

ECOLOGICAL HYDROELECTRIC CONCEPT "SHAFT POWER PLANT"

A. Sepp

P. Rutschmann

Abstract: Am Lehrstuhl für Wasserbau der TU München wurde ein innovatives Wasserkraftkonzept „Schachtkraftwerk“ entwickelt, bei dem die gesamte Kraftwerkseinheit vollständig unter Wasser in einem Schacht angeordnet ist und die Triebwasserzuführung über eine horizontale Einlaufebene erfolgt. Das Anlagensystem benötigt nur ein geringes Bauwerksvolumen und verfügt insbesondere über ökologische Vorteile, weil im hydraulischen Design ein überzeugender Fischschutz und Fischabstieg integriert ist. Für größere Standorte wurde das System „Mehrschachtanlage“ konzipiert.

1 Motivation

Die grundlastfähige Wasserkraft ist in vielen Ländern eine tragende Säule der regenerativen Stromgewinnung und liefert einen wichtigen Beitrag zur gesicherten Bedarfsdeckung. In der Mehrzahl der Industrieländer ist allerdings das Wasserkraftpotential größtenteils ausgebaut und neue Wasserkraftanlagen müssen hohe Umweltauflagen erfüllen: Im deutschen Wasserhaushaltsgesetz (WHG) von 2010 wird der Schutz der Fischpopulation gefordert und mit § 35 (Wasserkraftnutzung) eine bindende Zulässigkeitsvoraussetzung vorgeschaltet was bedeutet, dass eine Erlaubnis oder Bewilligung nicht erteilt oder ein Plan nicht festgestellt oder genehmigt werden darf, falls die geforderten geeigneten Maßnahmen zum Schutz der Fischpopulation nicht ergriffen werden oder keinen Erfolg versprechen. Zum anderen ist dafür Sorge zu tragen, dass die Fische bei ihren Wanderbewegungen nicht in die Wasserkraftturbinen eingesogen und dadurch verletzt oder getötet werden [1]. Eine weitere Restriktion enthält die EU-Wasserrahmenrichtlinie durch das ökologische Verschlechterungsverbot, weshalb sich der Neubau von Laufwasserkraftanlagen weitgehend auf bestehende Wehrstandorte mit häufig schwierigen Randbedingungen beschränkt.

Eine Wasserkraftnutzung bei bestehenden Querbauwerken wird in konventioneller Technik meist in der klassischen Form eines Buchtenkraftwerkes umgesetzt, wobei systembedingt ein großer baulicher Aufwand mit erheblichen Ufereingriffen erforderlich ist. Da in der Regel im Vergleich zum Ist-Zustand keine größeren Wasserstandserhöhungen vorgenommen werden dürfen, entstehen bei den vielfach verlandeten Staubauwerken aufgrund der geringen Fließtiefen äußerst ungünstige Voraussetzungen für die Kraftwerksanströmung. Das Einlaufbauwerk muss deshalb so gestaltet und dimensioniert werden, dass der natürliche, breitangelegte Fließquerschnitt möglichst verlustarm in den kompakten Fließquerschnitt der

Buchtenstrecke umgelenkt wird. Zur Gewährleistung hydraulischer Mindestanforderungen sind deshalb im unmittelbaren Anströmbereich großflächige Sohleintiefungen vorzunehmen und bei geschiebeführenden Flüssen sind Vorbecken zur Geschiebeablagerung und Spülschleusen zur Weitergabe anzuordnen. Zugleich sind baulich und konstruktiv den Anforderungen des Fischschutzes Rechnung zu tragen, wobei insbesondere die Einhaltung max. Anströmgeschwindigkeiten in der Rechenebene mit funktionsfähigen Abwanderungswegen gewaltige Einlaufbauwerke erfordern.

Aufgrund dieser schwierigen Rahmenbedingungen sind für Deutschland und viele andere Länder mit konventioneller Kraftwerkstechnik die ökologischen Auflagen nur schwer erfüllbar und die Wirtschaftlichkeit insbesondere mit abnehmender Fallhöhe kaum zu erreichen. Die zentrale Herausforderung einer modernen und nachhaltigen Wasserkraftnutzung besteht also darin, praxistaugliche, effiziente und insbesondere ökologische Wasserkrafttechnik mit integriertem Fischschutz voranzubringen. Eine erfolgreiche Technologieentwicklung in diesem Sinne ist auch deshalb besonders erstrebenswert, weil man umweltgerechte Lösungen für die großen Wasserkraftpotentiale in den Entwicklungsländern zur Verfügung hätte.

An der Technischen Universität München (TUM) wurde das innovative Konzept „Schachtkraftwerk“ für eine kosteneffiziente und naturverträgliche Nutzung der Laufwasserkraft 2009 konzipiert und im Rahmen eines ZIM-Forschungsprojekts physikalisch untersucht. Seit 2013 steht in der Versuchsanstalt in Obernach eine Prototypanlage mit Naturverhältnissen für Forschungszwecke zur Verfügung.

Die zum Patent angemeldeten Anlagentypen „Schachtkraftwerk/ Mehrschachtanlagen“ eignen sich für den Neubaubereich und können auch in bestehende Querbauwerke integriert werden.

