

Fortschritte beim Fischschutz und Fischabstieg: Inbetriebnahme der Pilot-Wasserkraftanlagen Freyburg und Öblitz

Für den Fischschutz und Fischabstieg an europäischen Wasserkraftanlagen wird zunehmend das Leitrechen-Bypass-System nach Ebel, Gluch und Kehl eingesetzt, mit dem sowohl hohe biologische Effizienzen als auch betriebliche Vorteile erzielt werden können. In den Jahren 2014 und 2017 wurde an zwei weiteren Wasserkraftanlagen mit Ausbaudurchflüssen von 26 m³/s und 48 m³/s ein derartiges System installiert, wobei die Leitrechen eine lichte Stabweite von jeweils 10 mm besitzen. Der vorliegende Beitrag stellt die technischen Eigenschaften dieser Anlagen vor und vermittelt einen Überblick über die Betriebserfahrungen und Investitionen.

Guntram Ebel, Martin Kehl und Arne Gluch

1 Einleitung

Die Wasserkraft gehört sowohl im europäischen als auch im globalen Maßstab zu den bedeutendsten regenerativen Energiequellen. Ihre Nutzung trägt einerseits zur Begrenzung klimaschädlicher Emissionen und zur Schonung fossiler Energieträger bei, verursacht aber andererseits tiefgreifende Veränderungen der Gewässer und ihrer Lebensgemeinschaften. Eine biologisch bedeutsame Folge der Wasserkraftnutzung ist die Tötung flussabwärts wandernder Fische durch Turbinen und andere technische Einrichtungen. Das gilt insbesondere für diadrome Arten, wie beispielsweise Aal (*Anguilla anguilla*) oder Lachs (*Salmo salar*), da diese der kumulativen Wirkung aller Wasserkraftanlagen (WKA) in dem zu durchwandernden Gewässerabschnitt unterliegen.

Von den verschiedenen Strategien, die zur Begrenzung der wasserkraftbedingten Mortalität einsetzbar sind, besitzen Fischschutz- und Fischabstiegssysteme die größte praktische Bedeutung. Das betrifft vor allem ingenieurbologisch konzipierte Leitrechen-Bypass-Systeme, da diese nicht nur über günstige Voraussetzungen für einen effektiven Fischschutz verfügen, sondern auch Vorteile im praktischen Anlagenbetrieb bedingen [1], [2].

Eine hohe biologische Wirksamkeit derartiger Systeme ist dann zu erwarten, wenn sowohl der Leitrechen als auch der Bypass entsprechend den einschlägigen Regeln und Grenzwerten [2] bemessen und gestaltet werden. Ein diesbezüglich

wesentlicher Parameter ist die lichte Stabweite des Leitrechens. Diese ist nach Möglichkeit so zu wählen, dass der Rechen für die jeweils maßgebenden Zielarten bzw. -stadien als physisch undurchlässige Barriere wirkt. Bei Blanktaalen und Lachssmolts, auf die sich die Schutzbemühungen in zahlreichen europäischen Gewässern in besonderer Weise konzentrieren, ist ein Eindringen in die Triebwerke dann sicher auszuschließen, wenn Leitrechen mit einer lichten Weite von 10 mm installiert werden.

Allerdings ist in der Praxis vielfach unklar, ob bei einer derartig geringen lichten Weite ein störungsfreier und wirtschaftlicher Anlagenbetrieb gewährleistet werden kann. Das gilt vor allem für WKA mit Ausbaudurchflüssen ≥ 20 m³/s, da an diesen bislang fast ausschließlich Leitrechen mit Stabweiten von ≥ 15 mm ausgeführt wurden. Ausgehend hiervon sind Erfahrungen zum Einsatz von 10-mm-Leitrechen an WKA mit größerem Ausbaudurchfluss von besonderem Interesse.

In vorliegendem Beitrag werden zwei Pilotanlagen mit Ausbaudurchflüssen von 25,5 m³/s und 48,0 m³/s vorgestellt, an denen Leitrechen mit einer lichten Stabweite von 10 mm installiert sind. Dabei finden technische Parameter, Betriebserfahrungen und Investitionsvolumina besondere Berücksichtigung. Den Ausführungen wird eine Kurzbeschreibung der prinzipiellen Eigenschaften des eingesetzten Leitrechen-Bypass-Systems vorgestellt.

2 Aufbau und Funktionsprinzip des Leitrechen-Bypass-Systems

An beiden in vorliegender Arbeit vorgestellten Pilotanlagen ist ein Leitrechen-Bypass-System nach Ebel, Gluch und Kehl installiert (**Bild 1**). Dieses wurde erstmalig im Jahr 2006 am Standort Halle-Planena (Saale, Deutschland) praktisch ausgeführt und findet seitdem zunehmend an europäischen WKA Anwendung [1], [2], [3], [4], [5].

Das durch horizontale Stabelemente gebildete, der Sohle senkrecht aufstehende Rechenfeld wird in einem horizontalen

Kompakt

- Der Fischschutz an Wasserkraftanlagen mittels 10-mm-Leitrechen ist für Durchflüsse bis 50 m³/s pro Rechenfeld praktisch realisierbar.
- Bei der Planung von Leitrechen mit 10-mm-Stabweite sind neben den ingenieurbioologischen Bemessungs- und Gestaltungsregeln spezielle technische Aspekte zu berücksichtigen.

