

Dipl.-Ing. Manuela Winbeck, Amorbach

## Fischfreundliche Kraftwerksgestaltung mit drehzahlvariablen Turbinen

Mit der Einführung der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie sind Planer und Betreiber von Wasserkraftwerken aufgefordert, die Durchgängigkeit der Gewässer für migrierende Lebewesen auch im Bereich der Kraftwerke zu gewährleisten. Für stromabwärts wandernde Fische hängt die Qualität der Abstiegsmöglichkeit dabei wesentlich von den Rechensystemen ab. Ein fischfreundliches Rechensystem ermöglicht es den Fischen, einen verletzungsfreien Abstieg am Kraftwerk vorbei aufzufinden – beispielsweise über einen Bypass.

Durch den Einsatz einer fischfreundlichen Turbine ist eine sichere Kraftwerkspassage auch für die Fische möglich, die trotz des Feinrechens in die Turbine gelangen. Kriterien für fischfreundliche Turbinen sind bei-

spielsweise ein geringes Einklemmrisiko durch Spalte sowie geringe Kollisionsgeschwindigkeiten und -wahrscheinlichkeiten. Insbesondere werden diese Kriterien von drehzahlvariablen Propellerturbinen mit festen Laufradschaufeln erfüllt. Zum Nachweis der Fischfreundlichkeit drehzahlvariabler Turbinen hat die bayerische DIVE Turbinen GmbH & Co. KG aus Amorbach im Juni 2016 daher erste Freilandversuche durchgeführt.

### Die fischfreundliche Turbine

Die DIVE-Turbine ist ein Turbinensystem für Wasserkraftanlagen mit Fallhöhen von 2 bis 25 m und Leistungen von bis zu 2 Megawatt pro Turbine. Der Generator befindet sich in der Turbinenkammer direkt über dem Leit-



Abb. 1: Im Hintergrund ein Wasserkraftwerk an der Ariège im Osten der Pyrenäen, an der die ersten Freilanduntersuchungen zur Fischverträglichkeit der drehzahlvariablen DIVE-Turbine durchgeführt wurden.

apparat und ist getriebefrei mit dem Laufrad verbunden. Zur Anpassung an unterschiedliche Wassermengen ist die Turbine doppelt reguliert: Durch einstellbare Leitschaufeln und Anpassung der Drehzahl ist für alle Betriebspunkte ein hoher Wirkungsgrad gegeben.

Jedoch ist nicht nur die hohe Effizienz der DIVE-Turbine ein wichtiges Kriterium, auch im Hinblick auf Ökologie bringt sie erhebliche Vorteile mit sich.

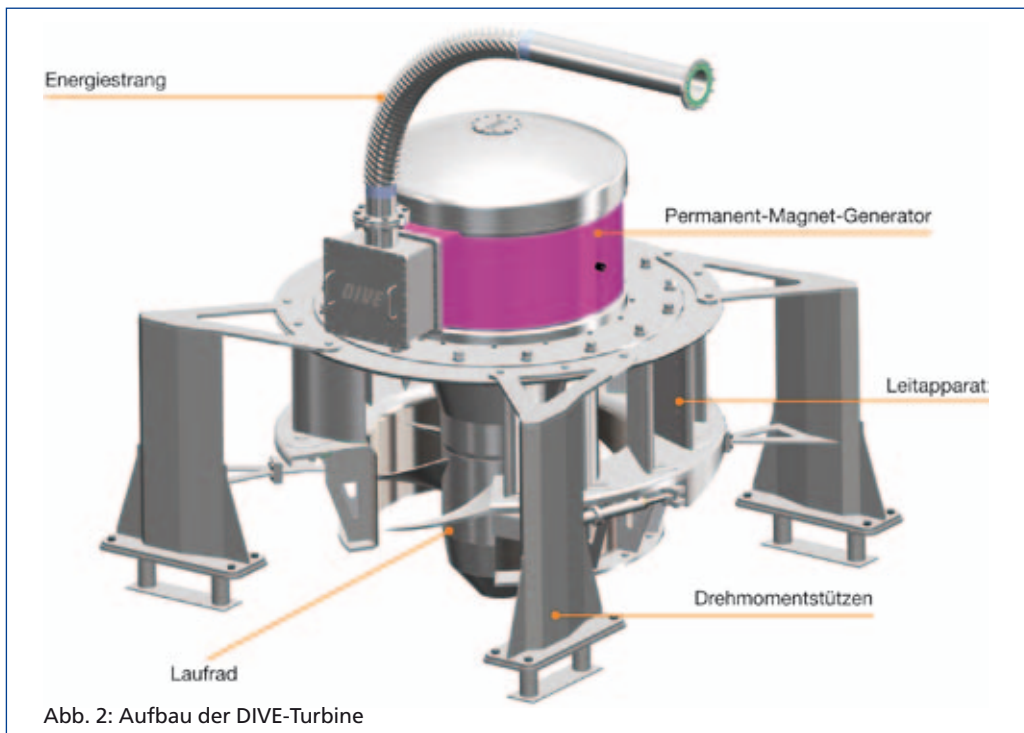
Obwohl die Qualität der Kraftwerkspassage für stromabwärts wandernde Fische in erster Linie wesentlich von den Rechensystemen abhängt, ist durch den Einsatz einer fischfreundlichen Turbine eine sichere Kraftwerkspassage auch für die Lebewesen möglich, die trotz des Feinrechens in die Turbine gelangen.

