Dipl.-Wi.-Ing. Christian Winkler und Dipl.-Ing. Manuela Winbeck, Amorbach

DIVE-Turbine: elegante Turbinenlösung zur ökologischen Aufwertung von Wasserkraftanlagen

Die Herstellung eines guten ökologischen Zustandes der Gewässer ist oberstes Ziel der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie. Daher wird es in den nächsten Jahren erforderlich sein, bestehende Wasserkraftanlagen dem aktuellen Stand der Technik zum Thema Fischschutz anzupassen.

Die DIVE-Turbine ist aufgrund ihrer Bauweise von Haus aus um ein Vielfaches fischschonender als Kaplan- oder Rohrturbinen. Vor allem in Teillast kann sie mit maximal geöffneten Schaufeln bei reduzierter Drehzahl punkten, wo Kaplan-Turbinen mit geschlossenen Schaufeln bei voller Drehzahl zum Risiko für Fische werden.

Die Besonderheit der fischschonenden DIVE-Turbine besteht darin, dass sie auch maschinenbautechnisch und hydraulisch ein High-Tech-Produkt ist. Hohe Wirkungsgrade und niedrige Betriebskosten machen sie auch betriebswirtschaftlich konkurrenzfähig zu marktüblichen Kaplan-Turbinen.

Historie

Der ursprüngliche Gedanke zur Entwicklung der DIVE-Turbine war es, neue Entwicklungen auf dem Gebiet der Elektrotechnik mit den seit Viktor Kaplan gewonnenen Erkenntnissen der Turbinenhydraulik zu verbinden: Die mechanisch aufwendige Regulierung der Kaplan-Turbine wurde durch eine elektronische Regelung ersetzt. Anstelle verstellbarer Schaufeln am rotierenden Laufrad wird die Geschwindigkeit des Laufrades an die schwankenden Wassermengen angepasst. Die Laufradschaufeln sind fest mit der Nabe verbunden. Dadurch entfällt die gesamte rotierende Verstellmechanik der Kaplan-Turbine. Dies hat Auswirkungen auf die Lagerung, Schwingungen und Wartungsintensität der Turbine. Außerdem konnte ein patentiertes Dichtkonzept entwickelt werden, mit dem ein dauerhafter Unterwasserbetrieb der gesamten Turbine-Generator-Einheit ermöglicht wurde.

Abb. 1: DIVE-Wasserkraftwerk in Frankreich mit 900 kW

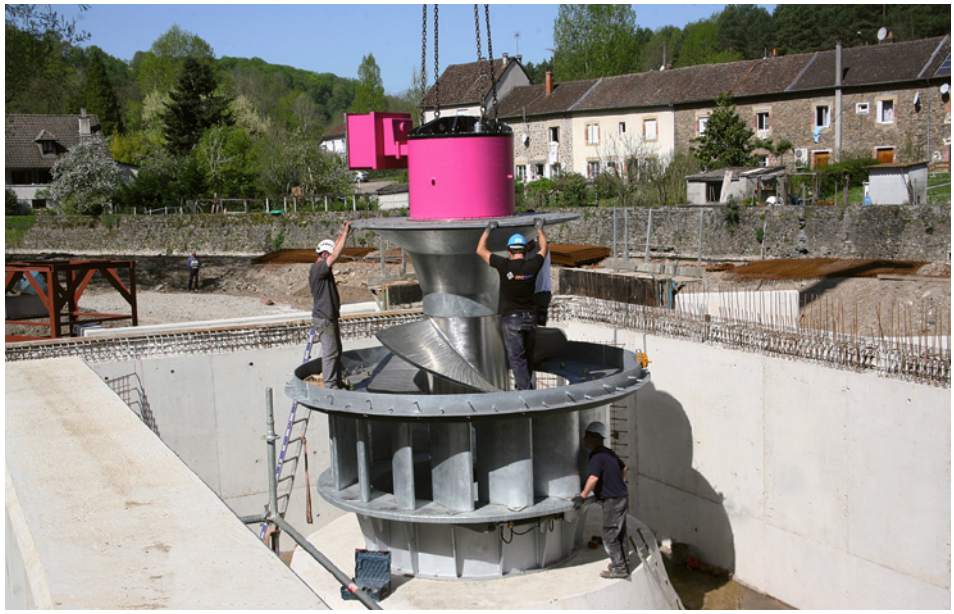


Abb. 2: Einbau einer fischverträglichen DIVE-Turbine in Frankreich, 2019

Trotz der schwierigen Bedingungen auf dem Markt der Kleinwasserkraft konnte sich die DIVE-Turbine weltweit etablieren: Seit der Inbetriebnahme des Prototypen im Jahr 2006 sind weltweit über 40 DIVE-Turbinen mit bis zu 2 MW Leistung an das Netz gegangen und seither im Dauerbetrieb.

