis zu 7-fach erhöhte Verlustbeiwerte und verdeutlichen den dominanten Einfluss der Rechenstabausrichtung β. Allgemein führt eine Verringerung von β immer zur Verringerung der Verlustbeiwerte.

Weiter wird anhand der Gruppe (a) der Einfluss der Rechenausrichtung α ersichtlich. Mit spitzer gewähltem Rechenwinkel kommt es bei den meisten Konfigurationen zur Abnahme der Verluste, da die Rechenfläche zunimmt und damit die mittlere Fliessgeschwindigkeit am Rechen verringert wird.

Im Hinblick auf den axialen Stababstand *B* gilt der bereits aus anderen Berechnungsvorschlägen bekannte Zusammenhang. Eine Erhöhung von *B* führt grundsätzlich zur Abnahme der Verluste. Interessant ist jedoch die Analyse der durch Gruppe (c) angezeigten Ergebnisse. Diese Gruppe enthält modifizierte Bar-Racks mit doppeltem und vierfachem Stababstand *B* für einen spitzen Rechenwinkel von $a = 15°$. Es wird deutlich, dass an Leitrechen mit kleinem α, die vorteilhafte fischbiologische Eigenschaften aufweisen, eine Erhöhung des Stababstandes aus hydraulischer Sicht nicht zielführend ist, da sie nur geringe Auswirkungen auf die Rechenverluste hat.

Eine weitere wichtige Referenz wird durch die an Standardeinlaufrechen hervorgerufenen Energieverluste gegeben. *Meussurger* (2002) fasste in seiner Arbeit die Ergebnisse von Naturmessungen an Schweizer Flusskraftwerken zusammen und stellte fest, dass auch diese eine erhebliche Bandbreite besitzen. Der von ihm ermittelte Bereich ist in *Bild 5* blau markiert und umfasst Verlustbeiwerte zwischen $0.1 \leq \xi_R \leq 5.2$, wobei die überwiegende Anzahl der Kraftwerksrechen Verlustbeiwerte $\xi_R < 3.0$ besitzen. Aus dem direkten Vergleich der Modellergebnisse mit den Naturmessungen lässt sich ableiten, dass modifizierte Bar-Racks und Einlaufrechen dimensionslose Verlustbeiwerte der gleichen Grössenordnung aufweisen. Dieser Vergleich bezieht zum jetzigen Zeitpunkt allerdings nicht den Einfluss von Abstandhaltern, Aussteifungsdiagonalen und Rechenträgern ein, die im Modellversuch nicht verbaut waren und an einer Leitrechenprototypanlage zu höheren Verlusten führen würden. Demgegenüber bleibt bei einer direkten Gegenüberstellung der Verlustbeiwerte unberücksichtigt, dass die mittleren Fliessgeschwindigkeiten U_r an Leitrechen deutlich diejenigen an Einlaufrechen unterschreiten. In der Folge treten an Leitrechen geringere resultierende Fallhöhenverluste Δh_R auf.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass klassische *Louver* für einen Einsatz in direkter Nähe von Laufkraftwerken ungeeignet sind, da sie unvertretbare Produktionseinbussen verursachen würden. Vielversprechender sind aus hydraulischer Sicht modifizierte *Bar-Racks*, die im Hinblick auf die hydraulischen Verluste vergleichbare Eigenschaften wie aktuelle Einlaufrechen aufweisen.

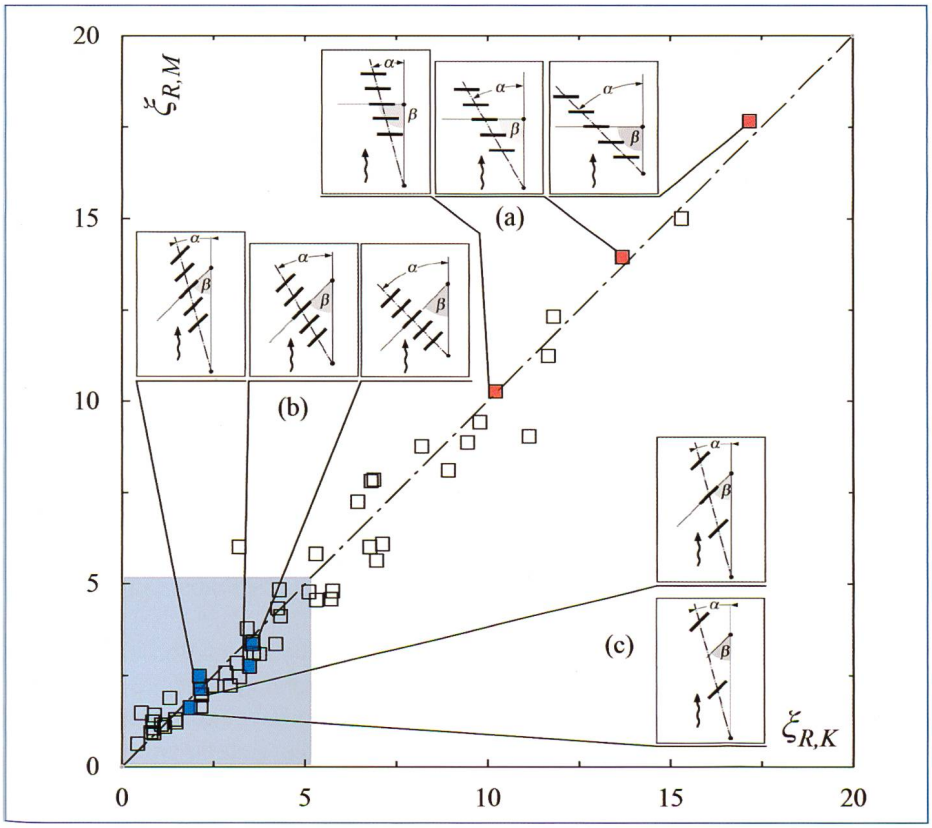

Bild 5. Ergebnisübersicht mit Auswahl wichtiger Leitrechenkonfigurationen: (a) Louver mit a = 15°, 30°, 45° bei B = 6 cm (σ = 0.17); (b) modifizierte Bar-Racks analog zu (a); (c) modifizierte Bar-Racks mit a = 15° und B = 12 cm und 24 cm (σ = 0.08 resp. 0.04); die blaue Zone repräsentiert Verlustbeiwerte von Einlaufrechen Schweizer Kraftwerke nach Meusburger (2002).

6. Fischleitende Wirkung

6.1 Versuchsaufbau und -bedingungen

Ein Highlight der Forschungsarbeit stellten die Untersuchungen mit Lebendfischen am ethohydraulischen Modell dar. Die Ethohydraulik ist ein junges Fachgebiet, das sich der Untersuchung der aquatischen Fauna im Wechselspiel mit wasserbaulichen Anlagen unter Laborbedingungen widmet. Dabei werden parallel Aspekte der Ethologie (Verhaltensforschung) und der Hydraulik (Strömungslehre) analysiert (*Adam* und *Lehmann,* 2011). Ziel ethohydraulischer Forschung ist die Untersuchung der Reaktionen z.B. von Fischen auf wasserbauliche Anlagen und die durch sie erzeugten hydraulischen Situationen unter definierten Laborbedingungen.