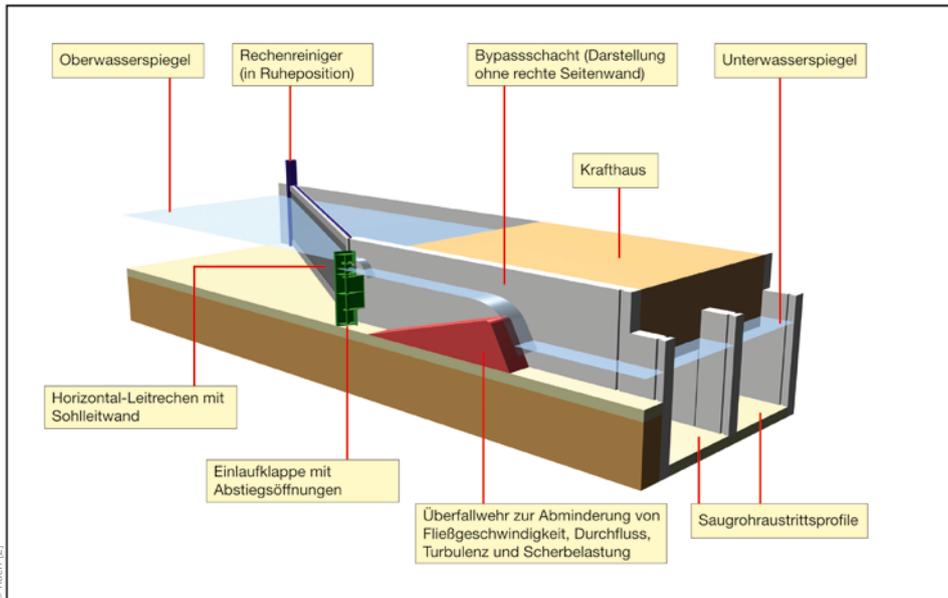


Bild 1: Prinzipskizze des Leitrechen-Bypass-Systems in Seitenansicht (Bereich zwischen Leitrechen und Krafthaus ohne Abdeckung bzw. Grobrechen dargestellt)

Winkel schräg angeströmt. Die ingenieurbologisch geeignete Kombination von Anströmwinkel und Anströmgeschwindigkeit ist von der Schwimmfähigkeit der jeweils relevanten Arten bzw. Stadien abhängig und ergibt sich durch Anwendung der maßgebenden Bemessungsregeln [2], [6]. Die lichte Stabweite des Rechens orientiert sich an den Körperdimensionen der kleinsten Zielart. Aufgrund seiner spezifischen Exposition bietet der Leitrechen abwandernden Fischen die Möglichkeit, den Bypass ohne Veränderung des natürlichen Schwimmhorizontes zu erreichen. Um die biologische Leitwirkung des Rechens zu verbessern und die Weitergabe von Geschiebe an das Unterwasser zu fördern, wird das Rechenfeld im Regelfall mit einer Sohlenleitwand kombiniert.

Der Rechen bildet eine Funktionseinheit mit einem lichtoffenen, schachtartigen Bypass. Dessen Eintrittsprofil befindet sich am abstromigen Ende des Rechenfeldes und erfasst die gesamte Höhe der Oberwassersäule. Der Bypass besitzt einerseits die Aufgabe, den durch das Rechensystem horizontal abgeleiteten Individuen eine schad- und verzögerungsfreie Passage in das Unterwasser zu ermöglichen. Andererseits fungiert der Bypass

als Ableitungsgerinne für Treibgut sowie ggf. als Entlastungsgerinne für Geschiebe und Hochwasser.

Da im Bypassschacht eine erhebliche Wasserspiegeldifferenz abzubauen ist, werden hier spezielle Regelorgane installiert, die Fließgeschwindigkeit, Durchfluss, Turbulenz und Scherbelastung abmildern. Dabei handelt es sich um eine bewegliche, selbstreinigende Klappe mit vertikaler Drehachse (Türflügelprinzip) sowie um ein unterhalb angeordnetes Überfallwehr.

Die im oberen Teil des Bypassschachtes installierte Klappe erzeugt durch Einengung der durchströmten Gerinnebreite eine Schlitzstruktur, die sich entweder über die gesamte Höhe der Wassersäule erstreckt oder durch Teilverblendungen in verschiedene fensterartige Öffnungen untergliedert wird. Die Anordnung dieser permanenten Öffnungen erfolgt in den bevorzugten Abwanderungshorizonten der jeweils maßgebenden Arten, wobei im Regelfall zumindest im oberflächennahen und im sohlennahen Bereich eine Abstiegsöffnung vorgesehen wird. Im normalen Betriebszustand stehen für die Fischabwanderung ausschließlich der Schlitz bzw. die Abstiegsöffnungen zur Verfügung. Bei Spülvorgängen bzw. Hochwasserereignissen öffnet

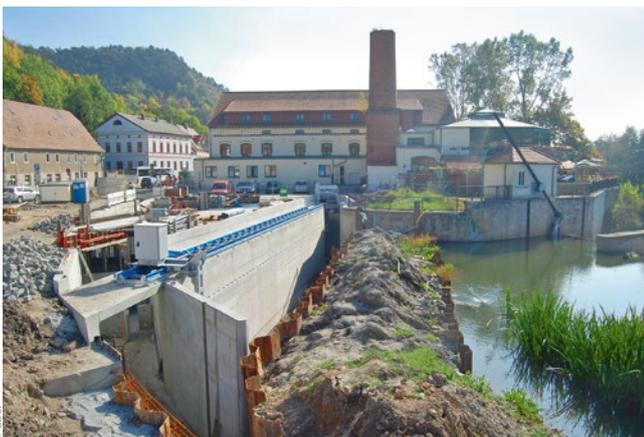


Bild 2: WKA Freyburg mit Leitrechen-Bypass-System im Bau (links) und im Betrieb (rechts)

