



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

Schlussbericht 13. Juli 2011

Evaluation von Ultra-Niederdruckkonzepten für Schweizer Flüsse

Innovationen, Eignungskriterien und
Erfahrungsberichte

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Wasserkraft
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer:

Entegra Wasserkraft AG
Oberalpstrasse 28
CH-7000 Chur
www.entegra.ch

Autoren:

Peter Eichenberger, Entegra Wasserkraft AG, peter.eichenberger@entegra.ch
Ivo Scherrer, Entegra Wasserkraft AG, ivo.scherrer@entegra.ch
Jean-Marc Chapallaz, JMC-Engineering, jmceng@bluewin.ch
Matthias Wiget, mattwiget@gmail.com

BFE-Bereichsleiter: Dr. Michael Moser

BFE-Programmleiter: Dr. Klaus Jorde

BFE-Vertrags- und Projektnummer: SI/500354-01 / SI/500354

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Zusammenfassung

An Schweizer Mittellandflüssen besteht eine grosse Anzahl an Wehrschwellen, die für den Erosions- und Hochwasserschutz erstellt worden sind und die ein beachtliches, aber ungenutztes Wasserkraftpotential enthalten. Die Fallhöhen an diesen Schwellen bewegen sich jedoch im Bereich von 2m oder weniger und geeignete Maschinengruppen für solche Ultra-Niederdruckanlagen waren bisher nicht verfügbar. Bestrebungen in verschiedenen Nachbarländern der Schweiz haben zu Pilotlösungen für Ultra-Niederdruckanlagen geführt, die in den letzten zwei Jahren an einzelnen Standorten in Betrieb genommen worden sind.

Ingesamt wurden 7 Pilotlösungen und 3 schon länger bekannte Wasserkraftmaschinen für kleinste Fallhöhen identifiziert und deren Anwendung für Schweizer Verhältnisse 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 (Wasserdruckmaschine 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 im konkreten Fall jeweils geeignete Konzept gewählt werden.

Der vorliegende Bericht charakterisiert die identifizierten Pilotlösungen, zeigt die für die Evaluation vorgeschlagene Systematik und den zugehörigen Kriterienraster und stellt die Stärken und Schwächen der 10 Konzepte in Form von Spinnennetz- oder Radardiagrammen anschaulich dar.

Résumé

Les cours d'eau du Plateau comportent un grand nombre de seuils qui furent construits pour contrôler les crues et lutter contre l'érosion. Ces seuils représentent un potentiel important, mais inutilisé, pour la production d'énergie hydraulique. Les dénivellations de ces seuils se situent aux environs de 2 mètres ou moins, et jusqu'à ce jour, il n'existait pas, sur le marché, de machines hydrauliques adaptées à l'exploitation de ces très basses chutes. Des efforts ont été faits dans plusieurs pays voisins de la Suisse pour construire de telles machines, efforts qui ont conduit à la réalisation d'installations pilotes mises en exploitation sur plusieurs sites ces deux dernières années. Au total 7 installations pilotes et 3 concepts avec des machines hydrauliques déjà connues pour ces faibles chutes ont été localisés. Leur application aux conditions suisses est évaluée dans le présent rapport.

Il apparaît ce qui suit:

- quelques unes des installations visitées n'ont été mises en service qu'en 2010. Il n'existe donc pas suffisamment d'expériences d'exploitation;
- de nombreuses maladies d'enfance ont été constatées, ce qui signifie que le développement et la mise au point ne sont pas terminés;
- pour deux concepts techniques (machine à pression d'eau et centrale en chambre d'eau), il n'existe pas de fabricants en état d'offrir de telles machines dans le cadre d'une commercialisation;

- aucun des 10 concepts examinés ne représente une solution applicable pour tous les cas ; au contraire, il est nécessaire d'analyser les conditions et contraintes particulières de chaque site de très basse chute et de choisir le concept technique le mieux adapté.

Le présent rapport présente les caractéristiques des installations pilotes identifiées et propose une approche systématique pour leur évaluation accompagnée par une trame de critères. Les forces et les faiblesses des 10 concepts sont décrites et mises en lumière au moyen d'une représentation en toile d'araignée ou image radar.

Summary

The rivers of the Swiss Plateau comprise a large number of weir sills, which had been built for erosion and flood control. These weir sills represent a considerable but unexploited hydropower potential. However, the pressure heads at these weir sills are around 2m or less and suitable hydropower equipment for such ultra low-head applications have until now not been available on the market. Efforts in neighbouring countries of Switzerland have led to a few pilot projects for ultra low-head plants; some of these have been commissioned during the last two years.

A total of 7 pilot projects for ultra-low head sites and 3 machine concepts previously known have been identified. These 10 solutions and their application in Swiss conditions have been evaluated in the present report. The following can be concluded:

- some of the plants were commissioned as late as 2010 and therefore, hardly any relevant operational experience has been available;
- teething troubles are still prevailing and the development process has not been finalised;
- for two concepts (the hydrostatic pressure machine and the shaft power plant), there are as yet no suppliers of machinery and equipment on the market; these concepts are still at the development stage in University laboratories;
- none of the 10 concepts evaluated represent a solution for all possible applications; in fact, the specific requirements of an ultra low-head site must be thoroughly analysed first and only then can the most suitable concept be selected.

The present report characterises the pilot concepts identified, shows a classification system for their evaluation and the related criteria, and presents pros and cons of the 10 concepts in the form of radar or spider web charts.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Résumé	3
Summary	4
Projektziele	7
Projektgliederung und Untersuchungskonzept	8
Kriterienraster	12
Umwelt	12
Längsvernetzung – Fischabstieg	12
Längsvernetzung - Fischaufstieg	12
Sedimentdurchgängigkeit	12
Landschaftsbild – Landbedarf	12
Lärmimmissionen	13
Wasserbau und bauliche Gestaltung	13
Bauvolumen	13
Wetter- und hochwassersicherer Bau	13
Elektromechanische Ausrüstung	13
Wirkungsgrad (Auslegungspunkt)	13
Teillastverhalten	14
Elektrotechnik	14
Aufwand, um Netzbedingungen zu erreichen	14
Betrieb und Unterhalt	15
Geschwemmselentnahme	15
Sedimentablagerungen	15
Zugänglichkeit	15
Lebensdauer	15
Wichtige Anmerkungen	16
Evaluationsresultate 1: Leistungspotential bis 100kW	17
Konzept 1: Wasserwirbelkraftwerk	18
Technische Daten der Anlage in Schöffland	18
Umwelt	19
Wasserbau und bauliche Gestaltung	22
Elektromechanische Ausrüstung	22
Elektrotechnik	25
Betrieb und Unterhalt	25
Gesamteindruck	26
Konzept 2: Stau- resp. Wasserdruckmaschine	28
Technische Daten der Versuchsmaschine im Fluss Iskar in Bulgarien	29
Konzept 3: Hydro-kinetische Turbine / schwimmender Energiewandler / „Strom-Boje“	31
Technische Daten der Strom-Boje 2 in der Donau in der Wachau	31
Konzept 4: Mittelschlächtinge Wasserräder	35
Technische Daten des Wasserrades Herzogenmühle, Wallisellen	35
Umwelt	37
Wasserbau und bauliche Gestaltung	38
Elektromechanische Ausrüstung	38

Elektrotechnik	39
Betrieb und Unterhalt	39
Konzept 5: Lamellenturbine	40
Konzept 6: Wasserkraftschnecke	43
Technischen Daten der Anlage „Alte Ziegelei“, Derendingen:	45
<i>Evaluationsresultate 2: Leistungspotential über 100kW</i>	47
Konzept 7: Very Low Head VLH Turbine von MJ2 Technologies	47
Technischen Daten der Anlage in der Schleuse Nr. 2, Huningue, Rosenau (F)	48
Technischen Daten der Anlage in der Schleuse Nr. 3, Huningue, Rosenau (F)	48
Umwelt	49
Wasserbau und bauliche Gestaltung	50
Elektromechanische Ausrüstung	51
Elektrotechnik	53
Betrieb und Unterhalt	53
Konzept 8: Bewegliches Kraftwerk von Hydro-Energie Roth GmbH	56
Technischen Daten der Anlage Sophienwehr an der Ilm, Bad Sulza (D)	57
Technischen Daten der Anlage Gengenbach an der Kinzig, Nähe Offenburg (D)	58
Umwelt	59
Wasserbau und bauliche Gestaltung	61
Elektromechanische Ausrüstung	63
Elektrotechnik	63
Betrieb und Unterhalt	64
Konzept 9a: DIVE-Turbine	67
Konzept 9b: Schachtkonzept TU München	67
Konzept 10: Heberturbine (MHyLab / Bunorm)	69
Technischen Daten der Anlage UMV in Vallorbe an der Orbe	69
<i>Gesamtbewertung und Zusammenfassung</i>	72

Projektziele

An Schweizer Mittellandflüssen besteht eine grosse Anzahl an Wehrschwellen, die für den Erosions- und Hochwasserschutz erstellt worden sind und die ein beachtliches, aber ungenutztes Wasserkraftpotential enthalten. Die Fallhöhen an diesen Schwellen bewegen sich jedoch im Bereich von 2m und geeignete Maschinengruppen für solche Ultra-Niederdruckanlagen waren bisher nicht verfügbar. Insbesondere besteht die Schwierigkeit, mit den bekannten, bei diesen Fallhöhen sehr langsam laufenden Kaplan- oder Rohrturbinen einen teuren hochpoligen Generator bei Netzfrequenz anzutreiben und dabei die gesamte Maschinengruppe kompakt und unauffällig in die Landschaft zu stellen, ohne die Kosten ins Unermessliche ansteigen zu lassen und ohne eine Ablehnung des Projekts durch die Umweltgruppen zu riskieren.

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, etc., die oft Wildfluss-Charakter aufweisen, ist nicht bekannt.

Ziel des vorliegenden Projekts ist es, den Bauherren, Investoren und Planern in der Schweiz zu zeigen, ob die Nutzung von kleinen Fallhöhen um 2m nun technisch, wirtschaftlich und umweltverträglich möglich wird und diese bislang ungenutzten Wasserkraftpotentiale genutzt werden können.

Projektgliederung und Untersuchungskonzept

Um eine sinnvolle Gliederung der verschiedenen Ansätze zur Nutzung von kleinen Fallhöhen an Flussschwellen zu erhalten, wurden die Pilotlösungen zum einen aufgrund ihres Leistungspotentials und zum anderen aufgrund ihrer Zielsetzung gegliedert:

Leistungspotential:

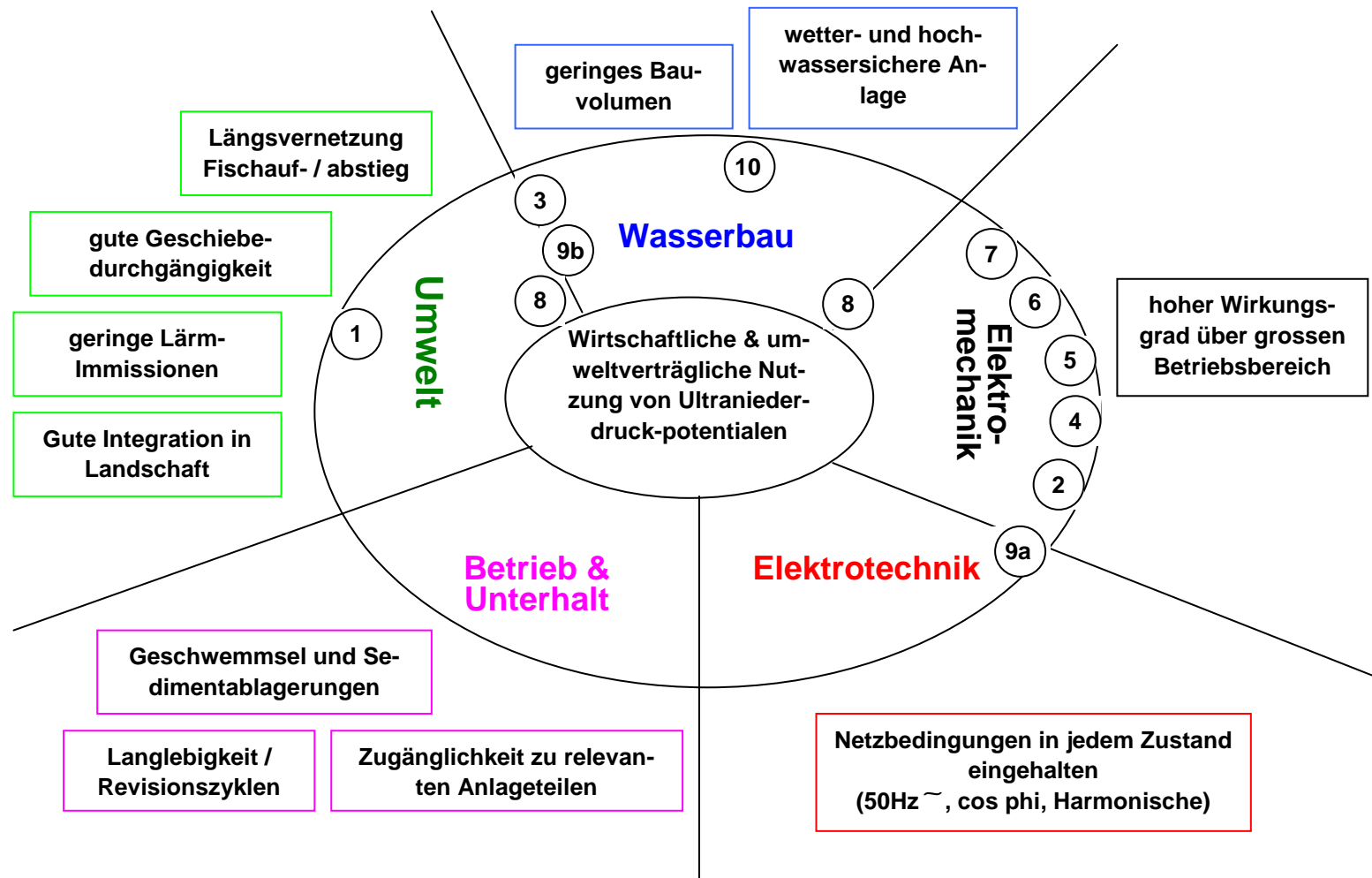
- bis ca. 100kW
- über 100kW

Während bei einigen die Umweltverträglichkeit im Vordergrund stand, fokussierten andere auf die Kostenreduktion der Gesamtanlage, welche über Innovationen bei verschiedenen Teilsystemen gesucht wurde. Dabei können die folgenden Teilsysteme unterschieden werden:

- Wasserbau (Wehr, Wasserfassung, Rechen, Hochwasserschutz)
- Elektromechanik (Maschinensatz mit Turbinen-Generator-Einheit sowie allenfalls Getriebe / Umrichter)
- Elektrotechnik (Steuerung, Drehzahl-Regelung)
- Betrieb und Unterhalt

Ausgehend von einem Anforderungskatalog für Ultraniederdruckanlagen wurden die bekannten Pilotanlagen einem Raster zugeordnet, aus welchem der Ansatz der Initianten hervorgeht. Nachfolgende Graphik zeigt eine Übersicht (siehe Fig. 1):

Fig. 1: Anforderungskatalog für eine wirtschaftliche und umweltverträgliche Nutzung von Ultraniederdruckpotentialen



Die Nummern beziehen sich auf die nachfolgende Auflistung der untersuchten Ultraniederdruckkonzepte. Die Zuteilung erfolgte aufgrund der Konzeptbeschreibung der Hersteller und unterlag damit der subjektiven Einschätzung der Autoren der vorliegenden Studie.

Die in die Evaluation aufgenommenen Niederdruckkonzepte sind der folgenden Liste zu entnehmen:

Tabelle 1: Leistungspotential bis ca. 100kW

Nr.	Name des Typs / Konzepts	Vertriebsfirma	Initiator / Herkunft
1	Wasserwirbelkraftwerk	WWK Energie GmbH, CH-Windisch	Dipl. Ing. Zotlöterer, A-Obergrafendorf
2	Staudruckmaschine / Wasserdruckmaschine	-	Adolf Brinnich †, A-Wien / Projekt HYLOW (EU- finanziert)
3	a) „Strom-Boje“ b) / c) / d) hydrokinetische Turbine e) schwimmender Energiewandler	a) Aqua Libre Energieentwicklungs GmbH, A-Wien b) Hydro Green Energy, Houston, Texas (USA) c) KSB, D-Frankental d) Smart Hydro Power GmbH, D-Feldafing, e) – (noch keine)	a) Fritz Mondl, Aqua Libre, A-Wien b) Wayne F. Krouse, Hydro Green Energy c) – d) Smart Hydro Power GmbH e) Projekt HYLOW (EU- finanziert)
4	Wasserrad (mittelschlächtig)	1. Motorsänger GmbH, CH- Männedorf 2. Hydrowatt GmbH, D-Karlsruhe	19. Jahrhundert: Sagebien (F) und Zuppinger (CH)
5	Lammellen-Turbine (Weiterentwicklung Wasserrad)	1. BEW GmbH, A-Wien	
6	Wasserkraftschnecke	1. Ritz-Atro GmbH, D-Nürnberg 2. Rehart GmbH, D-Ehingen 3. Spaans Babcock (NL- Balk)	ca. 250 v. Chr. Archimedische Schraube

Tabelle 2: Leistungspotential über 100kW

Nr.	Name des Typs / Konzepts	Vertriebsfirma	Initiator / Herkunft
7	Very Low Head VLH	MJ2 Technologies S.A.R.L., F- La Cavalerie	MJ2
8	Bewegliches Kraftwerk	Hydro-Energie Roth GmbH, D- Karlsruhe	Hydro-Energie Roth
9	a) DIVE-Turbine b) Schachtkonzept	a) Fella Maschinenbau GmbH, D-Amorbach	Schachtkonzept: TU München
10	Heberanlage	MhyLab, CH-Montcherand & Bunorm, CH-Aarwangen	Frühes 20. Jahrhundert

Die Anlagentypen 4, 6 und 10 sind bereits länger bekannt (auch in der Schweiz) und damit keine Pilotanlagen mehr; der Vollständigkeit halber wurden diese jedoch in die Untersuchung aufgenommen.