Da der ethohydraulische Versuchsstand für die Durchführung von Fischversuchen im geometrischen Massstab 1:1 konzipiert wurde, ergaben sich in Bezug auf die Modellabmessungen und auch die Modellwasserversorgung beachtliche Spezifikationen. Das Modell verfügt über

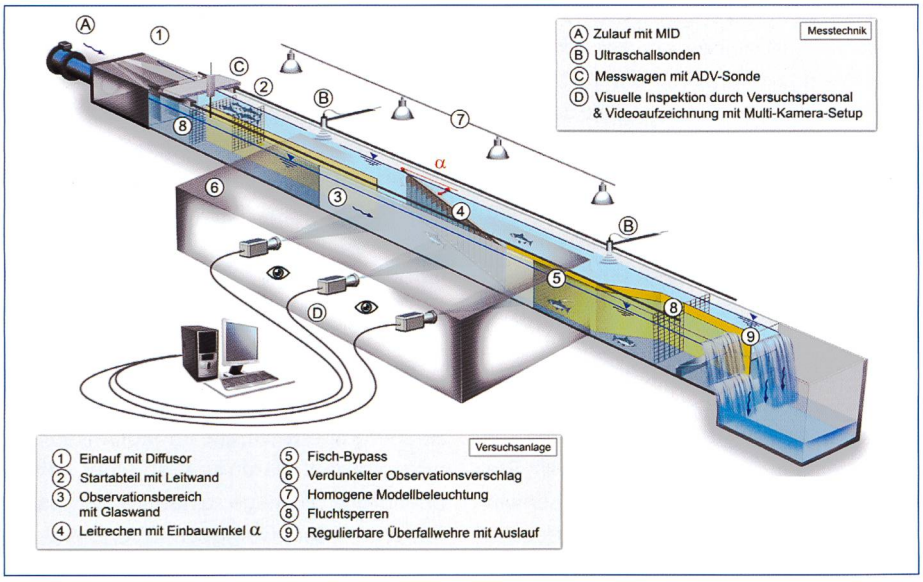

Bild 6. Prinzipskizze des ethohydraulischen Modells mit Bezeichnung der wichtigsten Modellkomponenten und Messinstrumente.

eine Gesamtlänge von 30 m, ist 1.8 m breit und 1.4 m hoch. Bei einem stufenlos bis 1.2 m^3/s regulierbaren Abfluss können mittlere Fliessgeschwindigkeiten bis 0.9 m/s erreicht werden. *Bild 6* veranschaulicht in einer Prinzipskizze den Aufbau des Modelles mit den wichtigsten Konstruktionselementen und der messtechnischen Instrumentierung.

Bei den getesteten Fischen handelte es sich ausschliesslich um wild lebende Exemplare. Diese wurden mittels Elektrobefischung in regelmässigen Befischungskampagnen den Flüssen Sure, Birs und Thur und dem Mülitalbach entnommen und nach erfolgter Beprobung in das Entnahmegewässer zurückgebracht.

Als Fischarten mit zentraler Bedeutung für die vorliegende Untersuchung wurden zum Projektbeginn Barbe *(Barbus barbus)*, Äsche *(Thymallus thymallus)* und Schneider *(Alburnoides bipunctatus)* definiert. Barben und Äschen kennzeichnen durch ihr Auftreten typische Gewässerregionen der Schweizer Mittellandflüsse. Sie gelten als Zielfischarten, an deren Auftretensvielfalt der Gewässerzustand beurteilt werden kann. Bei beiden Fischarten handelt es sich um rheophile, also strömungsliebende Fische. Während die Barbe als vorwiegend sohlennah orientiert eingestuft wird, ist die Präferenz von Äschen in Bezug auf den Gewässerhorizont weitgehend unerforscht. Barben gelten in der Schweiz als potenziell gefährdet, Äschen dagegen sind bereits als gefährdete Fischart eingestuft. Die dritte Fischart, der Schneider, wurde gewählt, um eine ebenfalls rheophile Kleinfischart in die Untersuchung aufzunehmen. Ihr Verhalten interessierte insbesondere vor dem Hintergrund der im Verhältnis zu ihrer Körpergrösse weiten Stababstände. Auch der Schneider besitzt in der Schweiz den Status des gefährdeten Fisches.

Die positiven Ergebnisse der Versuche mit den oben genannten Zielfischarten führten im Projektverlauf zu einer Erweiterung des getesteten Artenspektrums. Um auch das Potenzial von Leitrechen für den Einsatz an Hochrheinkraftwerken abschätzen zu können, wurden zusätzliche Versuche mit Aalen durchgeführt, da diese auf deutscher Seite hohe Priorität besitzen. Ferner sorgt der stetige Rückgang der Jahresfangzahlen bei Bachforellen in der Schweiz seit einiger Zeit schon für Diskussionen. In der Konsequenz wurden beide Arten für zusätzliche Untersuchungen ausgewählt. Die Bachforelle *(Salmo trutta fario)* gliedert sich dabei in die Reihe der rheophilen Fischarten ein. Sie gilt als potenziell gefährdet. Der Aal *(Anguilla anguilla)* ist demgegenüber strömungsindifferent (eurytop), und sein Bestand wird als gefährdet eingestuft.

Die Durchführung ethohydraulischer Versuche ist mit erheblichem Zeitaufwand verbunden. Aus diesem Grund war es notwendig, das Parameterspektrum durch eine Vorauswahl auf den für die praktische Anwendung relevanten Bereich zu beschränken. Ferner wurde das Testprogramm im Projektverlauf parallel dem Erkenntniszuwachs angepasst. Die folgenden geometrischen Grundkonfigurationen sind das Resultat dieses kontinuierlichen Prozesses (vgl. *Bild 3*).

- *Louver* ($\beta = 90°$)
  Louver sind für den Einsatz in direkter Kraftwerksnähe nicht prädestiniert, da sie wie oben beschrieben erhebliche hydraulische Verluste verursachen. Allerdings ist ihre fischleitende Wirkung und Effizienz sowohl im Labor als auch im Prototyp grundlegend erforscht und nachgewiesen (*EPRI* und *Dominion Millstone Laboratories*, 2001; *Amaral et al.*, 2003; *EPRI*, 2006). Für die Zielfischarten dieser Untersuchung existieren hingegen, abgesehen vom Aal (*Adam et al.* 1999), noch keine Erkenntnisse. Aus diesem Grund wurden trotz ihrer offensichtlichen hydraulischen Nachteile *Louver* mit axialen Stababständen von $B = 6$ cm und 2 cm und einem Rechenwinkel von $\alpha = 15°$ in das Testprogramm aufgenommen.
- Modifizierte *Bar-Racks* ($\beta = 45°$)
  Bar-Racks, insbesondere die modifizierten Varianten dieser Untersuchung, besitzen aufgrund kleinerer Stabwinkel hydraulisch günstigere Eigenschaften. Sie sind deshalb von besonderem Interesse, da sie sowohl ökonomische Interessen als auch die des Fischschutzes bedienen. Modifizierte *Bar-Racks* wurden deshalb in einem weiteren Parameterspektrum getestet, das die Rechenwinkel $\alpha = 15°$ und 30° und die axialen Stabweiten $B = 6$ cm und 12 cm beinhaltete.
- Kontroll-Konfiguration ($\beta = 0°$)
  Bei der Kontroll-Konfiguration handelt es sich um einen schräg angeordneten Rechen, dessen Rechenstäbe parallel zur Anströmung ausgerichtet sind, also einen Rechenstabwinkel von $\beta = 0°$ besitzen. Dieser Rechen verursacht dementsprechend eine deutlich geringere Störung des Abflusses (*Raynal et al.*, 2014). Ziel dieser Anordnung ist es, zu überprüfen, inwieweit die von Leitrechen verursachten Strömungsbeeinflussungen zur Leitung von Fischen führen, oder ob auch weniger stark ausgeprägte hydraulische Signaturen eine befriedigende Wirkung zeigen. Die getestete Kontrollkonfiguration besass den Rechenwinkel $a = 30°$ und einen axiale Stababstand $B = 6$ cm *(Bild 7a)*.
- Konfigurationen mit Sohlleitwand
  Die Anordnung einer Sohlleitwand verbessert für eine breite Anzahl an Spezies die Leiteffizienz von Leitrechen (*Ebel*, 2013). Insbesondere bodennah orientiert abschwimmende Fische profitieren danach von einer solchen Modifikation. Aus diesem Grund wurden zusätzlich modifizierte *Bar-Racks* mit $\alpha = 30°$ und $B = 6$ cm nach Installation einer Sohlleitwand

Bild 7. Leitrechen im ethohydraulischen Modell: (a) Kontrollkonfiguration und (b) modifiziertes Bar-Rack mit Sohlleitwand.

getestet. Die Sohlleitwand besass eine Höhe von 0.1 m (1/9 der Abflusstiefe) und wurde direkt vor den Rechenstäben auf der Gerinnesohle positioniert *(Bild 7b)*.