Die Vorzüge dieser Turbine im Hinblick auf Fischfreundlichkeit sind:

- drehzahlvariabler Betrieb (Drehzahl direkt proportional zum Durchfluss)  
→ Laufradschaufeln bleiben geöffnet: geringe Kollisionswahrscheinlichkeit und -geschwindigkeit, geringe Scherspannungen,

- kein Spalt zwischen Laufradschaufeln und Laufradnabe (feste Laufradschaufeln)  
→ kein Einklemmrisiko,
- geringer Spalt zwischen Laufradschaufeln und Turbinenkessel  
→ kein Einklemmrisiko,
- reduzierte Geschwindigkeiten aufgrund großzügiger Dimensionierung  
→ geringe Kollisionsgeschwindigkeit, keine Kavitation,
- großer Abstand zwischen Leitapparat und Laufrad  
→ kein Einklemmrisiko,
- feste Laufradschaufeln  
→ da es keine aufwändige Verstellmechanik zur Anpassung des Laufradschaufelwinkels gibt, kann die Anzahl der Laufradschaufeln einfach auf bis zu drei Schaufeln reduziert werden, um die Kollisionswahrscheinlichkeit zu minimieren.

Aufgrund dieser Eigenschaften ist die Mortalitätsrate von Fischen, die über die DIVE-Turbine absteigen, im Vergleich zu klassischen Kaplan-Turbinen minimiert. Dies lässt sich zum einen anhand von Berechnungen,



zum anderen an Freilandstudien nachweisen. Da die Berechnungsmodelle zur turbinenbedingten Mortalität auf Freilandstudien an Kaplan-Turbinen basieren, können die Ergebnisse nur einen Anhaltswert für drehzahlvariable Turbinen geben. Die entscheidenden Vorteile – wie stets geöffnete Schaufeln und spaltfreies Laufrad – fließen nicht in die Berechnungen ein. Deshalb hat die bayerische DIVE Turbinen GmbH & Co. KG im Juni 2016 die erste Freilandstudie durchgeführt.

### Berechnungsmodelle für Turbinen

Um die turbinenbedingte Mortalität einer Axialturbine abschätzen zu können, können Berechnungsmodelle verwendet werden, die auf Freilandstudien an Kaplan-Turbinen basieren.

Das Diagramm Abb. 3 basiert auf einer Berechnung für Salmonidensmolts mit einer mittleren Totallänge von TL = 21,5 cm.

Im Vergleich zur turbinenbedingten Mortali-

tät der Kaplan-Turbine bleibt die berechnete Mortalität der DIVE-Turbine über dem gesamten Betriebsspektrum konstant, weil sich die Drehzahl dem Durchfluss anpasst. Da die Kollisionswahrscheinlichkeit mit sinkender Drehzahl theoretisch abnehmen sollte, sollte auch die Mortalitätsrate sinken. Da jedoch die verwendeten Formeln für die DIVE-Turbine auf Experimenten an Kaplan-Turbinen basieren, wird dieser Effekt kompensiert. Deshalb bleibt die theoretische Mortalitätsrate der Turbine bei der Anwendung der Formeln für Kaplan-Turbinen konstant. Bei der Kaplan-Turbine steigt die Mortalitätsrate mit abnehmendem Durchfluss an, da die Drehzahl konstant bleibt und die Laufradschaufeln sich schließen (steigende Kollisionswahrscheinlichkeit).