Funktionsprinzip

Die Laufradschaufeln der DIVE-Turbine sind fest mit der Nabe verbunden, die Leitschaufeln verstellbar (1. Regulierung). Über dem Leitapparat befindet sich der Permanentmagnet-Generator. Dieser ist direkt mit der Turbinenwelle verbunden. Zur Wirkungsgradanpassung bei schwankenden Wassermengen wird die Drehzahl angepasst (2. Regulierung).

Von dem Generator gelangt der generierte Wechselstrom in einen Umrichter, wo er in Gleichstrom gewandelt wird. In einem zweiten Umrichter wird der Strom anschließend

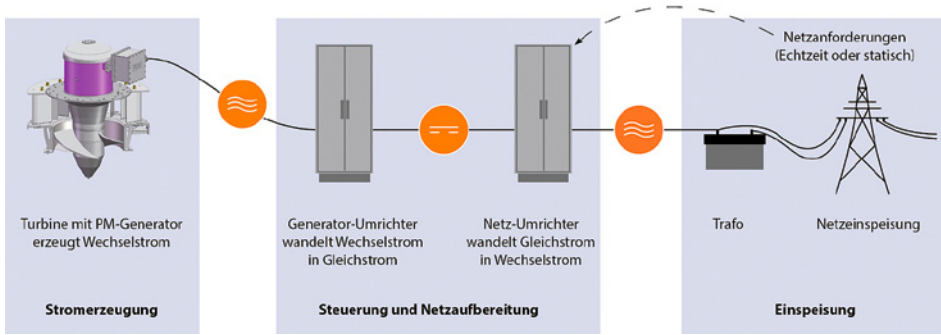


Abb. 3: Regelung der DIVE-Turbine mit Gleichstromzwischenkreis: Die Drehzahl kann unabhängig von den Netzbedingungen an die hydraulischen Bedingungen angepasst werden (Drehzahlregulierung). Dadurch kann die Maschine von 5% bis 100% Durchfluss betrieben und eine mit der Kaplan-Turbine vergleichbare Jahresproduktion erreicht werden.