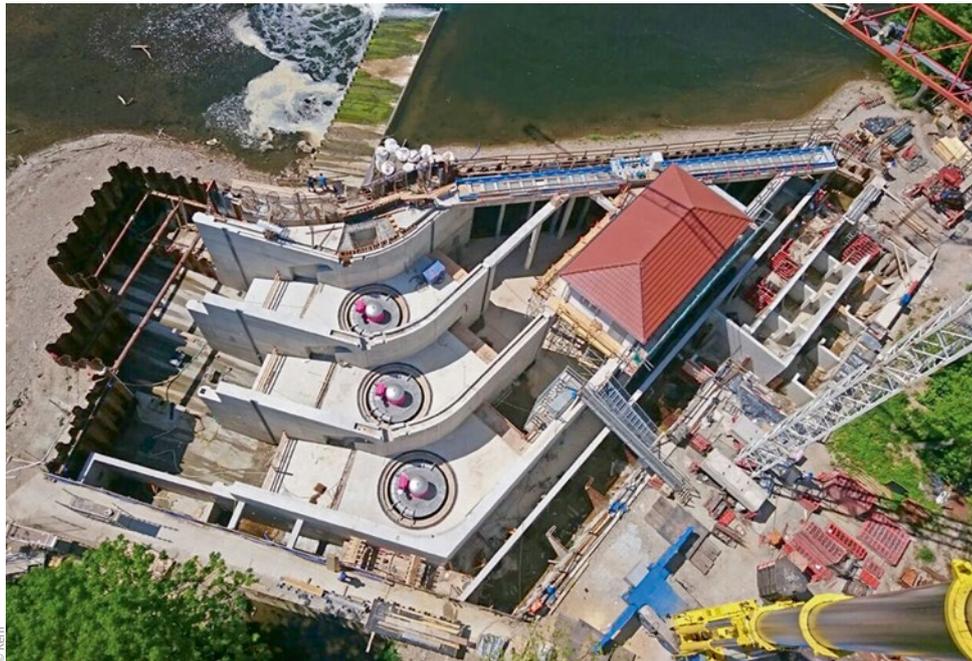


Bild 3: WKA Öblitz mit Leit-rechen-Bypass-System im Bau

die Klappe hingegen vollständig und gibt den gesamten Querschnitt des Bypassgerinnes frei.

Das Überfallwehr besitzt einen schrägen Anströmboden (10 bis 30°) und wird in Abhängigkeit von den standörtlichen Gegebenheiten fest oder beweglich ausgeführt. Bei beweglichen Konstruktionen kann die Durchflusskapazität für Sediment- bzw. Geschiebespülung und Hochwasserabführung durch Absenkung vergrößert werden. Nachteilige Schwall- und Sunk-effekte sind durch geeignete Auslegung bzw. Steuerung des Bypasses auszuschließen.

3 Charakterisierung der Pilotanlagen

3.1 Standörtliche Daten

Die Pilotanlage Freyburg befindet sich am Unterlauf der Unstrut im Bundesland Sachsen-Anhalt am Standort eines historischen Ausleitungskraftwerkes, das in den Jahren 2013 und 2014 im

Rahmen umfangreicher Umbau- und Modernisierungsmaßnahmen reaktiviert wurde (**Bild 2**). Die Anlage besitzt einen Ausbaudurchfluss von 25,5 m³/s und eine Nennfallhöhe von 1,85 m. Zur Energiegewinnung kommen drei vertikalachsige Kaplan-Turbinen mit einer Nennleistung von insgesamt 344 kW zum Einsatz.

Die Pilotanlage Öblitz, die sich nordöstlich von Naumburg am Mittellauf der Saale im Bundesland Sachsen-Anhalt befindet, wurde als überströmbares, hochwasserneutrales Kraftwerk konzipiert und linksseitig in die bestehende Staustufe integriert (**Bild 3**). Von einer Ausführung des Neubauvorhabens als Buchtenkraftwerk musste wegen eines im Vorland angrenzenden Naturschutzgebietes abgesehen werden. Der Ausbaudurchfluss des Kraftwerks beträgt 48 m³/s und die Nennfallhöhe 2,13 m. Die Anlage ist mit 3 Dive-Turbinen ausgestattet, die eine Nennleistung von jeweils 300 kW besitzen. Nach 2-jähriger Bauzeit nahm die Anlage Ende September 2017 den Probebetrieb auf.

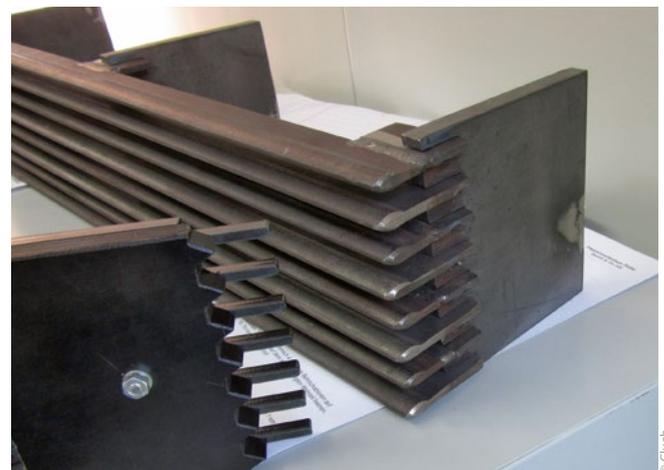


Bild 4: Detailansicht der eingesetzten 10-mm-Rechen: WKA Freyburg (links), Muster WKA Öblitz (rechts)



Bild 5: Beide WKA sind mit lichtoffenen, schachtartigen Bypässen ausgestattet, deren Eintrittsprofil die gesamte Höhe der Oberwassersäule erfasst: Bypass der WKA Öblitz im Bau (Blick zum Unterwasser) (links), Bypass der WKA Freyburg (Eintrittsbereich mit Klappe) im Betrieb (rechts)

Die hydrographischen Verhältnisse von Unstrut und Saale im Bereich der beiden Pilotanlagen sind mit Ausnahme der unterschiedlichen Gewässerdimensionen sehr ähnlich. In beiden Fällen handelt es sich um kiesgeprägte Gewässer des Hügellandes mit geringem Gefälle, die aus fischereibiologischer Sicht als Barbenregion zu klassifizieren sind. In **Tabelle 1** sind wesentliche standörtliche Daten für die beiden Pilotanlagen zusammenfassend dargestellt.

3.2 Technische Lösungen für den Fischschutz und Fischabstieg

Die Konzeption und Bemessung der Leitreechen-Bypass-Systeme erfolgten im Rahmen der fischereibiologischen Begutachtung

[7], [8] und der technischen Genehmigungsplanung [9], [10] in enger iterativer Abstimmung der Bearbeiter im Zeitraum 2009-2011. Im Zuge der ersten Bearbeitungsphase, in der für beide WKA die Installation von Leitreechen mit einer lichten Stabweite von jeweils 15 mm vorgesehen war, wurden zunächst die zu erwartenden Mortalitätsraten durch Anwendung von Prognosemodellen bilanziert. Hierbei zeigte sich jedoch, dass ein Mortalitätsgrenzwert von $\leq 1\%$, der bei Neubau- oder Reaktivierungsvorhaben in den durch Wasserkraft intensiv genutzten Flüssen Unstrut und Saale entsprechend der gängigen Genehmigungspraxis einzuhalten ist, voraussichtlich nicht bei allen Zielarten erfüllt werden kann. Infolgedessen wurden für die weitere Planung Leitreechen mit einer lichten Stabweite von jeweils