Die Versuche fanden stets unter stationären Abflussbedingungen bei mittleren Fliessgeschwindigkeiten zwischen 0.3 m/s bis 0.8 m/s statt. Mit Versuchsbeginn erhielten die Tiere in einem Startabteil *(Bild 6, Position 1–2)* eine 10-minütige Eingewöhnungszeit und wurden danach freigelassen. Entlang der Fliessstrecke bis kurz Oberstrom des Leitrechens erfolgte die Führung der Fische entlang einer Leitwand bis zum Rechenkopf (4). So wurde sichergestellt, dass der Grossteil der getesteten Individuen die gesamte Rechenfläche passierte und nicht bereits im Modelloberwasser eine Ausrichtung in Flucht des Bypass-Einlaufes stattfand. Der Bypass-Einlauf (5) schloss sich direkt an das Rechenende an, besass eine Breite von 0.2 m und war über die gesamte Abflusstiefe geöffnet. Über einen Versuchszeitraum von 30 min wurde das Fischverhalten durch Fischbiologen der Eawag beobachtet und zeitgleich mittels Videoaufnahmen dokumentiert.

Grundsätzlich ergaben sich nach Ablauf der Versuchsdauer drei mögliche Ergebnisszenarien:

i. Erfolgreiches Auffinden des Bypasses
ii. Passage des Rechens in das Unterwasser
iii. Verbleiben im Oberwasser

Während die Abstiegsszenarien (i) und (ii) eindeutig definiert sind, ist im Fall (iii) eine differenzierte Betrachtung notwendig. Versuche, in denen Fische die Kooperation vollständig verweigerten, also das Startabteil und den Leitkanal nicht verliessen, wurden verworfen und mit anderen Individuen oder zu einem anderen Zeitpunkt wiederholt. Als Verweigerung hingegen wurde interpretiert, wenn Fische grundsätzlich Abwanderungsbereitschaft zeigten, aber auch nach mehrmaliger Annäherung an Rechen und Bypass ungewillt blieben, einen der Abstiegswege einzuschlagen. Dieses Verhalten ist insofern entscheidend, da es belegt, dass auch bei funktionierender Leitung durch den Rechen die Strömungsverhältnisse im Bypass eine abschreckende Wirkung aufweisen können.

6.2 Verhaltensbeobachtungen

Die untersuchten Fischarten lassen sich nach ihrer grundlegenden Verhaltensweise in zwei Gruppen gliedern. Barbe, Aal und Bachforelle zeigten ein ausgeprägt strukturliebendes Verhalten *(Bild 8)*, während Schneider und Äsche gegenüber allen Modellstrukturen ein ablehnendes Verhalten aufwiesen *(Bild 9)*.

Entsprechend unterschiedlich verhielten sich beide Gruppen während der Annäherung an und der Abwanderung entlang der Leitrechen. Individuen der strukturliebenden Gruppe suchten erst die Nähe entweder zur Modellsohle oder den seitlichen Modellbegrenzungen und verblieben nach Erreichen des Rechens quasi in permanentem Kontakt mit diesem. Insbesondere Barben zeigten dabei eine ausgeprägt investigative Natur. Dahingegend vermieden Individuen der strukturmeidenden Gruppe jederzeit den Kontakt zu den Modellstrukturen und dem Rechen. Sowohl Schneider als auch Äschen hielten zudem Abstand zu Modellstrukturen, um ihren Aktionsradius nicht einzuschränken.

6.3 Fischleiteffizienz

Im Rahmen dieses Artikels können nicht alle Versuchsergebnisse zur Fischleiteffizienz (FLE) im Einzelnen vorgestellt werden. Eine detaillierte Darstellung ist in *Flügel et al.* (2015) dokumentiert. Allerdings lassen sich anhand der Analyse für Barben und Schneider allgemein gültige Trends aufzeichnen. Grundlage dafür stellen die in *Bild 10* dargestellten Fischleiteffizienzen für unterschiedliche Leitrechenkonfigurationen dar.

Als Schlüsselstelle im Hinblick auf das erfolgreiche Auffinden des Bypasses wurden die Bereiche von Rechenfuss und Bypass-Einlauf identifiziert. Selbst nach erfolgreicher Leitung der Versuchstiere entlang der Rechen kam es hier häufig zur Abstiegsverzögerung oder sogar Flucht in das Oberwasser. Dieses Verhalten wurde entweder auf eine abschreckende Wirkung der starken Transversalströmungen zum Rechen hin oder die mangelnde Attraktivität der verlangsamten Bypass-Strömung zurückgeführt.

Trotz der stark differenzierten Verhaltensmuster konnten für die meisten getesteten Fischarten Rechenkonfigurationen identifiziert werden, die eine hohe bis sehr hohe FLE hervorriefen. Es sind diese modifizierten *Bar-Racks* mit Rechenwinkeln von α = 15° und 30° sowie Stabwinkeln von β = 45° und einem axialen Stababstand von B = 6 cm. Sie erreichten die höchsten FLE für alle getesteten Arten. Zwischen 72% und 100% der getesteten Fische konnten, mit Ausnahme der Äschen, bei dieser Konfiguration in den Bypass gelenkt werden. Die Anordnung der Sohlleitwand führte zu einer weiteren

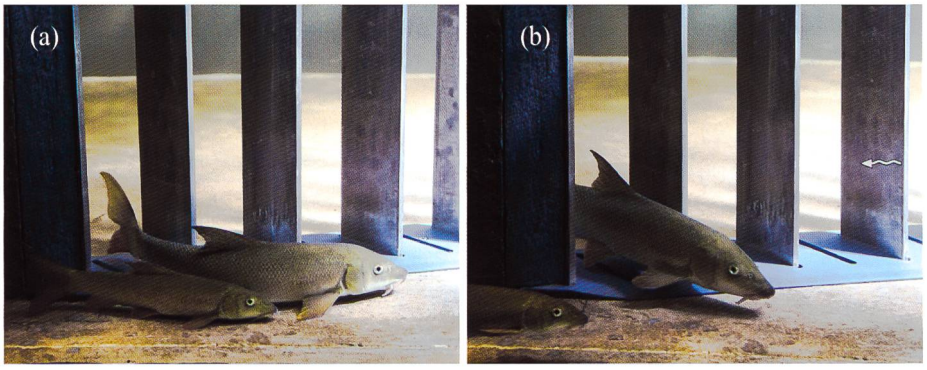

Bild 8. Barben im Versuch mit modifiziertem Bar-Rack (a = 15° und B = 12 cm) und permanentem Kontakt zum Leitrechen bei U_o = 0.6 m/s (Foto: D. Flügel).

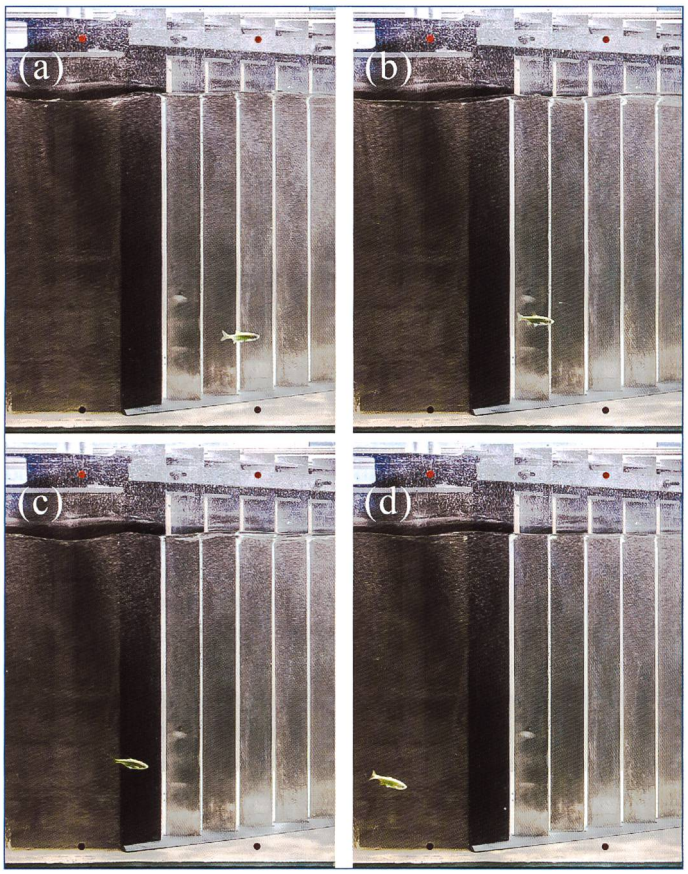

Bild 9. Schneider im Versuch mit Kontrollkonfiguration (a = 30°, ß = 30° und B = 6 cm) in zeitlicher Abfolge zwischen Bypass-Annäherung und Bypass-Eintritt (a) bis (d) bei U_o = 0.6 m/s.