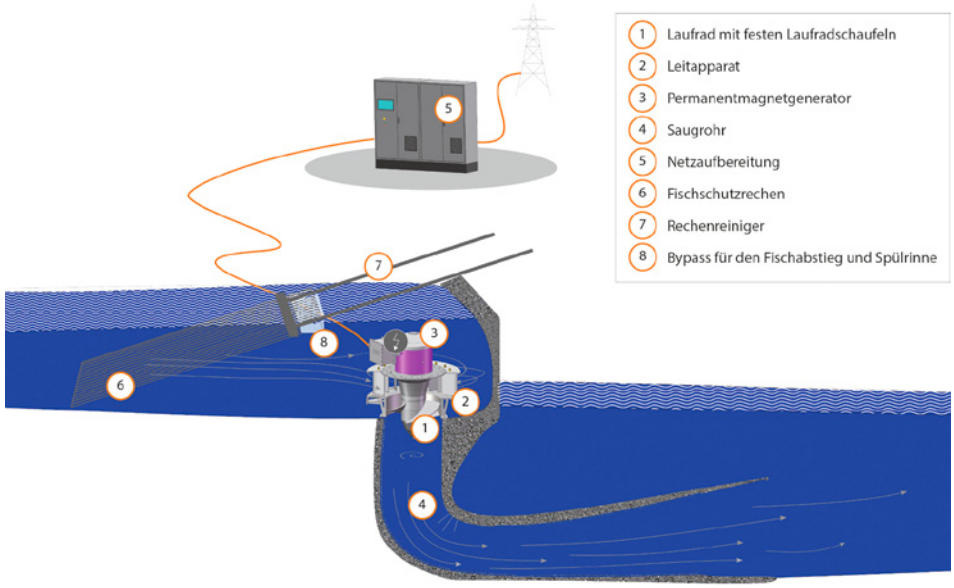


Abb. 4: Kraftwerksaufbau mit einer DIVE-Turbine

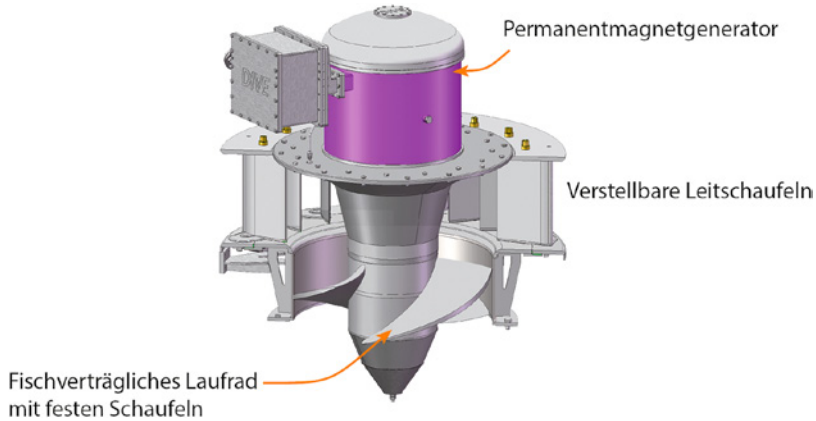


Abb. 5: Aufbau der Turbine-Generator-Einheit der DIVE-Turbine

Abb. 6: DIVE-Laufrad mit drei Schaufeln: Für den Druckabbau steht eine lange Schaufellänge zur Verfügung und der Druckgradient bleibt flach.

in netzkonformen Wechselstrom gewandelt und eingespeist. Durch diesen Gleichstrom-Zwischenkreis ist der eingespeiste Strom mechanisch vollkommen von der Turbine-Generator-Einheit entkoppelt. Das ermöglicht es, den Strom an die Anforderungen des Netzbetreibers anzupassen – sowohl einmalig, zum Beispiel an die Netzfrequenz, als auch nach wechselnden dynamischen Vorgaben.

Die maximale Turbinendrehzahl hängt von der Leistung und Fallhöhe ab, kann jedoch an Vorgaben – zum Beispiel zum Fischschutz – angepasst werden, da sie unabhängig von der Netzfrequenz ist.

Fischverträglichkeit

Bereits seit Entwicklung der Kaplan-Turbine werden Untersuchungen zum Thema Fischschutz an Wasserkraftanlagen durchgeführt. Auf Basis der Kaplan-Technologie wurden anerkannte Kriterien entwickelt, anhand derer die Fischverträglichkeit von Turbinen bewertet werden kann. Die größten Risikofaktoren für die Fische sind Kollisionen mit rotierenden Teilen, ein Einklemmen und hohe Druckgradienten.

Je nach Fischart werden die Kriterien unterschiedlich bewertet. Für die Turbinengestaltung ergeben sich daraus Empfehlungen für niedrige Drehzahlen (Kollisionsgeschwindigkeit), wenige Laufradschaufeln (Kollisionsrisiko), geringe Spaltmaße (Einklemmen) und flache Druckgradienten.

Für die scharf auf Leistung hin ausgelegte Kaplan-Turbine müssen konstruktiv Kompromisse eingegangen werden, um auf die Ansprüche zur Fischverträglichkeit einzugehen: Zur Reduktion der Drehzahl müssen Generatoren und Getriebe angepasst werden, was sich auf die Kosten niederschlägt. Die Spaltmaße wurden durch die Entwicklung von kugeligen Laufradformen reduziert, um in allen Betriebspunkten kleine Abstände zwischen den Schaufeln und dem Turbinenkessel zu gewährleisten. Weiterhin können die Schaufeln auf bis zu drei reduziert werden. Das geht jedoch mit Wirkungsgradeinbußen einher, da sich die verstellbaren Schaufeln nicht mehr überdecken können.

Die DIVE-Turbine erfüllt diese Anforderungen ohne Zusatzaufwand auf Grundlage ihrer Konstruktion: Die Drehzahl kann angepasst werden und wird in Teillast immer reduziert. Insbesondere bei kleinen Wasserkraftanlagen, die einen Großteil der Jahresleistung in Teillast erbringen, spielt die reduzierte Drehzahl eine Rolle. Weiterhin sind die Schaufeln fest mit der Laufrad-

Abb. 7: Die Laufradschaufeln sind fest mit der Nabe verbunden. Der Spalt zwischen dem äußeren Turbinenkessel und den Schaufeln ist kleiner als 2 mm. Dadurch besteht kein Einklemmrisiko für durchschwimmende Fische.

