

# Neue Konzepte für Ultra-Niederdruck-Kraftwerke

Autor(en): **Eichenberger, Peter / Scherrer, Ivo**

Objektyp: **Article**

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

Band (Jahr): **103 (2011)**

Heft 3

PDF erstellt am: **30.06.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-941810>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# Neue Konzepte für Ultra-Niederdruck-Kraftwerke

Peter Eichenberger, Ivo Scherrer

## 1. Einleitung

An Schweizer Mittellandflüssen besteht eine grosse Anzahl an Wehrschwellen, die für den Erosions- und Hochwasserschutz erstellt worden sind und die ein beachtliches, aber ungenutztes Wasserkraftpo-

tenzial enthalten. Die Fallhöhen an diesen Schwellen bewegen sich jedoch im Bereich von 2 m oder weniger und geeignete Maschinengruppen für solche Ultra-Niederdruckanlagen waren bisher nicht verfügbar.



Bild 1. Typische Wehrschwelle in einem Schweizer Mittellandfluss, die für den Erosions- und Grundwasserschutz benötigt wird und ein ungenutztes Wasserkraftpotenzial im Ultraniederdruckbereich unter 3 m Fallhöhe enthält.

Bestrebungen in verschiedenen Nachbarländern der Schweiz haben zu Pilotlösungen für Ultra-Niederdruckanlagen geführt, die jetzt an einzelnen Standorten ausgeführt worden sind und die über einige Monate Betriebserfahrung verfügen. Bis auf wenige Ausnahmen wurde keines dieser neuartigen Konzepte seit längerer Zeit in der Schweiz eingesetzt und betrieben. Die Tauglichkeit dieser Konzepte für die Schweizer Mittellandflüsse wie Thur, Töss, Limmat, Reuss, Emme, usw., die oft Wildfluss-Charakter aufweisen, war bisher nicht bekannt.

## 2. Evaluierungsprojekt

Um die mögliche Anwendung dieser neuen Konzepte für Schweizer Mittellandflüsse zu überprüfen, besuchte die Entegra Wasserkraft AG in den Jahren 2010 und 2011 verschiedene Kraftwerke in Deutschland und Frankreich sowie Anlagen im Versuchsstadium in der Schweiz, welche innovative Ansätze in die Praxis umsetzen. Bei dieser Überprüfung wurden nicht nur energie-technische Aspekte wie Effizienz und Betriebs- und Unterhaltsaufwendungen der neuen Konzepte sondern auch die wasserbaulichen Anforderungen sowie sämtliche Umweltbelange verglichen und bewertet. Dazu wurde ein Kriterienraster gemäss Bild 2 definiert und angewandt.

Umwelt					Wasserbau und Bau		Elektromechanik		Elektrotechnik	Betrieb & Unterhalt			
Längsvernetzung - Fischabstieg	Längsvernetzung - Fischaufstieg	Sedimentdurchgängigkeit	Landschaftsbild - Landbedarf	Lärmimmissionen	Bauvolumen	wetter- und hochwassersicherer Bau	Wirkungsgrad (Auslegungspunkt)	Teillastverhalten	Netzbedingungen	Geschwemmelentnahme	Sedimentablagerungen	Zugänglichkeit	Lebensdauer

Bild 2. Kriterienraster für die ganzheitliche Beurteilung der Ultraniederdruck-Konzepte.

Auf die negativen gewässerökologischen Auswirkungen einer Querschwelle im Gewässer, die für die Wasserkraftnutzung im Niederdruckbereich im Allgemeinen erforderlich ist, wurde bei der vorliegenden Untersuchung nicht eingegangen. Solche negativen Effekte einer Staustrecke an bestehenden Schwellen (herabgesetzte Fließgeschwindigkeit, Sedimentablagerungen, monotone Gewässerstruktur, usw.) sind sowohl mit wie auch ohne Wasserkraftnutzung vorhanden und beeinflussen die Wahl des Wasserkraftkonzepts nicht.

Der Bau von neuen solchen Schwellen im Bereich von 2 m Fallhöhe ausschliesslich für die Wasserkraftnutzung scheitert in der Schweiz in den meisten Fällen sowohl an der schwierigen Bewilligungsfähigkeit als auch an der nicht gegebenen Wirtschaftlichkeit eines solchen Vorhabens.

Die Investitionskosten sind nicht direkt als spezifisches Kriterium eingeführt worden, sondern fließen nur indirekt in die Bewertung ein, und zwar in Form eines Zu- oder Abschlages bei jedem der in Bild 2 aufgeführten Kriterien: erfüllt zum Beispiel ein Konzept den Fischabstieg durch die Maschine nicht, muss nach den neuesten ökologischen Anforderungen zusätzlich ein Fisch-Bypass erstellt werden; dies verteuert die Anlage. In der Bewertung wird dieses Kriterium «Fischabstieg» deshalb als gering bis nicht erfüllt eingestuft, obwohl die Anlage ja mit einem Fischschutz (z.B. Feinrechen vor der Turbine) ausgerüstet sein könnte und damit kaum Fischschäden verursachen würde. Die schlechte Bewertung dieses Umweltthemas ist damit ökonomisch begründet und enthält implizit die Investitionskosten

für Ersatzmassnahmen zugunsten der Längsvernetzung.

Für die Beurteilung der oben definierten Kriterien wurden bei der Evaluation der verschiedenen Kraftwerkskonzepte Schulnoten gemäss schweizerischer Praxis mit Note 6 – *sehr hoher Erfüllungsgrad bis Note 1 – Kriterium wird nicht erfüllt* angewandt.

Da für keines der untersuchten Konzepte abschliessende wissenschaftliche Untersuchungen vorliegen, ist die Evaluation eine subjektive Einschätzung der Autoren. Die Sicht ist jedoch nicht einseitig auf ein einzelnes Kriterium wie z.B. Umwelt oder Maschineneffizienz fixiert, sondern ist die Sicht eines Investors, der das ungenutzte Energiepotenzial an bestehenden Wehrschwällen in Schweizer Mittellandflüssen möglichst umweltgerecht und effizient nutzen will. Dabei stehen die Umweltthemen – auch im Hinblick auf die Bewilligungsfähigkeit eines Projekts – gleichbedeutend neben der Energieausbeute und der Wirtschaftlichkeit der neuen Nutzungskonzepte.

### 3. Konzepte mit Leistungspotenzial über 100 kW

#### 3.1 VLH – Very-Low-Head Turbine

Das VLH-Konzept besteht aus einer einfach regulierten Kaplanturbine und einem direkt in der Turbinennabe angeordneten Generator. Die Maschine wird in einer beweglichen, überströmbaren Stauklappe integriert, die sowohl in einer Wehrschwelle als auch in einem Kanal eingebaut werden kann.

Dieses Konzept wählt aus Umweltschutzgründen tiefe Wassergeschwindigkeiten in der Maschine. Diese wird zwar

entsprechend voluminös, durch eine vollständige Unterwasseranordnung geschieht dies aber nicht zum Nachteil des Landschaftsbildes. Auch kann bei diesen tiefen Wassergeschwindigkeiten auf ein Saugrohr verzichtet werden, was die Wasserbaukosten reduzieren sollte.