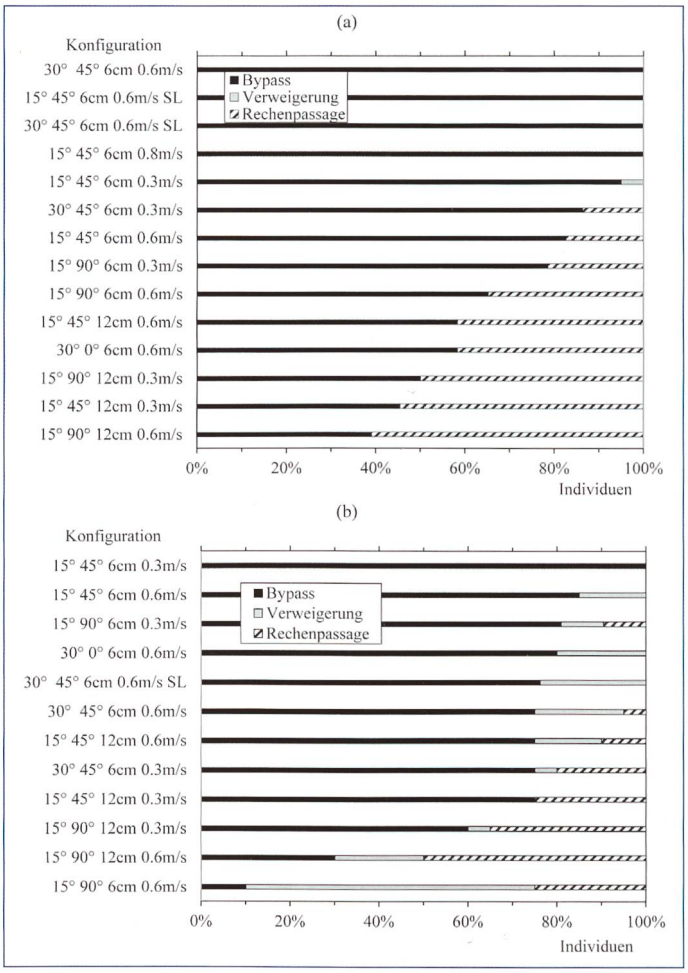

Bild 10. Ergebnisübersicht zur Leiteffizienz der Versuchsreihen mit (a) Barben und (b) Schneidern; Angaben in Legende: a [°], ß [°], B [cm], U_o [m/s], SL = Sohlleitwand.

Steigerung der FLE auf Werte zwischen 76% und 100% für alle getesteten Arten.

Hervorzuheben sind ferner die Resultate der Versuche mit der Kontrollkonfiguration ohne Neigung der Rechenstäbe (α = 30°, β = 0°, B = 6 cm), die allein mit Barben und Schneidern durchgeführt wurden. Das grundsätzlich unterschiedliche Verhaltensmuster beider Arten führte zu ebenso divergenten Versuchsresultaten. Alle Barben, die sich entlang des Rechens dem Bypass näherten, durchschwammen den Kontrollrechen ohne massgebende Leitwirkung. Schneider hingegen zeigten das gleiche Verhaltensmuster vor Kontroll- und Leitrechen. Die FLE blieb bei ihnen unverändert.

Die Videodokumentation «Downstream» zu den Versuchen am ethohydraulischen Modell ist unter der Web-Adresse www.youtube.com/watch?v=Y8WSRQWA8DY verfügbar.

7. Kraftwerksbetrieb

7.1 Versuchsaufbau und -bedingungen

Der Einsatz von Leitrechensystemen an mitteleuropäischen Flusskraftwerken setzt voraus, dass diese Systeme in die bestehende Anlagenlandschaft integriert werden können. Das heisst, es müssen neben der fischbiologischen Wirksamkeit vor allem auch die Betriebssicherheit, z.B. im Hochwasserfall, und die möglichst geringe Beeinflussung der Energieproduktion nachgewiesen werden. Wie die teils Jahrzehnte andauernden Optimierungsarbeiten an den Pionier-Fischschutzanlagen nordamerikanischer Flüsse aufzeigen, ist die Einhaltung der oben genannten Voraussetzungen bereits für ein einzelnes Kraftwerk schwierig. Ungleich ambitionierter und innerhalb des Projektes nicht umsetzbar war die Aufgabe, solche Nachweise spezifisch für ein breites Spektrum von Kraftwerkstypen zu führen. Grund dafür ist ihre Diversität, sowohl im Hinblick auf die bauliche Ausbildung und die hydromorphologischen Verhältnisse als auch auf die fischbiologischen Schutzziele.

Vor diesem Hintergrund wurden die wichtigsten Kenndaten von 28 VAR-Mitgliedskraftwerken erfasst. Im Rahmen dieser Erhebung erfolgte die Kategorisierung der hydrologischen, hydraulischen und baulichen Spezifikationen und in der Folge die Identifizierung des für die meisten Anlagen stellvertretenden, typischen Kraftwerktyps. Eine für die Mittellandflüsse repräsentative Anlage besteht demnach aus einem in Blockbauweise ausgeführten Kraftwerk, dessen Krafthaus in Verlängerung des Wehres orientiert ist, über Turbinen des Kaplan-Typs verfügt und Fallhöhen ≤ 10 m aufweist. Eine solche Anlage wurde in einem Gesamtmodell im Massstab M 1:35 an der VAW nachgebildet. Der Modellaufbau ist in *Bild 11* dargestellt.

Die Versuche beinhalteten vier Leitrechen mit den Rechenwinkeln α = 15° und 30° und den Stabwinkeln β = 45° (modifizierte *Bar-Racks*) und 90° (*Louver*) bei einem einheitlichen axialen Stababstand von B = 6 cm.

Ziel der Untersuchung war die vergleichende Analyse des Einflusses von klassischen und modifizierten Fischleitrechen auf den Kraftwerksbetrieb mit folgenden Schwerpunkten:

- Bestimmung der grossräumigen Kraftwerks- und Leitrechenanströmung und der Strömungsverhältnisse am Turbineneinlauf
- Beschreibung des Verhaltens bei Schwemmholzaufkommen

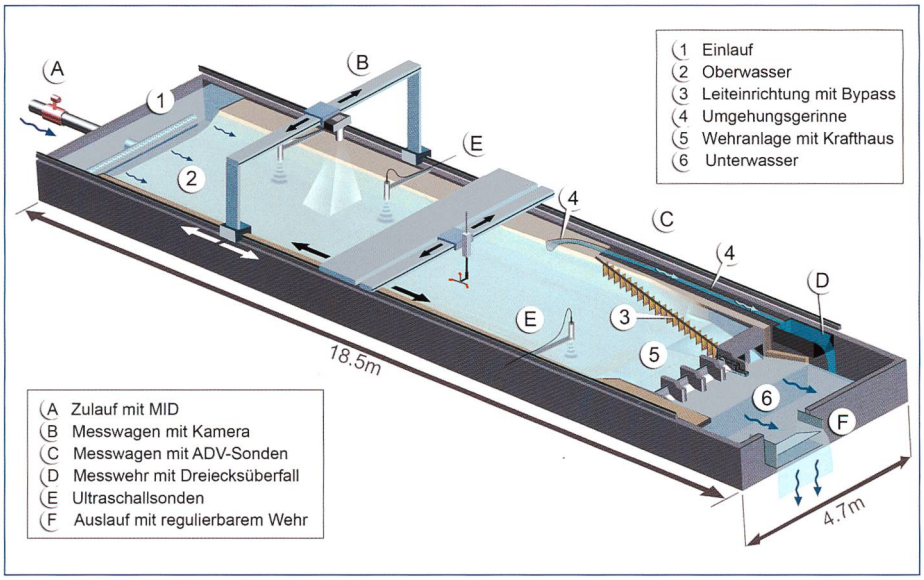

Bild 11. Prinzipskizze des Kraftwerksmodells mit Bezeichnung der wichtigsten Modellkomponenten und Messinstrumente.