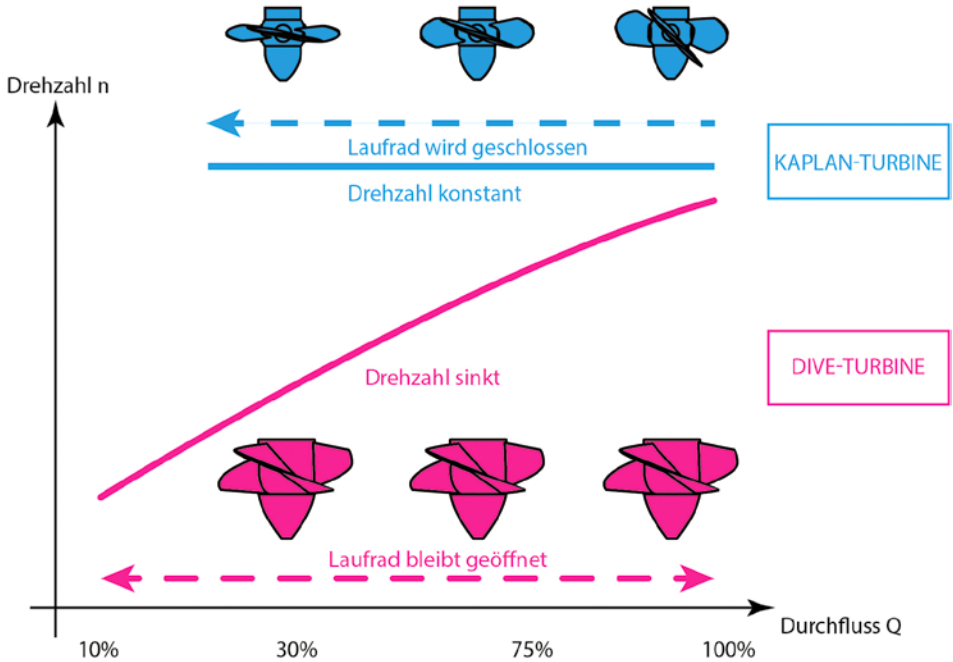


Abb. 8: Die Drehzahl der DIVE-Turbine wird dem Durchfluss angepasst, die festen Laufschaufeln bleiben maximal geöffnet. Im Vergleich dazu werden die Schaufeln der Kaplan-Turbine in Teillast geschlossen – bei maximaler Drehzahl. Da die Maximaldrehzahl der DIVE-Turbine geringer ist als die der Kaplan-Turbine, ist die Mortalität der DIVE-Turbine auch bei Volllast geringer.

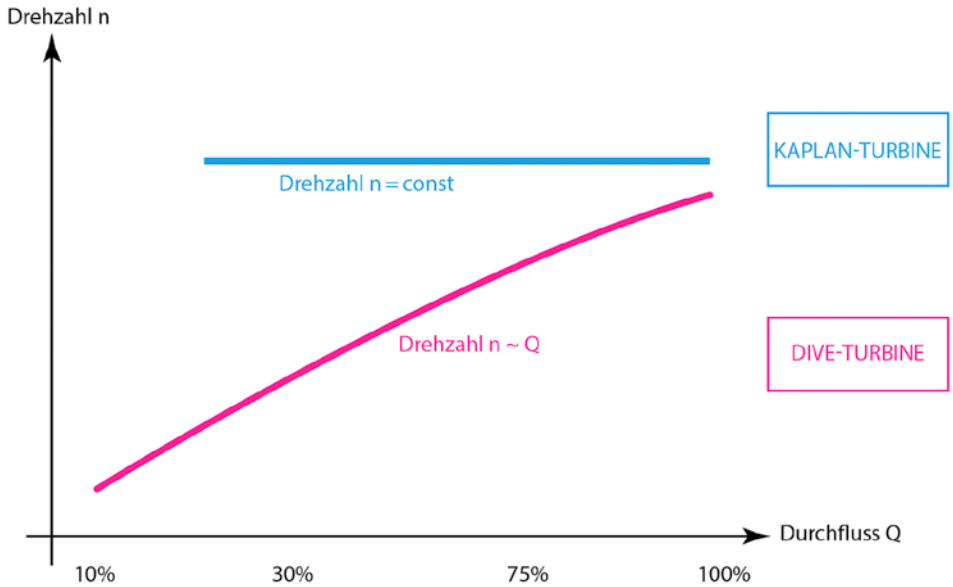
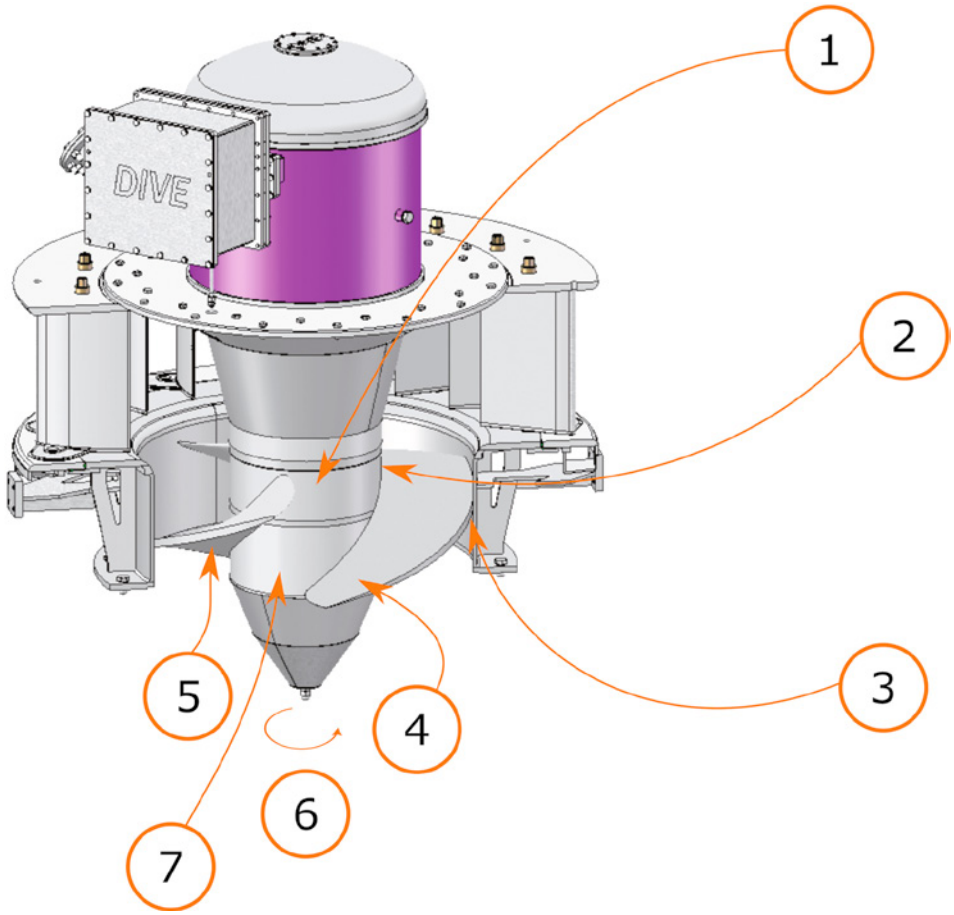