Tabelle 1: Standörtliche Daten (Quelle: nach [7]-[10])

Parameter	WKA Freyburg	WKA Öblitz
Hydrographische Angaben		
Gewässer	Unstrut	Saale
Staat, Bundesland	Deutschland, Sachsen-Anhalt	Deutschland, Sachsen-Anhalt
Mittelwasserabfluss (MQ) [m ³ /s]	30,4 (Pegel Laucha)	67,3 (Pegel Naumburg-Grochlitz)
mittlere Gewässerbreite [m]	25	55
mittleres Gefälle [‰]	0,5	0,4
dominierendes Sohlensubstrat	Fein- und Mittelkies	Fein- und Mittelkies
fischereibiologische Klassifizierung	Barbenregion/Epipotamal	Barbenregion/Epipotamal
Kenngrößen der Wasserkraftanlagen		
Station	5,050 km oberhalb Mündung	151,450 km oberhalb Mündung
Lage	linksseitig Staustufe Freyburg	linksseitig Staustufe Öblitz
Kraftwerkstyp	Ausleitungskraftwerk (Reaktivierung)	überströmbares Kraftwerk (Neubau)
Ausbau durchfluss [m ³ /s]	25,5	48,0
Turbinenkonzept	3 x Kaplan-Turbine	3 x Dive-Turbine
Nennfallhöhe (brutto) [m]	1,85	2,13
installierte Leistung [kW]	344	900
Breite Einlaufkanal [m]	13,58	16,60
Wehraufsatz	fest	beweglich
Stauziel	vollständig dynamisch	vollständig dynamisch
Inbetriebnahme	Oktober 2014	September 2017



Bild 6: Bei dem Leitrechen der WKA Öblitz handelt es sich nach vorliegenden Kenntnissen um den größten 10-mm-Rechen Europas, das Foto zeigt den Rechen von der Abströmseite vor der Inbetriebnahme

10 mm gewählt. Wie erneute Modellrechnungen für beide Standorte ergaben, sind bei einer derartigen Rechenstabweite sowohl für Gelbaale und Blankaale als auch für Lachsmolts Mortalitätsraten von jeweils deutlich <1 % zu erwarten.

Um trotz der kleinen Rechenstabweite einen geringen Rechenverlust und eine effiziente Rechenreinigung gewährleisten zu können, wurden die Stäbe beider Leitrechen als Spezial-

profil ausgeführt. An der WKA Freyburg kam ein gebördeltes Edelstahlprofil (System Oppermann [11]) mit einer Stabdicke von 3 mm, einer Kopfdicke von 8 mm und einer Stabtiefe von 50 mm zum Einsatz. Auf der Abströmseite dieses Rechens beträgt die lichte Stabweite somit 15 mm (**Bild 4a**). Für die WKA Öblitz wurde ein Fischbauchprofil (Typ Einsal) mit einer Stabdicke von 5 mm, einer Kopfdicke von 8 mm und einer Stabtiefe von 60 mm gewählt. Zur weiteren Verminderung der Rechenverluste wurde jeder zweite Rechenstab auf der Abströmseite ausgeklinkt und hierdurch die Stabtiefe von 60 auf 30 mm reduziert. Die auf diese Weise gekürzten Stäbe besitzen die Funktion von „Füllstäben“, die aus biologischer, nicht jedoch aus statischer Sicht erforderlich sind. Auf der Abströmseite besitzt der am Kraftwerk Öblitz eingesetzte Rechen somit eine lichte Stabweite von 31 mm (**Bild 4b**).

An beiden Leitrechen wurden die Rechenstäbe nicht mit Distanzhülsen auf Zugstangen montiert, sondern auf der Abströmseite an vertikalen, kammartigen Elementen schweißtechnisch fixiert. Der Rechenreiniger wurde an beiden Standorten mit Zähnen ausgestattet, um den verlegungsanfälligen Bereich zwischen den Stabköpfen vollständig zu erfassen und hierdurch bleibende Verlegungen auszuschließen. Bei der Fertigung und Montage der Rechenfelder und Reinigungsmaschinen wurde auf präzise Ausführung geachtet, um eine gute Passgenauigkeit von Stabzwischenräumen und Reinigungszähnen zu gewährleisten.

Tabelle 2: Kenngrößen der Fischschutz- und Fischabstiegssysteme (Quelle: nach [7]-[10])

Parameter	Freyburg	Öblitz
Rechen (Angaben zu durchströmten Rechenfeldhöhen beziehen sich auf WKA-Neandurchfluss)		
Typ	Leitrechen nach [1]	Leitrechen nach [1]
Stabweite, licht [mm]	10	10
Stabform	gebördelt (System Oppermann)	Fischbauchprofil (Typ Einsal)
Stabdicke (Kopfdicke) [mm]	3 (8)	5 (8)
Stabtiefe [mm]	50	60 und 30 (alternierend)
Länge Rechen, durchströmt [m]	26,60	27,63
Höhe Rechen, durchströmt [m]	3,15	5,89
Höhe Sohlenleitwand [m]	0,60	0,60
horizontaler Anströmwinkel [°]	38	38
Anströmgeschwindigkeit [m/s]	≤0,49	≤0,47
Normalgeschwindigkeit [m/s]	≤0,30	≤0,29
Gestaltung Rechenreiniger	Reinigungskamm + Räumschild	Reinigungskamm + Räumschild
Bypass (Angaben zum Durchfluss und zur Höhe der oberen Abtriegsöffnung beziehen sich auf WKA-Neandurchfluss)		
Typ	schachtartiger Bypass nach [1]	schachtartiger Bypass nach [1]
Breite Schacht, licht [m]	2,00	2,00
Tiefe Schacht (OK Wand bis Sohle) [m]	5,80	9,30
Länge Schacht [m]	44	18
Position Abtriegsöffnungen	sohlennah + oberflächennah	sohlennah + oberflächennah
Größe untere Abtriegsöffnung (b x h) [m]	0,40 x 0,60	0,40 x 0,60
Größe obere Abtriegsöffnung (b x h) [m]	0,40 x 0,55	0,45 x 0,64
Wassertiefe [m]	≥1,71	≥1,44
spezifische Leistung [W/m ³]	≤114	≤361
Bypassdurchfluss, absolut [m ³ /s]	1,094	1,555
Bypassdurchfluss, relativ [%]	4,3	3,2



Bild 7: Beckenstruktur (links) und turbinennahe Einstiegsmöglichkeiten (rechts, rechter Bildbereich) des Schlitzpasses der WKA Öblitz

Aufgrund der zu erwartenden Verformungen wurde der aus Stahl gefertigte Rechen der WKA Öblitz nicht verzinkt, sondern mit einem kathodischen Korrosionsschutz kombiniert.