2 Wasserkraftkonzept Schachtkraftwerk

2.1 Funktionsbeschreibung

Der Grundgedanke des neuen Konzeptes „Schachtkraftwerk“ zielte darauf ab, die Kraftwerksanlage vollständig im Staubaubauwerk zu integrieren (Abb. 1), um eine klassische Triebwasserausleitung und -rückführung mit allen baulichen und ökologischen Nachteilen zu vermeiden.

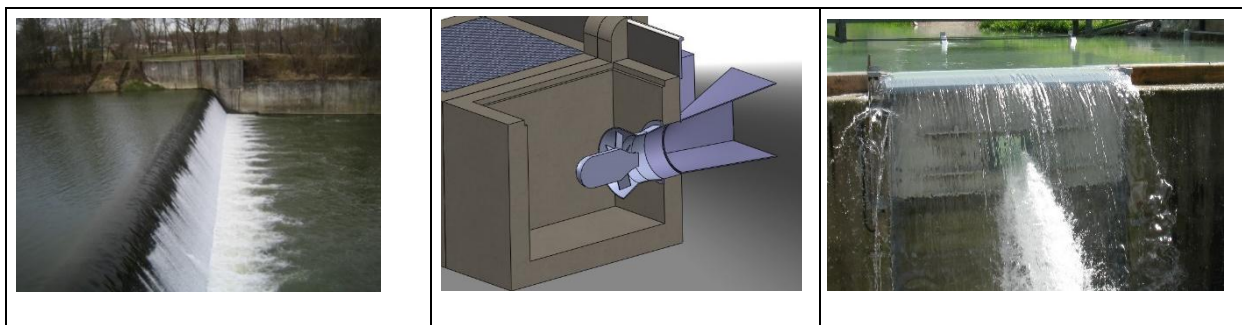


Abb. 1: Konzept „Schachtkraftwerk“ eingebaut in einem festen Wehrkörper

Der entwickelte Lösungsweg beinhaltet dabei die Anordnung einer horizontalen Einlaufebene in der Gewässersohle mit vollständiger maschineller Unterwasseranordnung in einer Schachtkammer, was durch die neue Technologie von Tauchturbinen ermöglicht werden kann. Der Kraftwerkszufluss wird durch den horizontal angeordneten Rechen mit abflussabhängiger Überdeckungshöhe der Turbine zugeführt. Die Anbindung an das Unterwasser erfolgt über das Saugrohr durch den Wehrkörper hindurch.

In den hydraulischen Überlegungen war angedacht, die erforderliche 90° Strömungsumlenkung durch eine groß dimensionierte Einlaufläche und durch eine permanente Überströmung eines stirnseitig angeordneten Verschlusses (reduziert die Wirbelbildung) zu kontrollieren (siehe Abb. 2). Mit diesen hydraulisch erforderlichen Einlaufkomponenten kann zugleich aus dem Einlaufbereich ein direkter und breitflächiger Abwanderungskorridor für den Fischabstieg zur Verfügung gestellt werden. Mit den weiteren Möglichkeiten der Verschlussstellung – Spaltöffnung zur Rechenreinigung und Vollabsenkung zur Treibholz- und Geschiebeabführung – sollten auch alle betrieblichen Funktionen abgedeckt werden können.

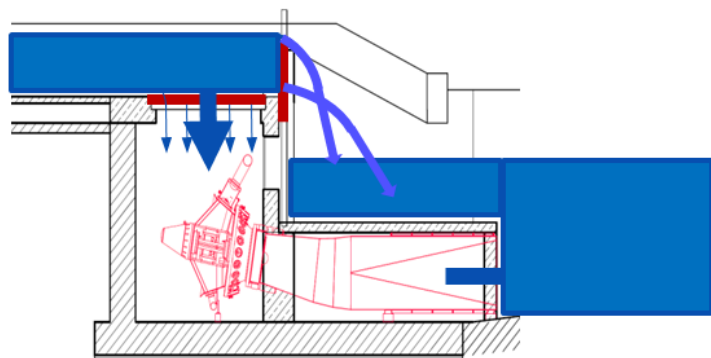


Abb. 2: Überströmte Verschlussstafel (li.) und Triebwasserweg mit KW-Längsschnitt (re.)

2.2 Untersuchungsergebnisse Kraftwerksmodell

Um die Funktionalität des beschriebenen Anlagenkonzeptes zu überprüfen, zu optimieren und hydraulische Kennlinien zu erstellen, wurden im Rahmen eines vom Zentralen Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM) geförderten Forschungsvorhabens von der TUM an der Versuchsanstalt Oberrach ein physikalisches Vollmodell aufgebaut (Bild 2). Das im März 2010 in Betrieb genommene Kraftwerksmodell konnte mit einem maximalem Turbinenabfluss von 200 l/s beaufschlagt werden. Bei einer Fallhöhe von 1,20 m lag der Leistungsbereich bei rund 2 kW. Durch den Einbau einer voll funktionsfähigen „Diveturbine“ der Firma Fella sowie der hydraulisch gesteuerten Verschlusseinrichtung konnten beliebige Strömungszustände unter Einhaltung der Ähnlichkeitsbedingungen untersucht und demonstriert werden. Die Bemessungsregeln des Anlagentyps wurden daraus entwickelt [2].