Das Untersuchungskonzept sah vor, ausgeführte Pilotanlagen gemäss obiger Auflistung zu besuchen und die Ausführungsdetails und die Betriebserfahrungen der Anlagen zu dokumentieren. Dabei wurde mit Hilfe eines Kriterienrasters (aufbauend auf Fig. 1) vorgegangen, welcher die Bereiche Maschinenbau, Elektrotechnik, Wasserbau und Umwelt abdeckt.

Kriterienraster

Oft haben die Merkmale der hier vorgestellten Wasserkraft-Technologien gegenläufige Tendenz: ein gutes ökologisches Verhalten geht oft auf Kosten eines hohen Wirkungsgrades der Energiekonverter oder der Wirtschaftlichkeit der Gesamtanlage und umgekehrt. Für den Investor gilt es jeweils abzuwägen, welches Kriterium an seiner Anlage im Vordergrund stehen muss, d.h., mit welcher Technologie das Vorhaben wirtschaftlich überhaupt machbar und nicht zuletzt bewilligungsfähig wird.

Umwelt

Längsvernetzung – Fischabstieg

Idealerweise sollten Fische aller Alters- und Grössenklassen die Wasserkraftmaschine direkt durchschwimmen und so den Abstieg über eine Staustufe ohne Verletzung bewerkstelligen können. Abstiegswillige Fische wandern meist mit der grössten Strömung ab und stossen dabei zwangsläufig auf die Turbine resp. stehen an einem Feinrechen an.

Falls das Durchschwimmen der Wasserkraftmaschine für die Fische nicht gefahrlos ist, müssen Fischschutz und Abstiegshilfen (Bypass-Einrichtungen um die Maschine herum) vorgesehen werden, die bisher nicht über alle Zweifel erhaben sind und sich negativ auf die Wirtschaftlichkeit der Anlage auswirken (zusätzliche Investition). Ein Fisch-Bypass kann deshalb dieses Kriterium „Fischabstieg“ nicht erfüllen. Die Fischmortalität beim Durchgang durch die Wasserkraftmaschine kann nicht nach den bekannten Formeln (Larinier oder Ebel) beurteilt werden, da deren Input-Parameter auf Kaplan-Maschinen basieren und für die neuartigen Konzepte wie Staudruckmaschine, etc. nicht anwendbar sind.

Längsvernetzung - Fischaufstieg

Auch hier erfüllt nur der unbeschränkt mögliche Fischaufstieg direkt durch die Wasserkraftmaschine hindurch dieses Kriterium zu 100%. In den meisten Fällen ist jedoch eine Fischaufstiegshilfe (FAH) um das Wanderhindernis und die Wasserkraftmaschine herum erforderlich, was auch bei Niederdruckanlagen von 2m eine Investition von mindestens CHF 100'000.- benötigt. Nur in Ausnahmefällen ist eine kostengünstigere Lösung mittels weit ausladendem Umgehungsgerinne in flachem Gelände ohne Ufersicherungen möglich.

Sedimentdurchgängigkeit

Eine Wasserkraftmaschine (und deren Wehranlage falls erforderlich) sollte keine Störung des Geschiebetriebes hervorrufen. Konventionelle Wehranlagen behindern oder zumindest verzögern den freien Geschiebetrieb immer zu einem gewissen Grad, auch wenn sie mit Wehrklappen oder Schützen ausgerüstet sind.

Landschaftsbild – Landbedarf

Maximale Punktzahl bekommen Anlagen, die nicht in Erscheinung treten, d.h., die zum Beispiel in überströmter Bauweise im Fluss liegen und weder einen Landbedarf am Ufer haben, noch einen Gewässereinstau bewirken.

Am anderen Ende der Skala liegen jene Wasserkraftmaschinen, die Wehr und Ausleitkanäle benötigen und die wegen ihrer Funktionsweise hoch über das Gelände hinausragen müssen oder die ein Maschinenhaus mit Saalkran und entsprechend grosser Bauhöhe benötigen.

Lärmimmissionen

Ideal sind jene Wasserkraftmaschinen, die unhörbar sind, weil die Turbinen-Generator-Einheit gekapselt ist und/oder im Wasser liegt und die Kühlung nicht mit Umgebungsluft sondern mit dem Triebwasser geschieht.

Wasserbau und bauliche Gestaltung

Bauvolumen

Die idealsten Wasserkraftmaschinen sind jene, die gar keine Einbauten im Fluss benötigen wie z.B. die schwimmenden Energiewandler, die nur auf eine Befestigung am Flussgrund angewiesen sind.

Am anderen Ende der Skala liegen jene Anlagen wie z.B. das klassische Buchtenkraftwerk, welches neben einer Wehranlage auch Wass erfassung, Einlaufkanal, Maschinenhaus und Saugrohr/Auslaufkanal erfordert.

Wetter- und hochwassersicherer Bau

Vorteilhaft sind jene Anlagen, die nicht durch ein Maschinenhaus und wasserdichten Beton geschützt werden müssen, sondern schon so ausgeführt sind, dass sie auch ohne zusätzliche Schutzhülle Hochwasser und Wettereinflüsse überdauern.

Ungünstig sind jene Anlagen, die seit je her an Ausleitkanälen weg vom Fluss und mit Einlaufschützen abschliessbar angeordnet werden müssen, um nicht bei jedem Hochwasser beschädigt zu werden.

Elektromechanische Ausrüstung

Wirkungsgrad (Auslegungspunkt)

Nicht nur die hydraulische Maschine für sich sondern die ganze Kette von der hydraulischen Inputleistung bis zum elektrischen Output auf der Niederspannungs-Netzebene muss berücksichtigt werden, da nur dieser Output verkauft und mit ihm Ertrag generiert werden kann. Insbesondere sind auch die Verluste von Übersetzungsgetrieben oder Frequenzumrichtern einzubeziehen.

Die erreichbaren Wirkungsgrade sind leistungsabhängig, d.h., kleine Energiewandler im 10kW-Bereich erreichen nicht die Wirkungsgrade der grösseren Maschinensätze mit Leistungen >100kW. Für die Benotung wurde die nachfolgende Graphik benutzt.

Benotung Gesamtwirkungsgrade

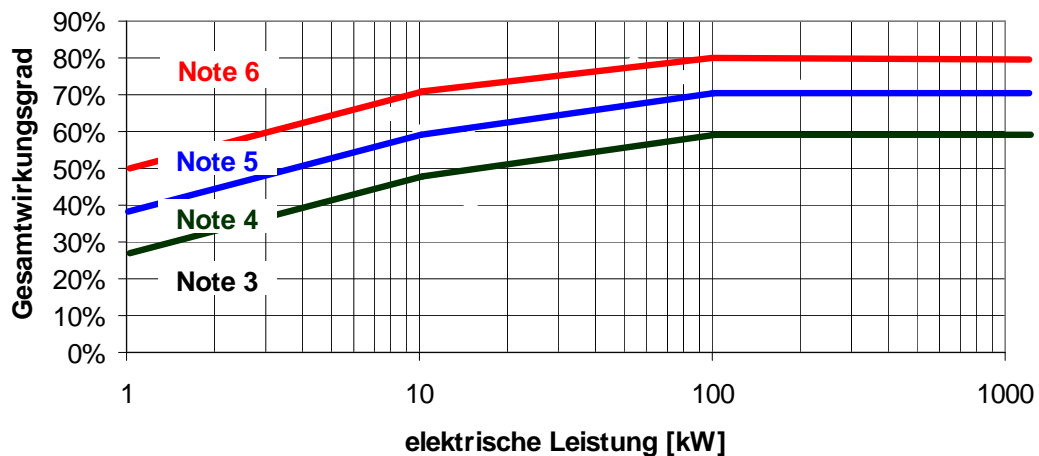


Fig. 2: Benotung der Gesamtwirkungsgrade im Auslegungspunkt

Teillastverhalten

Der Teillastwirkungsgrad ist in der Evaluation auch zu berücksichtigen, denn einige der neueren Konzepte zeigen ansprechende Wirkungsgrade nahe am Auslegungspunkt, während bei geringen Durchflüssen kaum mehr eine Leistung vorhanden ist. Gerade in den Schweizerischen Mittellandflüssen, die Gegenstand der vorliegenden Untersuchung sind, gibt es sehr grosse Abflussschwankungen, die mit der Klimaerwärmung eher noch zunehmen werden (länger andauernde Trockenperioden gefolgt von intensiven Regenfällen).

Die übliche Gewichtung $\eta_{\text{gew.}} = \frac{1}{4} (\eta_{P25\%} + \eta_{P50\%} + \eta_{P75\%} + \eta_{P100\%})$ konnte nicht angewandt werden, da die entsprechenden Daten für die wenigsten Konzepte veröffentlicht wurden und dem Evaluationsteam somit nicht zur Verfügung standen. Es wurde deshalb eine mehr qualitative Bewertung vorgenommen.

- Note 6: Teillastwirkungsgrad wie doppelt-regulierte Kaplan-Maschine mit hohem Wirkungsgrad bis hinunter zu 15% $Q_{\text{min}}/Q_{\text{max}}$.
- Note 5: Teillastwirkungsgrad wie einfach-regulierte Kaplan-Maschine aber mit Umrichter-Technologie zur Quasi-Doppelregulierung verbessert.
- Note 4: Teillastwirkungsgrad wie reine Propeller-Maschine
- Note 3: Leistung bei geringen Durchflüssen von $<50\% Q/Q_{\text{max}}$ stark abfallend
- Note 1: Betrieb bei geringen Durchflüssen von $<50\% Q/Q_{\text{max}}$ nicht mehr möglich

Elektrotechnik

Aufwand, um Netzbedingungen zu erreichen

Ideal sind jene Wasserkraftmaschinen, die z.B. ohne Getriebe, Frequenzumrichter, Maximum Powerpointtracker (MPPT) und Transformator (galvanische Trennung zur Verhinderung von Störungsübertragungen ins Netz) direkt 50Hz Drehstrom in genügender Qualität ans Netz liefern können.

Betrieb und Unterhalt

Geschwemmselentnahme

Die maximale Punktzahl ist zu erreichen, wenn keine Geschwemmselentnahme mit Feinrechen und Rechenreinigungsmaschine (RRM) anfällt und das Geschwemmsel mit dem Triebwasser durch die Wasserkraftmaschine hindurch geht, ohne Störungen zu verursachen. Am anderen Ende der Skala liegen jene Anlagen, die nicht nur Feinrechen, RRM und Geschwemmselentsorgung benötigen, sondern bei hohem Geschwemmselanfall im Herbst auch noch Betriebsausfälle durch Geschwemmselablagerungen und anschliessende Reinigungsarbeiten zu beklagen haben.

Sedimentablagerungen

Anlagen mit klassischer Seitenentnahme sind nicht immer an idealem Standort an einer Flussaussenkurve positioniert, so dass Geschiebeablagerungen vor oder nach der Wasserkraftmaschine vorkommen und regelmässig gereinigt werden müssen. Auch wenn diese Ablagerungen durch Spülungen entfernt werden können, ist dieses Kriterium damit nicht vollständig erfüllbar, da solche Spülvorgänge (i) nur während genügend grossen Abflüssen im Gewässer erlaubt sind und (ii) an Schweizer Mittellandflüssen während der Fischeschonzeit (ca. November bis April / Mai je nach Gewässertyp) gar nicht durchgeführt werden dürfen. Zudem sind die Spülungen im Hochwasserfall oft nicht effizient oder gar nicht möglich, weil mit dem Öffnen der Spülschütze eher noch mehr Geschiebe in die Anlage eingeschwemmt wird oder speziell bei Ultraniederdruckanlagen an der Spülschütze keine Druckhöhe zur Verfügung steht, um die Geschiebeablagerungen während des Hochwassers zu mobilisieren und abzuschwemmen. In jedem Fall sind Konzepte, die regelmässige, wenn auch einfache Spülungen erfordern, nicht so hoch zu bewerten wie jene, die aus ihrer Konzeption heraus gar keine Sedimentprobleme kennen.

Zugänglichkeit

Die maximale Punktzahl für dieses Kriterium wird dann erreicht, wenn alle unterhaltsrelevanten Teile insbesondere der Elektromechanik und Elektrotechnik aber auch der verstopfungsanfälligen Elemente der Triebwasserwege gut zugänglich sind, und dies auch während hoher Wasserführung des Gewässers.

Auf der anderen Seite der Skala sind Anlagen in kompletter Unterwasseranordnung, die zuerst eine Abdämmung mit Dammbalken und eine vollständige Entwässerung sowie das Öffnen von Druckdeckeln benötigen, um einfache Reparaturen durchzuführen.

Lebensdauer

Die maximale Punktzahl wird dann erreicht, wenn Aufbau und Konstruktion der Anlage in etwa eine Lebensdauer wie folgt erwarten lässt:

- Bau 40 bis 50 Jahre (entspricht ca. Dauer der Wasserrechtskonzession für Kleinwasserkraftanlagen)
- Stahlwasserbau > 30 Jahre
- Elektromechanik > 25 Jahre
- Elektrotechnik > 15 Jahre

Verschleissteile (Steuerungsmodule, Dichtungen, Lager) sowie Korrosionsschutz sind ausgenommen, vorausgesetzt deren Einsatzzyklen bewegen sich im Bereich von mindestens 8 bis 10 Jahre resp. 20 Jahre beim Korrosionsschutz.

Wichtige Anmerkungen

- Auf die negativen gewässerökologischen Auswirkungen einer Querschwelle im Gewässer, die für die Wasserkraftnutzung im Niederdruckbereich im Allgemeinen erforderlich ist, wird hier nicht eingegangen. Wie in den Projektzielen erläutert, sind es die vielen bestehenden Wehrschwelle zur Sohlenfixierung in Schweizer Mittellandflüssen, die für den Einbau von Ultraniederdruck-Kraftwerken in Frage kommen. Dort sind die negativen Effekte einer Staustrecke (herabgesetzte Fließgeschwindigkeit, Sedimentablagerungen, monotone Gewässerstruktur, etc.) sowohl mit wie auch ohne Wasserkraftnutzung vorhanden. Deshalb wird dieses Kriterium hier nicht bewertet.

Der Bau von neuen solchen Schwellen im Bereich von 2m Fallhöhe ausschliesslich für die Wasserkraftnutzung scheitert in den meisten Fällen sowohl an der 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 oben 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 deshalb als gering bis nicht erfüllt eingestuft, obwohl die Anlage ja mit einem Fischschutz (z.B. Lochblech vor der Turbine) ausgerüstet sein könnte und damit keine Fischschäden verursachen würde. Der wirtschaftliche Aspekt führt jedoch zu einer schlechteren Bewertung.

Evaluationsresultate 1: Leistungspotential bis 100kW

Für die Beurteilung der oben definierten Kriterien wurde bei der Evaluation der verschiedenen Kraftwerkskonzepte der folgende Beurteilungsschlüssel angewandt:

- ++ sehr hoher Erfüllungsgrad (Note 6)
- + guter Erfüllungsgrad (Note 5)
- 0 knapp genügender Erfüllungsgrad resp. neutral oder nicht relevant (Note 4)
- geringer Erfüllungsgrad (Note 3)
- Kriterium wird nicht erfüllt (Note 1)

Da für die wenigsten 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 Wirkungsgrad fixiert, sondern ist die Sicht eines Investors, der das ungenutzte Energiepotential an bestehenden Wehrschwellen 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.

Konzept 1: Wasserwirbelkraftwerk

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 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 in Betrieb genommen. Projektträger ist die Genossenschaft Wasserwirbelkraftwerke Schweiz (GWWK).

Diese Anlage wurde vom Evaluationsteam Ende 2009 ein erstes Mal kurz besucht. Es konnten damals noch keine relevanten Betriebsergebnisse in Erfahrung gebracht werden. In der Zwischenzeit wurde die Anlage kontinuierlich verbessert und die Wirkung der verschiedenen Modifikationen teilweise auch von externer Seite dokumentiert.

Das Prinzip der Wasserwirbeltechnologie beruht auf der Umwandlung von Rotationsenergie in elektrische Energie. Dabei wird ins Wirbelzentrum eines runden Beckens mit mittlerer Auslauföffnung, dem sog. Rotationsbecken, ein Turbinenrotor gestellt, welcher mit einem Generator verbunden für die Umwandlung der hydraulischen in elektrische Energie verantwortlich ist. 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. Die Initianten der Wasserwirbeltechnologie gehen noch einen Schritt weiter und geben an, dass das Wasser in solchen Widerwasserabschnitten mit natürlichen Wirbeln mit Sauerstoff angereichert und sich dadurch abkühlen würde. Für sie stellt deshalb die Erzeugung von künstlichen Wirbeln in einem Wasserwirbelkraftwerk auch eine Korrektur der negativen Auswirkungen von begradigten und korrigierten Flussabschnitten mit geringer Vielfalt dar und es wird auch im Rotationsbecken eine Sauerstoffaufnahme postuliert¹.

Technische Daten der Anlage in Schöffland

- Fallhöhe 1.4m (auch für Standorte mit Fallhöhen ab 0.7m möglich)
- nutzbare Durchflussmenge 0.8 bis 2.2m³/s
- Beckendurchmesser 6.5m
- hydraulische Leistung max. 30.2kW
- elektrische Leistung max. ca. 11kW (beobachtet wurden bisher ca. 7kW)
- Turbinendrehzahl variabel, bei Nominalabfluss 21min⁻¹
- Investitionskosten rund CHF 340'000.-- (ohne nachträgliche Fischaufstiegshilfen)
- erwartetes Jahresarbeitsvermögen ca. 40'000 kWh (mit aktueller Technologie)

¹ Eine bleibende Sauerstoffaufnahme ist nicht nachweisbar, da das Wasser in Schweizer Mittellandflüssen und -bächen meistens sauerstoffgesättigt ist.