Um den Geschiebetransport entlang der Sohlenleitwand abzusichern und eine Auffüllung dieses Bereiches damit dauerhaft auszuschließen, wurde der Rechenreiniger an beiden Standorten durch Aufsatz eines Geschieberäumschildes verlängert, welches die gesamte Höhe der Sohlenleitwand erfasst.

Die Auslegung der Anströmbedingungen der Rechenanlagen erfolgte in Anlehnung an die einschlägigen Bemessungsregeln [2], die sich zum Zeitpunkt der Planung beider WKA jedoch noch in der Erarbeitungsphase befanden. Für die Anströmgeschwindigkeit wurde ein Wert von jeweils $\leq 0,50$ m/s und für die orthogonal auf den Rechen auftreffende Strömungskomponente (Normalgeschwindigkeit) ein Wert von jeweils $\leq 0,30$ m/s gewählt (Anströmwinkel jeweils 38°).

Die Bypassgerinne besitzen an beiden WKA eine lichte Breite von jeweils 2,0 m und sind entsprechend den Darstellungen in Abschnitt 2 jeweils mit einer Einlaufklappe und einem nachgeordneten Überfallwehr ausgestattet (**Bild 5**). Die Bemessung dieser Kontrollbauwerke erfolgte gleichfalls entsprechend den maßgebenden geometrischen und hydraulischen Vorgaben [2]. Da die Fließgeschwindigkeiten und Fließhöhen an Bypassklappe und Überfallwehr wechselseitige Abhängigkeiten aufweisen, waren iterative Berechnungen auszuführen, um die Einhaltung der ingenieurbioologischen Zielgrößen nachzuweisen.

Wesentliche Eigenschaften der an den Standorten Freyburg und Öblitz installierten Leitreechen-Bypass-Systeme sind in **Tabelle 2** zusammenfassend dargestellt. Ergänzend wird darauf verwiesen, dass es sich bei dem an der WKA Öblitz installierten Leitreechen nach vorliegenden Kenntnissen um den größten 10-mm-Rechen in Europa handelt (**Bild 6**).

3.3 Technische Lösungen für den Fischaufstieg

An beiden Standorten wurden darüber hinaus Fischaufstiegsanlagen errichtet, deren Ausführung jeweils als Schlitzpass erfolgte (**Bild 7a**). Die durch Schlitzweiten von 0,45 m (WKA

Freyburg) und 0,47 m (WKA Öblitz) gekennzeichneten Anlagen verfügen jeweils über zwei Einstiege. Während der eine Einstieg unmittelbar am Saugrohraustrittsprofil in einem Bereich mit eingetiefter, betonierter Gewässersohle angeordnet ist, bindet der andere Einstieg etwa 20 m (WKA Öblitz) bzw. 35 m (WKA Freyburg) unterhalb des Saugrohraustrittsprofils in einem Bereich mit natürlicher Sohlenhöhe und natürlichem Sohlensubstrat in das Unterwasser ein.

Die Einstiege erfassen jeweils die gesamte Unterwassersäule, deren Höhe maximal 4,40 m (WKA Freyburg) bzw. 6,12 m (WKA Öblitz) beträgt. Um eine Geschwindigkeitsdominanz der Einstiege gegenüber den benachbarten Referenzprofilen im gesamten maßgebenden Abflussspektrum (Q30 bis Q330) zu gewährleisten, wurden diese in Einstiegsfenster (**Bild 7b**) aufgliedert und über eine Rohrleitung (DN 400) zusätzlich dotiert, die zwischen turbinennahem und turbinenfernem Einstieg sohlennah ausmündet.

Durch die gewählte Anordnung der Einstiege wird den differenzierten Anforderungen unterschiedlicher Fischarten und -größen in vermutlich besserer Weise entsprochen als durch einen einzigen Einstieg, der in Saugrohrnähe oberflächennah an das betonerte Unterwasser anbindet und durch schwimmschwache, sohlenorientierte und substratgebundene Arten möglicherweise nicht erreicht bzw. aufgefunden werden kann. Die entsprechend der wasserrechtlichen Genehmigung durchzuführenden Funktionskontrollen der beiden Fischaufstiegsanlagen stehen noch aus.

3.4 Betriebserfahrungen

Die generellen Erfahrungen, die für Leitreechen-Bypass-Systeme des o. g. Typs vorliegen und nunmehr einen 12-jährigen Zeitraum umfassen, sind wie folgt zusammenzufassen [1], [2]:

- 1) geringe Rechenverluste durch horizontale Stabausrichtung;
- 2) partielle Selbstreinigung des Rechens durch tangentialen Strömungsvektor;
- 3) minimale Treibgutentsorgungskosten durch effektive Treibgutweiterleitung ins Unterwasser;

Tabelle 3: Investitionsvolumina für das Leitrechen-Bypass-System an unterschiedlichen WKA (Quelle: Ebel, Gluch und Kehl)

Kostenposition	Freyburg	Öblitz	Planena
Baukosten			
Baugrube (Aushub, Spundwand mit Rütteln, Gurtung, Rückverankerung)	180 000	305 000	240 000
Betonbau Einlaufkanal (Sohle, Decke, Rechenbühne, Stützen, Sohleleitwand)	150 000	185 000	170 000
Betonbau Bypass (Sohle, Wand, Überfallwehr)	90 000	135 000	95 000
Ausrüstungskosten			
Rechen und Rechenreiniger	160 000	450 000	330 000
Bypassklappe	25 000	20 000	15 000
Schütz	15 000	30 000	20 000
Dammtafelverschluss im Ober- und Unterwasser	20 000	23 000	16 000
Hebezeug oder Säulendrehkran am Einlauf des Bypasskanals	10 000	35 000	30 000
Zwischensumme			
absolut [Euro]	650 000	1 183 000	916 000
spezifisch [Euro/(m ³ /s)]	25 490	24 646	18 320
abzüglich Einsparungen (Verzicht auf konventionellen Betriebsrechen, nur für WKA-Neubauten berücksichtigt)			
absolut [Euro]	0	313 000	215 000
Gesamtkosten			
absolut [Euro]	650 000	870 000	701 000
spezifisch [Euro/(m ³ /s)]	25 490	18 125	14 020