Die durchgeführten Versuche bestätigen überzeugend die prognostizierten hydraulischen und betrieblichen Abläufe, so dass die grundsätzliche Funktionalität

des Kraftwerkskonzeptes bereits abgesichert werden konnte. Zusammenfassend wurden folgende wesentliche Ergebnisse festgestellt:

Durch die horizontale Einlaufebene mit der erzwungenen Vertikalumlenkung des Triebwassers entsteht beim Übergang vom Freispiegel- zum Druckabfluss eine Wirbelbildung, deren Intensität primär von der Einlaufgeschwindigkeit und der Überdeckung (= Höhendifferenz zwischen Schachtüberlauf und Wehrkrone) abhängig ist und außerdem durch die Rechenstäbe grundsätzlich abgemindert wird. Bereits eine relativ geringe Verschlussüberströmung unterbindet die Entwicklung kritischer Wirbel auch bei geringen Fließtiefen. Die mit einer 3-D-ADV-Sonde durchgeführten Geschwindigkeitsmessungen bestätigen zudem, dass durch entsprechende Dimensionierung der Einlaufläche ($v < 0,5 \text{ m/s}$) und Überdeckung ein sehr homogenes Geschwindigkeitsprofil in der Rechenebene erzeugt werden kann, siehe Abb. 3.

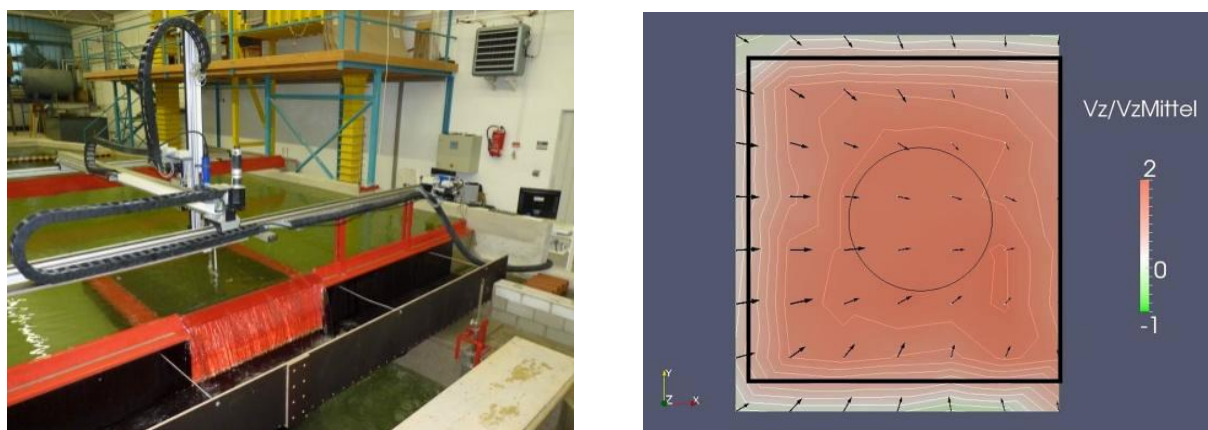


Abb. 3: Geschwindigkeitsmesseinrichtung im Modellkraftwerk (li.) mit dargestellter Geschwindigkeitsverteilung über dem horizontalen Rechenfeld

Mit der hydraulisch erforderlichen Verschlussanordnung lassen sich alle weiteren grundlegenden betrieblichen Funktionen abdecken:

Geschiebetransport und Treibholzanfall erfolgt normalerweise bei Hochwasserführung. Bei höherer Wasserführung wird die Verschlussstafel bis zur Einlaufläche mit dem Effekt abgefahren, dass sich über der Rechenebene eine Absenkungsfläche bildet und dadurch ausreichend große Schleppkräfte erzeugt werden, um den Einlaufbereich geschiebefrei zu halten (Bild 4). Sedimentanteile kleiner der lichten Rechenstabweite werden durch die Turbine in das Unterwasser abgegeben. Im Kraftwerksmodell konnten ein künstlich verlandeter Einlaufbereich und eine verfüllte Schachtkammer im Turbinenbetrieb vollständig entleert werden. Um das Einklemmen von Gesteinskörnern und Holzteilen zu verhindern, wird ein Rechenstabprofil verwendet, das sich nach unten verjüngt.

Durch die vollständige Unterwasseranordnung des Kraftwerks ist eine Rechenreinigungsanlage im Unterwasserbetrieb erforderlich. Im Modell wird eine Rechenreinigungsschiene mit Harke über den Rechen bewegt und durch temporäres Unterströmen der Verschlusseinrichtung das Rechenreinigungsgut direkt ins Unterwasser abgegeben (Bild 5). Um bei Betriebsstörungen und Revisionsarbeiten

eine rasche Zugänglichkeiten gewährleisten zu können, sind u. a. bewegliche, in der Schachtkammer eingebaute Dammtafeln eingeplant.



Abb. 4: Betriebszustände: KW-Betrieb (li.), Rechenreinigung (mi) Geschiebe- und HW-Spülung (re.)