Die Firma WWK Energie GmbH wurde Mitte 2009 gegründet, um Wasserwirbelkraftwerke im Auftrag der Genossenschaft GWWK und Dritter zu entwickeln, planen, realisieren und zu betreiben. In Zusammenarbeit mit der Fachhochschule Nordwestschweiz wird die Wasserwirbeltechnologie laufend verbessert.

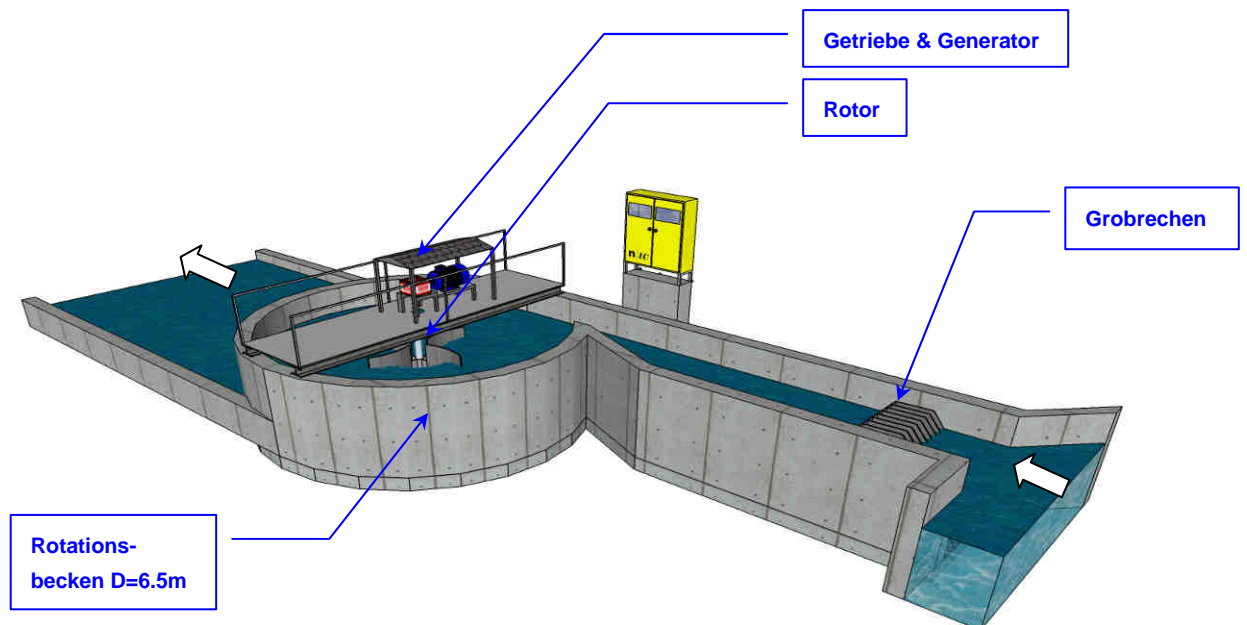


Fig. 3: Darstellung des Wasserwirbelkraftwerks Schöffland an der Suhre (Quelle: Bachelor-Arbeit FHNW 2011, ergänzt durch die Autoren)

Anlässlich verschiedener Besuche durch das Evaluationsteam vor Ort, konnten die folgenden Feststellungen gemacht werden:

Umwelt

Längsvernetzung – Fischabstieg

Das Durchschwimmen des Wasserwirbelkraftwerks ist wahrscheinlich für alle Fischarten mehr oder weniger gefahrlos möglich. Ein Fischschutz und oder eine Abstieghilfe (Bypass-Einrichtungen um die Maschine herum) ist nicht vorhanden. Der Abstieg wird jedoch von bodenorientierten Kleinfischen und Wirbellosen wahrscheinlich nicht angenommen, da der Zulaufkanal teilweise und das Rotationsbecken gesamthaft einen glatten Betonboden und keine Natursohle aufweisen.

+ guter Erfüllungsgrad (5)

Längsvernetzung - Fischaufstieg

Die ursprüngliche Annahme, dass die Fische vom Unterwasserkanal durch die mittige Öffnung des Rotationsbeckens aufsteigen würden, hat sich – mit Ausnahme von einzelnen, sehr schwimmstarken Forellen - nicht bewahrheitet. Es wurde deshalb im Winter 2010/11 eine Fischschleuse wie sie am Kraftwerk Buchholz (Gossau/Flawil) an einer 15m hohen Stauanlage seit 2006 in Betrieb ist, direkt an den Oberwasserkanal angebaut. Die im Unterwasserkanal unter dem Rotationsbecken anstehenden Fische können mit dieser Einrichtung periodisch ins Oberwasser geschleust werden.

Damit ist die Wasserwirbeltechnologie nicht weiter als konventionelle Niederdruckanlagen, die eine zusätzliche Fischaufstiegshilfe (FAH) um das Wanderhindernis und die Wasserkraftmaschine herum benötigen. Neben den zusätzlichen Investitionskosten gilt es bei der gewählten FAH in Form einer Fischschleuse auch die höheren Unterhalts- und Betriebskosten für die automatischen Schützen und deren Steuerung zu berücksichtigen.

- geringer Erfüllungsgrad (3)

Sedimentdurchgängigkeit

Die Anlage in Schöffland ist so konzipiert, dass die Hauptstromrichtung in den Einlaufbereich führt und keine Geschiebeschwelle vorhanden ist. Die GWWK argumentiert denn auch, dass es sich nicht um ein Ausleitkraftwerk mit Restwasserstrecke handle, sondern dass sich der Bach durch die Anlage hindurch fortsetze. Entsprechend müsste auch die Sedimentdurchgängigkeit durch die Anlage hindurch gewährleistet werden können. Im Hochwasserfall geht die Hauptstromrichtung jedoch über die Blockrampe.

Mit der Seitenentnahme in einem nahezu geraden Bachabschnitt ist jedoch immer auch ein gewisser Geschiebe- und Sandeinzug in den Ausleitkanal (siehe Fig. 4) zu erwarten (insbesondere, da keine Geschiebeschwelle vorhanden ist), so dass Sedimente in das Rotationsbecken gelangen, wo sie sich aussen ablagern (wie in einem Zyklon-Sandabscheider).

- geringer Erfüllungsgrad (3)

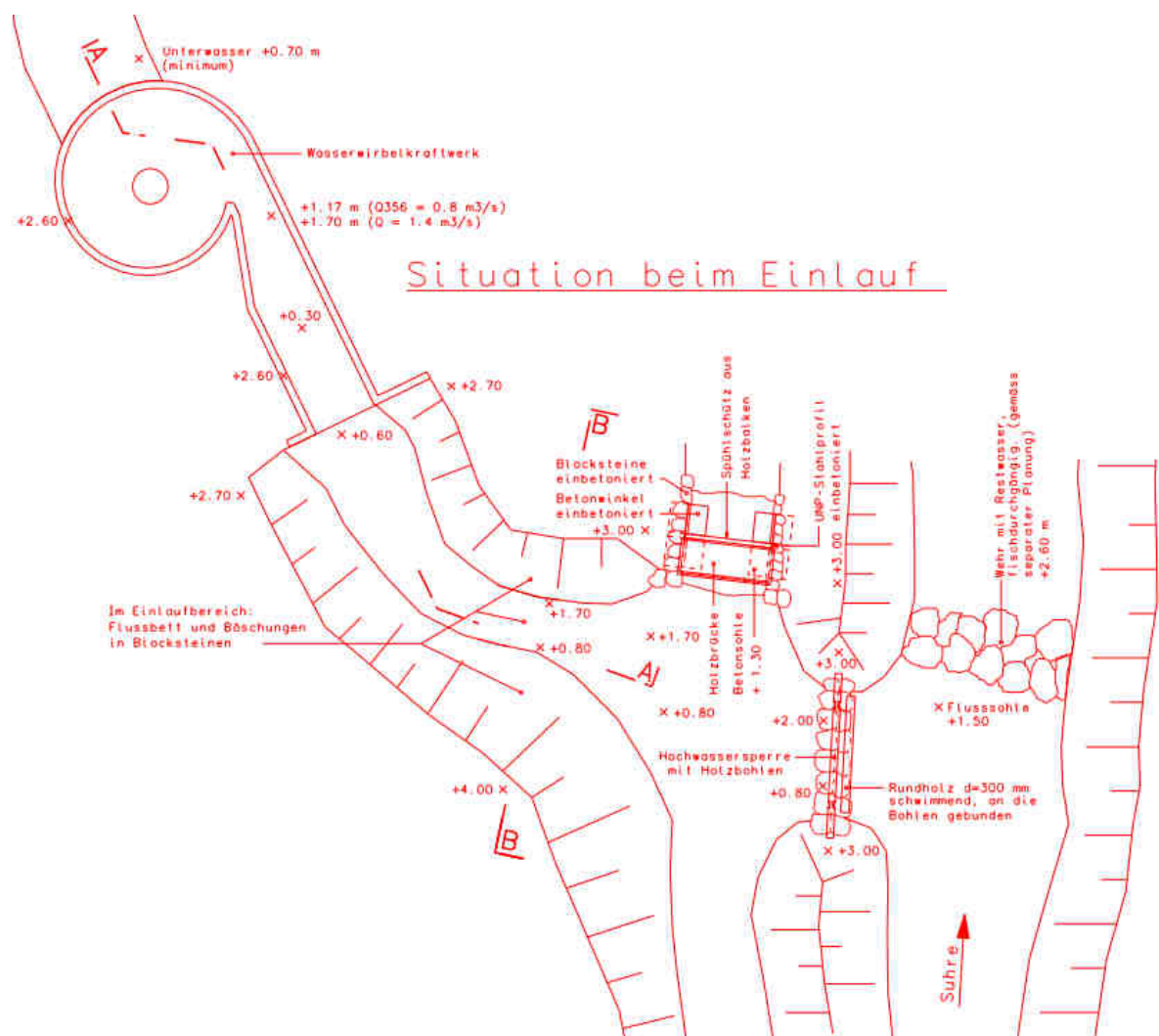


Fig. 4: Situationsplan des Wasserwirbelkraftwerks Schöffland an der Suhre (Quelle: GWWK)

Landschaftsbild – Landbedarf

Die Anlage in Schöffland beansprucht im Vergleich zu ihrer Leistung von 11kW erstaunlich viel Land. Zwar bezeichnen die Initiatoren des Wasserwirbelkraftwerkes den rund 25m langen Ausleitkanal als einen Flussarm, doch entspricht das trotz mehrheitlich natürlich gestalteten Ufern nicht der Tatsache, denn der Kanal besitzt nicht den Bachcharakter mit geringer Fliesstiefe und flachen Ufern.

Auch das im Durchmesser 6.5m messende Rotationsbecken aus Beton mit der aufragenden Einlaufschütze und dem Maschinenaufbau erscheint vom Landschaftsbild her unattraktiv, insbesondere vor dem Hintergrund der geringen Leistung der Anlage.

- geringer Erfüllungsgrad (3)



Fig. 5: Ansicht des Wasserwirbelkraftwerks Schöffland vom Oberwasserkanal her gesehen

Lärmimmissionen

Die im freien aufgestellte Getriebe- und Generatorengruppe ist bei Vollast nachts weit herum zu hören. Wenn dieses Surren an einem Standort mit sensibler Umgebung zum Problem werden sollte, liesse sich mit einer Einhausung Abhilfe schaffen, was aber zu zusätzlichen Investitionskosten führen würde.

- geringer Erfüllungsgrad (3)

Wasserbau und bauliche Gestaltung

Bauvolumen

Die Anlage Schöffland besitzt wie das klassische Ausleitkraftwerk eine Wehranlage mit Wasserfassung (beides in Blocksatz), einen Ausleitkanal (25m lang, naturnah), einen Einlaufkanal (8m lang, Beton), ein Rotationsbecken (Beton Durchmesser=6.5m) und einen Auslaufkanal (naturnah mit Blocksatz). Darüber hinaus ist noch eine Hochwasserentlastungs- und Spülschütze von 2.8m Breite im Oberwasserkanal vorhanden, sowie neu die Fischaufstieghilfe in Form einer Fischschleuse (aus Natursteinblöcken mit Abdichtung). Einzig der Verzicht auf einen Feinrechen und eine Rechenreinigungsmaschine lässt eine Einsparung gegenüber einer konventionellen Anlage zu.

Dieses grosse Bauvolumen ist wahrscheinlich für die hohen Investitionskosten von über CHF 340'000.- verantwortlich, was bei 11kW maximalem Output zu spezifischen Investitionskosten von über CHF 30'000.-/kW führt!

- geringer Erfüllungsgrad (3)

Wetter- und hochwassersicherer Bau

Der Maschinensatz des Wasserwirbelkraftwerks muss nicht durch ein Maschinenhaus und wasserdichten Beton geschützt werden. Die Getriebe-Generator-Einheit ist hoch über dem maximalen Hochwasserspiegel angeordnet; eine einfache Bedachung genügt zum Schutz vor der Witterung. Wie langlebig die Komponenten unter diesen Bedingungen jedoch sind, ist nicht genau abschätzbar.

- + guter Erfüllungsgrad (5)

Fig. 6: Schutzdach über der Getriebe-Generator-Einheit des Wasserwirbelkraftwerks Schöffland



Elektromechanische Ausrüstung

Wirkungsgrad (Auslegungspunkt)

Die Elektromechanische Ausrüstung besteht aus einem Rotor mit stehender Welle („Turbine“), zwei Übersetzungsgetrieben (1 x Winkelgetriebe und 1 x Riemenantrieb), einem Asynchron-Generator sowie einem Frequenzumrichter.

Gemäss einer Untersuchung im Rahmen einer Bachelor-Arbeit an der Fachhochschule der Nordwestschweiz (FHNW) von Anfang 2011 bringt es die Wasserwirbeltechnologie bisher nur auf einen Gesamtwirkungsgrad von 23.5%, d.h., bei einer maximalen hydraulischen

Leistung von 30.5kW (Nettofallhöhe 1.40m, Durchfluss max. 2.2m³/s), können 7.1kW elektrische Leistung ins Niederspannungsnetz abgegeben werden.

Die Annahmen zu den Wirkungsgraden gemäss nachfolgender Abbildung sind jedoch teilweise sehr tief:

- der Asynchronmotor als Generator sollte bei richtiger Dimensionierung weit über 80% Spitzenwirkungsgrad haben;
- der Wirkungsgrad des Frequenzumrichters sollte auch für diese kleine Leistung noch über 93% liegen.

Es ist nicht klar, wieweit Messungen an der Anlage in Schöffland selber zu diesen Annahmen geführt haben; möglicherweise wurde der Generator stark überdimensioniert (weil man eine weit höhere Inputleistung von der Turbine her erwartet hatte), so dass er jetzt in einem schlechten Teillastbereich betrieben werden muss.

Ein Gesamtwirkungsgrad von über 30% sollte bei guter Dimensionierung und Auswahl aller elektrischen und elektronischen Komponenten problemlos erreicht werden können; das ändert aber nichts an dem generell enttäuschenden Gesamtwirkungsgrad des Wasserwirbelkraftwerks.

- geringer Erfüllungsgrad (3)

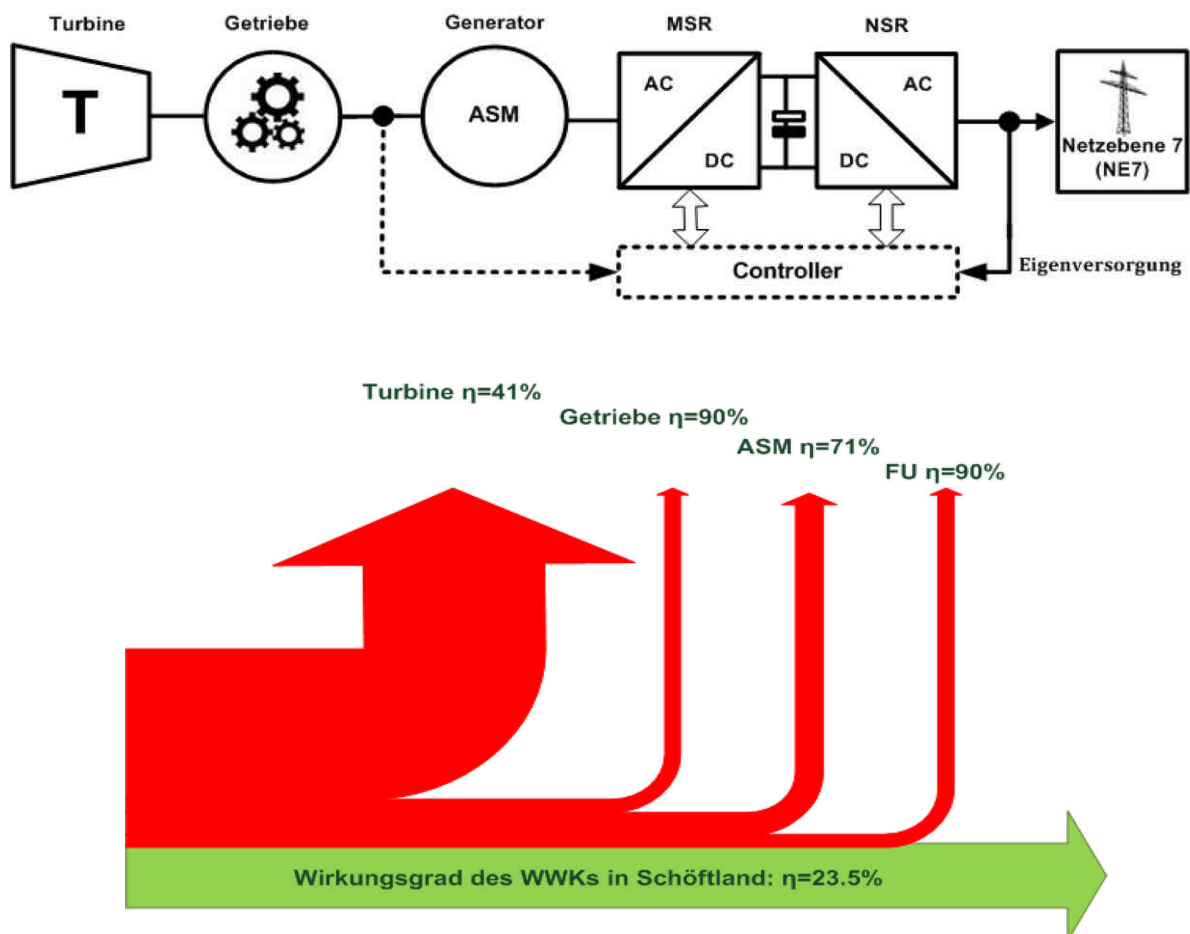


Fig. 7: Wirkungsgrad-Abschätzung des Wasserwirbelkraftwerks Schöffland (Quelle: Bachelor Thesis; Studiengang Elektro- und Informationstechnik; FHNW Brugg/Windisch; 2011)

Teillastverhalten

Das Teillastverhalten des Wasserwirbelkraftwerks in Schöffland erwies sich als schlecht:

- Da sich der Wirbel im Becken bei höherem oder geringerem Durchfluss als bei Auslegungsbedingungen auch schneller resp. langsamer drehte und damit nicht mehr synchron mit dem Rotor war, bildeten sich Sekundärströmungen an den Schaufeln, die den Wirkungsgrad der Anlage weiter verringerten.
- Da es keine Durchflussregelung gibt, kann der Wasserspiegel im Becken bei Zuflüssen unter der Dimensionierungswassermenge nicht gehalten werden; er fällt ab. Damit nimmt auch die Leistung dramatisch ab.