Obwohl die Berechnungen über das gesamte Betriebsspektrum für die drehzahlvariable Turbine eine wesentlich niedrigere Mortalitätsrate als für die drehzahlfeste Kaplan-Turbine anzeigen, ist anzunehmen, dass die Mortalitätsrate der DIVE-Turbine in der Realität noch deutlich niedriger ist. Diese Annahme basiert auf der Tatsache, dass die Be-

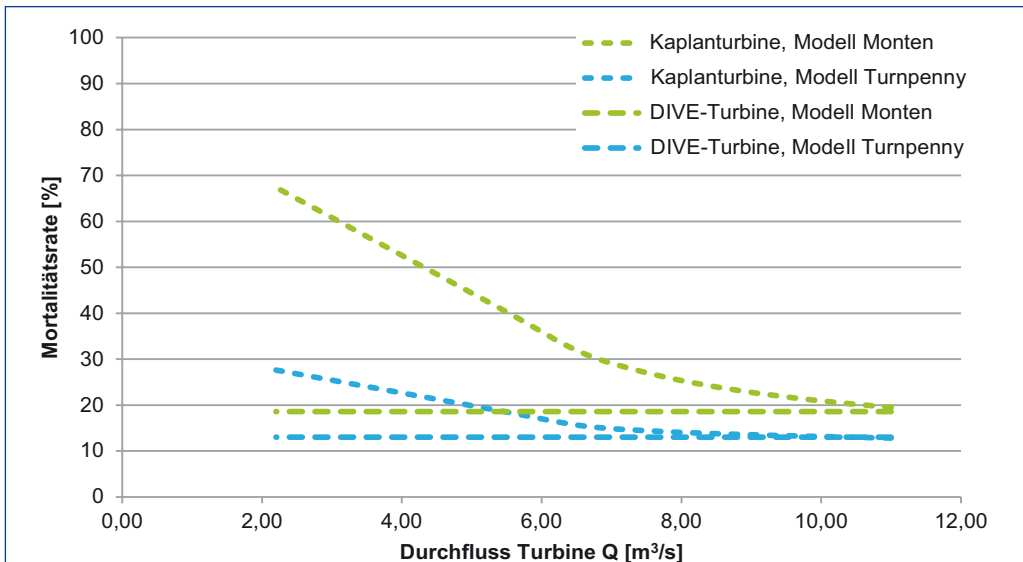


Abb. 3: Vergleich der berechneten turbinenbedingten Mortalitätsraten für eine drehzahlvariable DIVE-Turbine und eine drehzahlfeste Kaplan-Turbine, beide mit 1600 mm Laufraddurchmesser und drei Laufradschaufeln. Die maximale Totallänge der Fische ist TL = 21,5 cm. Dies entspricht einem Rechensystem mit 21,5 mm lichter Stabweite. Es gilt zu beachten, dass sich die Berechnung nur auf die turbinenbedingte Mortalität bezieht. Diese gilt nur für die Fische, die trotz des Feinrechens in die Turbinenkammer geraten. Die Mortalitätsrate für das gesamte Kraftwerk ist wesentlich niedriger, da der Großteil der Fische und alle größeren Fische nicht über die Turbinenkammer absteigen und somit das Kraftwerk unbeschadet passieren.

rechnungsmodelle auf Basis von Freilandversuchen an Kaplan-Turbinen entwickelt wurden. In den Berechnungsmodellen können nur geometrische und strömungstechnische Parameter variiert werden – konstruktive Eigenschaften wie Spalte und Laufradschaufelwinkel sind in den Modellen nur implizit enthalten und können daher für die Berechnung mit drehzahlvariablen Turbinen nicht eliminiert werden.

Daher sind die Werte für die Mortalitätsprognosen der drehzahlvariablen DIVE-Turbine sehr konservativ.

## Erste Freilandversuche an drehzahlvariablen Turbinen

Im Juni 2016 wurde die erste Freilandstudie an der Turbine durchgeführt.