2.3 Untersuchungsergebnisse Prototypanlage

Durch die vollständige Unterwasseranordnung des Kraftwerkstyps besteht für alle beweglichen Maschinenbauelemente ein besonders hoher Qualitätsanspruch. Um grundsätzlich auch die Praxisauglichkeit unter naturähnlichen Verhältnissen, d. h. verstärkte Treibholz- und Geschiebeführung erproben und aufzeigen zu können, wurde auf dem Freigelände der Versuchsanstalt Oberrach ein Prototypkraftwerk mit Technikgebäude für die Unterbringung der Steuerung Netzanbindung und Aggregate (siehe Abb. 5) errichtet und mit einer tauchbaren Kaplanmaschine (Laufdurchmesser 75 mm, 4 Laufschaufeln, 333 Upm) der Firma Geppert ausgestattet. Das Schachtkraftwerk ist für einen Ausbaubereich von 1,5 m³/s mit exakter Abflussmessung über eine entsprechend dimensionierte Rehbockmessrinne und für eine Fallhöhe von 2,5 m ausgelegt. Die 2 m x 2 m große Rechenfläche wurde von der Firma Muhr mit zwei Rechenfeldern (jeweils Sonderprofil, 20 mm lichte Rechenstabweite) ausgestattet, wobei verschiedene, vollständig unter Wasser arbeitende Rechenreinigungskonzepte entwickelt und erprobt wurden. Mit der komplett ausgestatteten doppelt regelbaren 35 kW Anlage konnten somit alle relevanten Betriebszustände (Rechenreinigung, Geschiebespülung, Wirkungsgradverläufe) untersucht und demonstriert werden. Ein wichtiger Forschungsschwerpunkt waren und sind Fischabstiegsuntersuchungen insbesondere mit Jungfischen.



Abb. 5: Prototypanlage mit Technikgebäude (li.), Überfallströmung mit Abstiegsfenster (re.)



Abb. 6: Turbineneinbau (li. U. mi.), Blick aus dem Schacht noch oben (re.)

Die betriebstechnischen Versuche konnten unter kontrollierten Laborbedingungen mit Simulation naturnaher Verhältnisse durchgeführt werden. Die besondere technische Herausforderung ist die Entwicklung einer zuverlässigen Rechenreinigungstechnik, weil systembedingt auch ein Geschiebetransport über das Rechenfeld erfolgt und die Technik deshalb so ausgestattet sein muss, dass hydraulisch nicht gespülte Bereiche im Einlauf mechanisch gereinigt werden können. Zusätzlich sind auch Treibholz und andere Feststoffe kontrolliert ins Unterwasser zu befördern. Das Anlagensystem ist außerdem für große Rechenflächen zu dimensionieren, wobei das Antriebssystem so auszulegen ist, dass statische Felddauflager berücksichtigt werden.

Die erprobten Rechenreinigungstechniken haben gezeigt, dass die Mechanik konstruktiv so auszuführen ist, dass systembedingt Ablagerungen von Geschiebeteilen im kompletten Reinigungsapparat vermieden werden können. In der Anlagentechnik und geometrischen Abstimmung muss deshalb in Fließrichtung immer eine Querschnittsaufweitung erfolgen, damit systembedingt kein Ablagern und Einklemmen von Feststoffen erfolgen kann. Diese Forderung ist auch für die geometrische Form der Rechenstäbe einzuhalten: Statt eines ausgerundeten, strömungsgünstigen Stabprofils muss ein T-förmiges Profil verwendet werden, damit ein Durchfallen von Feinkiesen und kleineren Feststoffen in die Schachtkammer möglich ist. Der Weitertransport wird über die Turbinenströmung gewährleistet, Geschiebeablagerungen in den Schachtecken sind unproblematisch, weil damit keine Strömungsverluste verursacht werden. Nach dem jetzigen Entwicklungsstand wird ein elektrisch angetriebener Reinigungsbalken zur Einsatzreife ausgeführt. Das System ist dabei so konzipiert, dass die gesamte Antriebstechnik geschützt im Schacht integriert ist, spezielle Führungs- und Gleitschienen einen exakten Bewegungsgleichlauf gewährleisten und durch Programmierung lastabhängig die Laufrichtung und Antriebsleistung variiert werden kann.

Die Konzeption des Schachtkraftwerkes wurde aus Effizienzgründen auf einfache geometrische Formen ausgerichtet werden, weil im Einlauf- und Zuströmbereich im Vergleich zu konventioneller Anlagentechnik deutlich geringere Strömungsgeschwindigkeiten vorliegen und systembedingt nur geringe hydraulische Verluste entstehen können. Erste durchgeführte Messungen zum Anlagenwirkungsgrad mit

Werten von 86 % bei Volllast und 88 % bei Teillast ($0,6 \cdot$ Ausbauabfluss) bestätigen überzeugend das gewählte hydraulische Einlaufkonzept. Da der Generator ebenfalls im Wasserkörper steht und dadurch optimal gekühlt wird, ergibt sich ein zusätzlicher positiver Wirkungsgardeinfluss.