Um das Teillastverhalten des Wasserwirbelkraftwerks in Schöffland zu verbessern, wurde Mitte 2010 ein Frequenzumrichter eingebaut, der es erlaubt, die Drehzahl der Maschine an die sich im Becken je nach Durchfluss ausbildende Wirbeldrehzahl anzupassen. Dazu ist auch noch ein Maximum Powerpointtracker (MPPT) erforderlich, der die jeweilige optimale Drehzahl sucht. Das System läuft nicht nach den Vorstellungen der Betreiber. Bei geringen Wasserzuflüssen kann nach wie vor nicht verhindert werden, dass der Wasserspiegel im Becken stark abfällt. Das hat Auswirkungen bis zum Einlaufkanal und sogar bis in die Suhre, so dass weder der Fischaufstieg noch der Wehrüberfall funktionieren; die „Restwasserstrecke“ wie auch die Fischschleuse fallen trocken und die Längsdurchgängigkeit ist unterbrochen.

-- Kriterium nicht erfüllt (1)

Die neueste Arbeit an der Fachhochschule der Nordwestschweiz (FHNW) von Anfang 2011 kommt jedoch zum Schluss, dass eine gleichbleibende Drehzahl auch bei variierenden Abflüssen besser sei und man auf den Frequenzumrichter verzichten könne. Ob sich dieses überraschende Resultat nur in Kombination mit einem verbesserten Rotor ergeben hat, ist nicht bekannt.



Fig. 8: Rotor des Wasserwirbelkraftwerks Schöffland im Betrieb



Fig. 9: Wasserwirbelkraftwerk Schöffland mit abgesunkenem Oberwasserspiegel (ungenügendes Reguliervermögen des Frequenzumrichters)

Elektrotechnik

Aufwand, um Netzbedingungen zu erreichen

Wie oben dargestellt, ist beim Wasserwirbelkraftwerk in Schöffland neben dem Getriebe noch ein Frequenzumrichter mit Powerpointtracker (MPPT) nötig, um 50Hz Drehstrom in genügender Qualität ans Netz liefern können. Mit einem Frequenzumrichter kann auch der Leistungsfaktor $\cos\phi$ korrigiert werden.

Wird das Wasserwirbelkraftwerk wie ursprünglich ohne Frequenzumrichter betrieben, muss mit dem gewählten Asynchrongenerator noch stufenweise kompensiert werden (Kondensatoren-Bank), um auch bei niedriger Leistung den vom Netzbetreiber vorgeschriebenen Leistungsfaktor $\cos\phi$ einhalten zu können.

- **geringer Erfüllungsgrad (3)**

Betrieb und Unterhalt

Geschwemmselektnahme

Geschwemmselekt wird in Schöffland nur mit einer Tauchwand aus Holz bei der Wasserfassung und mit einem Grobrechen im Einlaufkanal vom ungehinderten Eindringen in das Wirbelbecken abgehalten, denn für kleines Geschwemmselekt ist der Rotor nicht anfällig. Größere Äste bleiben am Grobrechen hängen und verursachen Probleme. Es war angedacht, eine einfache Seilzugmaschine zur Reinigung des Grobrechens einzubauen und eine häufige Intervention des Betriebswarts zu eliminieren; das wurde bisher noch nicht ausgeführt.

- **geringer Erfüllungsgrad (3)**

Sedimentablagerungen

Sedimente, die mit dem Triebwasser bis ins Rotationsbecken gelangen, lagern sich wie in einem Zyklon-Sandabscheider aussen am Beckenrand ab, was eine Reinigung nach sich zieht. Zudem vermindern die mit dem Wirbel an der Beckenwand ständig mitdrehenden Kiesablagerungen die Lebensdauer des Beckenbetons.

- geringer Erfüllungsgrad (3)

Zugänglichkeit

Alle unterhaltsrelevanten Teile sind am Wasserwirbelkraftwerk gut zugänglich und dies auch während hoher Wasserführung des Gewässers.

++ sehr hoher Erfüllungsgrad (6)

Lebensdauer

Die Ausführung der Wasserbauten ist eher leicht geraten; es wurden nicht die im Wasserbau sonst üblichen Fundationstiefen und Bauteildicken gewählt, die auch Extremhochwasser unbeschadet überstehen können. Bereits im ersten Betriebsjahr wurden Ausschwemmungen an der Blockrampe und bei der Wasserfassung festgestellt und es mussten grössere Reparaturen ausgeführt werden.

Auch die Elektromechanik ist bezüglich Lebensdauer nicht über alle Zweifel erhaben: die Maschinenplattform über dem Rotationsbecken ist zu leicht geraten und die Stahlprofile biegen sich unter Last durch; es kommt zu Schwingungen.

- geringer Erfüllungsgrad (3)

Gesamteindruck

Der Gesamteindruck des ersten Wasserwirbelkraftwerkes ist noch ungenügend. Insbesondere das schlechte Abschneiden bei den Umweltthemen überrascht, da die Promotoren dieser Technologie vorwiegend auf diese Aspekte fokussiert sind.

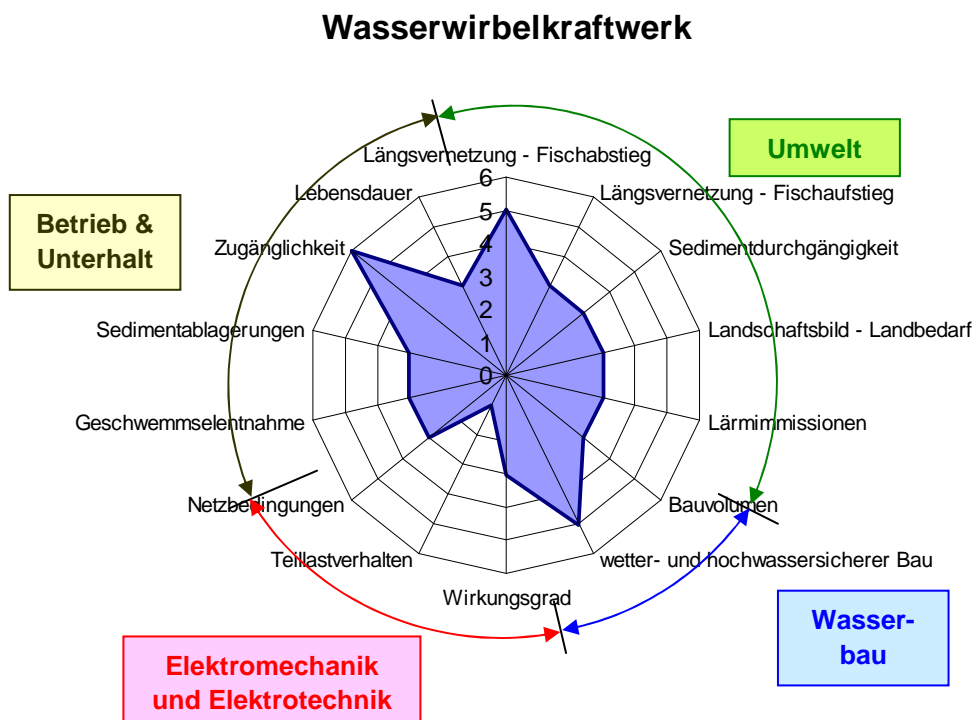


Fig. 10: Gesamtevaluation des Wasserwirbelkraftwerks Schöffland an der Suhre

Die Wasserwirbeltechnologie steckt noch in der Entwicklungsphase. Das ist auch der Grund, weshalb die WWK Energie GmbH ihren Kunden, die ein Wasserwirbelkraftwerk bestellen, eine Supportgebühr in der Höhe von 12% der jährlichen Stromertragseinnahmen während der ersten 15 Betriebsjahre in Rechnung stellt und für die weitere Forschung und Entwicklung der Technologie einsetzen will. Mit der bisher sehr bescheidenen Jahresproduktion eines Wasserwirbelkraftwerks und diesen zusätzlichen Supportgebühren lässt sich auch mit der kostendeckenden Einspeisevergütung kEV kein Projekt finanzieren, welches nicht auf à-fonds-perdu Beiträge oder zinslose Darlehen angewiesen wäre.

Die Autoren dieser Studie kommen zum Schluss, dass die konsequente Weiterentwicklung der Wasserwirbeltechnologie zu einer Reaktionsturbine in Form einer klassischen vertikalachsigen Kaplanmaschine führen wird, deren grundlegende Gleichung schon Leonhard Euler (1707 – 1783) beschrieben hat (siehe Fig. 11).

Es ist deshalb eher fraglich, in welche Richtung die Wasserwirbeltechnologie entwickelt werden soll, wenn diese Arbeit vor genau 100 Jahren durch Prof. Kaplan in Brünn bereits vorweggenommen worden ist und mit den heutigen Kaplanmaschinen (auch in der Kleinwasserkraft) Spitzenwirkungsgrade von über 92% erzielt werden können². Eventuell wäre eine Modifikation der bestehenden Kaplan-Technologie zu kostengünstigeren und ökologischeren Bauarten auch eine Überlegung wert.

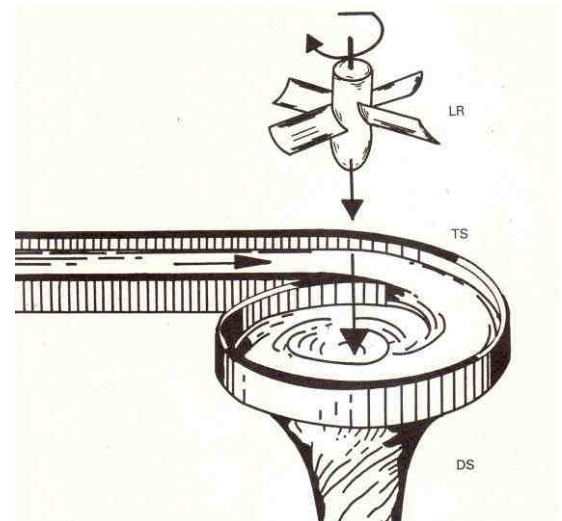


Fig. 11: Schematische Darstellung einer Reaktionsturbine – die Ähnlichkeit mit der Wasserwirbeltechnologie ist frappant (Quelle: J.M. Chapallaz: Wasserturbinen – Impulsprogramm PACER 1995)

In der Öffentlichkeit wird die Wasserwirbeltechnik ganz unterschiedlich beurteilt:

- Einige Vertreter der Wasserkraftindustrie lehnen diese neuartige Technologie wegen der vergleichsweise geringen Energieausbeute eher ab: wenn schon ein Eingriff in ein Gewässer mit Restwasserstrecke gemacht und teilsubventionierte Einspeisetarife (kEV) beansprucht würden, dann sollte diejenige Unternehmung resp. deren Technologie gewählt werden, die in Anlehnung an das Wasserrechtsgesetz (WRG 721.80) Art. 41 „für die wirtschaftliche Ausnutzung des Gewässers am besten sorgt“.
- Vertreter aus Umweltgruppen befürworten die Wasserwirbeltechnik mit dem Argument, dass nicht überall die letzte kWh aus einem Wasserkraftpotential herausgepresst werden müsse und sich auch mit einer sub-optimalen Energieausbeute und einem Technologieniveau unterhalb des bei EVUs geltenden Industriestandards grüner Strom produzieren liesse.

² Leider sind die auf dem Markt erhältlichen Kaplanmaschinen für den vorliegenden Leistungsbereich <100kW meistens zu aufwändig und damit zu teuer für die geringen Fallhöhen von ca. 2m und die entsprechend tiefe Jahreserträge.

Konzept 2: Stau- resp. Wasserdruckmaschine

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.

Die erste Staudruckmaschine nach dem verbesserten Design des österreichischen Erfinders Alfred Brinnich † (Firma WICON) wurde 2006 im Wiener Neustädter Kanal / Schleuse 9 in Pfaffstätten eingebaut. Frühere Modelle nach Adolf Brinnich wurden in Deutschland erstellt, wo sogar ein Deutscher Verband Wasserkraft-Staudruckmaschine e.V. (c/o Herrn Dipl.-Ing. A. Kaminski in Wermelskirchen) gegründet wurde.



Fig. 12: Staudruckmaschine, Pilotanlage am Wiener Neustädter Kanal (Quelle: WICON Generatoren)

Offensichtlich waren diese Staudruckräder wenig erfolgreich; die Räder am Wiener Neustädter Kanal sind wieder ausgebaut worden.

Im Rahmen des EU-Forschungsprojekts „HYLOW“, welches die Entwicklung von wirtschaftlichen und ökologisch effektiven Wasserkraftwandlern für niedrigste Fallhöhen bis 2.5m zum Ziel hat, wurden zwei Pilotprojekte von Wasserdruckmaschinen³ in Deutschland und in Bulgarien gebaut. Die beiden Anlagen sind bei Redaktionsschluss der vorliegenden Studie noch nicht in Betrieb.

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

- Wasserdruckmaschinen die einzigen Wandler sind, die bei kleinen Fallhöhen von 1m bis 2.5m grosse Durchflüsse bis $4\text{m}^3/\text{s}$ pro Meter Breite verarbeiten können; Wasserräder moderner Bauart bringen es auf max. $1.2\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$;
- Wasserdruckmaschinen mit geringeren Raddurchmessern auskommen als vergleichbare Wandler und sich so besser in die Landschaft einfügen lassen.

³ Im EU-Projekt werden diese Wandler nicht mehr Stau- sondern neu Wasserdruckmaschinen genannt.

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

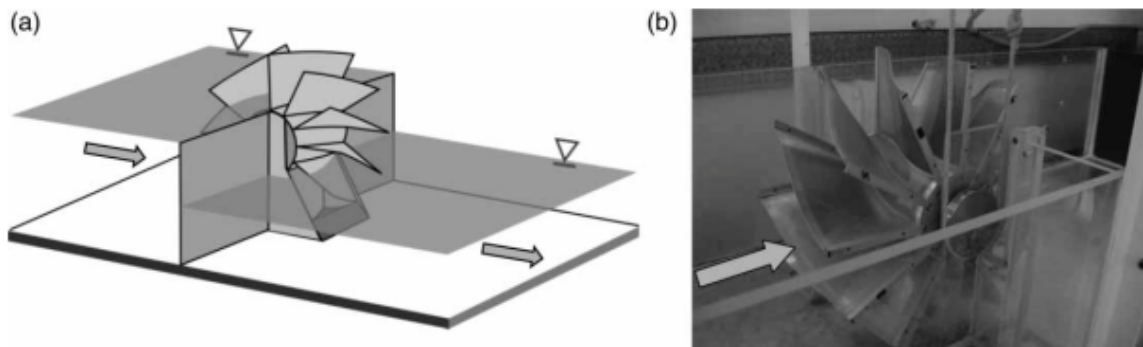


Fig. 13: Wasserdruckmaschine, Prinzipskizze und Labormaschine (Quelle: *Gerald Müller et al. New hydropower converters for very low-head differences*, in: *Journal of Hydraulic Research* Vol. 48, No. 6 (2010), pp. 703–714)

Technische Daten der Versuchsmaschine im Fluss Iskar in Bulgarien

(Quelle: Snezhana Bozhinova, Vortrag anlässlich des 34. Dresdner Wasserbaukolloquiums 2011)

- Fallhöhe 1.0 bis 1.3m
- nutzbare Durchflussmenge bis $2.0\text{m}^3/\text{s}$
- Raddurchmesser 2.4m; Radbreite 2.0m, Nabendurchmesser 1.02m
- hydraulische Leistung max. 25.5kW
- mech. Leistung max. ca. 13.7kW; Turbinenwirkungsgrad max. 0.54
- Turbinendrehzahl 16min^{-1}
- Investitionskosten: unbekannt
- erwartetes Jahresarbeitsvermögen: unbekannt

Da bei Abschluss der vorliegenden Arbeit noch keine Erfahrungen mit den Prototypen der Wasserdruckmaschine vorliegen, wurde nur eine Beurteilung des Potentials der Wasserdruckmaschine vorgenommen. Es zeigt sich, dass auch bei dieser Maschine die Herausforderung besteht, im Teillastbereich attraktive Outputs sowohl in quantitativer (Wirkungsgrad) wie qualitativer (Netzbedingungen) Hinsicht zu erreichen. Neben einem mehrstufigen Getriebe muss auch bei der Wasserdruckmaschine ein Frequenzumrichter mit MPPT eingesetzt werden, um die Drehzahl dem Wasserdargebot sowie der entsprechend veränderlichen Fallhöhe anzupassen. Ob diese Massnahme genügt oder ob nicht auch hier wie beim Wasserwirbelkonzept der Oberwasserspiegel bei abnehmenden Zuflüssen stark abfällt, muss abgewartet werden.