Im März 2007 wurde eine erste Demonstrationsanlage mit dem VLH-Konzept am Sitz der Firma MJ2 in Millau (F) in Betrieb genommen. Nach einer weiteren Entwicklungsphase wurden die ersten kommerziellen Anlagen im Jahr 2009 installiert, zwei davon im Kanal von Huningue zwischen Basel und Mulhouse im Dreiländereck Deutschland, Frankreich, Schweiz.

Das patentrechtlich geschützte Konzept der VLH-Turbine lässt sich wie folgt charakterisieren:

- Die gesamte Turbinen-Generatoren-Gruppe ist beweglich in einem Kanal aufgehängt und lässt sich für Reinigungs- und Revisionszwecke oder bei Hochwasser hydraulisch aus dem Wasser heben und senken (siehe Bild 3).
- Als Generator wird eine direktgekoppelte permanentmagnetisch erregte Synchronmaschine verwendet, die in der Nabe der Turbine sitzt und direkt vom Triebwasser gekühlt wird. Die Netzanbindung erfolgt über Frequenzumrichter und Trafo.
- Ein Rechen ist direkt vor dem Laufrad auf der Maschine angeordnet; er wird mit einem rotierenden Rechenreiniger gereinigt, wobei das Geschwemmsel über eine kleine Klappe ins Unterwasser abgeschwemmt wird.

Das VLH-Konzept besticht durch hohe Wirkungsgrade der Maschine und

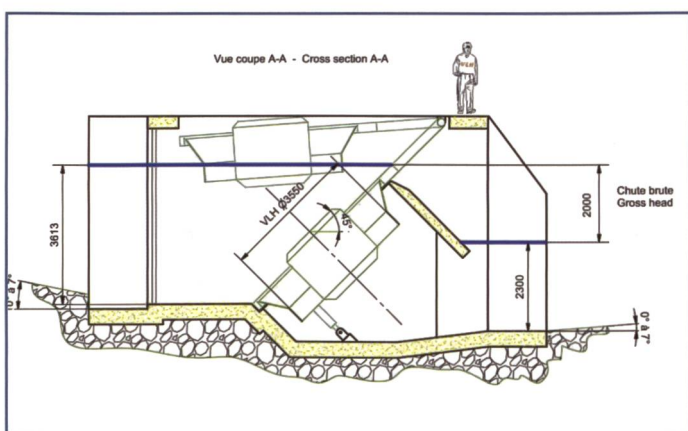


Bild 3. Typische Einbausituation des VLH-Konzepts; die Maschine kann zu Revisionszwecken hydraulisch aus dem Wasser gehoben werden.



Bild 4. Ansicht des VLH-Konzepts an der Schleuse Nr. 2, Huningue bei Basel vom Oberwasser her. Von der gesamten Anlage ist nur der Schwenkarm der Maschine (weiss) sowie der Container (braun) mit den Nebenanlagen und Hilfsbetrieben sichtbar (hier direkt über dem Unterwasser und damit unter der Geländeoberfläche aufgestellt, da im Kanal kein Hochwasser zu befürchten ist).

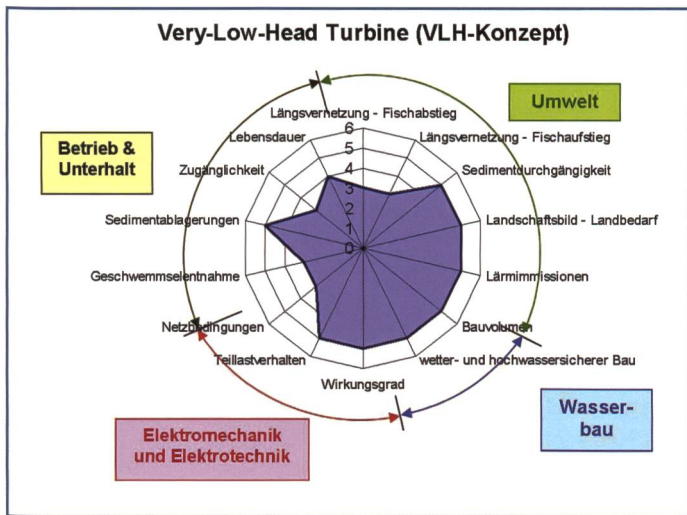


Bild 5. Evaluation des VLH-Konzepts.

einen kostengünstigen Wasserbau, da dank der Unterwasseranordnung direkt im Triebwasser eines Kanals oder eines Flusses keine Gebäude benötigt werden (ausser einer Kabine für die Hilfsbetriebe und Nebenanlagen). Diese Unterwasseranordnung der gesamten Turbinen-Generatoren-Gruppe ist jedoch teuer in der Anschaffung und im Betrieb, da für die Abdichtung des Gehäuses gegen eindringendes Wasser u.a. ein permanenter Überdruck mit entfeuchteter Luft benötigt wird.

Die Darstellung der Evaluation gemäss Bild 5 in einem Radar- oder Spinnennetzdiagramm zeigt auf einen Blick die Stärken und Schwächen der verschiedenen Konzepte. Obwohl die Evaluation Schulnoten gemäss schweizerischer Praxis (1 schlechteste, 6 beste) benutzt, ist die Bildung eines Gesamtnotendurchschnitts über die 14 Kriterien nicht erlaubt, da absichtlich keine Gewichtung vorgenommen wurde (es herrscht z.B. ein Übergewicht von fünf Kriterien zugunsten der Umweltthemen). Der Investor in eine Ultraniederdruckanlage soll auf einen Blick erkennen können, welches Konzept sich für seine spezifische Anwendung und dessen Randbedingungen wohl am besten eignet, sich aber nicht durch eine rein arithmetische Bestnote fehlerleiten lassen.

### 3.2 Bewegliches Kraftwerk

Das erste Pilotprojekt einer beweglichen, über- und unterströmbaren Wasserkraftanlage wurde am Sophienwehr/Illm in Bad Sulza (D) Ende September 2009 in Betrieb genommen. Die Anlage erzeugt 60 kW elektrische Leistung. Drei weitere Anlagen wurden in der Zwischenzeit ausgeführt und zwar in Gengenbach (D) an der Kinzig (Mai 2010; 550 kW), in Offenburg (D) am Gros-sen Deich, Kinzig (Juli 2010, 465 kW) und in

Kradolf-Schönenberg (CH) an der Thur (Mai 2011, 2 x 800 kW).

Das bewegliche über- und unterströmbare Wasserkraftwerk besteht durch die folgenden Innovationen:

- Das in einem Betontrog angeordnete schwenkbare Krafthausgehäuse mit Turbinen-Generatorengruppe ersetzt einen beweglichen Wehrverschluss (siehe Bild 6).
- Das Krafthaus ist anhebbar, um Geschiebe und Geschwemmsel direkt durch den Trog weiterzugeben; daraus ergeben sich Bauvereinfachungen: das Konzept benötigt weder einen Kiesfang noch einen separaten Geschiebespülkanal/Grundablass.
- Das Krafthaus fällt optisch und akustisch nicht auf, weil es unter Wasser angeordnet ist.