Abb. 7: Geschiebespülung mit Unterstützung der Rechenreinigung

3 Fischschutz

Wie in Abschnitt 2.2 ausführlicher erläutert, erfordert der hydraulische Lösungsansatz „Schachtkraftwerk“ geringe Anströmungsgeschwindigkeiten in der Einlaufebene und zur Wirbelvermeidung ein feinmaschiges Rechenfeld sowie eine Oberflächenabströmung über die Verschlussstapel. In der Konzeptidee sollte dieser energetisch nicht nutzbare Abfluss (ca. 3 – 5 % von Q_T) auch dem Fischabstieg dienen und es wurden deshalb gezielt alle hydraulischen Einflussgrößen auf einen funktionsfähigen Fischschutz ausgelegt: Die horizontale Rechenfläche mit geringen Stababständen wird deshalb prioritär so dimensioniert, dass sich niedrige Strömungsgeschwindigkeiten mit homogener Verteilung einstellen. Die Maximalgeschwindigkeiten lassen sich der jeweiligen Fischpopulation und deren Schwimmvermögen anpassen. Der Abstieg sollte über spezielle Öffnungen (ein oder mehrere Abstiegsfenster in unterschiedlicher Anordnung, Abb. 2) im Verschluss, erfolgen, wodurch eine direkte Wasserverbindung mit dem Unterwasserkörper hergestellt wird. Um ein schadloses Eintauchen der Fische zu gewährleisten, ist ein Wasserpolster mit einer Mindesttiefe von 90 cm bzw. $\frac{1}{4}$ der Fallhöhe einzuhalten.

Die Wirkungen im System „Schachtkraftwerk“ zum Fischverhalten wurden 2011 (Fische größer lichter Rechenabstand) ohne Turbine aber mit exakter Einhaltung der Kraftwerksströmung und ab 2013 mit der vollständigen Prototypanlage untersucht. Weil alle hydraulischen und betriebstechnischen Abläufe ohne Maßstabeffekte zur Verfügung standen war unter kontrollierten Laborbedingungen mit naturnahen Verhältnissen eine Vergleichbarkeit verschiedener Konfigurationen untereinander gewährleistet. Die Untersuchungen lieferten nach Fischart, -größe und Versuchsanordnung (verschiedene Abstiegsfenster, variable Geschwindigkeiten) differenzierte Datensätze zu Fischverteilung und Schädigung, wobei sämtliche Wander- bzw. Abdriftereignisse vollständig erfasst wurden. [3] [4]. Die Untersuchungen waren generell von besonderem Interesse, weil man bisher für nach unten gerichtete Strömungsformen keine Verhaltensmuster kannte. Die mit Unterwasserkamera aufgenommen Bilder haben gezeigt, dass für alle untersuchten Arten die Fische über der Einlaufebene eine Schrägstellung (Abb. 8) einnehmen, praktisch kein Rechenkontakt festgestellt wurde und ein aktives Schwimmverhalten

gegen die gekrümmte Strömung eingenommen wird. Die geringen Stababstände am Rechen, die homogenen Geschwindigkeiten über dem Rechen und der im unmittelbaren Einlaufbereich angeordnete Fischabstieg ermöglichen den Fischen sich frei über dem Rechen zu bewegen und den vorgesehenen Fischabstieg (Fenster in der Verschlussstafel) zu finden.

Die Fischuntersuchungen haben gezeigt, dass das Konzept Schachtkraftwerk bezüglich der untersuchten Arten einen sehr guten Schutz für Fische größer der lichten Rechenstabweite bietet. Diese für die Reproduktion der Population besonders wichtigen Individuen sind vor einer Turbinenpassage vollumfänglich geschützt.



Abb. 8: Fischbewegung über der horizontalen Rechenebene (li. Aitel, mi. Barben, re. Jungfische)

Die Untersuchungen mit Fischen kleiner der lichten Rechenstabweite zeigten außerdem, dass der Rechen grundsätzlich als Verhaltensbarriere wirken kann und auch rechengängige Fische (2013. Anteil 51 – 86 %) über den sicheren Fischabstieg ins Unterwasser gelangen. Bei der Turbinenpassage gab es unterschiedliche Schädigungsraten: Bachforelle 6/16) Äsche(2/13)

Das Fischabstiegskonzept beinhaltet die Schaffung eines sicheren Abwanderungskorridors in das Unterwasser sowie die Einhaltung der Anströmgeschwindigkeiten in der Rechenebene $v_{max} < 0,5$ m/s damit sich die Fische frei über der Einlaufebene bewegen und sich aus eigener Kraft vom Rechenbereich entfernen können. Mit dem Schachtkonzept lässt sich aufgrund der horizontalen Einlaufebene die geforderte große Rechenfläche für moderate Fließgeschwindigkeiten ausschließlich durch die richtige Dimensionierung von Schachtgrundfläche und Überdeckung erzeugen. Somit können auch die für den Fischschutz notwendigen geringen Rechenstababstände von rund 2 cm ohne gravierende hydraulische Verluste umgesetzt werden. Der funktionsfähige