Wasserdruckmaschine

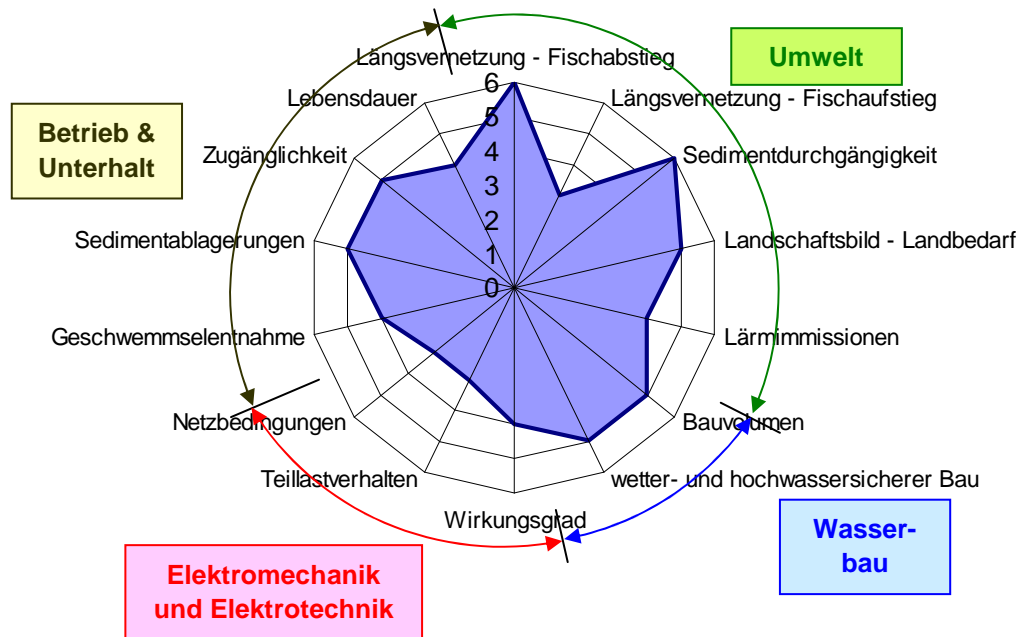


Fig. 14: Evaluation der Wasserdruckmaschine (nur Potential, nicht auf tatsächlich käuflicher Maschine basierend)

Konzept 3: Hydro-kinetische Turbine / schwimmender Energiewandler / „Strom-Boje“

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 dieser Arbeit, nämlich die heute verfügbaren Technologien für die energetische Nutzung der vielen bestehenden Querbauwerke in Schweizer Flüssen zu evaluieren.

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 150cm 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 seriennahe 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 100kW-Anlage der Hydro Green Energy ging 2009 im Mississippi bei Hastings in Betrieb. Über die Betriebserfahrungen ist nichts bekannt. Die Entwicklung der KSB wurde erst im Oktober 2010 im Rhein bei St. Goar erstmals eingesetzt. Die 5kW-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.



Fig. 15: Strom-Boje 2 vor dem „Versenken“ in die Donau (Quelle: Aqua Libre, Wien)

Technische Daten der Strom-Boje 2 in der Donau in der Wachau

(Quelle: Aqua Libre, persönliche Kommunikation von Geschäftsführer Herrn Fritz Mondl)

- Rotordurchmesser 1.5m
- Länge 9m, Breite = Höhe = 3m
- Gesamtgewicht 4.2 to
- Generator, Synchron, 16-polig
- Nennleistung 15kW, max. Leistung 30kW

- Investitionskosten: unbekannt
- erwartetes Jahresarbeitsvermögen: 100'000kWh (für die Donau in Wachau errechnet)

Die Anforderungen für einen wirtschaftlichen Einsatz einer Stromboje sind:

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

In Schweizer Mittelland-Flüssen existieren Wassertiefen von 3m 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 2m/s finden sich nur im Hochwasserfall.

Werden wie von Aqua Libre postuliert, ganze Serien von Strom-Bojen 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 Strom-Bojen-Serie flussaufwärts ein neuer höherer Wasserspiegel ausbildet als ohne die Serie. Die Bewilligungsfähigkeit einer solchen Strom-Bojen-Serie innerhalb der Konzessionsstrecke eines bestehenden Flusskraftwerks ist deshalb als nicht gegeben einzustufen.

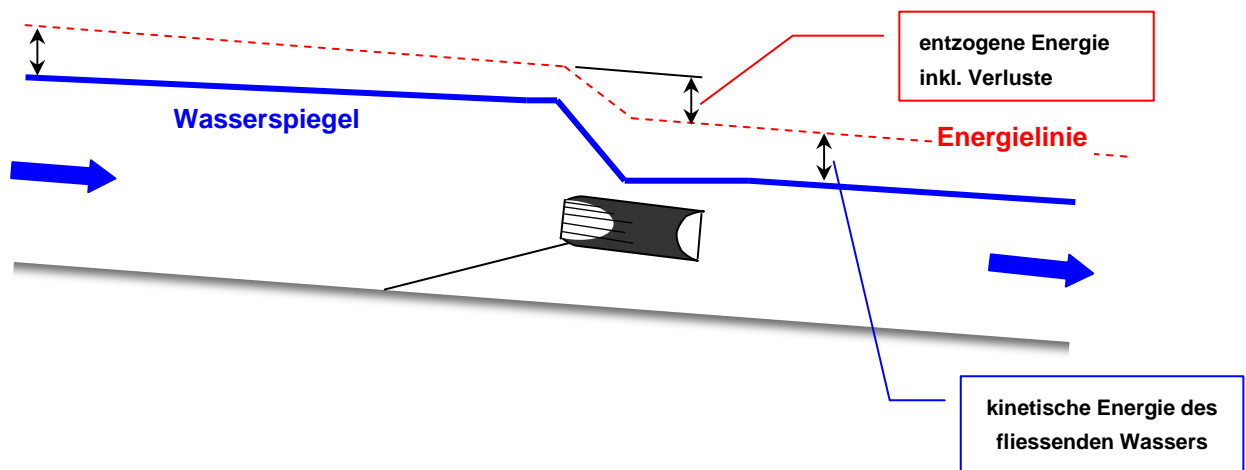


Fig. 16: Schematische Darstellung des Wasserspiegelaufstaus aufgrund einer Serie von hydro-kinetischen Turbinen quer zum Fluss

Es ist durchaus möglich, zwischen den Staustufen von grossen Wasserkraftanlagen in den grösseren Schweizer Flüssen einzelne hydro-kinetische Turbinen einzusetzen, da der gezeigte Wasserspiegelaufstau bei nur einer Maschine von 1.5m Rotordurchmesser und bis zu 30kW Maximalleistung nicht messbar ist⁴.

⁴ Im ungenutzten Alpenrhein oberhalb des Bodensees sind die Wassertiefen zu gering; darüber hinaus sind Aufweitungen geplant, die noch geringere Wassertiefen erzeugen. Im einzigen, noch ungenutzten Gewässerabschnitt des Rheins vom Bodensee flussabwärts unterhalb Reckingen wird ein mittlerer Jahresabfluss von knapp 450m³/s gemessen. Bei diesem Abfluss liegt die kinetische Energie des fliessenden Wassers bei rund 400kW. Werden von diesem Mittelwasserabfluss ca. 15kW elektrischer Leistung mit einer hydro-kinetischen Turbine entzogen und rechnet man noch 25kW für alle hydraulischen, mechanischen und elektrischen Verluste dazu, so entzieht diese Maschine dem Wasser rund 40kW, also rund 10% seiner kinetischen Leistung. Fortsetzung nächste Seite.

Die schwimmenden Energiewandler, die im Rahmen des EU-finanzierten Projekts HYLOW getestet werden, zeigen im Prinzip die gleiche Problematik des Wasserspiegelaufstaus, insbesondere wenn diese Schwimmkörper mit Ballasttanks in kleineren Fließgewässern eingesetzt werden. Bei den Feldversuchen der Uni Rostock hat sich dieser Wasserspiegelaufstau auch klar manifestiert. Darüber hinaus muss bei einem Einsatz von solchen schwimmenden Energiewandlern in Schweizer Flüssen mit grossen Geschwemmselproblemen gerechnet werden, die bis zum Untertauchen der Anlage durch Verklausung führen können.

Da bei Abschluss der vorliegenden Arbeit noch keine gut dokumentierten Erfahrungen mit den Prototypen (Strom-Boje 2, KSB, Smart Hydro Power, etc.) vorliegen, wurde nur eine Beurteilung des Potentials der hydrokinetischen Turbine vorgenommen. Keine Angaben liegen zur Umwandlung der mechanischen in elektrische Leistung sowie zu Netzbedingungen vor; diese Kriterien wurden deshalb sehr vorsichtig evaluiert, da wohl ähnliche Herausforderungen wie bei den Wasserwirbelkraftwerken und den Wasserdruckmaschinen bestehen.

Was ganz klar aus der Evaluation hervorgeht, ist die hervorragende ökologische Verträglichkeit dieses Konzepts. Hingegen sind die Bedingungen bezüglich Wassertiefe und Fließgeschwindigkeiten, die einen Einsatz der hydrokinetischen Turbinen in Schweizer Flüssen erlauben, an nur wenigen Standorten gegeben. Darüber hinaus muss jeder Investor die besonderen Risiken dieser Technologie in Schweizer Bedingungen (Bewilligungsfähigkeit, Geschwemmsel / Verklausung, Zugänglichkeit, Langlebigkeit) je nach Standort selber abschätzen. Die diesbezügliche Einschätzung der Autoren dieser Studie ist als eher vorsichtig zu bezeichnen.

Der resultierende Wasserspiegelaufstau dieser einzelnen Turbine liegt damit bei weniger als 1cm und ist damit nicht messbar. Die erwarteten ca. 100'000kWh aus dieser Maschine sind ein ehrlicher Gewinn. Setzt man jedoch beispielsweise 10 solcher hydro-kinetischen Turbinen ein, dann wird der Aufstau gegen 10cm betragen, was beim Oberliegerkraftwerk Reckingen einen entsprechenden Ein-stau bewirkt, der bei nur 4m Nettogefälle dieses Flusskraftwerks zu Verlusten im Bereich von über 5GWh pro Jahr führen kann. Die aus den 10 hydrokinetischen Turbinen gewonnenen $10 \times 0.1\text{GWh} = 1\text{GWh}$ können diesen Verlust nicht annähernd ausgleichen.

hydrokinetische Turbine / Strom-Boje

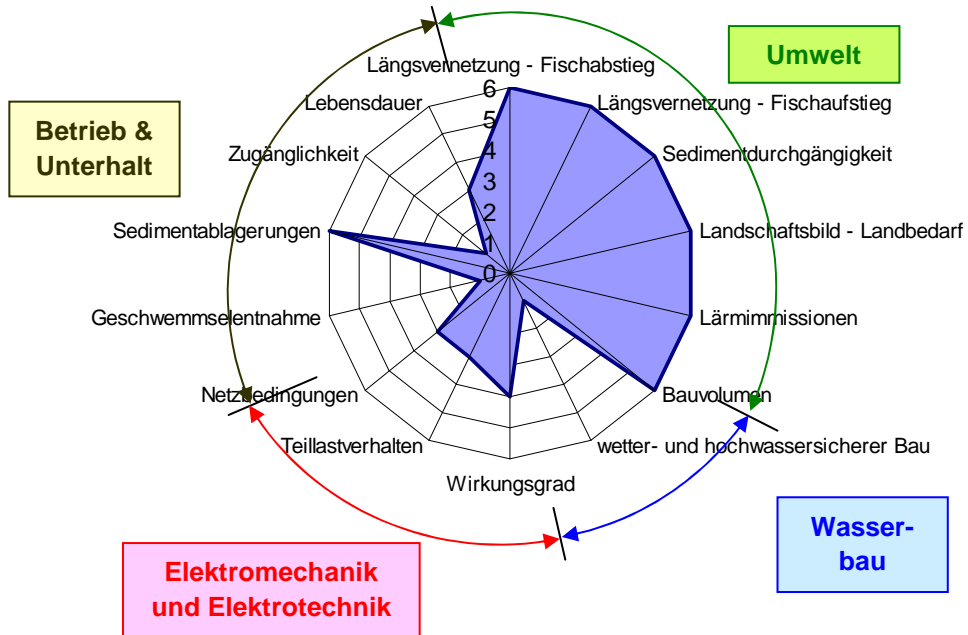


Fig. 17: Evaluation der hydrokinetischen Turbine (nur Potential, nicht auf tatsächlich käuflicher Maschine basierend)

Konzept 4: Mittelschlächtinge Wasserräder

Wie erwähnt, ist die Technologie der Wasserräder seit Jahrhunderten bekannt und wird jetzt in Kombination mit „modernen“ Komponenten (mehrstufige Getriebe und Generatoren) auch zur Stromerzeugung genutzt. Auch in der Schweiz sind neue Wasserräder zur Stromerzeugung erstellt worden:

- Kraftwerk „Grüntal“ an der Lützelburg in Aadorf, Inbetriebnahme: Feb. 2004. Dieses oberflächliche Wasserrad vom Typ TURAS (einseitige Lagerung) gilt aber nicht als Ultraniederdruck-Anlage, da die Fallhöhe über 4m beträgt.
- Herzogenmühle Wallisellen an der Glatt mit mittelschlächtingem Wasserrad, erstellt durch Metallbau Krismer + Co, Wallisellen und Motorsänger GmbH, Männedorf.

Die Anlage in Wallisellen wurde als interessante Neuanlage im Ultraniederdruckbereich in die vorliegende Untersuchung aufgenommen.

Seit dem 11. Mai 2009 wird der Glattkanal in Wallisellen wieder für die Energieproduktion genutzt. Das neue mittelschlächtinge Wasserrad für eine Fallhöhe von 2.6m mit ca. 15kW Leistung soll jährlich rund 120MWh Strom produzieren.



Fig. 18: Wasserrad Herzogenmühle in Wallisellen

Technische Daten des Wasserrades Herzogenmühle, Wallisellen

(Quelle: Motorsänger GmbH, Männedorf – Konstrukteur der Anlage)

- Fallhöhe 2.6m
- nutzbare Durchflussmenge bis 1.0m³/s

- Raddurchmesser 5.2m; Radbreite 2.0m,
- hydraulische Leistung max. 25.5kW
- elektr. Leistung max. ca. 15kW;
- Wirkungsgrad gesamt: max. 60%; davon Wasserrad ca. 70%
- Raddrehzahl 7min^{-1}
- Investitionskosten: ca. Fr. 250'000.-
- spezifische Investitionskosten ca. Fr. 16'700.-/kW
- erwartetes Jahresarbeitsvermögen: ca. 120'000kWh

Da es sich bei der Anlage Herzogenmühle für beide involvierten Firmen um die erste Ausführung eines Wasserrades handelte, waren die Investitionskosten noch übergebürlich hoch. Für weitere Anwendungen kann mit spezifischen Investitionskosten von ca. Fr. 10'000.- bis Fr. 12'000.- gerechnet werden, vorausgesetzt, dass der wasserbauliche Bestand vorhanden ist.

Wie das Beispiel Herzogenmühle zeigt, sind mittelschlächtige Wasserräder teuer in der Anschaffung, da sie:

- a. zur Verarbeitung auch kleiner Wassermengen sehr grosse Abmessungen (Raddurchmesser praktisch 2 x Fallhöhe) benötigen;
- b. wegen der geringen Drehzahl des Rades (meist unter 7min^{-1}) mehrstufige Übersetzungen haben, die grosse Drehmomente übertragen müssen; und
- c. anlagenspezifisch auf Fallhöhe und Durchfluss jedes Mal neu konstruiert und ausgelegt werden müssen; es gibt keine Serienfertigung.

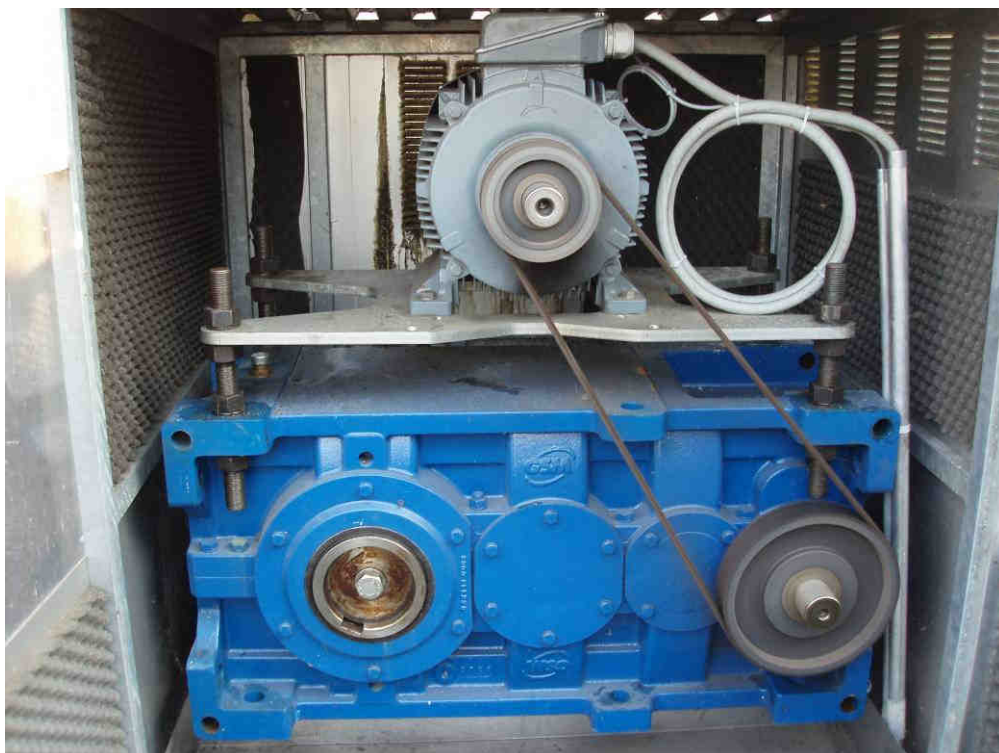


Fig. 19: Dreistufiges Getriebe mit Zahnriemen und Asynchrongenerator (25kW, $n_g=1000\text{min}^{-1}$) am Wasserrad Herzogenmühle in Wallisellen

Anlässlich eines Besuches durch das Evaluationsteam vor Ort, konnten die folgenden Feststellungen gemacht werden:

Umwelt

Längsvernetzung – Fischabstieg

Grössere Fische können nicht durch das Wasserrad absteigen; es besteht eine Verletzungsgefahr beim Wassereinlauf in die Schaufeln. Der Einlauf ist mit einem Feinrechen abgeschlossen.