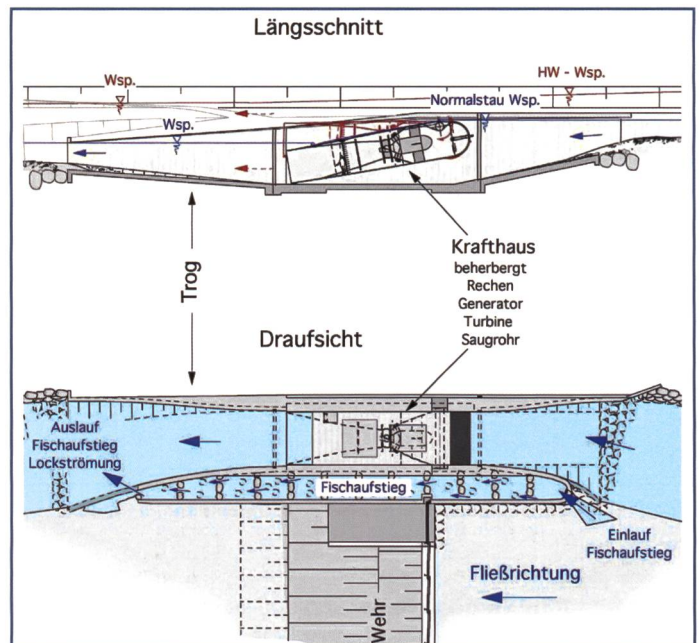


Bild 6. Bewegliches Kraftwerk im Längsschnitt mit Rechen-Turbine-Generator-Saugrohr in einer Klappe «Krafthausgehäuse» eingebaut (Quelle: Hydro-Energie Roth GmbH).

- Durch das überströmbare Krafthausgehäuse ist der Fischabstieg, aber auch die Geschwemmselweitergabe möglich; speziell für bodenorientierte Fische ist auch ein Fischaufstieg durch den Trog unter dem Krafthausgehäuse hindurch vorstellbar.
- Die ungenutzte Energie bei erhöhten Abflüssen kann durch ein Anheben der Maschine und ein Unterströmen teilweise genutzt werden. Bei dieser Betriebsart tritt am Saugrohrende eine Ejektorwirkung auf, welche mehr Wasser als normal durch die Turbine zieht und zur Steigerung der Energieproduktion genutzt werden kann. Diese Idee zur indirekten Nutzung des Über-



Bild 7. Bewegliches Kraftwerk an der Kinzig bei Gengenbach (D) vom Unterwasser her gesehen: rechts der Trog mit dem Krafthausgehäuse, links die Fischaufstiegshilfe in Form eines Rauherinne-Beckenpasses.

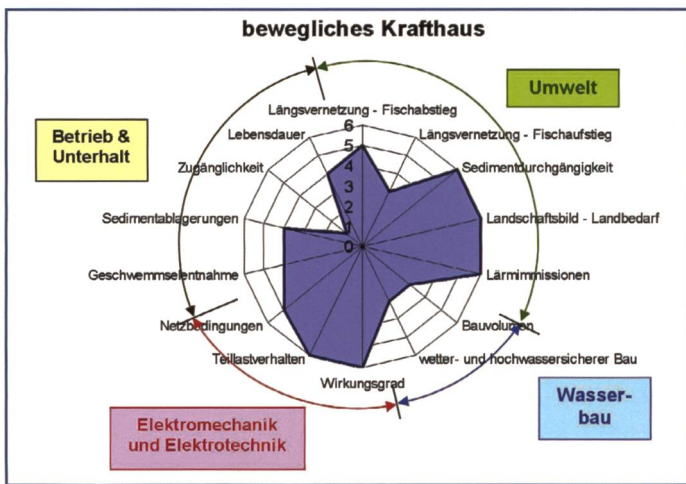


Bild 8. Evaluation des beweglichen Krafthauses.



Bild 9. Heberturbinen des MHyLab-Konzepts in Vallorbe.

wassers ist nicht neu, sondern wurde bereits 1909 vorgeschlagen und später in den Rhein-Kanalkraftwerken in Kembs und Ottmarsheim auch umgesetzt.

Das Konzept des beweglichen Kraftwerks kann die hohen Erwartungen an dessen Umweltverträglichkeit sehr gut erfüllen; hingegen ist auch hier wie schon beim VLH-Konzept die komplette Unterwasseranordnung der Turbinen-Generatoren-Gruppe aus Sicht des Betriebs und des Unterhalts nicht unbedingt vorteilhaft.

Einmal erstellt, sieht das bewegliche Kraftwerk kompakt und unauffällig aus und scheint wie geschaffen für den Einbau in eine bestehende Wehrschwelle. Hingegen sind die Wasserbau- und Spezialtiefbauarbeiten beim Einsatz eines beweglichen Kraftwerkes an bestehenden Schwellen an Schweizer Flüssen, die oft auf Fels fundiert sind oder dann in einem Grundwasserleiter liegen, nicht zu unterschätzen:

- Für die Betonarbeiten beim Bau des langen Troges im Tosbecken- und Kolkbereich der Schwelle sind aufwändige Baugrubenabschlüsse und entsprechend aufwändige Wasserhaltungen auszuführen. Die Baustelle im Fluss ist hochwassergefährdet. Bei konventionellen Buchtenkraftwerken geschieht dies meist ausserhalb des Flusses «im Trockenem».
- An den bisher gebauten beweglichen Kraftwerken wurden für die Baugrubenumschliessung rückverankerte, überschnittene Bohrpfähle verwendet. Eine Zufahrt für das grosse Bohrgeschäft besteht oft nicht und muss zuerst gebaut werden und ist damit mit hohen Kosten verbunden. Für kleinere Anlagen im Stile von Bad Sulza mit 60 kW Nennleistung rechnen sich solche Bau-

weisen in der Regel nicht. Auch ist diese Bauart mit überschnittenen Bohrpfählen in der Schweiz nicht immer bewilligungsfähig, weil sie nicht rückgebaut werden können und damit den Grundwasserleiter einstauen.

- Wegen des Auftriebs auf den Trog im Revisionsfall müssen die Sohle und die niedrigen Seitenmauern sehr massiv ausgeführt werden. Hier helfen keine Maschinenhaus-Aufbauten (wie bei konventionellen Buchtenkraftwerken) das Gewicht zum Ausgleichen der Auftriebskräfte aufzubringen.

Besonders geeignet erscheint das bewegliche Krafthaus für Standorte, die nur einen geringen Landbedarf und eine geringe Störung des Landschaftsbildes zulassen.