Abb. 9: Die Mortalität der DIVE-Turbine nimmt in Teillast ab, während die Mortalität der Kaplan-Turbine in Teillast stark ansteigt. Insbesondere in der Kleinwasserkraft, bei der die Kraftwerke im Jahresverlauf oft in Teillast betrieben werden, spielt die Mortalität in Teillast eine große Rolle.



	Eigenschaft	Vorteile für den Fisch
1	Maximale Schaufelöffnung in allen Betriebspunkten	→ Geringes Kollisionsrisiko
2	Kein Spalt zwischen Schaufel und Nabe	→ Kein Einklemmrisiko
3	Spalt zwischen Schaufel und Mantel <2 mm	→ Kein Einklemmrisiko
4	Anzahl der Laufradschaufeln auf 3 reduzierbar	→ Geringes Kollisionsrisiko
5	Lange Flügelgeometrie	→ Langsamere Druckänderung insbesondere in Kombination mit Drehzahlregelung
6	Niedrige Drehzahlen bei Volllast und vor allem in Teillast	→ Geringes Kollisionsrisiko → Geringe Kollisionsgeschwindigkeit → Regelbarkeit in Zeiten erhöhten Wanderaufkommens → Sanftes Anfahren („Softstart“)
7	Ölfreies Laufrad und verschleißfreie Lagerabdichtung	→ Keine Gefahr eines Schmierstoffeintrages in das Wasser

Abb. 10: Ökologische Vorteile der DIVE-Turbine

nabe verbunden – es gibt keinen Spalt zwischen Schaufeln und Nabe. Der Spalt zwischen Schaufeln und Turbinenkessel kann kleiner als 2 mm gehalten werden, da keine Schaufelverstellung notwendig ist. Nabe, Schaufeln und Kessel können frei geformt werden.

Es ist möglich, die Anzahl der Laufradschaufeln auf drei zu reduzieren, ohne Wirkungsgradeinbußen in Kauf zu nehmen. Da die festen Schaufeln die Nabe beliebig umschlingen können, ist immer eine volle Überdeckung der Schaufeln gewährleistet.

Die Länge der festen Laufradschaufeln wirkt sich auch positiv auf den Druckgradienten aus, da der Druckabbau über eine längere Strecke als bei den kurzen Schaufeln der Kaplan-Turbine stattfindet. Die Druckspitzen sind weit weniger ausgeprägt, weil die DIVE-Turbine bei gleichen hydraulischen Bedingungen etwa ein Drittel größer und langsamer als eine Kaplan-Turbine ist.