- geringer Erfüllungsgrad (3)

Längsvernetzung - Fischaufstieg

Der Fischaufstieg direkt durch das Wasserrad hindurch ist nicht möglich. Eine Fischaufstiegshilfe (FAH) um das Wanderhindernis und das Wasserrad herum besteht in Wallisellen nicht, da es sich um ein althergebrachtes Wasserrecht in einem Kanal handelt.



Fig. 20: Feinrechen und Einlaufschütze

- geringer Erfüllungsgrad (3)

Sedimentdurchgängigkeit

Im Glattkanal von Dübendorf bis Wallisellen herrscht normalerweise kein Geschiebetrieb. Trotzdem sind Steine im Triebwasser keine Seltenheit. Diese haben beim Durchgang durch die Maschine Dellen in die Schaufelkanten des Wasserrades (aus verzinktem 3mm Blech) geschlagen.

- geringer Erfüllungsgrad (3)

Landschaftsbild – Landbedarf

Das Wasserrad wird – so auch an der Herzogenmühle in Wallisellen – aus denkmalpflegerischen oder historischen Gründen gewählt; der erhöhte Platzbedarf durch das hoch aufragende Rad wird deshalb nicht als Nachteil gewertet. Hingegen kann die grosse Bauhöhe des Rades an einem nicht vorbelasteten Standort zu ästhetisch bedingten Klagen führen (in Wallisellen reicht das Rad bis zu den Fenstern des benachbarten Gebäudes).

- geringer Erfüllungsgrad (3)

Lärmimmissionen

Das Wasserrad hat verhältnismässig hohe Lärmimmissionen von bis 83dB_A in 1m Abstand von der Maschine. Es sind vor allem Wassergeräusche, die nicht extrem störend, aber für eine Wohnzone trotzdem nicht akzeptabel sind. Eine Einhausung des Wasserrades ist zwar möglich, entzieht jedoch dem Rad den Charakter eines Demonstrationsobjekts (anschauliches Beispiel der Energieproduktion und/oder industrie-historisches Denkmal).

- geringer Erfüllungsgrad (3)

Wasserbau und bauliche Gestaltung

Bauvolumen

Die erforderliche Grundfläche für die Triebwasserwege und den Einbau des Wasserrades ist nicht grösser als für eine vergleichbare Wasserkraftmaschine. Jedoch tritt hier die Bauhöhe besonders stark in Erscheinung, was zu den hohen Kosten für den Stahl- und Maschinenbau führt.

- geringer Erfüllungsgrad (3)

Wetter- und hochwassersicherer Bau

Das Wasserrad Herzogenmühle liegt am Glattkanal und ist deshalb von Hochwasser grösstenteils geschützt. Direkt am Fluss wäre die jetzige Anordnung nicht möglich; zumindest die Lager und das Getriebe sowie der Generator müssten hochwassersicher angeordnet werden, um nicht bei jedem Hochwasser beschädigt zu werden, was die Investitionskosten weiter in die Höhe treiben würde.

- geringer Erfüllungsgrad (3)

Elektromechanische Ausrüstung

Wirkungsgrad (Auslegungspunkt)

Der Wirkungsgrad der ganzen Kette von der hydraulischen Inputleistung bis zum elektrischen Output auf der Niederspannungs-Netzebene liegt beim Wasserrad Herzogenmühle bei ca. 60%, was für eine Anlage von weniger als 20kW als gut angesehen werden muss. Der Wirkungsgrad des dreistufigen Stirnradgetriebes mit Zahnriemen liegt bei über 90%. Dieser Wert ist nur mit qualitativ hochstehenden Produkten zu erreichen, die aber auch teuer sind.

- + guter Erfüllungsgrad (5)

Teillastverhalten

Das Wasserrad ist keine Strömungsmaschine, d.h., sie nimmt nicht den Weg der Energieübertragung über die kinetische Energie, sondern setzt die Lageenergie der sich füllenden und wieder entleerenden Schaufeln in ein Drehmoment um. Bei geringerem Zulauf füllen sich die Schaufeln einfach mit weniger Wasser, was das Drehmoment und damit die Wellenleistung verringert. Der Wirkungsgrad des Wasserrades ist davon aber nur wenig tangiert und bleibt bis hinunter auf 20% des Nenndurchflusses hoch (bei ca. 65% bis 70%).

- ++ sehr hoher Erfüllungsgrad (6)

Elektrotechnik

Aufwand, um Netzbedingungen zu erreichen

Der Output des Generators kann direkt ans Niederspannungsnetz geliefert werden; es ist mit einer Kompensation des reaktiven Leistungsbedarfs des Asynchrongenerators zu rechnen, damit der cosphi in jedem Betriebszustand die Vorschriften des Netzbetreibers einhält, in der Regel >0.85 .

+ guter Erfüllungsgrad (5)

Betrieb und Unterhalt

Geschwemmselektnahme

Die Geschwemmselektnahme am Feinrechen geschieht von Hand, was relativ viel Aufwand verursacht (siehe Fig. 20). Es ist geplant, einen neuen Rechen mit grösserer Fläche weiter kanalaufwärts (nach der bestehenden Seitenentlastung) zu installieren und damit die Interventionshäufigkeit zur manuellen Rechenreinigung zu reduzieren. Ein Verzicht auf einen Feinrechen ist nicht möglich, weil sonst Geschwemmsel in die Luftspalte zwischen Einlauf- / Auslaufblech und die Schaufeln geklemmt würde.

- geringer Erfüllungsgrad (3)

Sedimentablagerungen

Geschiebeablagerungen vor und nach dem Wasserrad kommen im Glattkanal von Wallisellen vor und müssen ab und zu gereinigt werden. Ein Durchschwemmen durch die Maschine ist wegen der Einlaufschwelle zum Rad nur schlecht möglich und wegen Beschädigungsgefahr der Schaufeln auch nicht erwünscht.

- geringer Erfüllungsgrad (3)

Zugänglichkeit

Alle unterhaltsrelevanten Teile des Wasserrades (Lager, Getriebe, Schaufeln) sind gut zugänglich, ohne dass eine Abdämmung und Entwässerung vorgenommen werden muss. Der verstopfungsanfällige Feinrechen ist leider zu klein (Anströmgeschwindigkeit ca. 1m/s statt $< 0.5\text{m/s}$) und fast vertikal angeordnet, was die Reinigung zusätzlich erschwert. Dies soll aber in absehbarer Zeit geändert werden (siehe oben) und ist kein Problem des Wasserrades an sich, sondern eher eine zu kostenoptimierte Lösung des Ingenieurs.

++ sehr hoher Erfüllungsgrad (6)

Lebensdauer

In Wallisellen herrscht fast immer Volllastbetrieb, da die Wasserführung im Glattkanal nur selten unter $1\text{m}^3/\text{s}$ fällt. Die Lebensdauer des höchst beanspruchten Elements, nämlich des Stirnradgetriebes mit Zahnriemen, resp. dessen Betriebsstundenzahl zwischen zwei Komplettrevisionen liegt bei mind. 40'000 Stunden (ca. 5 Jahre) im Volllastbetrieb. Eine Revision des Stirnradgetriebes ist sehr kostspielig; längere Standzeiten können durch eine starke Überdimensionierung des Getriebes erreicht werden. Es ist nicht klar, ob diese Massnahme in der Herzogenmühle angewandt worden ist.

Die Beanspruchung des Wasserrades und dessen Welle ist hoch, weil es durch das in die Schaufeln einschliessende Wasser zu einer stossartigen einseitigen Belastung kommt. Das Rad ist auf Silentblöcken gelagert, um diese Stösse abzufedern. Auch die Schaufeln werden relativ stark belastet und können sich verbiegen. Dank der guten Zugänglichkeit ist die Reparatur oder der Ersatz einer Schaufel kostengünstig zu bewerkstelligen.

- / + geringer bis guter Erfüllungsgrad (4)

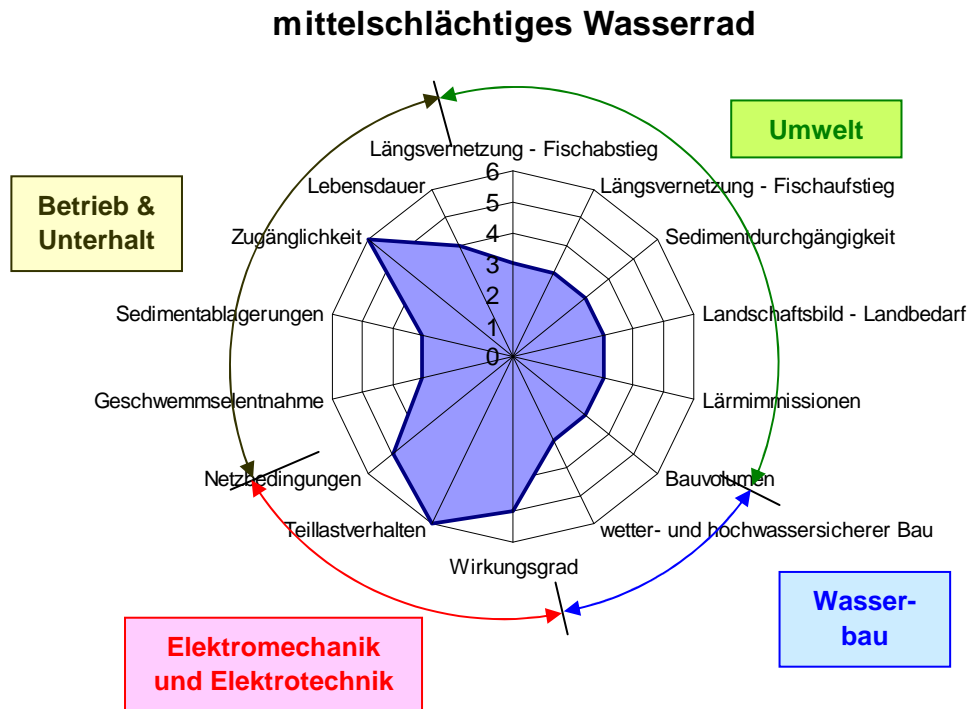


Fig. 21: Evaluation der mittelschlächtigen Wasserräder

Die mittelschlächtigen Wasserräder erhalten relativ schlechte Noten bei den Umweltkriterien, weil diese nicht durch die Technologie selber sondern durch flankierende Massnahmen (Fischauf- und -abstiegshilfen; Geschiebedurchgang, Lärmschutz, etc.) erfüllt werden müssen; das erhöht zusätzlich Kosten und den Landbedarf dieser Technologie.

Konzept 5: Lamellenturbine

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 90% angegeben.

Das besondere dieser Maschine sind die Schaufeln des Rades (siehe Fig. 22) sowie die hohen Drehzahlen von 50min^{-1} und mehr, was einerseits die Baugrösse der Maschine reduziert und andererseits die Anforderungen für den Antrieb eines Generators erleichtert.

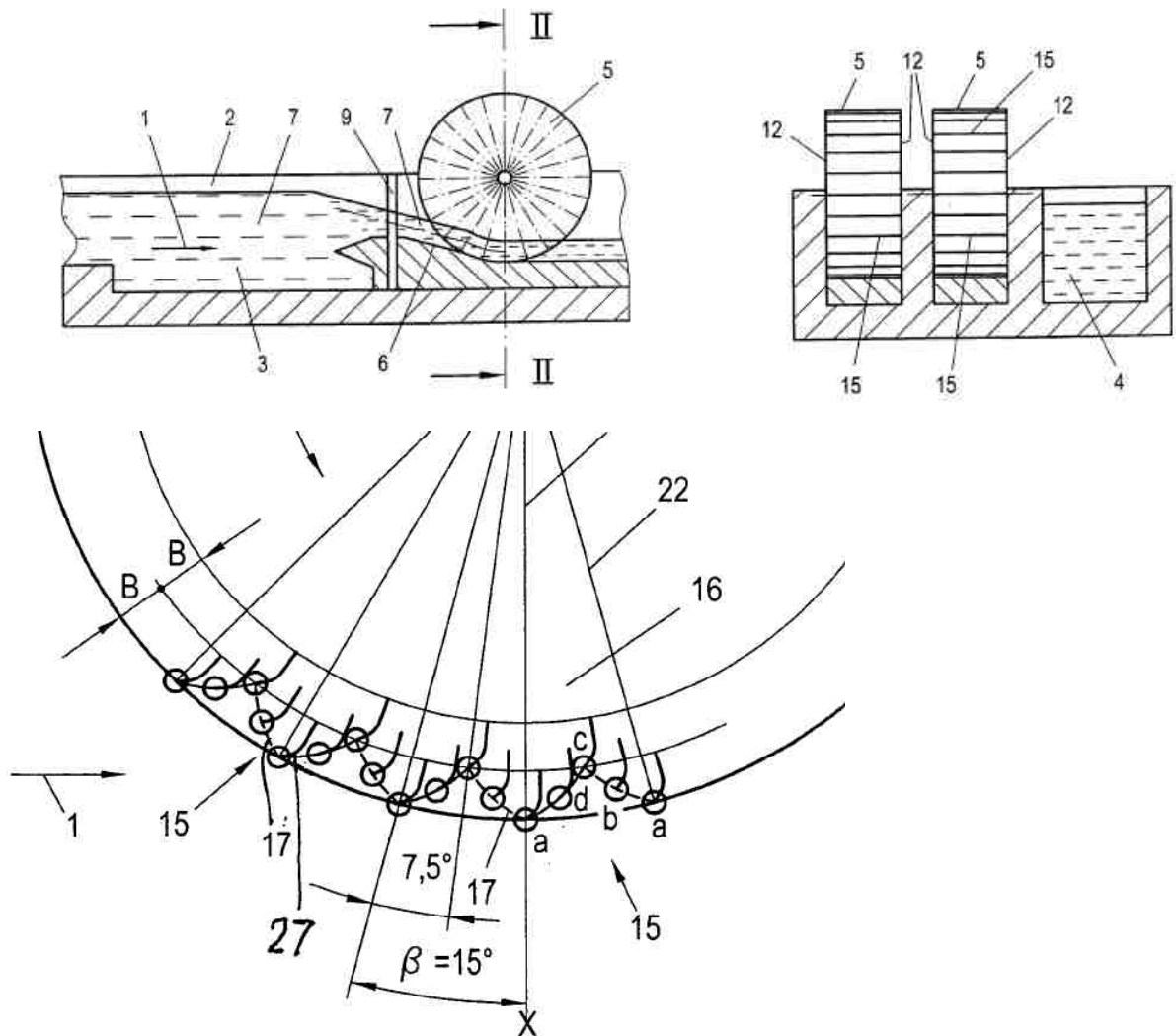


Fig. 22: Funktionsprinzip der Lamellenturbine (Quelle: Patentschrift WO 2009/074283)

Bisher bestehen zwei Anlagen mit Lamellenturbinen, und zwar in Gumpoldskirchen und Feldkirchen bei Graz (beide Österreich). Es ist nicht bekannt, ob die Verbreitung dieses Konzepts erfolgreich verläuft und ob in den letzten drei Jahren weitere Anlage installiert worden sind. Eine Überprüfung des angegebenen Turbinen-Wirkungsgrad von 90% durch eine unabhängige Instanz ist erforderlich; 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% und sind somit nicht höher als bei den mittelschlächtigen Wasserädern gemäss Konzept 4. 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 werden wie folgt angegeben:

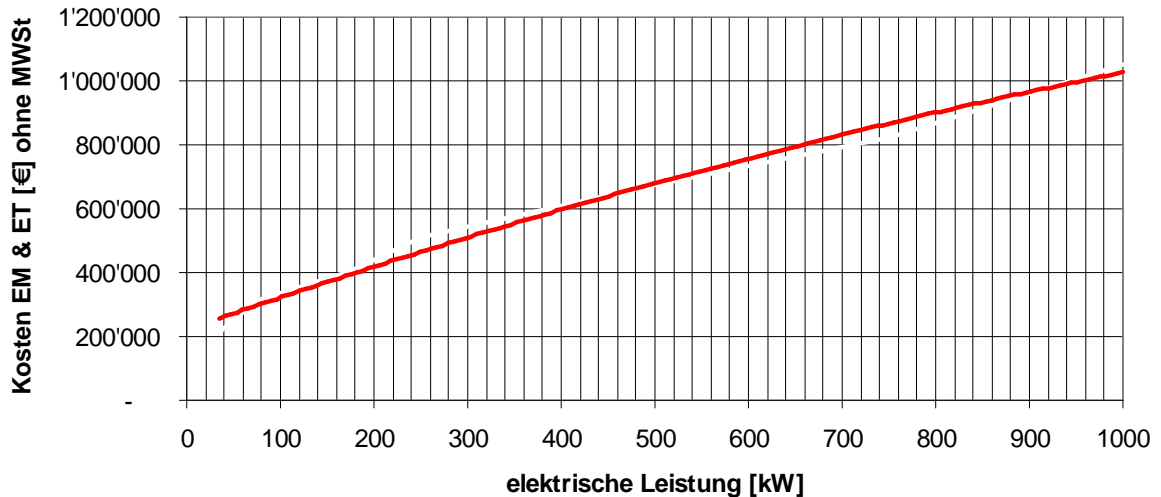


Fig. 23: Kosten der Lamellenturbine ohne Wasserbau (Quelle: BEW GmbH, Wien)

Ein Vergleich mit dem Kosten des mittelschlächtigen Wasserrades aus Schweizer Produktion (Konzept 4) zeigt, dass die Lamellenturbine für kleine Leistungen teuer ist.