- Identifizierung hydraulischer und fischbiologischer Schlüsselstellen

Die Testrechen wurden dazu direkt vor den Turbineneinläufen angeordnet und der Trennpfeiler zwischen Krafthaus und Wehr mit einem boden- und einem oberflächennahen Bypass ausgestattet. Ihre Dotierung erfolgte gesamt mit 2% der Ausbauwassermenge, was den Empfehlungen der Fachliteratur entspricht (*Amaral,* 2003; *Ebel,* 2013).

7.2 Grossräumige Kraftwerks- und Leitrechenanströmung

Die Untersuchungen am Kraftwerksmodell besitzen für die Einschätzung einer möglichen Umsetzung von Leitrechensystemen am Prototyp eine zentrale Bedeutung im Projekt. Zwar liefert die experimentelle Ermittlung der hydraulischen und fischbiologischen Grundlagen in den vorhergehend besprochenen Modellen die notwendigen Basisdaten, es bleiben aber wesentliche Zusammenhänge unerschlossen. Insbesondere die Frage nach der Übertragbarkeit der in den Versuchskanälen idealisierten Leitrechenanströmung kann nur an einem Gesamtmodell beantwortet werden. Aus diesem Grund wurde eine im Prototyp ca. 180 m lange Fliessstrecke des Oberwassers der Kraftwerksanlage nachgebildet und vermessen. Als Referenzkonfigurationen dienten klassische Louver-Konfigurationen. Die dabei ermittelten Geschwindigkeitsfelder sind für die Variante mit einem Rechenwinkel von a = 30° in *Bild 12* dargestellt. Es werden jeweils die über den Versuchszeitraum zeitlich gemittelten Fliessgeschwindigkeiten in Prototypmassen in longitudinaler und transversaler Richtung U und V als Konturplot und die Resultierenden U_r als Vektorpfeile gezeigt.

Der Vergleich mit *Bild 4* verdeutlicht, dass sowohl die An- als auch Abströmungsverhältnisse im Kraftwerksmodell über weite Teile des Leitrechens identisch sind. Im Oberwasser erfährt der Abfluss eine stetige Beschleunigung hin zum Rechenfuss *(Bild 12a)*, und auch die rechenparallele Umleitung der Strömung ist analog zur Detailuntersuchung ausgeprägt *(Bild 12b)*. Im Unterwasser des Rechens führt die vollständige Umlenkung der Strömung in Richtung der Rechenstäbe zur inhomogenen Anströmung des Kraftwerkseinlaufes. Die Reorientierung des Abflusses ist nicht schnell genug möglich, und somit werden die Turbineneinläufe unterschiedlich beaufschlagt.

Deutliche Abweichungen ergeben sich im Nahbereich des Rechenfusses vor dem Kraftwerkstrennpfeiler. Hier führt das grossräumige Eindrehen der Strömung zur Konzentration des Abflusses und zu deutlich erhöhten Transversalgeschwindigkeiten, die in diesem Bereich zur Rechenachse hin ausgerichtet sind. Dieses Gebiet stellt im Hinblick auf die fischbiologische Funktion eine Schlüsselstelle dar. Gerade hier ist eine ausgeprägte Leitströmung zu den Bypass-Einläufen im Trennpfeiler wünschenswert; sie bricht aber durch die Überlagerung mit der Kraftwerksanströmung vollständig zusammen.

Der Einsatz modifizierter *Bar-Racks* führt, wie aus *Bild 13* ersichtlich wird, zu einer massgebenden Verbesserung der Situation, sowohl im Ober- als auch Unterwasser. Generell treten geringere Geschwindigkeitsgradienten in der Rechenanströmung auf. Insbesondere aber die Abflussverhältnisse vor dem Kraftwerkseinlauf sind deutlich entschärft. Ungelöst bleibt allerdings weiter die fischbiologisch ungünstige Orientierung der Strömung unmittelbar vor den Bypass-Einläufen. Ein Aspekt, der in Zukunft zentraler Bestandteil weiterführender Forschungsarbeiten sein muss.

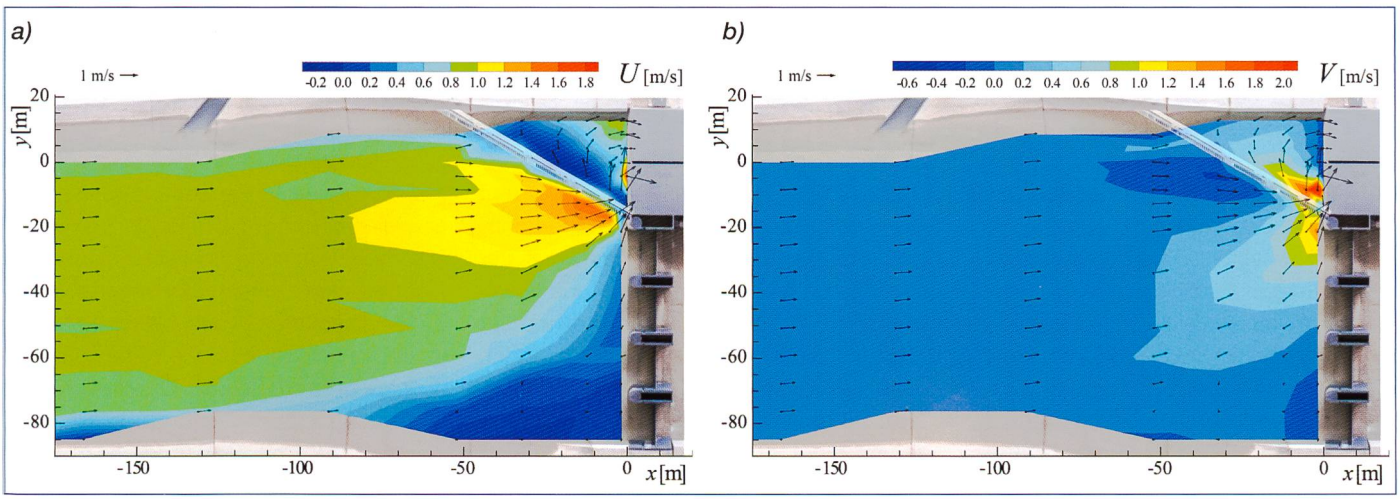

Bild 12. Grossräumige Kraftwerksanströmung mit klassischem Louver (a = 30°), (a) Longitudinalgeschwindigkeit U, (b) Transversalgeschwindigkeit V mit Darstellung der Resultierenden U_r als Vektorpfeile.