Weiterhin ist es für den Fischschutz wichtig, dass die festen Laufradschaufeln der DIVE-Turbine in allen Betriebszuständen maximal geöffnet sind, während das Kollisionsrisiko bei der Kaplan-Turbine durch Schließen der Schaufeln in Teillast steigt. In Kombination mit der reduzierten Teillast-Drehzahl ergeben sich daher für die DIVE-Turbine insbesondere in Teillast sehr niedrige Mortalitätswerte.

Die DIVE Turbinen GmbH & Co. KG hat diese Vorzüge in puncto Fischfreundlichkeit bereits 2016 in einem Feldversuch untersucht und ist zu sehr positiven Einschätzungen gekommen. Nun hofft sie auf Projekte in Deutschland, die im Rahmen eines Moni-

Abb. 11: Transport und Einbau der DIVE-Turbine als komplette Einheit. Alle Komponenten einschließlich Generator sind bereits ab Werk ausgerichtet. Die Toleranzen für das Bauwerk liegen im Zentimeterbereich.

Abb. 12: Die elektrotechnische Anlage wird in den bestehenden Gebäuden untergebracht.

Abb. 13: Alternativ kann die E-Technik auch in einem Container installiert werden, der zugleich zum Transport dient. Alle Einheiten werden im Werk verbaut und getestet, sie müssen vor Ort nur noch verkabelt werden.

torings beforscht werden könnten, um die Annahmen weiter zu untermauern.

Nachhaltigkeit auch ökonomisch

Das Ziel des Unternehmens war es von Beginn an, ein wirtschaftlich tragfähiges und langlebiges Produkt zu entwickeln. Durch hohe Wirkungsgrade, das verschleißfreie Laufrad und die schwingungsarme Technologie ergeben sich automatisch auch weitere ökologisch Vorteile: Aus rein physikalischen Gründen kann kein Schmiermittel in das Wasser dringen, die Drehzahl kann dem standortspezifischen Bedingungen angepasst werden und es gelangen kein Lärm und keine Schwingungen nach außen.

Projektentwicklung, Produktion und Steuerungsbau der gesamten Turbine-Generator-Einheit finden in Amorbach, Bayern, statt. So lassen sich projektspezifische Anforderungen an Kräfte und Dimensionen einfach umsetzen. Beispielsweise müssen bei Modernisierungen auch Aspekte des Denkmalschutzes und der Gebäudestatik berücksichtigt werden. Durch den kompakten Aufbau der Turbine als vormontierte Turbine-Generator-Einheit stellt die DIVE-Turbine keine hohen Anforderungen an die Maßhaltigkeit des Bauwerkes. Sie wird bereits im Werk vormontiert, ausgerichtet und vor Ort als Gesamteinheit eingebaut.

Da sich der Generator komplett überspült in der Turbinenkammer befindet und kein Getriebe vorhanden ist, kann auf einen aufwendigen, hochwassersicheren Hochbau verzichtet werden.

Erfahrungsgemäß lassen sich mit der DIVE-Turbine die turbinenbedingten Baukosten um ca. 30–50% reduzieren, im Vergleich zu Kaplan-Rohrturbinen und vertikal angeordneten Kaplan-Turbinen. Vorhandene Abmessungen können in der Auslegung und Fertigung berücksichtigt werden, da jede Turbine projektspezifisch dimensioniert wird.

Durch die bereits im Werk vollständig vormontierte und getestete Turbinen-Generator-Einheit werden das Risiko und die Kosten während der Montage und Inbetriebnahme minimiert.

Die planmäßigen Betriebskosten und Stillstandszeiten sind auf Grund der wartungsfreien Turbinen-Generator-Einheit absolut minimal. Die Einheit verfügt über eine zentrale Lagerung, welche die Einheit aus Turbi-