Die Tests wurden von einem Tierarzt sowie von der französischen Wasserschutzbehörde ONEMA begleitet. Nachweise zur turbinenbedingten Mortalität sollten normalerweise für Salmonidensmolts und Aale geführt werden, da diese Fischarten bei ihrer Wande-

rung eine Vielzahl an Kraftwerken passieren. Da die Verfügbarkeit von Salmonidensmolts je nach Region und Jahreszeit schwankt, wurden Regenbogenforellen verwendet, da sie ähnliche Schwimmeigenschaften haben.

## Turbinenparameter

Die Turbinenparameter sind der Abb. 5 und der Tabelle 1 zu entnehmen.

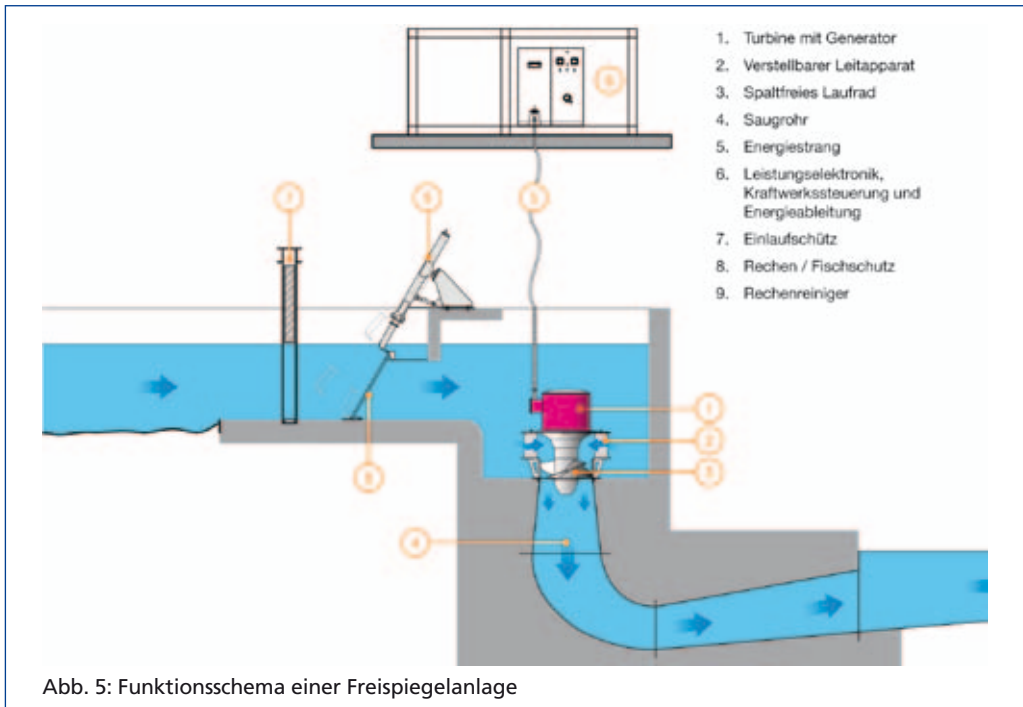
**Tabelle 1: Turbinenparameter**

Parameter	DIVE 1600-540
Regelung	doppelt
1. Regelung	Leitapparat
2. Regelung	drehzahlvariabel
max. Durchfluss $Q_{\max}$ m <sup>3</sup> /s	11,00
Drehzahlspektrum, min <sup>-1</sup>	50–255
max. Leistung, kW	540
Anzahl der Laufschaufeln	5
Laufreddurchmesser, mm	1600



Abb. 4: Das Kraftwerk Crampagna, an dem die ersten Praxistests zur Feststellung der Fischmortalität an der Turbine durchgeführt wurden





### Versuchsparameter

Die Größe der Regenbogenforellen lag zwischen 18 und 25 cm.