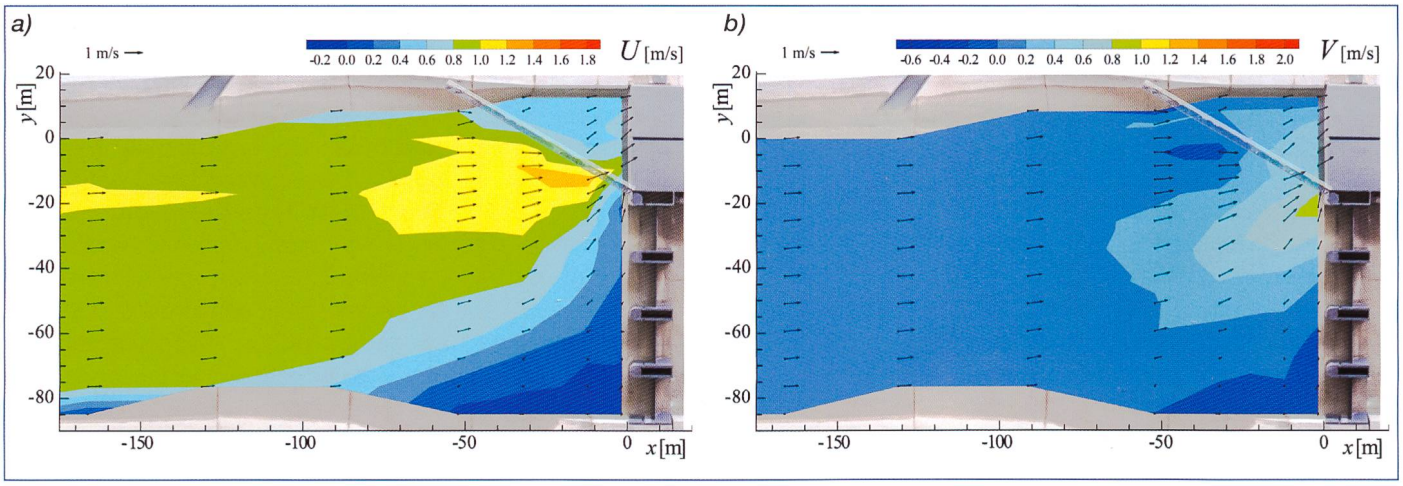

Bild 13. Grossräumige Kraftwerksanströmung mit modifiziertem Bar-Rack (a = 30°), (a) Longitudinalgeschwindigkeit U, (b) Transversalgeschwindigkeit V mit Darstellung der Resultierenden U_r als Vektorpfeile.

7.3 Anströmung der Turbineneinläufe

Der Einsatz von Fischleitrechen an bestehenden Anlagen kann zur Beeinflussung der Fallhöhe *h* durch erhöhte Rechenverluste Δh_R und zudem zur Veränderung des Wirkungsgrades η einer Turbine führen. Beide Effekte sind aber im Zusammenhang mit der Rentabilität einer Anlage von zentraler Bedeutung und sollten deshalb vor der Umsetzung einer fischschutztechnischen Massnahme überprüft werden. Auf Grundlage der oben beschriebenen Energieverlustformel ist eine Bestimmung der Fallhöhenbeeinflussung möglich. Eine konkrete Quantifizierung der Wirkungsgradänderungen war demgegenüber im Kraftwerksmodell nicht möglich, da die Turbinen abstrahiert modelliert wurden. Es werden in diesem Fall Kriterien zur Qualität der Zulaufströmung herangezogen, wie sie durch Turbinenhersteller typischerweise formuliert wurden. Bei Erfüllung dieser Kriterien, die in Anforderungskatalogen zusammengestellt sind, werden Garantieversprechen für den Wirkungsgrad abgeben. Grundsätzlich gilt, je heterogener die Strömungsverteilung in der Turbinenzuströmung ausfällt, umso geringer ist η anzunehmen. Vor dem allgemeinen Hintergrund der Untersuchung wurden die üblichsten Kriterien, namentlich die Beaufschlagung der Einlaufhälften und –quadranten, herangezogen (*Godde* 1994).

Am Beispiel des Kriteriums zur Einlaufhälftenbeaufschlagung, in dem gefordert wird, dass die Beaufschlagung der rechten und der linken Einlaufhälfte Q_{EH} maximal 2.5% vom Gesamtdurchfluss im Messquerschnitt Q_{MQ} abweichen darf *(Gleichung 6)*, werden die Einflüsse von Leitrechen besprochen.

$$47.5\% \cdot Q_{MQ} < Q_{EH} < 52.5\% \cdot Q_{MQ} \qquad (6)$$

Bild 14 zeigt die Verteilungen der mittleren resultierenden Fliessgeschwindigkeiten U_r in beiden Krafthauseinläufen als Konturplot. Ferner sind die daraus abgeleiteten Einlaufhälftenbeaufschlagungen in Prozent und die in der Dammbalkenebene gemessenen, korrespondierenden WSL dargestellt.

Bereits im unverbauten Ausgangszustand wird dieser Grenzwert mit 3.6% im linken und 4.7% im rechten Turbineneinlauf leicht überschritten *(Bild 14a)*. In beiden Einläufen konzentriert sich der Abfluss auf der rechten Seite, und es ist ferner eine Tendenz zur Geschwindigkeitszunahme über die Abflusstiefe erkennbar. Zurückzuführen ist dieses Ergebnis auf die beim Modellbau vorgenommenen Vereinfachungen im Hinblick auf die morphologische Gestaltung der Gewässerführung und der Sohlengeometrie. Für vergleichende Betrachtungen zwischen dem unverbauten Zustand mit dem durch Leitrechen beeinflussten, ist dies aber zulässig.

Der Einbau der *Louver*-Konfiguration mit den Rechenwinkeln *a* = 30° führt zu einer signifikanten Verschlechterung der Zulaufbedingungen *(Bild 14b)*. In Übereinstimmung mit den in *Bild 12* vorgestellten Resultaten wird insbesondere die Anströmung der rechten Turbine negativ beeinflusst. Hier konzentriert sich der Abfluss fast vollständig auf die linke Einlaufhälfte. Im rechten Randbereich kommt es, anhand negativer U_r-Werte erkennbar, sogar zu Rückströmungen aus der Einlaufrechenebene heraus in das Oberwasser. Entsprechend divergent ist hier die Einlaufhälftenbeaufschlagung verteilt. Fast 90% des Abflusses werden durch den linken Abflussquerschnitt abgeführt. Grund dafür ist der, der Kurvenströmung aufgezwungene, geringe Radius *R*, der zur starken Erhöhung der Fliehkräfte F_z führt ($F_z \sim v^2/R$) und mit der Konzentration des Abflusses auf der linken Einlaufseite einhergeht. Aus ersichtlichen Gründen besteht zwischen dem Auftreten heterogener, von starken Geschwindigkeitsgradienten gekennzeichneter Abflussverhältnisse und der Höhe der Fallhöhenverluste eine direkte Korrelation. Sie ist am Verlauf der WSL vor den Turbineneinläufen ersichtlich. Diese verläuft linkseitig noch geradlinig auf Höhe des Referenzpegels von 397.2 m ü.M., weist danach aber einen ausgeprägten Senkenbereich oberhalb des rechten Kraftwerkseinlaufes auf. Dies entspricht maximalen, lokalen Fallhöhenverlusten von Δh_R = 0.4 m (bei α = 30° und β = 90°).

Bei den getesteten modifizierten *Bar-Rack*-Konfigurationen *(Bild14c)* stellen sich in der Recheneinlaufebene deutlich günstigere Strömungsverhältnisse ein. Die Beaufschlagung beider Turbineneinlaufhälften ist auf vergleichbarem Niveau zum unverbauten Zustand und auch die Geschwindigkeitsgradienten fallen moderat aus. Zudem folgt die WSL im Vergleich zur unverbauten Konfiguration einem quasi identischen Verlauf auf Höhe 397.2 m ü.M., lässt also im Rahmen der Modellmessgenauigkeit keine zusätzlichen Fallhöhenverluste feststellen.

8. Ergebniszusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde ein weites Spektrum von Fischleitrechen auf ihre hydraulischen und fischbiologischen Eigenschaften untersucht. Dieses Spektrum beinhaltete sowohl bekannte Konfigurationen als auch solche, deren geometrische Eigenschaften zur Optimierung der Strömungsverhältnisse systematisch variiert wurden. Konkret wurde das Ziel verfolgt, modifizierte Leitrechen zu entwickeln, die bei gleichbleibender oder verbesserter Fischleiteffizienz geringere hydraulische

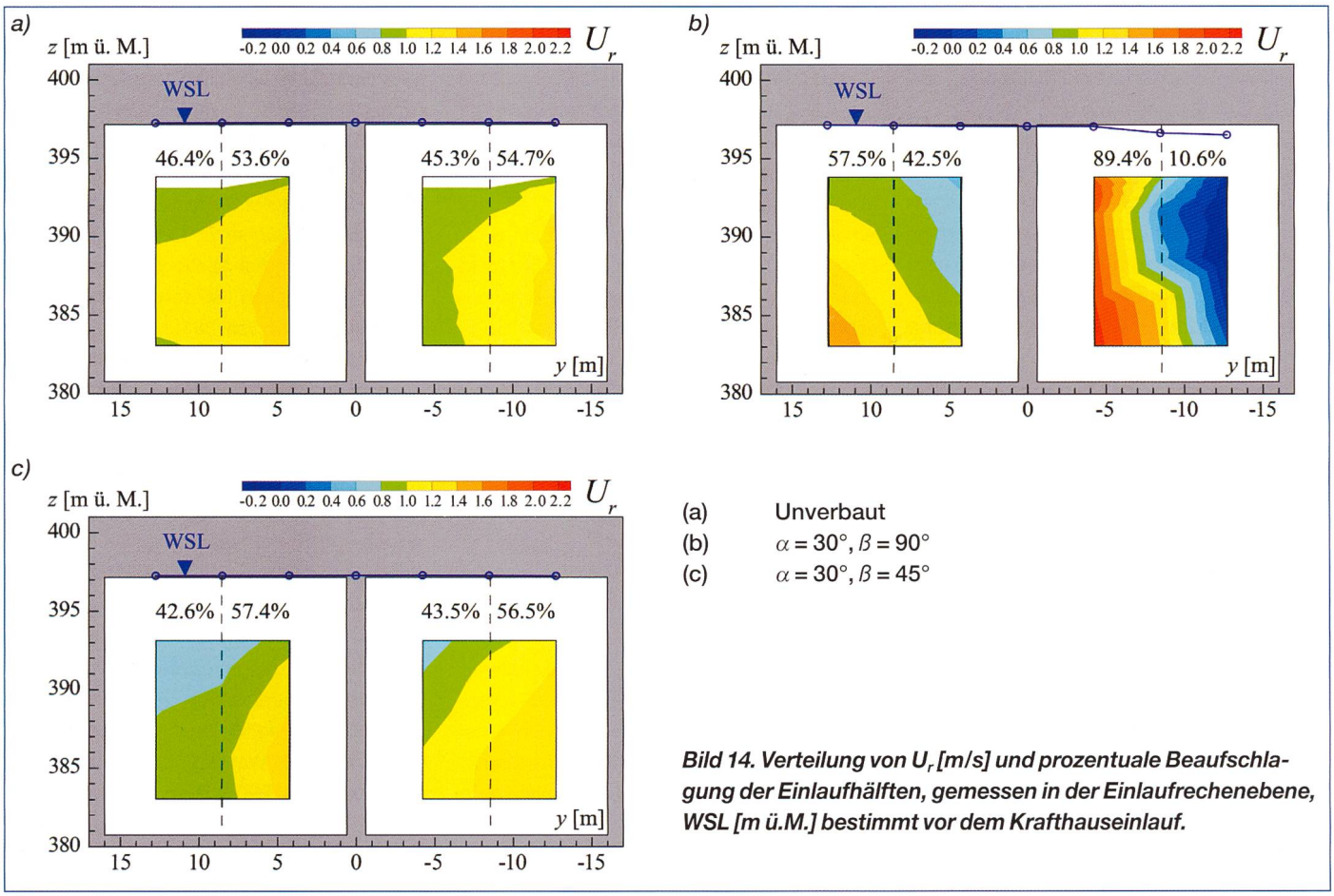

Bild 14. Verteilung von U_r [m/s] und prozentuale Beaufschlagung der Einlaufhälften, gemessen in der Einlaufrechenebene, WSL [m ü.M.] bestimmt vor dem Krafthauseinlauf.

Verluste und Wirkungsgradeinbussen an Flusskraftwerken verursachen.

Nach über drei Jahren interdisziplinärer Forschungsarbeit und unter Mitarbeit und Unterstützung eines breiten Expertenkreises aus Wirtschaft, Ämtern und Kraftwerksbetreibern wurde dieses Ziel erreicht. Durch die systematische Variation der Rechenparameter wurden neue Rechenkonfigurationen entwickelt, deren hydraulische Verluste im Bereich heutiger Einlaufrechen liegen. Es zeigte sich, dass insbesondere die Verringerung der Rechenstabausrichtung positive Resultate erzielt, da die hydraulischen Verluste verringert werden und die fischleitende Wirkung positiv beeinflusst wird.

Modifizierte Leitrechen zeigen dementsprechend in Laborversuchen mit 76% bis 100% Leiteffizienz sehr vielversprechende Resultate, sowohl für Fischarten, die strukturliebend entlang der Rechenkonstruktion abwandern (Barbe, Bachforelle, Aal) als auch strukturmeidende Arten, bei denen die hydraulische Signatur im Oberwasser der Rechen bereits zu Meidreaktionen führt (Äsche, Schneider).

Schliesslich zeigten die Untersuchungen im Kraftwerksmodell, dass durch die Modifikation der Rechen nicht nur die hydraulischen Verluste verringert werden, sondern parallel eine markante Verbesserung der Qualität der Kraftwerksanströmung und damit des Turbinenwirkungsgrades im Vergleich zu herkömmlichen Leitrechen möglich ist.

Die Arbeit muss dennoch nur als erster Schritt auf dem Weg zur fischbiologischen und ingenieurtechnischen Umsetzung gesehen werden, da die transdisziplinäre Spannweite der Problemstellung den Umfang einer Doktorarbeit weit überschreitet. In der Weiterführung möglicher Forschungsanstrengungen ist deshalb zu empfehlen, neben dem Ausbau des Grundlagenwissens einen weiteren Fokus auf die Problematik der baulichen Umsetzung und auf den betrieblichen Unterhalt, z.B. anhand einer Prototypanlage, zu legen. Konkret empfehlen die Autoren unter anderem folgende, zukünftige Untersuchungsschwerpunkte:

8.1 Grundlagenforschung

Der Rechenstabwinkel β zeigte sich als dominanter Einflussparameter, sowohl im Hinblick auf die hydraulischen Eigenschaften als auch die Fischleiteffizienz. Der getestete Wertebereich schloss dabei Konfigurationen mit $\beta = 0°$ und $45° \leq \beta \leq 90°$ ein. Im Resümee der Versuchsergebnisse könnte aber gerade der bisher noch nicht untersuchte Bereich $0° \leq \beta \leq 45°$ von besonderem Interesse sein. Eine systematische Variation des Rechenstabwinkels in diesem Wertespektrum würde mit hoher Wahrscheinlichkeit zur weiteren Verbesserung der hydraulischen Eigenschaften führen. Demgegenüber wäre zu analysieren, ob dies grundsätzlich auch für die fischleitende Wirkung gilt und welcher Rechenstabwinkel den Wendepunkt im Hinblick auf die Fischleiteffizienz für bereits untersuchte, aber auch zusätzliche Spezies darstellt. Des Weiteren sollte ein Fokus der weiteren ethohydraulischen Grundlagenforschung auf die Bypass-Gestaltung und –Geometrie gelegt werden, indem systematische Versuche eine optimierte allmähliche Zunahme der Zuströmungsgeschwindigkeiten zum Ziel haben.

8.2 Kraftwerksspezifische Umsetzung

Die Untersuchungen am Beispiel eines Flusskraftwerkes in Blockbauweise verdeutlichten, dass eine Schlüsselstelle bei der Anströmung der Leitrechen, wie auch anderer Rechensysteme, im Bereich des Trennpfeilers zwischen Krafthaus und Wehrfeld auftritt. Hier führt das grossräumige Eindrehen der Gerinneströmung zum Einbruch der rechenparallelen Leitströmung und zusätzlich zur starken lokalen Erhöhung der Fliessgeschwindigkeiten. Beide Aspekte können Fischen das Auf-

finden der Bypass-Einläufe erschweren oder unmöglich machen. Es existieren in diesem Hinblick bereits einige Lösungsansätze, wie z.B. die lokale Verringerung der Rechenstababstände am Rechenfuss, die zur Verlagerung der Abflusskonzentration in den oberen Rechenbereich beitragen kann. Die Sensibilität solcher Massnahmen erfordert allerdings in jedem Fall eine Überprüfung, entweder anhand numerischer Methoden oder durch physikalische Modellversuche.