- 4) minimale Aufwendungen zur Bypassunterhaltung durch geringe Verlegungsanfälligkeit des Bypasses (am Eintrittsprofil ist ein Hydraulik-Ladekran, Säulen-Drehkran oder Hebezeug zu betreiben);
- 5) bedarfsabhängige Bypassbeaufschlagung durch bewegliche Kontrollbauwerke (geringe Beaufschlagung bei Normalbetrieb, hohe Beaufschlagung bei Spülung oder Hochwasserentlastung);
- 6) vorteilhafte Eigenschaften im Winterbetrieb durch erleichterten Transport von Eisschollen entlang der schräg exponierten Rechenfläche.

Für die beiden hier besprochenen Pilotanlagen ist darüber hinaus auf einige spezifische Aspekte zu verweisen. An der WKA Freyburg hat sich nach nunmehr 4-jährigem Betrieb keine bleibende Verlegung zwischen den Rechenstäben ausgebildet. An der WKA Öblitz sind die diesbezüglichen Erfahrungen aufgrund der erst vor einem Jahr erfolgten Inbetriebnahme geringer, jedoch können wegen der analogen Rechenfeldgestaltung und -reinigung ähnliche Effekte erwartet werden. Aufgrund der strömungsgünstigen Stabprofile und der vorteilhaften Anströmbedingungen sind die Rechenverluste an beiden Standorten bei allen Betriebszuständen gering (≤ 2 cm). Ebenso wie an allen anderen WKA, die mit Leitrechen-Bypass-Systemen nach Ebel, Gluch & Kehl (2001) ausgestattet wurden, war es auch im Falle der beiden hier besprochenen Pilotanlagen nicht erforderlich, die Leitrechen mit einem Grobrechen zu kombinieren.

Die Reinigungsfrequenz des Leitrechens an der WKA Freyburg variiert in Abhängigkeit vom Treibgutaufkommen lediglich zwischen 3 und 12 Reinigungsfahrten/Tag.

Für die WKA Öblitz wurde ein automatisches Reinigungsintervall mit 24 Reinigungsfahrten/Tag gewählt, wobei die Reinigungsfrequenz hier nicht durch den Verlegungsgrad des Rechenfeldes, sondern durch den Geschiebeanfall vor der Sohlenleitwand bestimmt wird.

Im Hinblick auf die Rechenreinigung soll auch auf Erfahrungen für einige andere Standorte verwiesen werden, an denen auf den Einsatz von Rechenreinigern mit zahn- oder bürstenartigen Elementen verzichtet wurde. Hier hat sich nach einigen Betriebsjahren trotz der größeren Stabweite (20 mm) in Teilen des Rechenfeldes eine bleibende Verlegung ausgebildet.

3.5 Investitionsvolumina

Die Kosten für das Leitrechen-Bypass-System ergeben sich entsprechend dem in vorliegender Arbeit angewandten Kalkulationsansatz aus folgenden Positionen:

- 1) Kosten für Ausrüstungsobjekte (Stahlwasserbau mit Antriebs- und Regelungstechnik) und
- 2) baulicher Mehraufwand gegenüber einem konventionellen Kraftwerk.

Der bauliche Mehraufwand resultiert aus der etwa dreiecksförmigen Vergrößerung des Einlaufkanals infolge der schrägen Rechenanordnung sowie aus der Errichtung des Bypasskanals. Er beinhaltet die Kosten für die Baugrube (Aushub, Spundwand) sowie die Kosten für den Betonbau. Im Bereich des Einlaufkanals umfasst der Betonbau die Sohle, Decke, Rechenbühne, Stützen und die Sohlenleitwand, wogegen die Längswand Bestandteil der Fischaufstiegsanlage ist und nicht in die Kostenermittlung einbezogen wird. Im Bereich des Bypasskanals beinhaltet der Betonbau die Sohle, das Überfallwehr (bei fester Aus-

führung) und die äußere Längswand; die innere Längswand, die Bestandteil des Kraftwerkes ist, bleibt bei der Kostenermittlung unberücksichtigt.

Die Kalkulation der Baukosten erfolgte für alle Anlagen anhand der Kubatur auf der Grundlage aktueller Baupreise (Aushub: 25 Euro/m³, Spundwand mit Rütteln, Gurtung und Rückverankerung: 360 Euro/m², Betonbau mit Schalung und Gerüstbau: 450 Euro/m³). Die Kosten für die einzelnen Ausrüstungsobjekte wurden auf der Grundlage von Angeboten und Kostenschätzungen der Herstellerfirmen ermittelt.

Die auf dieser Grundlage ermittelten Kosten sind für die Leitreechen-Bypass-Systeme an den WKA Freyburg und Öblitz in **Tabelle 3** zusammenfassend dargestellt. Für Vergleichszwecke wurde auch die bereits im Jahr 2006 in Betrieb genommene WKA Planena (Ausbaudurchfluss 50 m³/s) in Tabelle 3 aufgenommen, für welche die spezifischen Kosten aufgrund der größeren Rechenstabweite (20 mm) und der kleineren spezifischen Rechenfläche (Normalgeschwindigkeit 0,49 m/s) geringer sind.

Bei Installation des Leitreechen-Bypass-Systems an einer neuen WKA sind in die Kostenbilanz auch die eingesparten Aufwendungen einzustellen, die sich aus dem Wegfall eines andersartig gestalteten Rechens ergeben. Sofern für eine diesbezügliche Kalkulation beispielhaft ein konventionell angeordneter Rechen (Neigung zur Sohle 75°) mit einer lichten Stabweite von 20 mm (Rechteckprofil) zugrundegelegt wird, der mit Rechenreinigern, Spülrinne und Zentralhydraulik ausgestattet ist, ergeben sich für die Neubaustandorte Öblitz und Planena die in Tabelle 3 ausgewiesenen Einsparungen.