Da die DIVE-Turbine drehzahlvariabel ist, wurden die Tests für drei verschiedene Drehzahlen durchgeführt:

– 150 min<sup>-1</sup>

– 200 min<sup>-1</sup>

– 250 min<sup>-1</sup>

Bei jeder Drehzahl wurden je 100 Forellen in die Turbine geleitet und mit einem Netz am

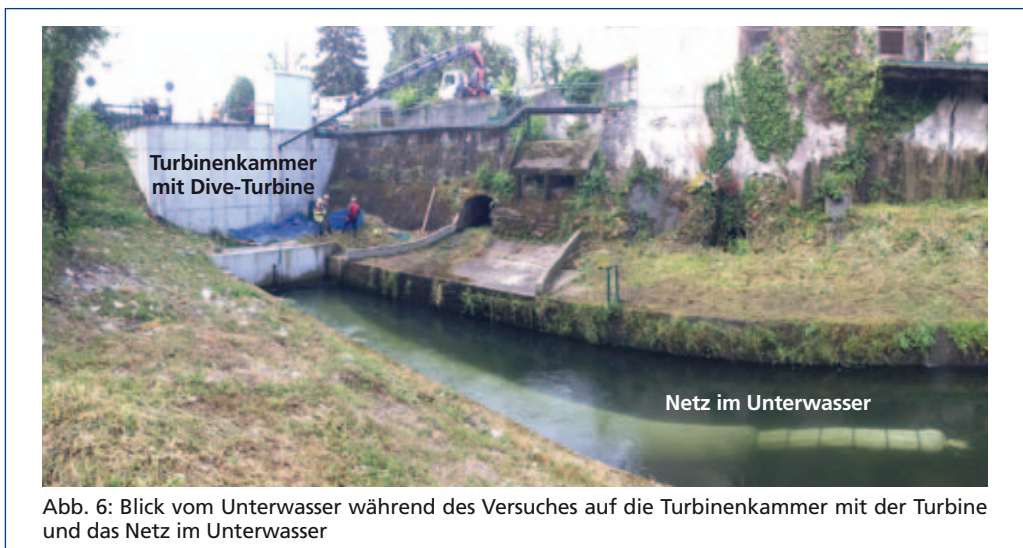




Abb. 7: Freilanduntersuchungen: Die Turbinenkammer befindet sich links im Bild. Der Hamen, in dem die Forellen nach der Turbinenpassage wieder gefangen werden, wird per Kran hinter das Saugrohr platziert.



Abb. 8: Versuchsaufbau der ersten Freilanduntersuchungen. Die Forellen wurden direkt in den Leitapparat der Turbine eingebracht. Nach der Turbinenpassage wurden die Forellen hinter dem Saugrohr in einem Netz aufgefangen und zur Untersuchung in ein Hälterungsbecken eingebracht.

Saugrohrausgang wieder gefangen. Nach einer ersten Untersuchung durch den Tierarzt wurden die Fische 48 Stunden lang gehalten, um eventuell auftretende Langzeitschäden festzustellen. Darüber hinaus wurde eine Kontrollgruppe direkt in das Netz eingebracht, um stressbedingte Reaktionen und Einflüsse des Fangnetzes von turbinenbedingten Schäden unterscheiden zu können.

48 Stunden später tierärztlich untersucht, um innere Verletzungen oder Langzeitschäden in die Betrachtung der einfließen zu lassen. Für die höchste der drei Drehzahlen ( $250 \text{ min}^{-1}$ ) wurde eine turbinenbedingte Schädigung von 15% ermittelt, während für die Teillastpunkte ( $200 \text{ min}^{-1}$  und  $150 \text{ min}^{-1}$ ) die Mortalität zwischen lediglich 1 und 2% lag. Dieses Ergebnis zeigt, dass die Mortalität der DIVE-Turbine im Volllastpunkt weit unterhalb der Mortalität einer Kaplan-Turbine der gleichen Baugröße liegt ( $M_{\text{Kaplan}} > 30\%$ ). In Kombination einer Turbine dieser Bauart mit einem fischfreundlichen Rechen-system lässt sich die Mortalität der Gesamtanlage damit bei Volllast auf 2,6% und bei Teillast auf <1% senken. Abhängig von der anlagenspezifischen Abflusskurve ergibt sich eine durchschnittliche Gesamtmortalität des Kraftwerks von <1%!