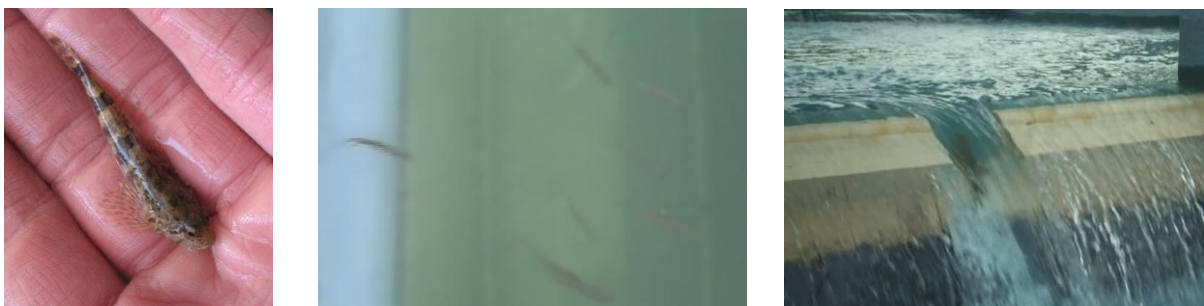


Abb. 9: Eingesetzte Koppe li, Kleinfische (mi.), Forelle (re.) beim Abstieg

Abwanderungskorridor erfolgt durch die hydraulisch notwendige Permanentüberströmung (Wirbelunterbindung) mit zusätzlichen Einkerbungen im

Kronenbereich. Aale, die sich bodennah bewegen und nur an wenigen Tagen im Herbst abwärts wandern, könnten durch temporäres Öffnen des integrierten, sohlbündigen Reinigungsverschlusses bzw. durch ein auf Recheniveau angeordnetes Abstiegsfenster, schadlos ins Unterwasser befördert werden.

Der Erfolg basiert dabei auf die gleichmäßige Geschwindigkeitsverteilung in der Rechenebene mit $v_m < 0,5$ m/s und einem direkt angeordneten Abstiegsfenster, das im Nahbereich eine spürbare und größere Abströmungskomponente aufweist als die Hauptströmung zur Turbine. Für fundierte Bemessungsvorschläge (Anzahl, Lage und Größe der Abstiegsfenster) wurden 2014 weitere Untersuchungen durchgeführt. Besonders vorteilhaft ist das System aufgrund der Einfachheit und Flexibilität. Die Bauwerksdimensionierungen können sehr leicht den standort- und damit artenspezifischen Verhältnissen angepasst werden, wobei auch eine temporäre Verschlusssteuerung die ökologische Durchgängigkeit erweitern kann.

Eine detaillierte statistische Analyse ist in Bearbeitung, um die Aussagefähigkeit im Einzelfall zu bewerten. Für umfassendere Aussagen sind weitere Versuche erforderlich, wobei zudem weitere Fischarten (z. B. Barbe, Elritze) eingesetzt werden sollen. Die bis dato durch Poolen der Datensätze abgeleiteten Beziehungen sind durch die zugrundeliegende Zusammensetzung des Fischensembles und der Versuchsvarianten beeinflusst und i. A. nicht ohne Weiteres auf Standorte übertragbar. Sie zeigen jedoch einige grundsätzliche Trends und veranschaulichen beispielhaft die quantitative Bestimmung der Abwanderungs- und Abdriftverteilung.

Die bisherigen Analysen zeigen statistisch signifikante Zusammenhänge, dass mit abnehmender Fischgröße bzw. mit zunehmender Fließgeschwindigkeit am Rechen derjenige Anteil der Fische ansteigt, die den Rechen und die Turbine passieren.

4 Mehrschachtkonzept

4.1 Grundsystem

Das technische Konzept „Schachtkraftwerk“ erfordert aufgrund der vollständigen Unterwasseranordnung den Einsatz von Tauchturbinen und ist deshalb leistungsmäßig begrenzt. Damit auch an Standorten mit größeren Abflüssen ein hoher Ausbaugrad möglich ist, kann eine Reihenanordnung mehrerer Einzelschächte vorgenommen werden, wodurch sich vorteilhafte ökologische Elemente integrieren lassen. So wurde für die Einbeziehung der aufwärts gerichteten Migration von Fischen und anderen Gewässerorganismen eine innovative Gesamtlösung entwickelt. Das „Mehrschachtkonzept“ zielt durch eine spezielle Anordnung der Anlagenteile auf eine optimierte Durchgängigkeit für aquatische Organismen ab.

Nach dem bisherigen Entwicklungsstand ist aus hydraulischen sowie betriebs- und turbinentechnischen Aspekten ein maximaler Abfluss pro Schacht mit 20 m³/s ausführbar. Für eine Wasserkraftnutzung an größeren Standorten sind also mehrere Schächte erforderlich, wobei eine bestmögliche Konzeption durch eine Aneinanderreihung von Einzelschächten in aufgelöster Blockanordnung erzielt wird. Damit können vorteilhafte betriebliche und konstruktive Elemente berücksichtigt und in ganz besonderem Maße wirkungsvolle ökologische Elemente eingebunden

werden, was in konventionellen Wasserkraftsystemen nicht mit der gleichen Wirkung umgesetzt werden kann.

Das Konzept „Mehrschachtanlage“ basiert auf dem Modul „Einzelschacht“ mit horizontaler Einlaufebene, Turbinen-Generatoreinheit in Unterwasseranordnung sowie beweglicher Verschlussebene mit Fischabstiegsfenstern. Durch diese Konstruktion erfüllt es eine Staukörper-, Abflusssteuerungs-, Energieumwandlungs- und Durchgängigkeitsfunktion.