Ausgehend von den vorliegenden Kalkulationsergebnissen lassen sich die spezifischen, auf den Ausbaudurchfluss bezogenen Kosten für ein Leitreechen-Bypass-System in Abhängigkeit von der Bemessung überschlägig wie folgt angeben:

- 1) lichte Stabweite Leitreechen 10 mm, Normalgeschwindigkeit vor Leitreechen ca. 0,3 m/s: 18 000–25 000 Euro/(m³/s).
- 2) lichte Stabweite Leitreechen 20 mm, Normalgeschwindigkeit vor Leitreechen ca. 0,5 m/s: 14 000–18 000 Euro/(m³/s).

Die genannten Beträge, die keine Planungskosten beinhalten, sollten als vorläufige Werte aufgefasst werden, die mit fortschreitendem Kenntnisstand zu überprüfen und ggf. anzupassen sind.

Bei der wirtschaftlichen Beurteilung des Leitreechen-Bypass-Systems sind darüber hinaus folgende generelle Aspekte zu berücksichtigen:

- 1) Es fallen praktisch keine Treibgutentsorgungskosten an.
- 2) Die hydraulischen Verluste an einem Leitreechen mit horizontaler Stabausrichtung sind aufgrund der vergleichsweise geringen Strömungsumlenkung stets kleiner als die an einem Leitreechen mit vertikaler Stabausrichtung der gleichen Stabweite.
- 3) Da im Winterbetrieb eine Weiterleitung von Eisschollen entlang des Rechens im Regelfall möglich ist, sind eventuelle Betriebsunterbrechungen von vergleichsweise geringer Dauer.
- 4) Sofern die orthogonal auf den Rechen auftreffende Strömungskomponente (Normalgeschwindigkeit) als maßgebende Größe für die ingenieurbioökologische Bemessung eines Rechens verwendet wird, ist die resultierende Fläche eines Leitreechens nicht größer als die eines konventionellen

Rechens. Allerdings ist beim Leitreechen die zulässige Anströmgeschwindigkeit höher, so dass sich die erforderliche Querschnittsfläche des Einlaufkanals reduziert [2].

- 5) Durch die gemeinsame Nutzung der Wand zwischen Einlaufkanal und Fischaufstiegsanlage sowie zwischen Krafthaus und Bypass treten bei den Baukosten Synergieeffekte auf (siehe oben).

3.6 Biologische Wirksamkeit

Für die beiden hier vorgestellten Leitreechen-Bypass-Systeme liegen noch keine Untersuchungen zur biologischen Wirksamkeit vor. Aufgrund der gewählten Stabweite und Anströmbedingungen kann jedoch davon ausgegangen werden, dass für die Zielarten Aal und Lachs ein sehr hohes Schutzniveau bzw. ein vollständiger Schutz erreicht wird. Die diesbezüglich durchgeführten Prognoseberechnungen ergaben für Gelbaale, Blankaale und Lachssmolts eine turbinenbedingte Mortalitätsrate von jeweils <1 % (Abschnitt 3.2). Eine ähnlich geringe Sterblichkeit ist auch für potamodrome Arten mit vergleichbarer Körpergröße anzunehmen.

Durch Untersuchungen an anderen Standorten ist eine hohe biologische Wirksamkeit des Leitreechen-Bypass-Systems und von ähnlichen Systemen mit schräg angeströmtem Horizontalreechen dokumentiert, wobei detaillierte Befunde insbesondere für die diadromen Arten Aal und Lachs vorliegen. Die bislang 8 verfügbaren Datensätze belegen für diese Arten biologische Effizienzen von 83–100 % bei lichten Rechenstabweiten von 20–12 mm. Für andere Arten ergaben sich gleichfalls positive Befunde. Des Weiteren sind durch telemetrische Studien geringe Aufenthaltszeiten der abwandernden Individuen im Oberwasser nachgewiesen, die vorteilhafte verhaltensbiologische Wirkungen des Leitreechen-Bypass-Systems indizieren (Überblick in Ebel [12]).

An einem Standort ergaben sich jedoch praktische Probleme, da hier auf die Installation eines schachtartigen Bypasses mit Eintrittsprofil über die gesamte Höhe der Wassersäule verzichtet wurde. An den stattdessen ausgeführten Bypassen, die tunnelartige Eintrittsprofile besitzen, traten teilweise erhebliche Treibgutverlegungen auf, welche die Passage der durch den Leitreechen mit hoher Wirksamkeit geschützten Individuen in das Unterwasser beeinträchtigten [13], [14].

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die in vorliegender Arbeit dargestellten Erfahrungen zeigen, dass das Leitreechen-Bypass-System bei Wahl einer lichten Stabweite von 10 mm bis zu einem Durchfluss von etwa 50 m³/s pro Rechenfeld praktisch realisierbar ist. Damit ergibt sich für kleine und mittelgroße WKA die Möglichkeit, turbinenbedingte Fischschäden wirksam abzumindern bzw. völlig zu vermeiden. Eine Kombination des Leitreechen-Bypass-Systems mit überströmbaren, hochwasserneutralen Kraftwerken ist möglich.

Bei der Planung von Leitreechen-Bypass-Systemen sollten neben den ingenieurbioökologischen Bemessungs- und Gestaltungsregeln [2] verschiedene technische Aspekte berücksichtigt werden, um einen geringen Rechenverlust und eine effiziente

Rechenreinigung zu gewährleisten. Diesbezüglich empfiehlt es sich, strömungsgünstig ausgeformte, auf der Abströmseite fixierte Rechenstäbe in Kombination mit einem zahnartigen Rechenreiniger einzusetzen. Die hydraulischen Voraussetzungen für die Ausbildung geringer Verluſthöhen werden im Regelfall bei Einhaltung der biologischen Zielvorgaben für die Anströmgeschwindigkeit und den Anströmwinkel erfüllt. Um Geschiebeablagerungen vor der Sohlenleitwand dauerhaft auszuschließen, sollte der Rechenreiniger grundsätzlich mit einem Geschieberäumschild ausgestattet werden, das die gesamte Höhe der Sohlenleitwand erfasst.