**Tabelle 2: Testparameter**

Größe der Forellen, cm	18–25		
Anzahl der Forellen	100	100	100
Drehzahl, $\text{min}^{-1}$	150	200	250

### Testergebnis

Zur Feststellung der turbinenbedingten Mortalitätsrate wurden die Fische sowohl unmittelbar nach der Turbinenpassage als auch

Darüber hinaus ist es möglich, eine DIVE-Turbine der gleichen Größe und Leistung mit

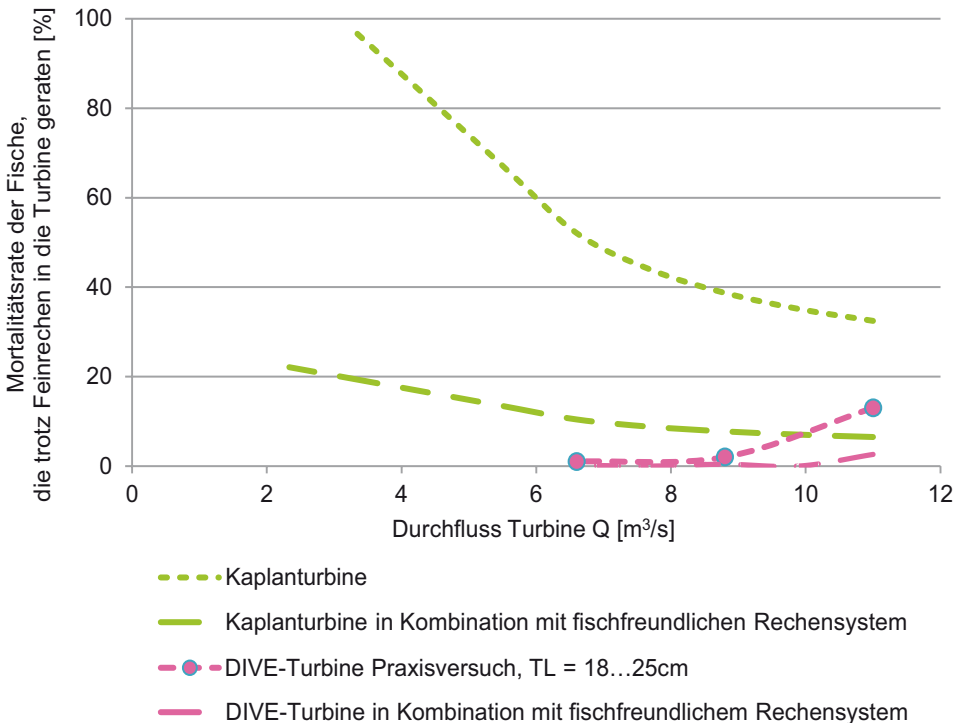


Abb. 9: Darstellung der turbinenbedingten Mortalität für eine Kaplan-Turbine und eine DIVE-Turbine. Die Werte für die DIVE-Turbine stammen aus Praxistests im Juni 2016. In Kombination mit einem fischfreundlichen Rechen-system lässt sich die durchschnittliche Gesamtmortalität eines Kraftwerks auf <1% senken.

drei statt fünf Laufradschaufeln auszuführen. Dadurch lässt sich die Kollisionswahrscheinlichkeit und damit die Schädigungsrate noch weiter reduzieren.

### Fischfreundliche Kraftwerks- passage – Rechensysteme

Das Ziel fischfreundlicher Rechensysteme ist es, dafür zu sorgen, dass der Großteil der abstiegswilligen Fische am Kraftwerk vorbei geleitet wird, ohne in die Turbinenkammer zu geraten. Dafür gibt es bewährte und innovative Konzepte:

Der vertikal flach angestellte Schrägrehen (Abb. 10) mit oberflächen- und/oder sohlnahen Abstiegsöffnungen wird bei Modernisierungen und Neubauten im französischen Raum oft eingesetzt. Größe, Anordnung und Anzahl der Abstiegsöffnungen werden dabei abhängig vom lokalen Fischbestand definiert.

Ein weiteres Konzept verfolgt das Leitreechen-Bypass-System (Abb. 11) von Ebel, Gluch & Kehl, das beispielsweise an der Wasserkraftanlage Halle-Planena zum Einsatz kommt. Ein Rechenfeld aus horizontalen Stäben ist horizontal gegen die Strömung geneigt und leitet die Fische an den Stäben entlang zu einer Klappe mit oberflächen- und/oder sohlnahen Abstiegsöffnungen, die bei Rechenreinigungsvorgängen zugleich zur Spülung genutzt wird.