### 3.3 Heberturbine

Das Konzept der Heber- oder Siphonturbine ist schon seit längerem bekannt und wird immer wieder angewandt. Es steht mit seiner Anordnung der Turbine über dem Oberwasserspiegel eigentlich in komplettem Gegensatz zu den in den vorangegangenen Kapiteln evaluierten Konzepten, die die Maschine ins Wasser eintauchen. Mit der Anordnung der Turbine über dem Oberwasserspiegel können:

- Baukosten gespart (keine tiefgründigen Saugrohre);
- einfache, nicht wasserdichte Komponenten gewählt, und
- eine gute Zugänglichkeit für die Wartung aller Komponenten gewonnen werden.

Das MHyLab aus CH-Montcherand hat im Rahmen des SEARCH LHT (Small Efficient Axial Reliable Compact Hydro Low Head Turbine), eines EU-finanzierten Forschungs- und Entwicklungsprojekts, zwischen 2002 bis 2006 eine Heberturbine neu entwickelt, die direkt über eine Wehr-

schwelle eingebaut, kleine Fallhöhen im Bereich von 0.5 m bis 3.5 m nutzen kann, ohne zusätzlichen Wasserbau zu beanspruchen.

Die einfache Konstruktion soll modular gefertigt resp. mit einem Einheitsdurchmesser ausgerüstet werden. Die Anpassung an unterschiedliche Fallhöhen und Durchflüsse geschieht durch Anpassen der Drehzahl (andere Scheiben des Riementreibs) und durch den Einsatz von mehreren Maschinen nebeneinander.

Dieses auf den ersten Blick bestechende Konzept wurde bisher erst in einer einzigen Anlage eingebaut, und zwar in der UMV SA in Vallorbe an der Orbe im Jahre 2009 (zwei baugleiche Maschinen nebeneinander).

Leider ist die Anlage in Vallorbe für die vorliegende Untersuchung nicht repräsentativ, weil die Turbinen am Ende eines Ausleitkanals im Fabrikgebäude statt an der bestehenden Wehrschwelle angeordnet sind. Viele Kriterien lassen sich dadurch nicht abschliessend beurteilen. Es wurde deshalb nur das Potenzial, nicht aber die konkret ausgeführte Anlage des Heberkonzepts gemäss MHyLab evaluiert (siehe Bild 10).

Mit dem Heberkonzept lassen sich praktisch keine der heute überall geforderten Umweltaspekte integral mit der Maschine lösen, sondern müssen in Form von Fischauf- und -abstiegshilfen und Geschiebeabzugseinrichtungen durch die Wehrschwelle separat gelöst werden, was Landbedarf und Kosten erhöht. Auch an Standorten mit hohen Anforderungen an den Landschafts- und Lärmschutz ist die Anwendung des Heberkonzepts nicht unproblematisch. Gute Noten können jedoch bezüglich Effizienz und Betriebskosten erwartet werden, obwohl die Robustheit und Langlebigkeit der technischen Lösung von MHyLab mit nur einer Pilot-

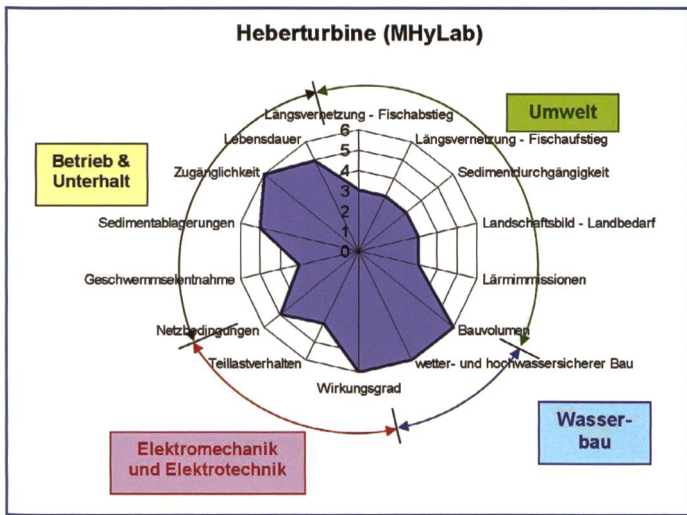


Bild 10. Evaluation der Heberturbine gemäss Konzept MHyLab.

anlage noch nicht abschliessend beurteilt werden kann.

### 3.4 Weitere Konzepte

Es erstaunt nicht, dass die Unterwasseranordnung der gesamten Turbinen-Generatoren-Gruppe wie die oben beschriebenen Konzepte von VLH und Hydro Roth von weiteren Firmen und Entwicklern aus dem EU-Raum verfolgt wurde, weil dort offenbar die Forderung gilt, dass die Wasserkräfte möglichst unsichtbar und versteckt genutzt werden sollten. So wurde die sogenannte DIVE-Turbine aus Deutschland in den Jahren 2006 und 2007 mit vollständiger Unterwasseranordnung unter Verwendung eines permanentmagnetisch erregten Synchrongenerators und einer einfach regulierten Propeller-Turbine mit Frequenzumrichter bereits an drei Anlagen erfolgreich eingesetzt. Anschliessend fand eine Zusammenarbeit des DIVE-Teams mit der TU München im Rahmen des nachfolgend beschriebenen Schachtkonzepts statt, welches neuartige Überlegungen zu den Wasserbau- und Umweltaspekten der Wasserkraftnutzung im Niederdruckbereich einbrachte.

Das Schachtkonzept beschreibt einen neuen Weg in der Maschinenanordnung im Fluss, indem die Wasserausleitung in eine Bucht am Ufer verlassen wird und der Einlauf in ein vollständig unter Wasser angeordnetes Kraftwerk direkt im Fluss, und zwar über einen Horizontalrechen stattfindet. Der Saugschlauch der Turbine führt durch das Wehr hindurch ins Unterwasser (siehe Bild 11).

Die Promotoren gehen von weitreichenden Vorteilen des Schachtkonzepts aus:

- Der Schacht mit der Unterwasserturbine wird nicht am Ufer, sondern im Fluss angelegt, so dass der Horizon-

talrechen von drei Seiten angeströmt werden kann. Damit ist keine Strömungsumlenkung in der Horizontalen zum

Ufer hin z.B. in ein Buchtenkraftwerk erforderlich. Es soll dadurch zu keiner Verlandung des Stauraumes und des Unterwassers auf der dem Kraftwerk gegenüberliegenden Flussseite mehr kommen.

- Da die Kraftwerksbauten ausschliesslich im Flussschlauch angeordnet werden, sind keine grossflächigen Ufereingriffe nötig, die nicht nur vom Landschaftsschutz sondern auch von den Kosten her nachteilig für die Nutzung kleiner Fallhöhen sind.
- Das Problem des Geschiebeeinzugs in das Kraftwerk besteht beim Schachtkonzept nicht, weil die Wasserfassung nicht bis auf die Flusssohle reicht, sondern nahe an der Wasseroberfläche bleibt.

Da es noch keine ausgeführten Anlagen dieses Typs gibt, kann – nur gestützt auf die bisherigen Untersuchungen im Labor – noch keine abschliessende Bewertung vorgenommen werden.