Da die Lamellenturbine als Wasserrad sich nicht besonders für die Nutzung des Wasserkraftpotentials von bestehenden Querschwellen in Flüssen eignet, sondern eher an Ausleitkanälen eingesetzt werden kann, wurden die beiden bestehenden Anlagen mit Lamellenturbinen in Österreich nicht besucht. Trotzdem wurde zur Einordnung dieses Konzepts eine Evaluation vorgenommen, die nur auf den zugestellten Daten der Firma BEW, Dipl.-Ing. Paul A. Slatin, CEO & Partner, beruht und deshalb nicht überprüft ist.

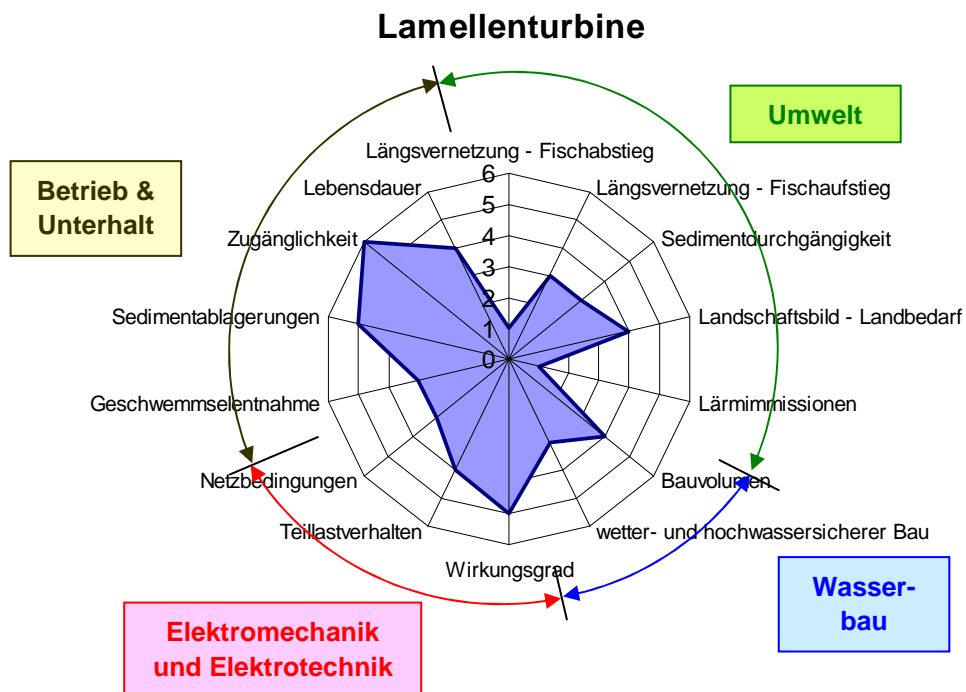


Fig. 24: Evaluation der Lamellenturbine

Konzept 6: Wasserkraftschnecke

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

Die Firmen Ritz-Atro (D-Nürnberg), REHART (D-Ehingen) und Spaans Babcock (NL-Balk) haben zusammen bereits über 100 Wasserkraftschnecken installiert, davon auch deren drei in der Schweiz (Derendingen und Ennenda, sowie Hirschthal/im Bau 2010/11). Die Anlage „Alte Ziegelei“ am Grütbach in Derendingen wurde in die Evaluation aufgenommen, da sie seit 2005 existiert und ein Erfahrungsbericht vorliegt (Thomas Köhli, Hersiwil, unterstützt durch das Bundesamt für Energie, Juni 2006).

Der Nachteil der Einzelfertigung (siehe Konzept 4: Wasserräder) 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 Fig. 25). 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 bis 10% tiefer als bei Turbinen modernster Bauart. Zum anderen sind die Schnecken etwas kostengünstiger in ihrer Errichtung, da der Feinrechen und die Geschwemmselreinigung mit einer Rechenreinigungsmaschine entfallen. Die Reinigung des Grobrechens erfordert jedoch in Schweizer Verhältnissen einen nicht zu unterschätzenden Betriebsaufwand. In der Anlage „Alte Ziegelei“ am Grütbach in Derendingen wurde nachträglich eine Rechenreinigungsmaschine eingebaut, um den Wartungsaufwand zu reduzieren.

Die Ausbauwassermenge der Wasserkraftschnecke ist auf ca. 8 m³/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.

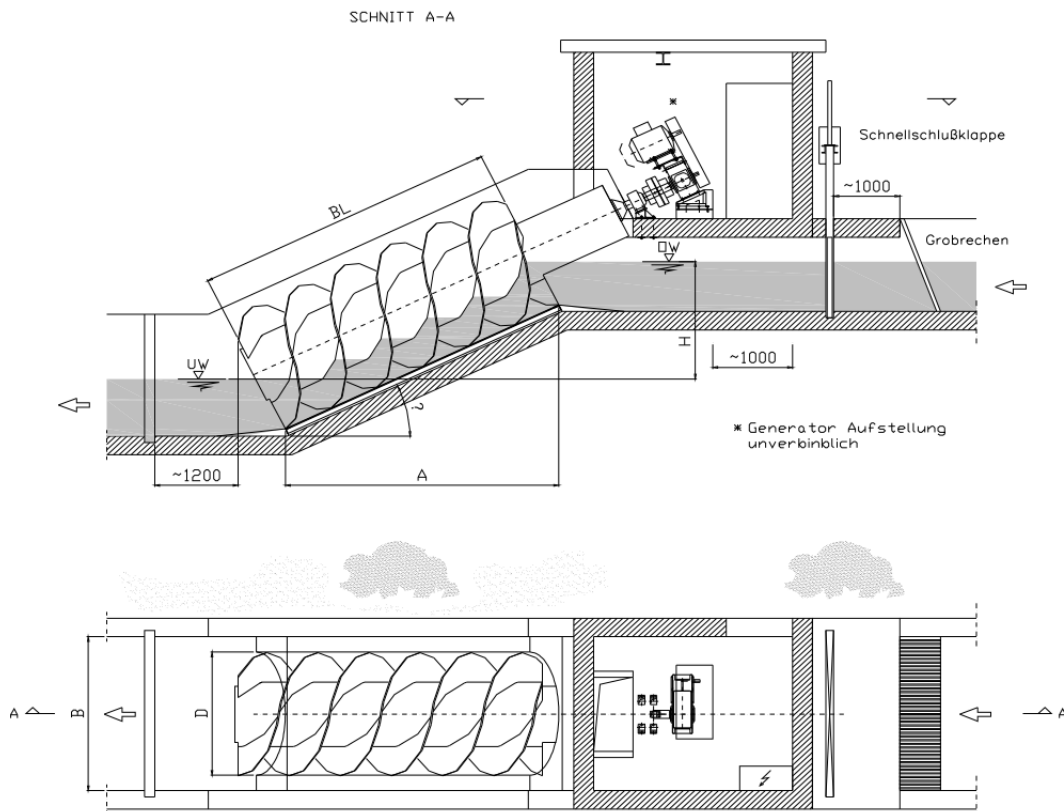


Fig. 25: Prinzipskizze der Wasserkraftschnecke (Quelle: Ritz-Atro)

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 werden⁵.

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

Der Fischabstieg durch die Schnecke ist nicht zu 100% gewährleistet; es wurden bei absteigenden Fischen Verletzungen (Quetschungen, Schuppenverluste) festgestellt, die jedoch in den wenigsten Fällen tödlich waren⁶.

⁵ Eis kann zu Unwucht der Schnecke führen, so dass diese am Trog streift, was sowohl dort als auch an den Schneckenflügeln zu Schäden am Stahl führt. Solche Abnutzungen erzeugen einen Spalt sowie scharfe Kanten an den Flügeln, was zu Wasserverlust resp. zu Fischschäden führt. U.a. deshalb ist die Wasserkraftschnecke nicht unbedenklich für den Fischabstieg.

⁶ siehe auch: *Dipl.-Biol. Wolfgang Schmalz*: Untersuchungen zum Fischabstieg und Kontrolle möglicher Fischschäden durch die Wasserkraftschnecke an der Wasserkraftanlage Walkmühle an der Werra in Meiningen, Thüringen (D)

Technischen Daten der Anlage „Alte Ziegelei“, Derendingen:

- Schneckendurchmesser 1600mm, Neigung der Schnecke 22°
- Wassermenge 1000 l/s
- Fallhöhe 1.15m
- Drehzahl ca. 38min⁻¹
- hydraulische Leistung 11.3kW
- Generatorleistung max. ca. 8 kW
- Investitionskosten ca. Fr. 250'000.- plus Eigenleistungen und Fördermittel
- mittlere Jahresproduktion 54'000kWh



Fig. 26: Wasserkraftschnecke „Alte Ziegelei“, Derendingen (Quelle: Faktor Verlag AG)

Wasserkraftschnecke

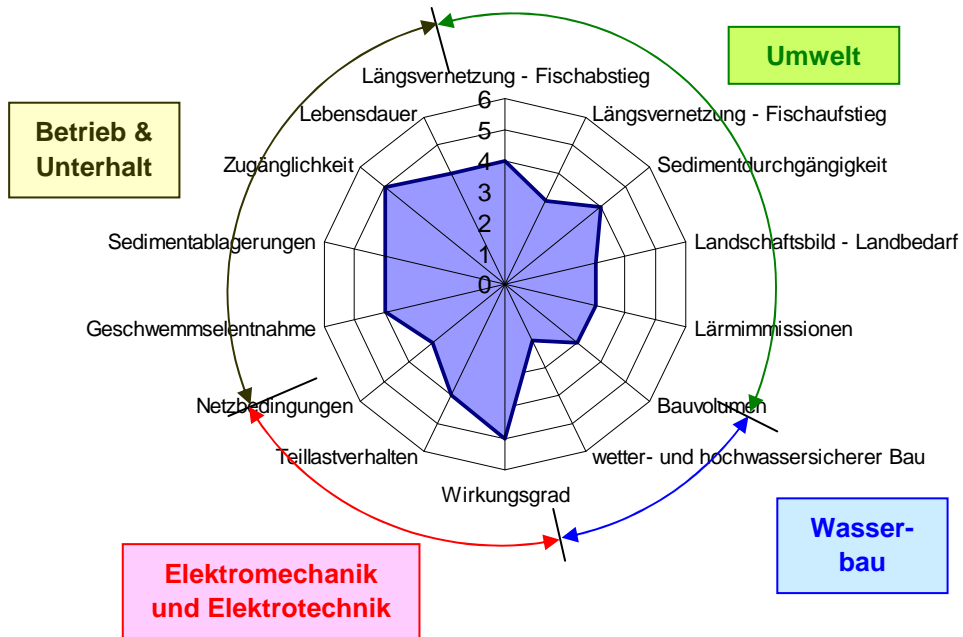


Fig. 27: Evaluation der Wasserkraftschnecke

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.

Evaluationsergebnisse 2: Leistungspotential über 100kW

Konzept 7: Very Low Head VLH Turbine von MJ2 Technologies

Das VLH-Konzept besteht aus einer einfach-regulierten Kaplanmaschine und einem direkt in der Turbinennabe angeordneten PM-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. Die beiden Anlagen wurden in die Evaluation aufgenommen und besucht. Die VLH-Turbine wird im deutschsprachigen Raum durch die Firma Stellba Hydro (CH-Birrhard und D-Heidenheim) vertrieben.

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 Fig. 28).
- Als Generator wird eine direkt-gekoppelte permanent-magnetisch erregte Synchronmaschine verwendet, die in der Nabe der Turbine sitzt. 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 die Klappe ins Unterwasser abgeschwemmt wird.

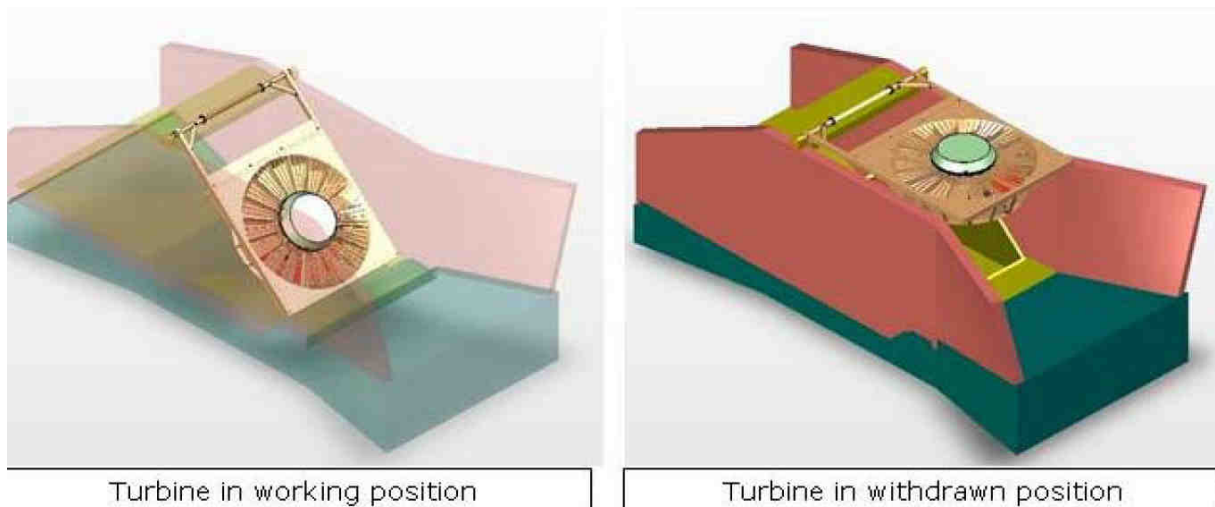


Fig. 28: Einbaulage der VLH Turbine (Quelle: Stellba Hydro)



Fig. 29: Schnittbild und Ansicht (mit rotierendem Rechenreiniger) der VLH Turbine (Quelle: Stellba Hydro)

Technischen Daten der Anlage in der Schleuse Nr. 2, Huningue, Rosenau (F)

- Fallhöhe brutto: 2.26 m
- Fallhöhe netto: 2.16 m
- Nenndurchfluss: 13 m³/s
- hydraulische Leistung 275 kW
- Nennleistung: 198 kW elektrisch; Gesamtwirkungsgrad ca. 72%
- Laufraddurchmesser: 3550 mm
- Kanalbreite 5300 mm
- Nenndrehzahl Turbine 39 min⁻¹
- Frequenzumrichter
 - AC Generator: 2.1 kV[~], f = variabel
 - DC 750 V
 - AC Trafo primär 480 V[~], f = 50 Hz

Technischen Daten der Anlage in der Schleuse Nr. 3, Huningue, Rosenau (F)

- Fallhöhe brutto: 1.67 m
- Fallhöhe netto: 1.45 m
- Nenndurchfluss: 13 m³/s
- hydraulische Leistung: 185 kW
- Nennleistung: 140 kW elektrisch; Gesamtwirkungsgrad ca. 76%
- Laufraddurchmesser: 3550 mm
- Kanalbreite 5300 mm
- Nenndrehzahl Turbine 33 min⁻¹

Die Investitionskosten für beide Anlagen zusammen wurden mit € 3.2 Mio. angegeben, was spezifische Kosten von ca. € 9400.-/kW ergibt.

Anlässlich eines Besuches durch das Evaluationsteam vor Ort, konnten die folgenden Feststellungen gemacht werden:

Umwelt

Längsvernetzung – Fischabstieg

Der Fischabstieg durch die Turbine wurde von MJ2 an einer Anlage an der Meuse in Frankreich getestet; es wurden lebende Aale durch die Maschine geschickt. Die Mortalitätsrate betrug durchschnittlich 8%. Der grosse Laufraddurchmesser von 3.55m und die geringe Drehzahl von nur 33min⁻¹ (im Nennpunkt) ergeben im Prinzip eine hohe Fischfreundlichkeit; dieser Vorteil wird aber durch die grosse Anzahl an Laufradschaufeln (8) wieder teilweise zunichte gemacht. Ein schadensfreier Abstieg durch die Maschine kann deshalb nicht garantiert werden.

- **geringer Erfüllungsgrad (3)**

Längsvernetzung - Fischaufstieg

Der Fischaufstieg direkt durch die VLH-Turbine hindurch ist nicht möglich. Eine Fischaufstiegshilfe (FAH) um das Wanderhindernis und die Wasserkraftmaschine herum besteht nicht, weil es sich um einen ehemaligen Schiffskanal mit Schleusen für Kleinboote handelt. Die Fischaufstiegshilfen befinden sich im Rhein selber und am Haupt-Nebenkanal.

- **geringer Erfüllungsgrad (3)**

Sedimentdurchgängigkeit

Das VLH-Konzept erfüllt dieses Kriterium gut, weil die Maschine im Hochwasserfall angehoben werden kann und keine Störung der Sedimentdurchgängigkeit verursacht. Im Kanal von Huningue ist dieses Kriterium nicht besonders relevant, da dort kein Geschiebetrieb stattfindet.