Ein weiteres fischfreundliches Abstiegs-konzept lässt sich durch ein Schachtkraftwerk (Abb. 12) realisieren. Bei dem Prinzip des Schachtkraftwerkes liegt der Rechen flach auf oder parallel zur Flusssohle. Der Fischabstieg erfolgt über eine Wehrklappe mit Abstiegsöffnungen, die sich hinter dem Kraftwerk befindet.

In Kombination einer DIVE-Turbine mit einem dieser fischfreundlichen Rechensysteme lässt sich die durchschnittliche Gesamt-mortalität des Kraftwerkes auf <1% senken.

### Fazit: Ökologie und Wasser- kraft, ein Widerspruch?

Die ökologische Gestaltung von Wasserkraftanlagen ist durch Kombination eines fischfreundlichen Rechensystems mit einer fischfreundlichen Turbine erfolgreich möglich. Während fischfreundliche Rechensysteme

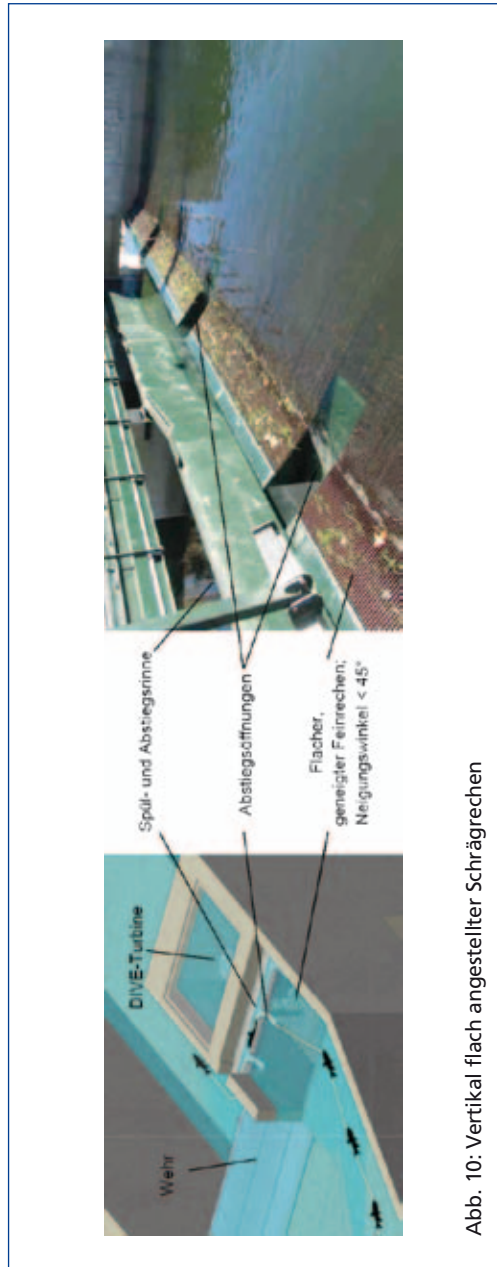


Abb. 10: Vertikal flach angestellter Schrägrehen

bereits erforscht sind, wurde die Fischfreundlichkeit von drehzahlvariablen Propellerturbinen in einem Praxisversuch an einer DIVE-Turbine nachgewiesen.

Aufgrund ihrer kompakten, überspülten Bauweise können die Turbinen einfach in bestehende Wehranlagen, Bauwerke oder als