## 4. Konzepte mit Leistungspotenzial bis ca. 100 kW

### 4.1 Wasserwirbelkraftwerk (WWK)

Das Wasserwirbelkraftwerk besteht aus einem kreisrunden Becken mit mittigem Auslauf, in welchem ein Wasserwirbel erzeugt wird, der einen Rotor mit Generator antreibt. Das Wasserwirbelkraftwerk wurde eindeutig mit der Zielsetzung für eine ökologischere Ausgestaltung von

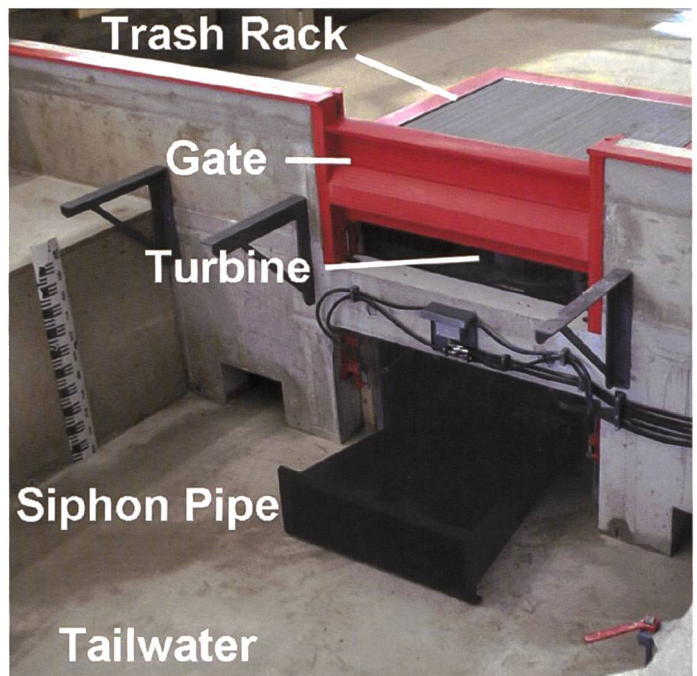


Bild 11. Aufbau des Schacht-Konzepts am Beispiel der Modellanlage an der TU München, Obernach; Quelle: TU München; Prof. Dr. Ing. Rutschmann, in *hydrolink* No. 2/2011 (Supplement to *JHR* – Vol 49 – No. 2).

Wasserkraftanlagen im Ultraniederdruckbereich initiiert. Es werden ausdrücklich tiefe Fließgeschwindigkeiten des Wassers beim Rotordurchlauf gewählt, um die ökologische Verträglichkeit der Maschine zu maximieren; entsprechend gross und voluminös wird aber die Maschine resp. die zugehörigen Teile (Rotationsbecken). Mittlerweile wurde neben der ersten Pilotanlage in Obergrafendorf, Österreich, auch ein erstes Wasserwirbelkraftwerk an der Suhre in Schöffland (AG) in der Schweiz erstellt und Ende November 2009 mit grossem Medienecho in Betrieb genommen. Projektträger ist die Genossenschaft Wasserwirbelkraftwerke Schweiz (GWWK).

Die Idee des WWKs entstand aus dem Ziel, die Renaturierung von Flussläufen mit der Energiegewinnung zu kombinieren. In einem natürlich mäandrierenden oder gut strukturierten Fluss herrscht eine grosse hydraulische Vielfalt, welche sich als Abfolge von einerseits tiefen, strömungsberuhigten Gewässerbereichen mit Fischunterständen und andererseits flachen Uferbuchten mit Widerwasser und Seitenarmen äussert und damit eine hohe Habitatsqualität des Gewässers ausmacht. Für die Initianten der Wasserwirbeltechnologie stellt die Erzeugung von künstlichen Wirbeln in einem Wasserwirbelkraftwerk auch eine Korrektur der negativen Auswirkungen von begradigten und korrigierten Flussabschnitten mit geringer Vielfalt dar. Dieser Kraftwerkstyp verbindet sozusagen die Gewässer-Renaturierung mit der



Bild 12. Rotor im Wasserwirbelkraftwerk Schöffland an der Suhre (AG).

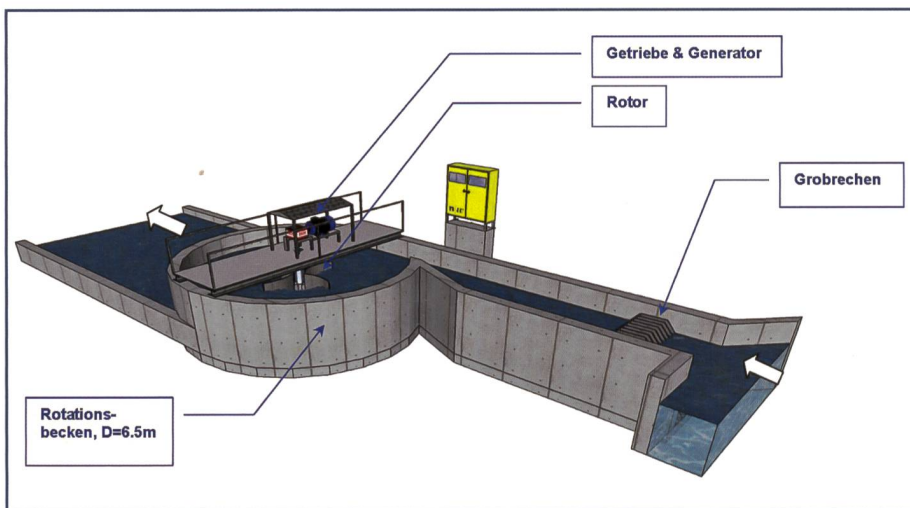


Bild 13. Darstellung des Wasserwirbelkraftwerks Schöffland an der Suhre (Quelle: Bachelor-Arbeit FHNW 2011, ergänzt durch die Autoren).

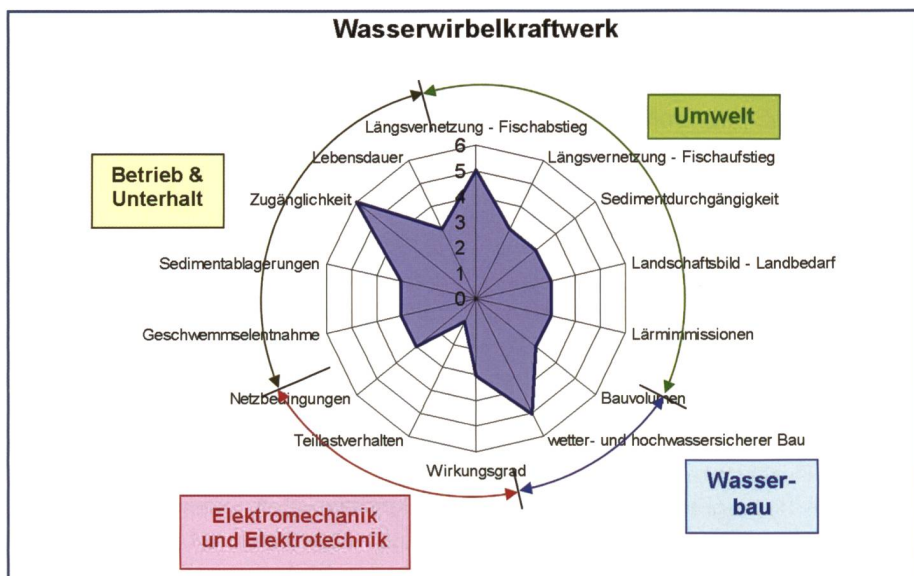


Bild 14. Evaluation des Wasserwirbelkraftwerks Schöffland an der Suhre.