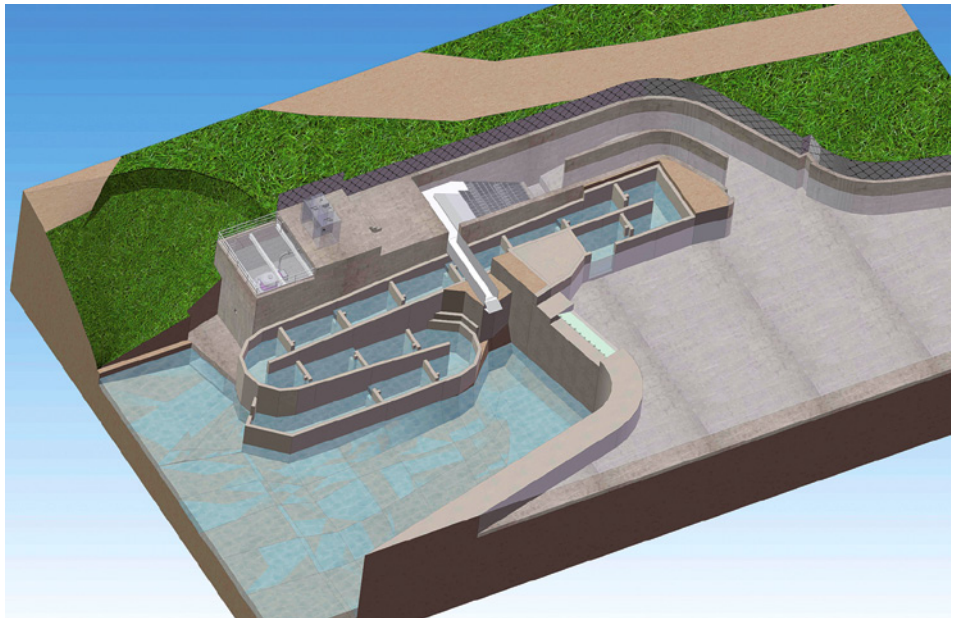


Abb. 14: Wasserkraftwerk mit flach angestelltem Feinrechen mit Abstiegsöffnungen, durch die die Fische in das Unterwasser gelangen können.

nenlaufrad und Generatorrotor lagert. Daneben gibt es keine sich drehenden Bauteile. Die Lagerung ist für eine Betriebszeit von mindestens 180000 Stunden dimensioniert und nach dieser Zeit können die Lager innerhalb eines Arbeitstages ohne Spezialwerkzeug getauscht werden. Innerhalb des Zeitraums von 20 Jahren ist kein Bauteilwechsel an der gesamten Turbinen-Generator-Einheit notwendig, lediglich der Lageröltausch (ca. 1 Arbeitsstunde) alle 5 Jahre. Somit ergibt sich ein planmäßiger Wartungsaufwand und Stillstandszeiten von durchschnittlich 0,6 Arbeitsstunden pro Jahr und eine Anlagenverfügbarkeit der Turbinen-Generator-Einheit von annähernd 100%.

Optische und akustische Einflüsse

Die Turbine-Generator-Einheit der DIVE-Turbine befindet sich unter Wasser in der Turbinenkammer. Dadurch ist auch die Kühlung des Generators durch das Triebwasser gewährleistet. Schaltschränke und Steuerung können unabhängig von dem Einbauort der Turbine platziert werden, meist in bestehenden Gebäuden oder einfachen Containern. Die Anlage ist daher von außen nicht sichtbar und erfordert keine baulichen Veränderungen am Bauwerk.

Die Kühlung der elektronischen Aggregate kann über einen geschlossenen Wasserkreislauf stattfinden. Somit können diese in einem vollständig geschlossenen Raum installiert werden und sind dadurch auch akustisch unkritisch. Bereits 2011 wurden zum Nachweis Schallmessungen an einer der ersten DIVE-Turbinen durchgeführt, die zu positiven Ergebnissen führten. Mehrere DIVE-Turbinen sind in Wohngebieten und Hotelgebäuden im Betrieb.