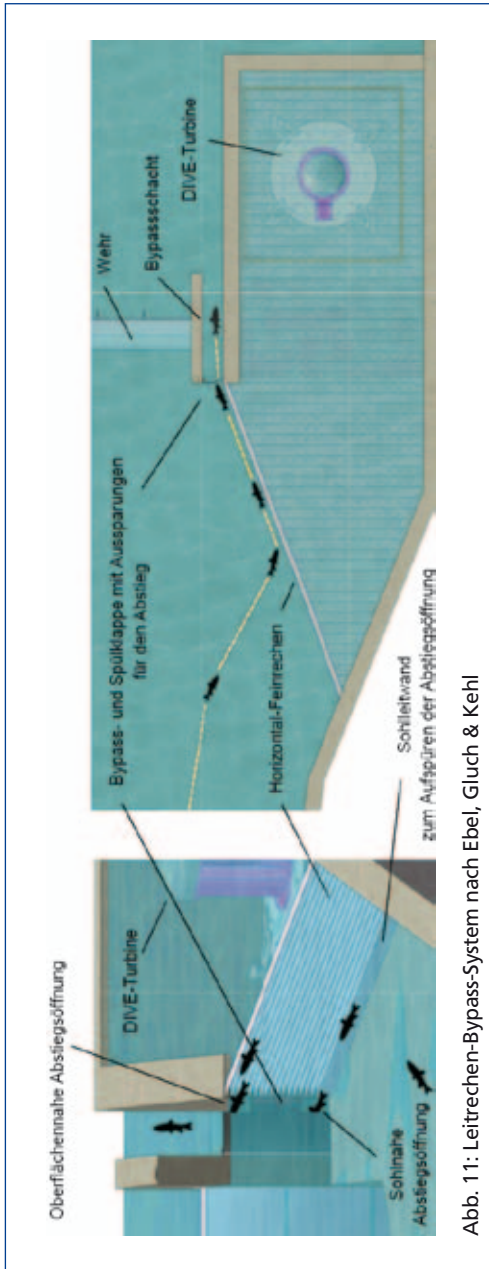


Abb. 11: Leitreechen-Bypass-System nach Ebel, Gluch & Kehl

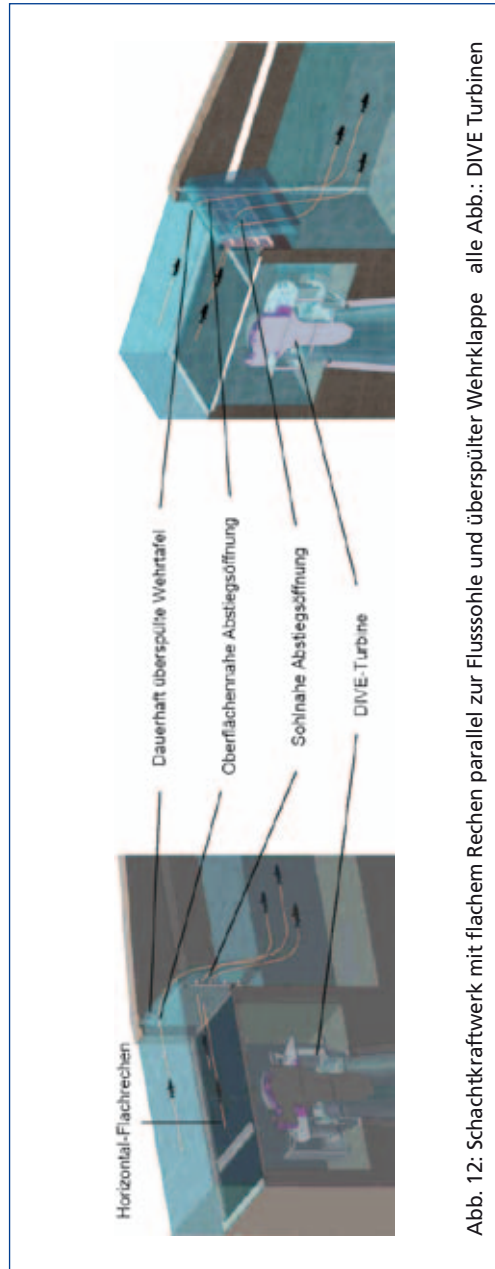


Abb. 12: Schachtkraftwerk mit flachem Rechen parallel zur Flusssohle und überspülter Wehrklappe alle Abb.: DIVE Turbinen

Ersatz alter Turbinen in bestehende Kraftwerke integriert werden. Neben der Fischfreundlichkeit bringt die Eigenschaft der Drehzahlvariabilität auch in Bezug auf Lärm und Vibrationen Vorteile mit sich: Aufgrund der direkten Verbindung von Turbine und Generator sowie nur einer zentralen Lager-einheit ist die Anzahl der rotierenden Bau-

teile minimal. Als komplett überspülte Einheit und mit nur einer Schnittstelle zum Bauwerk sind Lärm oder Vibrationen rund um das Wasserkraftwerk kein Thema. Damit ist auch der praktische Nachweis erbracht, dass Wasserkraft und Ökologie Hand in Hand gehen und zu einer effizienten und nachhaltigen Energieversorgung beitragen können.