Stromerzeugung auf neuartige Weise. Zur Zeit enttäuscht das Konzept des WWKs bei der Effizienz: die Wirkungsgrade sind noch so tief, dass ein wirtschaftlicher Betrieb nicht möglich ist, da nicht nur die Erträge gering sondern auch die Kosten für Becken und Kanal verhältnismäßig hoch sind. Es wird intensiv an verbesserten Rotoren gearbeitet. Bei den Umweltaspekten glänzt die Pilotanlage einzig durch den schadensfreien Abstieg der Fische durch die Maschine; bei allen übrigen Themen wie Sedimentdurchgängigkeit, Landschaftsbild und Lärmmissionen hebt sich das Konzept der WWK kaum von konventionellen Kraftwerken ab.

#### 4.2 Hydro-kinetische Wandler

Die hydro-kinetische Turbine bedarf keiner baulichen Massnahmen wie Dämme, Schleusen oder Fischaufstiegshilfen. Sie nutzt nur die kinetische Energie des fließenden Wassers. Deshalb passt dieses

Konzept eigentlich nicht in die Zielsetzung der vorliegenden Untersuchung, nämlich die heute verfügbaren Technologien für die energetische Nutzung der vielen bestehenden Querbauwerke in Schweizer Flüssen zu evaluieren. Weil sich viele Investoren für dieses in den Medien oft gezeigte Konzept interessieren, wurde es trotzdem kurz untersucht.

Erste Versuche mit hydro-kinetischen Turbinen gehen auf frühe Arbeiten von ITDG in England zurück, der Garman-Turbine (1987). Später kam die belgische Firma Rutten mit verschiedenen Wasserrädern auf Pontons recht weit. Einen völlig neuen Weg ging die Firma Aqua Libre aus Wien mit ihrer «Strom-Boje», die ein im Wasser völlig eingetauchtes Laufrad mit anschließendem Diffusor vorschlägt. Der erste Prototyp der Aqua Libre mit 150 cm Rotor wurde ab Dezember 2006 in der Donau bei Weissenkirchen in der Wachau getestet. Seither wurden viele

Verbesserungen aufgenommen und an der Optimierung der Leistung, der Form und der Herstellung gearbeitet. Seit Herbst 2009 schwimmt der zweite, schon serien-nahe Prototyp – die Strom-Boje 2 – in der Donau.

Einen ähnlichen Ansatz verfolgen die drei Firmen Hydro Green Energy (Houston, Texas), die KSB, Pumpenhersteller aus Frankenthal (D) und die Smart Hydro Power GmbH aus Feldafing bei München (D). Die erste 100 kW-Anlage der Hydro Green Energy ging 2009 im Mississippi bei Hastings in Betrieb. Über die Betriebserfahrungen ist nichts bekannt. Die Entwicklung der KSB wurde im Oktober 2010 im Rhein bei St. Goar erstmals eingesetzt. Die 5 kW-Turbine der Smart Hydro Power GmbH wurde erst im April 2011 der Öffentlichkeit vorgestellt.

Mit der Entwicklung am weitesten fortgeschritten ist die Aqua Libre mit ihrer Strom-Boje 2. Die Anforderungen für einen wirtschaftlichen Einsatz einer Stromboje sind:

- eine Strömungsgeschwindigkeit von zwischen 1.5 m/s und 3.5 m/s
- Wassertiefen von mind. 3 m.

In Schweizer Mittelland-Flüssen existieren Wassertiefen von 3 m und mehr nur in Aare, Rhone und Rhein und auch dort ganzjährig nur im Bereich von bestehenden Wasserkraftanlagen. In frei fließenden Flussstrecken sind solch grosse Wassertiefen nicht ganzjährig verfügbar. Strömungsgeschwindigkeiten von über 2 m/s finden sich ausserdem am Prallufer bei Gewässerbiegungen und im Hochwasserfall. Am Prallufer wird man eine hydro-kinetische Turbine nicht einsetzen wollen, weil dort das Geschwemmsel auftritt (inkl. ganzer Baumstämme im Hochwasserfall), welches die am Grund fixierte Maschine

verklausen oder beschädigen kann. Werden wie von den Promotoren dieser Konzepte postuliert, ganze Serien von hydrokinetischen Turbinen hinter und nebeneinander in den Fluss gehängt, um grössere Leistungen zu erzielen, wird ein leichter Aufstau des Flusses spürbar werden, der die Leistung von bestehenden Flusskraftwerken in der Nähe reduzieren kann. Es ist physikalisch nicht möglich, die Maschinen im Fluss zu platzieren und dem fließenden Wasser Energie zu entziehen, ohne dass sich mit der Turbinen-Serie flussaufwärts ein neuer höherer Wasserspiegel ausbildet als ohne die Serie. Die Bewilligungsfähigkeit einer solchen Serie von hydrokinetischen Turbinen z.B. innerhalb der Konzessions- resp. Staustrecke eines bestehenden Flusskraftwerks ist deshalb als nicht gegeben einzustufen. Diese Tatsache schränkt die kommerzielle Nutzung der hydrokinetischen Turbinen in Schweizer Mittellandflüssen stark ein. In grossen Flüssen im Ausland (Donau, Mississippi, Amazonas, usw.) sind diese Einschränkungen weniger relevant.

Unbestritten ist die hervorragende ökologische Verträglichkeit dieses Konzepts (Sedimentdurchgängigkeit, Fischabstieg, Landschaftsbild, Lärmmissionen). Abgesehen davon, dass die Bedingungen bezüglich Wassertiefe und Fließgeschwindigkeiten, die einen Einsatz der hydrokinetischen Turbinen in Schweizer Flüssen erlauben, an nur wenigen Standorten gegeben sind, muss sich jeder Investor klar sein, dass die besonderen Risiken dieser Technologie in Schweizer Fließgewässern nicht unerheblich sind (Geschwemmsel, Verklausung, Zugänglichkeit, Langlebigkeit, Bewilligungsfähigkeit).

### 4.3 Wasserkraftschnecke

Als Archimedische Schnecke ist die Wasserförderschnecke seit dem Altertum bekannt. Neu ist die Anwendung, aus der energetischen Umkehrung ihrer Arbeitsweise, eine Kraftmaschine zur Energiegewinnung zu machen.