Ökologisches Kraftwerk: DIVE-Feinrechen

Neben dem Kerngeschäft Turbinenbau hat die DIVE Turbinen GmbH & Co. KG auch

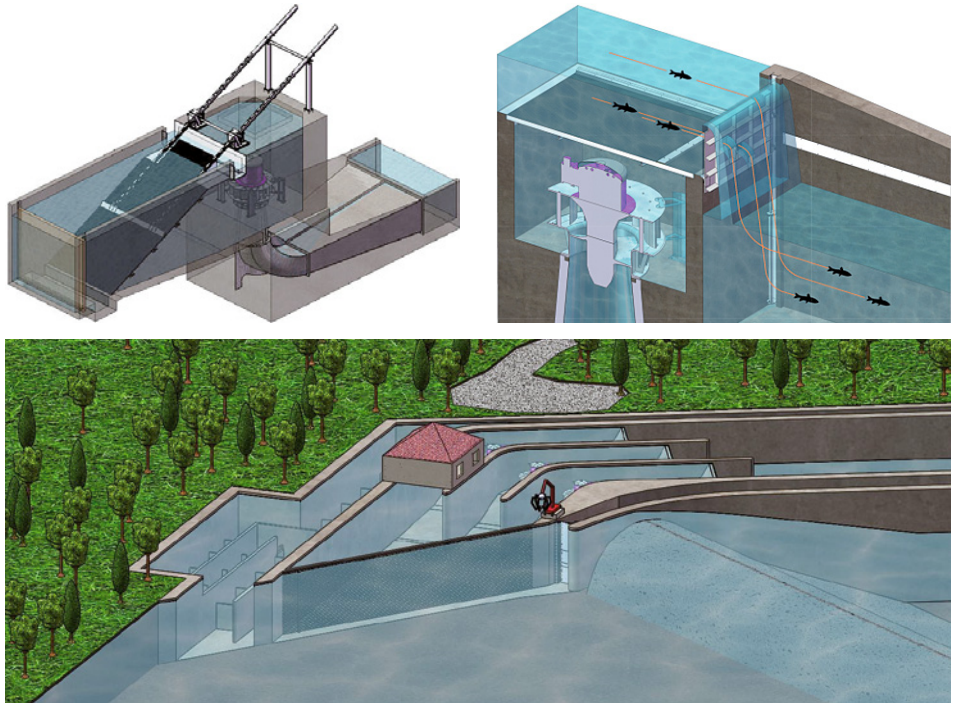


Abb. 15: Die DIVE Turbinen GmbH & Co. KG bietet die Auslegung und Fertigung fischfreundlicher Rechensysteme in Verbindung mit DIVE-Projekten an. Oben links: vertikal angestellter Flachrechen mit Abstiegsöffnungen, oben rechts: Schachtkraftwerk, unten: Horizontalrechen mit Bypass.

DIVE-Turbine – eine nachhaltige Lösung

Nachhaltigkeitskriterium	DIVE-Turbine
Erhalt der Fauna	Fischverträgliche Turbine
Durchgängigkeit für migrierende Lebewesen	Feinrechen mit Abstiegssystem
Berücksichtigung von Wander- und Laichzeiten	Dynamische Drehzahlanpassung
Minimaler Rohstoffverbrauch	Modularer Aufbau, nur die Teile werden ausgetauscht, die modernisiert werden müssen
Zuverlässiger erneuerbarer Strom	Wartungsfreie und verschleißfreie Mechanik
Minimale Anzahl an Kraftwerken	Hohe Effizienz
Keine Umweltbelastung durch Lärm, wassergekühlte Elektronik	Schwingungsarme Mechanik, vollständig überspült
Keine Gefahr bei Blackout oder Stillstand	Kein Einsatz von Gefahrstoffen, durchgangsfeste Turbine
Recyclingfähiger Rückbau	Allgemeingültig in der Wasserkraft
Keine Gewässerbelastung durch Verschmutzung	Kein Schmierstoffeintrag/kein Abrieb

Knowhow im Bereich der fischfreundlichen Rechensysteme aufgebaut. Sie bietet die Auslegung und Fertigung von Rechen und Rechenreinigern für unterschiedliche Kraftwerksarchitekturen an: vertikal flach angestellte Rechen mit Abstiegsöffnungen, Horizontalrechen mit Bypass sowie Rechen und Rechenreiniger für das Schachtkraftwerk.

Mehrere DIVE-Rechensysteme sind bereits im Einsatz. Durch die Fertigung und Programmierung von Turbine und Rechen in einem Hause sinkt der Aufwand zur Synchronisierung der einzelnen Komponenten.

Hochwasserschutz

Der Generator der DIVE-Turbine wird komplett überspült in der Turbinenkammer betrieben. Dadurch wird er dauerhaft von dem Triebwasser gekühlt. Das patentierte und verschleißfreie DIVE-Dichtsystem verhindert, dass Wasser in den Generator und die Leitungen eindringen kann – selbst bei hoher Aufstauung des Wassers. Eine Überschwemmung im Hochwasserfall stellt damit für die DIVE-Turbine keine Gefahr dar. Lagerung und Turbinenmechanik erlauben es, dass die Turbine in Durchgangsdrehzahl geht, ohne mechanische Schäden zu verursachen. So wird sichergestellt, dass das Wasser in jedem Fall abgeführt werden kann, selbst bei Netzausfall. Damit lassen sich Schwall- und Sunkereignisse verhindern und das Kraftwerk kann zu jeder Zeit vollständig überspült werden.

Abb. 16: Wasserkraftwerk Mazères, Frankreich, mit vertikal sehr flach angestelltem Fischschutzrechen

Betriebserfahrung

Die DIVE Turbinen GmbH & Co. KG hat inzwischen über 40 Turbinen weltweit im Dauerbetrieb. Nur aufgrund der einfachen Mechanik ist es möglich, die Turbinen weltweit ohne eigenes Personal vor Ort zu betreiben. Die Turbinen werden von dem DIVE-Büro in Amorbach in Unterfranken aus per Fernüberwachung betreut. So ist es beispielsweise möglich, eine DIVE-Turbine in einer Fischfarm in Südkorea zu betreiben. Andere Turbinen sind in Bewässerungskanälen in Chile oder als Restwasser- und Lockströmturbinen im europäischen Raum eingesetzt. In Deutschland sind bis jetzt zehn DIVE-Turbinen am Netz.