Die Bauelemente erfüllen folgende Aufgaben:

- Schachtbauwerk = Staubauewerk: Durch die geometrische Abmessung und die konstruktive Einbindung der Schachtblöcke (Dichtwände vor und nach Bauwerkskörper) bilden die Schachtkammern einschließlich der Saugrohranbindung den Stützkörper.
- Verschlussorgan Schachtkraftwerk = Steuerungsorgan Wehranlage: Neben den Kraftwerksfunktionen (Abführung des Rechengutes bei Unterströmung im Reinigungsablauf, Permanentüberströmung zur Wirbelunterbindung) ist eine kontrollierte Wasserstands- und Abflusssteuerung sowie ein Fischabstieg durch eingebaute Abstiegsfenster mit direkter Verbindung einer Wasserströmung zwischen dem Oberwasser- und Unterwasserkörper gewährleistet.
- Auslaufbauwerk = Tosbecken: Wasser- bzw. Volumenkörper über dem Saugschlauch sowie der Rampenkörper nach dem Saugschlauchende und der Flusssohle dienen zugleich als Tosbecken und damit zur Energieumwandlung bei Hochwasserabfluss.

Das besondere wasserbauliche Element besteht in einem sogenannten „ökologischen Verbindungsgerinne“, das oberstromig zwischen den Schachtblöcken eingebunden ist und in Größe und Bauart unterschiedlich strukturiert werden kann. Bei großzügiger Gestaltung erfüllt das Gerinne mit stirnseitigen Öffnungen naturnahe Lebensräume mit vielfältiger Strömungsstruktur und kann somit außerdem als Ersatzhabitat fungieren, weil Mehrschachtanlagen auch abflussabhängige und somit dynamische Wasserstände zulassen.

Zusätzlich können auf beiden Uferseiten Fischaufstiegsanlagen angeordnet werden mit dem besonderen Vorteil, dass der Einstieg optimal an den Kraftwerksauslauf ausgerichtet werden kann, keine Sackgassenbereiche entstehen und über die gesamte Flussbreite leicht auffindbare Verbindungswege für alle Lebewesen im Fließgewässer zur Verfügung stehen, siehe Abb. 5 und 6.

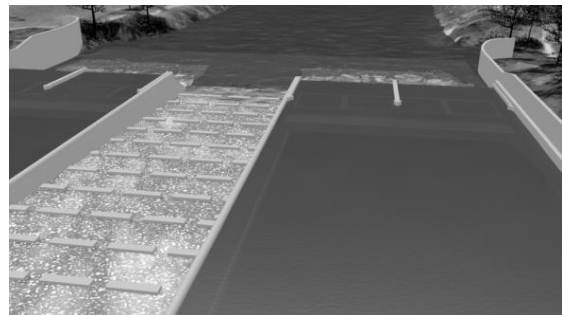
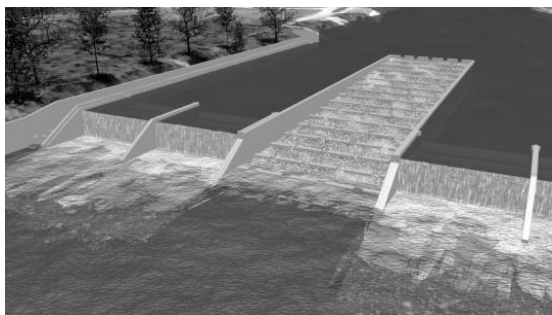


Abb. 5: Mehrschachtanlage: linkes Bild Blick von unterstrom, rechtes Bild Blick von Oberstrom

4.2 Bauwerksgestaltung und Anwendung

In der geometrischen und konstruktiven Konzeption vereinigt das Grundsystem „Mehrschachanlage“ einen kombinierten Wehr-Kraftwerkskörper, der bevorzugt senkrecht zur Hauptfließrichtung angeordnet wird und einen direkten Wasserweg zwischen Kraftwerkseinlauf und Unterwasser ermöglicht. Durch die Aneinanderreihung von Schächten zu Schachtblöcken mit einem eingebundenem ökologischem Verbindungsgerinne wird über die gesamte Flussbreite ein durchgehendes Staubauwerk mit integrierten Kraftwerkseinheiten (je Schacht eine Turbinen/Generatoreinheit) erstellt.

Mit der breitflächigen Verschlussausstattung kann eine abflussabhängige Wasserstandssteuerung für die Einhaltung minimaler Fließgeschwindigkeiten im Oberwasser nach ökologischen Vorgaben erzeugt werden. Bei Hochwasserabfluss wirkt das System als kombiniertes Wehr, weil die langen seitlichen Trennwände des Verbindungsgerinnes als feste, leistungsstarke Überläufe fungieren. Zu beachten ist, dass die bauliche Ausführung und Dimensionierung auf die komplexen Energieumwandlungsabläufe wegen unterschiedlicher Einstaugrade ausgerichtet werden muss.

Die Einbautiefe der Schächte bzw. die Überdeckung und die Fläche der horizontalen Einlaufebene richten sich in der Regel nach den entwickelten Bemessungsvorgaben für Strömungsgeschwindigkeiten und gegebenenfalls der Abflussleistung im abgesenkten Verschlusszustand. Die Tiefenanordnung des Saugschlauches ist so zu wählen, dass für den Fischabstieg das geforderte Mindestwasserpolster auch bei Niedrigwasserverhältnissen eingehalten wird.