Dank

Für die sachgerechte Konstruktion, Fertigung und Montage der beiden Leitrechen wird der Bernhard Maschinenbau GmbH & Co. KG, Unterammergau, und der Stahlbau-Metalltechnik Johann Heim GmbH, Hallstadt, vielmals gedankt. Herrn Erich Walter, Betreiber der WKA Freyburg, danken wir für zahlreiche Diskussionen und wertvolle Hinweise zur Planung dieser Anlage. Dank gilt nicht zuletzt dem Landesverwaltungsamt Sachsen-Anhalt, das die Anfertigung der vorliegenden Arbeit mit Mitteln aus der Fischereiabgabe des Landes Sachsen-Anhalt unterstützte (Projekträger: Landesfischereiverband Sachsen-Anhalt e. V.).

Autoren

Dr. Guntram Ebel

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

Dipl.-Ing. Martin Kehl

Wasserkraftanlage Öblitz GmbH & Co. KG
Pianoweg 12
06128 Halle (Saale)
info-wkaeoblitz@online.de

Dipl.-Hydr. Arne Gluch

Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt
Otto-von-Guericke-Straße 5
39104 Magdeburg
Arne.Gluch@lhw.mlu.sachsen-anhalt.de

Guntram Ebel, Martin Kehl and Arne Gluch

Advances in fish protection and downstream passage at hydropower stations – startup of pilot plants at Freyburg and Öblitz

For protecting fish at their downstream passage at European hydropower plants, operators increasingly use the angled bar rack bypass system of Ebel, Gluch and Kehl. The system can generate high biological efficiencies as well as operational and economic benefits. In 2014 and 2017, such a system was installed at two more hydropower plants with design flows of 26 m³/s and, respectively, 48 m³/s, whereby the racks have a clearance of 10 mm between the bars. The article presents the technical characteristics of these systems and looks at the experience gathered in their operation, and at investment costs.

Literatur

- [1] Ebel, G.; Gluch, A.; Kehl, M.: Einsatz des Leitrechen-Bypass-Systems nach Ebel, Gluch & Kehl an Wasserkraftanlagen – Grundlagen, Erfahrungen und Perspektiven. In: WasserWirtschaft 105 (2015), Heft 7/8, S. 44-50.
- [2] Ebel, G.: Fischschutz und Fischabstieg an Wasserkraftanlagen – Handbuch Rechen- und Bypasssysteme. Ingenieurbio-logische Grundlagen, Modellierung und Prognose, Bemessung und Gestaltung. In: Mitteilungen aus dem Büro für Gewässerökologie und Fischereibiologie (2018), Band 4, 3. A.
- [3] Gluch, A.: Kombierter Fisch- und Treibgutableiter für Wasserkraftanlagen. In: Wasser und Abfall 9 (2007), Heft 7/8, S. 38-43.
- [4] Gluch, A.: Leitrechen-Bypass-System Ebel, Gluch & Kehl (Praxisbeispiele WKA 0,05-2 MW). In: Fachtagung „Fischmigration und Fischschutzmaßnahmen“ des Forums „Fischschutz und Fischabstieg“ am 16.-17. Mai 2017, Dessau (<http://forum-fischschutz.de/sites/default/files/Gluch.pdf>; Aufruf: 08.07.2018).
- [5] Heiß, M.: 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, 2015.
- [6] Ebel, G.: Modellierung der Schwimmfähigkeit europäischer Fischarten – Zielgrößen für die hydraulische Bemessung von Fischschutzsystemen. In: WasserWirtschaft 104 (2014), Heft 7/8, S. 40-47.
- [7] Ebel, G.: Fischereibiologisches Gutachten zur Reaktivierung der Wasserkraftanlage Burgmühle Freyburg (Unstrut). Gutachten im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens, Halle (Saale), 2011 (unveröffentlicht).
- [8] Ebel, G.: Fischereibiologisches Gutachten zum Neubau der Wasserkraftanlage Öblitz (Saale). Gutachten im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens, Halle (Saale), 2009 (unveröffentlicht).
- [9] Kehl, M.: Technische Genehmigungsplanung zur Reaktivierung der Wasserkraftanlage Burgmühle Freyburg (Unstrut). Unterlagen zur Planfeststellung, Halle (Saale), 2011 (unveröffentlicht).
- [10] Kehl, M.: Technische Genehmigungsplanung zum Neubau der Wasserkraftanlage Öblitz (Saale). Unterlagen zur Planfeststellung, Halle (Saale), 2009 (unveröffentlicht).
- [11] Hassinger, R.: Neuartiger Fisch schonender Rechen für Wasserkraftanlagen. Forschungsbericht, Universität Kassel, 2009 (www.uni-kassel.de/fb14/vpuw/Download/FischSchonRechen/FischSchonRechen_080309.pdf; Aufruf: 08.07.2018).
- [12] Ebel, G.: Biologische Effizienz von Leitrechen-Bypass-Systemen – Internationaler Kenntnisstand. Mskr. in Vorb., 2018.
- [13] Engler, O.; Adam, B.: 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. Kirtorf-Wahlen, 2014.
- [14] Lehmann, B.; Adam, B.; Engler, O.; Hecht, V.; Schneider, K.: Ethohydraulische Untersuchungen zur Verbesserung des Fischschutzes an Wasserkraftanlagen. In: Naturschutz und Biologische Vielfalt (2016), Heft 151.

 SpringerProfessional.de

Leitrechen-Bypass-System 

Boes, R.; et al.: Fischschutz und Fischabstieg mittels vertikaler Leitrechen-Bypass-Systeme: Rechenverluste und Leiteffizienz. In: WasserWirtschaft, Ausgabe 7-8/2016. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016. www.springerprofessional.de/link/10603076

Ebel, G.; Gluch, A.; Kehl, M.: Einsatz des Leitrechen-Bypass-Systems nach Ebel, Gluch & Kehl an Wasserkraftanlagen — Grundlagen, Erfahrungen und Perspektiven. In: WasserWirtschaft, Ausgabe 7-8/2015. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015. www.springerprofessional.de/link/6109898