Die Firmen Ritz-Atro (Nürnberg D), Rehart (Ehingen D), Spaans Babcock (Balk NL) und Landustrie (Sneek NL) haben zusammen bereits über 100 Wasserkraftschnecken installiert, davon auch deren drei in der Schweiz (Derendingen, Ennenda und Hirschthal).

Der Nachteil der Einzelfertigung zur Anpassung an von Ort zu Ort verschiedene Fallhöhen- und Abfluss-Bedingungen entfällt dadurch, dass im Gegensatz zu herkömmlichen Wasserrädern bei Wasserkraftschnecken kein Zusammenhang zwischen Fallhöhe und Durchmesser besteht. Der Schneckendurchmesser hängt nur vom Wasserdargebot ab. Die Übereinstimmung mit Wasserförderschnecken (Abwasserreinigungsanlage) ermöglicht zudem die Auswahl unter Normteilen der Hersteller.

Moderne Wasserkraftschnecken sind unkompliziert in Bau, Betrieb und Wartung. Sie bestehen im Wesentlichen aus einem Trog, einer Wasserkraftschnecke und einer Abtriebseinheit (siehe Bild 15). Ihr Vorteil gegenüber Turbinen liegt zum einen im relativ flachen Wirkungsgradverlauf. Typische Gesamtwirkungsgrade der Schnecken liegen inklusive Getriebe und Generator zwischen 70 und 80%, also nur max. 10% tiefer als bei Turbinen modernster Bauart. Zum anderen sind die Schnecken etwas kostengünstiger in ihrer Errichtung, da der Feinrechen entfällt. Die Reinigung des Grobrechens erfordert je-

doch in Schweizer Verhältnissen einen nicht zu unterschätzenden Betriebsaufwand und eine Rechenreinigungsmaschine muss trotzdem fast immer vorgesehen werden.

Die Ausbauwassermenge der Wasserkraftschnecke ist auf ca. 8 m<sup>3</sup>/s limitiert (Quelle Rehart GmbH). Zur Nutzung grösserer Wassermengen müssen mehrerer Wasserkraftschnecken parallel geschaltet werden. Wasserkraftschnecken können selbstregelnd mit konstanter Drehzahl (OW-Spiegel fällt ab) oder drehzahlvariabel über Frequenzumrichter betrieben werden; letzteres ist nötig, wenn trotz abnehmendem Durchfluss der Oberwasserspiegel unverändert gehalten werden soll. Dies ist für Schweizer Flüsse in den meisten Fällen der Fall, weil ja für einen konstanten Abfluss durch die Fischaufstiegshilfe ein geregelter Oberwasserspiegel erforderlich ist.

Nachteilig an der Wasserkraftschnecke sind zum einen die Verluste bei variablem Unterwasserspiegel (bei hohem UW-Spiegel ergiesst sich Flusswasser zurück in die Schnecke und erzeugt neben energetischen Verlusten Stösse und Lärm) und zum anderen die offene Konstruktion der Schnecke, die eine Aufstellung an lärmempfindlichen Standorten verunmöglicht. Etwas Abhilfe schafft eine Abdeckung der Schnecke, was auch im Hinblick auf die Eisbildung am Trog im Winter meist ohnehin erforderlich wird; trotzdem können die Probleme durch Eis (wegen des «Freispiegelabflusses» in der Maschine) nicht immer vermieden werden.

Ideal ist der Einbau der Wasserkraftschnecke in Ausleitkanälen, die vor Hochwasser geschützt sind und meist einen klar definierten Unterwasserspiegel

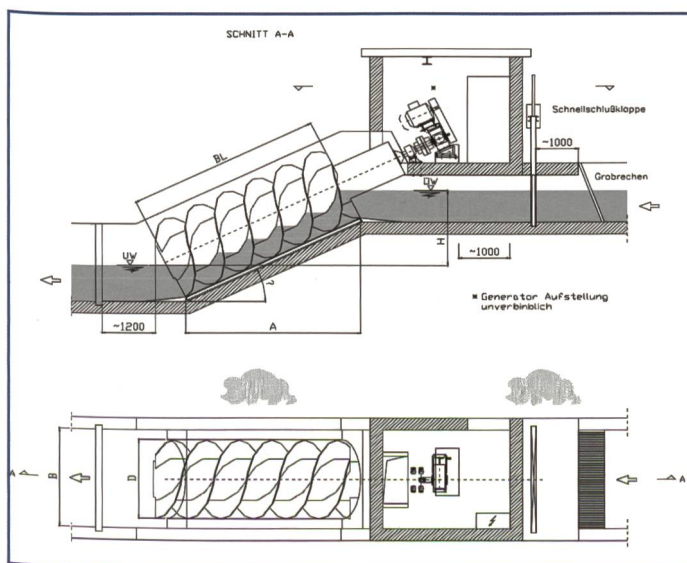


Bild 15. Prinzipische Skizze der Wasserkraftschnecke (Quelle: Ritz-Atro).

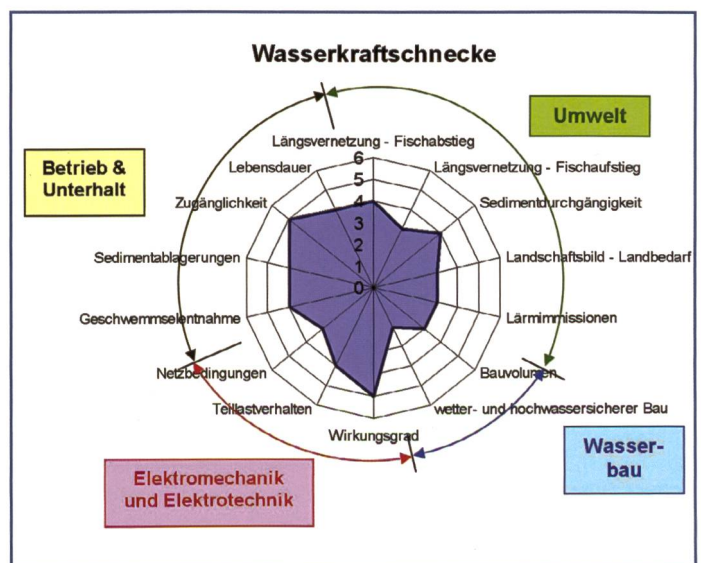


Bild 16. Evaluation der Wasserkraftschnecke.



haben. Der Einbau direkt an bestehende Schwellen in den grösseren Schweizer Flüssen (das Ziel der vorliegenden Untersuchung) ist wegen potentieller Schäden durch Hochwasser und vor allem durch Schwemmgut vorsichtig abzuwägen.

Die Technologie der Wasserkraftschnecke zeichnet sich in den Bereichen Umwelt und Wasserbau nicht durch wirkliche Innovationen aus. Punkten kann die Wasserkraftschnecke durch ihren einfachen Betrieb und Unterhalt sowie durch den recht hohen Wirkungsgrad, sofern der Betrieb der Anlage nicht durch einen stark variablen Unterwasserspiegel gestört wird.