8.3 Betriebliche Aspekte

Der Einsatz von Leitrechen unter Prototypbedingungen stellt z.B. im Hochwasserfall Anforderungen an die Rechenkonstruktion, die im Modellversuch vorerst nicht abgedeckt wurden. Dies beinhaltet Aspekte der Rechenreinigung, die anhand von Schwemmholzversuchen bereits grundlegend in diesem Projekt behandelt wurden, aber auch hydrodynamische Aspekte, die zur Schwingungsanregung der Rechenstäbe führen können. Da diese Problemstellungen von hoher Relevanz für die Betriebssicherheit sind, dürfen sie in zukünftigen Untersuchen nicht ausgelassen werden.

Danksagung

Die Autoren danken herzlich für die Beauftragung und Finanzierung des Projektes durch den Verband Aare-Rheinwerke (VAR) und für die finanzielle Unterstützung durch swisselectric research, das Bundesamt für Energie (BFE) und das Bundesamt für Umwelt (BAFU). Wir danken ferner der gesamten Projektbegleitgruppe für die stets konstruktive und wertvolle Kommentierung der weit gespannten Forschungsergebnisse und Claude Pahud (HOLINGER AG) sowie *Claudia Beck* (VAW) für die geschätzte Unterstützung bei der Durchführung der Forschungsarbeit.

Literatur

Adam B., Lehmann B. (2011). Ethohydraulik – Grundlagen, Methoden und Erkenntnisse. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, Deutschland.

Adam B., Schwevers U., Dumont U. (1999). Beiträge zum Schutz abwandernder Fische – Verhaltensbeobachtungen in einem Modellgerinne. Verlag Natur & Wissenschaft, Solingen, Deutschland.

Agostinho A. A., Marques E. E., Agostinho C. S., Almeida D. A. d., Oliveira R. J. d., Melo J. R. B. d. (2007). Fish ladder of Lajeado Dam: migrations on one-way routes? Neotropical Ichthyology 5: 121–130.

Amaral S. V. (2003). The Use of Angled Bar Racks and Louvers for Guiding Fish at FERC-Licensed Projects. FERC Fish Passage Workshop, Holden, USA.

Amaral S. V., Taft E. P. (2003). The use of Angeled Bar Racks and Louvers for Protecting Fish at Water Intakes. Symposium on Cooling Water Intake Technologies to Protect Aquatic Organisms, Arlington, USA.

Amaral S. V., Winchell F. C., McMahon B. J., Dixon D. (2003). Evaluation of angled bar racks and louvers for guiding silver phase American eels. American Fisheries Society: 367–376.

Arnekleiv J. V., Kraabøl M., Museth J. (2007). Efforts to aid downstream migrating brown trout kelts and smolts passing a hydroelectric dam and a spillway – Developments in Fish Telemetry, Developments in Hydrobiology, 195. (P. R. Almeida, B. R. Quintella, M. J. Costa and A. Moore, eds.), Springer Netherlands. 5–15.

Bates D. W., Vinsonhaler R. (1957). Use of Louvers for Guiding Fish. Transactions of the American Fisheries Society 86(1): 38–57.

Bös T., Egloff N., Peter A. (2012). Massnahmen zur Gewährleistung eines schonenden Fischabstiegs an grösseren, mitteleuropäischen Flusskraftwerken – Zwischenbericht zum Literaturstudium der Eawag, Eawag, Kastanienbaum, Schweiz.

Calles O., Karlsson S., Hebrand M., Comoglio C. (2011). Evaluating technical improvements for downstream migrating diadromous fish at a hydroelectric plant. Ecological Engineering - The Journal of Ecosystem Restoration 2011: 8.

Dumont U. (2011). Wasserkraft, Fischschutz und Fischabstieg. Ökologische Durchlässigkeit in Fliessgewässern, Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz (LUGV), Lebus, Deutschland.

Ebel G. (2013). Fischschutz und Fischabstieg an Wassekraftanlagen – Handbuch Rechen- und Bypasssysteme. Mitteilungen aus dem Büro für Gewässerökologie und Fischereibiologie Dr. Ebel, Halle (Saale), Deutschland.

EPRI und *Dominion Millstone Laboratories* (2001). Evaluation of Angled Bar Racks and Louvers for Guiding Fish at Water Intakes 1005193(1005193), D. M. Laboratories, Palo Alto, CA and Waterford, CT, USA.

EPRI P. A., CA, Holyoke Gas & Electric Company, Holyoke, MA, WE-Energies Inc., Milwaukee, WI (2006). Evaluation of an Angled Louver Facility for Guiding Sturgeon to a Downstream Bypass.

Flügel D., Bös T., Peter A. (2015). Untersuchungen zum Fischabstieg entlang eines vertikalen, schräg ausgerichteten Fischleitrechens an grösseren mitteleuropäischen Flusskraftwerken – Ethohydraulische Untersuchungen in einem Versuchsgerinne, Eawag, Kastanienbaum, Schweiz.

Godde D. (1994). Experimentelle Untersuchung zur Anströmung von Rohrturbinen: Ein Beitrag zur Optimierung des Turbineneinlaufs. Bericht Nr. 75, der Versuchsanstalt Obernach und des Lehrstuhls für Wasserbau und Wassermengenwirtschaft der TU München, Deutschland.

Harza Engineering Company, RMC Environmental Services Inc. (1993). Response of Juvenile Clupeids to Louvers in the Holyoke Canal, Fall 1992, Northeast Utilities Service Company

Hassinger R., Hübner D. (2009). Entwicklung eines neuartigen Aal-Abstiegssystems mithilfe von Laborversuchen. KW Korrespondenz Wasserwirtschaft 2(5): 276–281.

Hogan T. W., Cada G. F., Amaral S. V. (2014). The Status of Environmentally Enhanced Hydropower Turbines. Fisheries 39(4): 164–172.

Kriewitz C. R. (2015). Leitrechen an Fischabstiegsanlagen – Hydraulik und fischbiologische Effizienz, VAW-Mitteilung, 230. (R. Boes, ed.), Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich, Schweiz.

Kriewitz C. R., Albayrak I., Boes R. M. (2012). Massnahmen zur Gewährleistung eines schonenden Fischabstiegs an grösseren mitteleuropäischen Flusskraftwerken – Zwischenbericht zum Literatur- und Massnahmenstudium, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich, Schweiz.

Kynard B., Buerkett C. (1997). Passage and Behavior of Adult American Shad in an Experimental Louver Bypass System. North American Journal of Fisheries Management 17(3): 734–742.

Meusburger H. (2002). Energieverluste an Einlaufrechen von Flusskraftwerken, VAW-Mitteilung, 179. (H.-E. Minor, ed.), Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich, Schweiz.

Pelicice F. M., Agostinho C. S. (2012). Deficient downstream passage through fish ladders: the case of Peixe Angical Dam, Tocantins River, Brazil. Neotropical Ichthyolog 10(4): 705–713.

Pfammatter R., Piot M. (2014). Situation und Perspektiven der Schweizer Wasserkraft. «Wasser Energie Luft» 106(1): 1–11.

Raynal S., Chatellier L., Courret D., Larinier M., David L. (2014). Streamwise bars in fish-friendly angled trashracks. Journal of Hydraulic Research 52:3: 426–431.

Spangler J. (1928). Untersuchungen über den Verlust an Rechen bei schräger Zuströmung, Mitteilung H2 des hydraulischen Instituts der TH München, Deutschland.

Anschrift der Verfasser

Carl Robert Kriewitz, Ismail Albayrak, Robert M. Boes
Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich, CH-8093 Zürich
kriewitz@vaw.baug.ethz.ch
info@vaw.baug.ethz.ch
David Flügel, Tamara Bös, Armin Peter
Eawag, Fischökologie und Evolution
CH-6047 Kastanienbaum