Die maschinentechnische Ausstattung erlaubt aufgrund einer Mehrturbinenausstattung den Einsatz von unregelmäßig Tauchturbinen in horizontaler bis vertikaler Anordnung. Die Montage der Turbinen-Generatoreinheit erfolgt über einen Autokran, wobei eine Trennebene zum Saugschlauch vorzusehen ist.

Die Mehrschachanlagen sind im Wesentlichen mit der Betriebstechnik von Einzelschachanlagen auszustatten. Da bei Mehrschachanlagen allerdings nur eine einseitige Zuströmung vorliegt, muss zur Einhaltung der max. Fließgeschwindigkeit die Einlauffläche der horizontalen Rechenebene vergrößert werden. Diese gerichtete Zuströmung bietet allerdings den Vorteil, dass die Einläufe durch Trennpfeiler segmentiert und mit einseitigen Verschlusselementen abgesperrt werden können.

Das Konzept „Mehrschachanlage“ kann nur in einem vollständig neuen Bauwerk umgesetzt werden und ist beispielsweise als Ersatz für bestehende Querbauwerke in breiten Fließgewässern geeignet.

Eine weitere wichtige Anwendungsmöglichkeit liegt in flussbaulichen Sanierungsstrecken. Hier können geforderte wasserbauliche Effekte wie Stützfunktion zur Sohlstabilisierung und Grundwasseranhebung und zugleich eine regenerative Stromerzeugung erreicht werden. Durch die Kombination Wehr-Kraftwerkseinheit mit mehrwegigen Verbindungsgerinnen lässt sich der Anspruch an eine überzeugende Fließgewässerökologie mit Erhalt von Strömungs- und Geschiebedynamik erzielen und zugleich kann eine geforderte Abflusskapazität gewährleistet werden.

5 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Die Komplexität von Wasserkraftanlagen erschwert generell und allgemein einfache Bewertungen zu Angaben der Wirtschaftlichkeit und der Rentabilität, weil im Vergleich zu anderen Techniken meist mehrere Faktoren und Funktionen erfüllt oder berücksichtigt werden müssen. Eine Kostenangabe kann deshalb immer nur standortabhängig durchgeführt werden wobei neben den physikalischen Basiswerten Abflusssdargebot und Fallhöhe auch die Fragen nach der Bausubstanz, der bestehenden Wehrtechnik, der Zugänglichkeit, der Hochwasser- und Geschiebecharakteristik, der Infrastruktur und insbesondere der ökologischen Bedeutung Rechnung zu tragen ist. Unter Berücksichtigung gesamtgesellschaftlicher Kosten der Stromerzeugung.

6 Zusammenfassung

Das Konzept „Mehrschachtanlage“ nutzt das Prinzip „Einzelschacht“ in speziellen Anordnungen und mit Einbindung neuer Funktionskomponenten. Dadurch ist eine Nutzung an großen Wehrstandorten möglich. Die besondere Charakteristik besteht im „ökologischen Verbindungsgerinne“, das als naturähnliches Fließgerinne zwischen den Schachtblöcken integriert werden kann, wodurch optimale Durchgängigkeit und vorteilhafter Lebensraum entstehen. Das Kraftwerk kann in Modulbauweise errichtet werden. Die ökologische Vorrangstellung ergibt sich aus einem erforderlichen, energetisch nicht nutzbaren Sockelabfluss.

Durch den permanent überströmten, vollständig unter Wasser angeordneten kombinierten Wehr-Kraftwerkskörper lassen sich außerdem günstige bauliche und landschaftsästhetische Wirkungen erzielen.

Für größere Standorte wurde das System „Mehrschachtanlage“ konzipiert.

References

- [1] Reinhardt; Gieseke; Wiedemann; Czychowski; Verlag C.H. Beck, Kommentar zum WHG, 2010, München
- [2] Sepp A.; Geiger F.; Rutschmann P.; Barbier, J.; Cuchet, M.; Wasserkraft in vollständiger Unterwasseranordnung, DWA Energietage 2011, Kassel
- [3] Geiger, F.; Cuchet, M., Sepp, A.; Rutschmann, P. (2012). Fischverhaltensuntersuchungen am Schachtkraftwerk - Fischschutz und Fischabstieg an horizontalen Einlaufebenen, Wasserbausymposium 2012, Graz
- [4] Geiger, F.; Sepp, A.; Rutschmann, P. (2013). Prototypanlage Schachtkraftwerk – Konzept Mehrschachtanlage, Wasserbausymposium 2013, Zürich

Author(s)

Dipl.- Ing. Albert SEPP,
Technische Universität München
Versuchsanstalt Obernach und Lehrstuhl für Wasserbau und Wasserwirtschaft
D-82432 Walchensee, Versuchsanstalt Obernach
Phone: +49-8858-9203-28 FAX +49-08858-9203-33
E-mail: albert.sepp@tum.de

Prof. Dr. Peter RUTSCHMANN
Technische Universität München
Lehrstuhl für Wasserbau und Wasserwirtschaft
D-80333 München, Arcisstraße 21
Phone: +49-89-289-231-60 FAX +49-89-289-231-72
E-mail: peter.rutschmann@tum.de