#### 4.4 Weitere Konzepte

Für die Nutzung kleinster Fallhöhen kombiniert mit relativ geringen Durchflüssen stehen seit dem Altertum die Wasserräder in verschiedenen Ausgestaltungen zur Verfügung. Für die Stromerzeugung sind diese jedoch wegen ihrer geringen Drehzahl nicht besonders geeignet, so dass in den letzten Jahren neue Konzepte von wasserradähnlichen Wandlern wie die Staudruckmaschine und die Lammellenturbine entwickelt worden sind.

Die Staudruckmaschine besteht aus einem quer zur Fliessrichtung liegenden Schaufelrad mit Nabe (Durchmesser = Stauhöhe). Die Nabe des Antriebsrades wirkt als Stau und ersetzt das sonst erforderliche Wehr resp. den Wehrverschluss.

Im Rahmen des EU-Forschungsprojekts «HYLOW», welches die Entwicklung von wirtschaftlichen und ökologisch effektiven Wasserkraftwandlern für niedrigste Fallhöhen bis 2.5 m zum Ziel hat, wurden zwei Pilotprojekte von Staudruckmaschinen in Deutschland und in Bulgarien gebaut. Es bestehen noch keine Betriebserfahrungen und auch noch kein Anbieter einer kommerziellen Staudruckmaschine, so dass keine eigentliche Evaluation durchgeführt werden konnte.

Die theoretischen Untersuchungen und die Labortests zur Stau- oder Wasserdrukmaschine an der Universität Southampton (Prof. Gerald Müller) haben aber gezeigt, dass:

- Wasserdrukmaschinen die einzigen Wandler sind, die bei kleinen Fallhöhen von 1 m bis 2.5 m grosse Durchflüsse bis 4 m<sup>3</sup>/s pro Meter Breite verarbeiten können; Wasserräder moderner Bauart bringen es auf max. 1.2 m<sup>3</sup>/s/m;
- Wasserdrukmaschinen mit geringeren Raddurchmessern auskommen

als vergleichbare Wandler wie Wasserräder und sich so besser in die Landschaft einfügen lassen.

- Wasserdrukmaschinen mit höheren Drehzahlen arbeiten ( $n_t > 15 \text{ min}^{-1}$ ) als vergleichbare Wasserräder (die bei unter 7  $\text{min}^{-1}$  liegen) und damit etwas leichter zum Antrieb eines Generators zur Stromproduktion herangezogen werden können.

Seit Ende 2008 ist eine Weiterentwicklung der unterschlächtigen Wasserräder auf dem Markt, und zwar die sogenannte Lamellenturbine der Firma BEW-Power aus Österreich. Diese Maschine soll sowohl die kinetische Energie wie auch die Lageenergie des Wassers, meistens aus einem Kanal, nutzen. Damit ist es kein rein unterschlächtiges Wasserrad. Es werden mechanische Wirkungsgrade an der Welle von sagenhaften 90% angegeben.

Das besondere dieser Maschine sind die Schaufeln des Rades sowie die hohen Drehzahlen von 50  $\text{min}^{-1}$  und mehr, was einerseits die Baugrösse der Maschine reduziert und andererseits die Anforderungen für den Antrieb eines Generators erleichtert.

Bisher bestehen zwei Anlagen mit Lamellenturbinen, und zwar in Gumpoldskirchen und Feldkirchen bei Graz (beide Österreich). In den letzten drei Jahren wurde wohl keine weitere Anlage installiert. Insbesondere der angegebene Turbinen-Wirkungsgrad von 90% scheint unglaublich hoch; bisher erreichten unterschlächtige Wasserräder ca. 40% und mittelschlächtige max. 75%. Um das Teillastverhalten der Maschine zu verbessern und die Netzbedingungen einhalten zu können, wird neben einem mehrstufigen Getriebe auch ein Frequenzumrichter benötigt. Die Gesamtwirkungsgrade bis zum Netz fallen damit auf ca. 60%. Der Vorteil der Lamellenturbine reduziert sich damit auf die kompaktere Bauweise, welcher aber durch eine höhere Fischmortalität beim Turbinendurchgang und grössere Lärmimmissionen erkauft wird. Die Kosten für die elektromechanische Ausrüstung, d.h., ohne Wasserbaukosten sind vergleichbar mit den Kosten eines mittelschlächtigen Wasserrades aus Schweizer Produktion.

Da die Lamellenturbine als Wasserrad sich nicht besonders für die Nutzung des Wasserkraftpotenzials von bestehenden Querschwellen in Flüssen eignet, sondern eher an Ausleitkanälen eingesetzt werden kann, wurde keine eigentliche Evaluation

## 5. Schlussfolgerungen und Ausblick

Insgesamt wurden sieben Pilotlösungen und drei schon länger bekannte Wasserkraftmaschinen für kleinste Fallhöhen identifiziert und deren Anwendung für Schweizer Verhältnisse teilweise evaluiert. Es zeigte sich, dass:

- einige der besuchten Anlagen erst im Jahre 2010 in Betrieb genommen werden konnten und deshalb noch kaum über relevante Betriebserfahrungen verfügen;
- zum Teil noch viele Kinderkrankheiten vorherrschen und die Entwicklung nicht abgeschlossen ist;
- für zwei Konzepte (Wasserdrukmaschine und Schachtkraftwerk) noch keine Anbieter von tatsächlich käuflichen Maschinen und Anlagen auf dem Markt sind; diese Konzepte sind noch im Entwicklungsstadium bei Universitäts-Instituten;
- keines der insgesamt 10 untersuchten Konzepte eine Lösung für sämtliche Anwendungsfälle darstellt; vielmehr müssen die spezifischen Anforderungen der verschiedenen Ultra-Niederdruck-Standorte analysiert und das jeweils bestgeeignete Konzept gewählt werden. Die vorliegende Untersuchung kann dazu eine Systematik und erste Anhaltspunkte geben.

#### Verdankung

Die vorliegenden Untersuchungen zu den neuen Konzepten im Ultraniederdruck-Bereich wurden vom Forschungsprogramm Wasserkraft des Bundesamtes für Energie (BfE) unterstützt. Für die Beurteilung und Benotung waren jedoch ausschliesslich die Autoren des Berichts verantwortlich, die sich als Investoren und Betreiber von Kleinwasserkraftanlagen vor allem von Risikoabschätzungen (Unterwasseranordnung) und Überlegungen zur Langlebigkeit der Anlagen und weniger von Versprechungen der Promotoren zu Wirkungsgraden und Kosteneinsparungen der verschiedenen Konzepte leiten liessen.

#### Anschrift der Verfasser

Peter Eichenberger, Ivo Scherrer  
Entegra Wasserkraft AG, Reichsgasse 3  
CH-7000 Chur  
Tel. +41 81 511 11 60  
peter.eichenberger@entegra.ch  
ivo.scherrer@entegra.ch  
www.entegra.ch