+ **guter Erfüllungsgrad (5)**

Landschaftsbild – Landbedarf

Die vollständig eingetauchte VLH-Turbine tritt nur wegen der erforderlichen Kanalanlage in Erscheinung, ansonsten ist sie nicht sichtbar. Der Container mit den Nebenanlagen und Hilfsbetrieben (Hydraulikaggregat, Steuerung und Elektrotechnik) kann nötigenfalls separat in einiger Distanz von der Maschinengruppe und damit landschaftsschonend aufgestellt werden.

+ **guter Erfüllungsgrad (5)**



Fig. 30: Ansicht des VLH-Konzepts an der Schleuse Nr. 2, Huningue 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).

Lärmimmissionen

Die Turbinen-Generator-Einheit ist unhörbar, weil sie im Wasser liegt und die Kühlung nicht mit Umgebungsluft sondern mit dem Triebwasser geschieht. Die Nebenanlagen und Hilfsbetriebe im Container benötigen eine Kühlung mit Aussenluft, was eine gewisse Lärmimmission verursacht. In sensibler Umgebung kann eine Schalldämmung oder eine alternative Kühlung erforderlich werden, was jedoch die Kosten erhöht.

+ guter Erfüllungsgrad (5)

Wasserbau und bauliche Gestaltung

Bauvolumen

Der Kanal für die VLH Turbine kann im Prinzip in eine bestehende Wehranlage eingebaut werden; das Konzept benötigt deshalb kaum zusätzlichen Wasserbau.

+ guter Erfüllungsgrad (5)

Wetter- und hochwassersicherer Bau

Die VLH-Turbinen-Generator-Gruppe benötigt keine zusätzliche Schutzhülle, um Hochwasser und Wettereinflüsse zu überdauern. Der Container mit den Nebenanlagen und Hilfsbetrieben (Hydraulikaggregat, Steuerung und Elektrotechnik) kann problemlos über dem Hochwasserspiegel angeordnet werden, wird dadurch aber zu einem landschaftsbildenden Element.

Bei Netzausfall oder Netztrennung (Störung) beschleunigt die Turbine auf Durchgangsdrehzahl, was wegen der permanent-magnetischen Erregung zu hohen Generatorspannungen führt (Spannung ist proportional zur Drehzahl). Im VLH-Konzept schliesst die Turbine. Das Wasser muss deshalb an der Turbine vorbei geleitet werden, um keine Ausuferung im Kanal zu verursachen. In Huningue wird das durch eine automatisch öffnende und wasserstandsgeregelte Klappe mit Bypass-Kanal gelöst. Letzterer war schon vorhanden und musste nicht speziell für die Wasserkraftnutzung gebaut werden.

+ **guter Erfüllungsgrad (5)**

Elektromechanische Ausrüstung

Wirkungsgrad (Auslegungspunkt)

Die Turbine selber hat einen Wirkungsgrad von zwischen 87% und 90% im Auslegungspunkt. Der direkt gekoppelte permanent-magnetisch erregte Synchrongenerator erreicht einen Spitzenwirkungsgrad von ca. 94% (keine Verluste durch eine externe Erregung). Der Frequenzumrichter führt trotz Einsatz eines Spitzenprodukts zu Verlusten von 2% bis 4%. Vor der Energiemessung schlägt auch noch der Trafo mit ca. 2% Verlusten zu Buche, so dass der Gesamtwirkungsgrad des VLH-Konzepts bei ca. 79% liegt.

In Huningue werden nur Wirkungsgrade von zwischen 72% und 76% erreicht, da:

- keine Sohleneintiefung im Kanal beim Abströmen von der Turbine gemacht wurde (siehe Fig. 31)
- wegen zu geringer Überdeckung Luft eingetragen wird; Geschwemmsel wird durch den dort entstehenden Wirbel angesogen und führt zu Verklausungen und zusätzlichem Leistungsverlust.

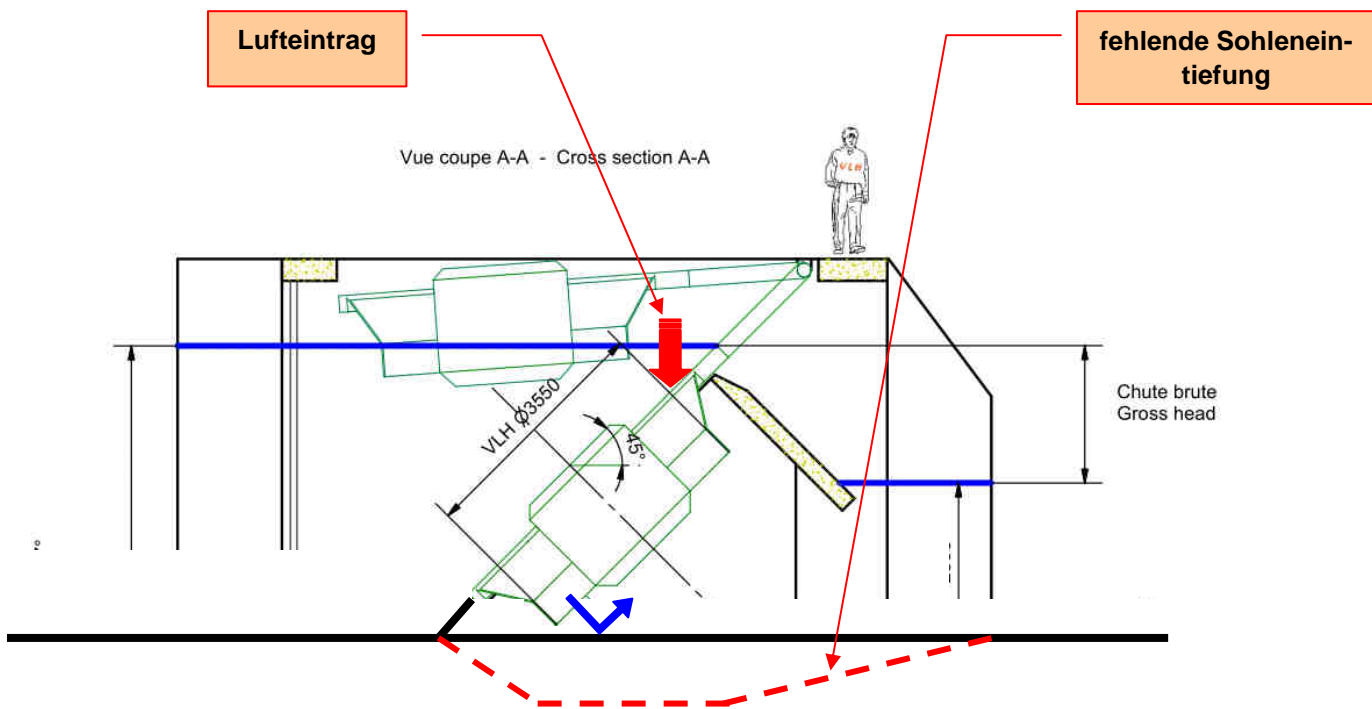


Fig. 31: Schnitt durch das VLH-Konzept: Leistungseinbisse an den Anlagen von Huningue wegen gerader Kanalsohle statt Eintiefung und Lufteinzug wegen zu geringer Überdeckung

Prinzipiell lassen sich jedoch mit dem VLH-Konzept relativ hohe Wirkungsgrade erreichen.

+ guter Erfüllungsgrad (5)

Teillastverhalten

Die Turbine ist nur einfach reguliert, d.h., es gibt nur die verstellbaren Laufradschaufeln, um den Durchfluss zu regulieren. Der Teillastwirkungsgrad wird aber auch bei abnehmendem Wasserdargebot noch recht hoch gehalten, indem die Drehzahl reduziert wird. Mit dem Frequenzumrichter wird der Output an die Netzbedingungen angepasst (siehe nächster Abschnitt). Der verwendete permanent-magnetisch erregte Synchrongenerator hat vor allem auch im Teillastbereich einen hohen Wirkungsgrad da, verglichen mit elektrisch-erregten Synchrongeneratoren mit hohen Polpaarzahlen, hier keine Erregerverluste anfallen.

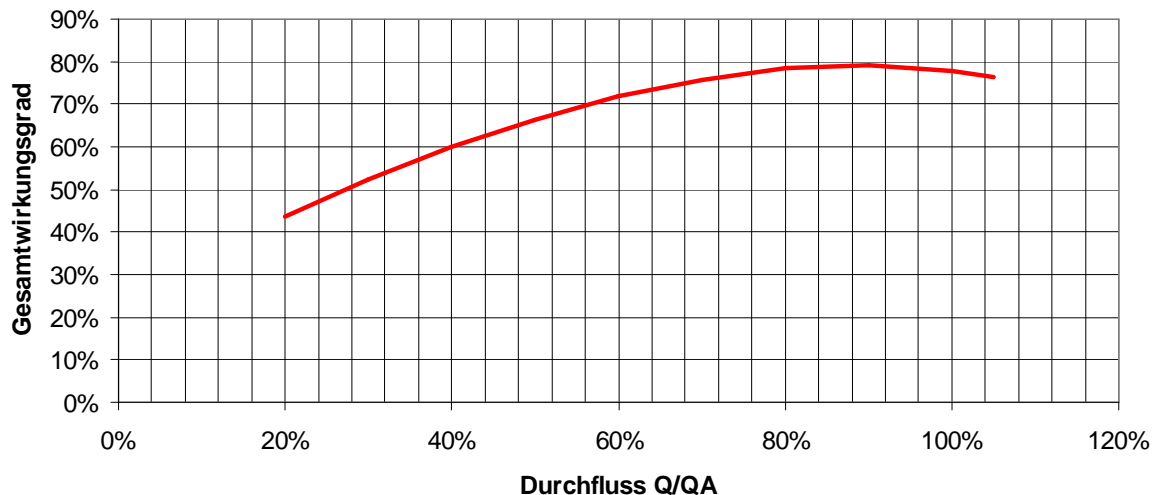


Fig. 32: Gesamtwirkungsgrad VLH-Konzept im Teillastbereich (Quelle: Schätzung aufgrund von Offerten MJ2)

+ guter Erfüllungsgrad (5)

Elektrotechnik

Aufwand, um Netzbedingungen zu erreichen

Die tiefe, variable Drehfrequenz der Turbine und des Generators wird über einen Umrichter an die Netzfrequenz angepasst. An der Schnittstelle zum Netz ist ein Filter installiert, welcher die Netzrückwirkungen (z.B. ungerade harmonische Ströme) begrenzt. Zwischen dem Umrichter und dem Netz ist in den Anlagen in Huningue ein Transformator dazwischen geschaltet, welcher nochmals einen positiven Effekt auf die Netzrückwirkungen hat.

Die Verluste von Umrichter und Transformator sind zusammen ca. 4%-Punkte oder 8kW bei einer 200kW-Anlage. Diese Verlustleistung muss mittels Kühlung im Nebenanlagen-Container und/oder in der Trafo-Kabine eliminiert werden. Zusätzlich zum Ertragsverlust entstehen Kosten für diese Elektrotechnik-Elemente.

- geringer Erfüllungsgrad (3)

Betrieb und Unterhalt

Geschwemmselentnahme

Das Geschwemmsel wird mit einem Feinrechen (direkt auf dem Turbineneinlauf montiert) gefasst. Ein rotierender Reinigungsbalken streift es ab. Durch Öffnen einer hydraulisch betätigten Klappe auf der Turbine kann das Geschwemmsel ins Unterwasser abgeschwemmt werden.

Dieses System hat in den Anlagen in Huningue nicht zufriedenstellend funktioniert, so dass nachträglich noch je ein Grobrechen im Kanal oberhalb der Maschinen angeordnet wurde. Leider wurde dieser Grobrechen mit vertikalen Stäben ausgerüstet, so dass die manuelle Reinigung mühsam bis aufwändig ist. Bei einer Anwendung des VLH-Konzepts in Schweizer Flüssen drängt sich ein Feinrechen mit automatischer Rechenreinigungsmaschine (RRM) im Zulaufkanal auf.

- geringer Erfüllungsgrad (3)



Fig. 33: Zusätzlicher Grobrechen an den VLH-Anlagen in Huningue, der aber rasch verstopft und zu einem zusätzlichen Betriebsaufwand führt.

Sedimentablagerungen

Mögliche Ablagerung von Sedimenten vor der VLH-Turbine können durch Anheben der gesamten Maschine leicht durch den Kanal abgespült werden, sofern keine Schwelle dies behindert.

+ guter Erfüllungsgrad (5)

Zugänglichkeit

Durch Hochklappen der gesamten Maschine (siehe Fig. 28) können alle relevanten Teile rasch aus dem Wasser gehoben werden. Um jedoch an den Generator heranzukommen, muss die wasserdichte Kapselung der Maschine geöffnet werden und nach der Reparatur wieder entsprechend dicht verschlossen werden. Was als besonders wartungsfreundlich daherkommt, ist es in Wirklichkeit nicht.

Um keine Feuchtigkeit in den gekapselten Generator eindringen zu lassen, wird entfeuchtete Luft mit Überdruck in die Maschinennabe mit dem Generator gepumpt; das mindert das Schadenspotential, sollten die Wellenabdichtungen undicht werden oder die Deckel der Nabe nach einer Reparatur einmal nicht dicht verschlossen worden sein. Auch alle Zu- und Ableitungen (Energieableitung, Hydraulik- und Steuerleitungen) müssen druckdicht ausgeführt und nach jeder Reparatur auch wieder entsprechend dicht zurückgelassen werden.

- geringer Erfüllungsgrad (3)

Lebensdauer

Über die Lebensdauer des permanent-magnetisch erregten Generators sowie der Leistungselektronik (Umrichter) bestehen unterschiedliche Ansichten, weil es dazu in der Kleinwasserkraft noch keine langjährigen Erfahrungen gibt. Die Lebensdauer von Leistungselektronik (Umrichter) ist tendenziell kleiner als diejenige von Getrieben oder Riemenantrieben. Die Lebensdauer gibt man in der Leistungselektronik z.B. dadurch an, dass nach einer bestimmten Anzahl Leistungszyklen / Betriebsstunden noch mehr als ein gewisser Prozentsatz (z.B. 99%) der Geräte funktionstüchtig ist. Umrichter über ca. 100kW können wassergekühlt sein. In diesem Fall ist eine zusätzliche Wartung des Kühlkreislaufs und des Kühlmittels nötig.

Die Lebensdauer von Permanentmagneten nimmt rasch ab, wenn Hitze oder Vibrationen auftreten. Eine entsprechende Vibrations-Überwachung ist angezeigt, was aber wiederum die Komplexität des VLH-Konzepts erhöht.

Allgemein ist für eine vollständig im Wasser eingetauchte Maschinengruppe eine geringere Lebensdauer anzunehmen als für eine klassische vertikalachsige Kaplan-Turbine, deren relevanten Teile alle zugänglich und über dem Wasserspiegel angeordnet sind.

- / + geringer bis guter Erfüllungsgrad (4)

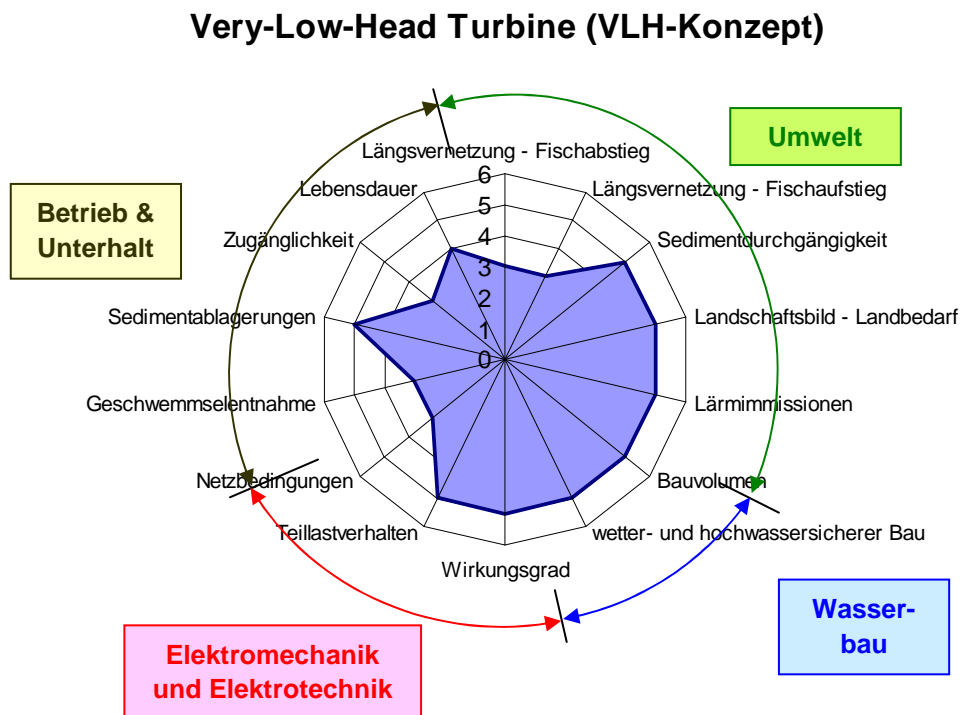


Fig. 34: Evaluation des VLH-Konzepts

Konzept 8: Bewegliches Kraftwerk von Hydro-Energie Roth GmbH

Die Hydro-Energie Roth GmbH, Karlsruhe, stellte sich folgende Zielsetzung, um kleine Fallhöhen an europäischen Flüssen zu nutzen:

- Das Krafthaus soll anhebbar sein, um Geschiebe direkt weiterzugeben.
- Bauvereinfachung: das Konzept soll keinen zusätzlichen Kiesfang, Geschiebespülkanal o. ä. benötigen.
- Es soll optisch möglichst wenig auffallen.
- Über das Krafthaus soll der Fischabstieg, aber auch die Geschwemmselweitergabe möglich sein.
- Die ungenutzte Energie bei erhöhten Abflüssen soll zusätzlich genutzt werden können.

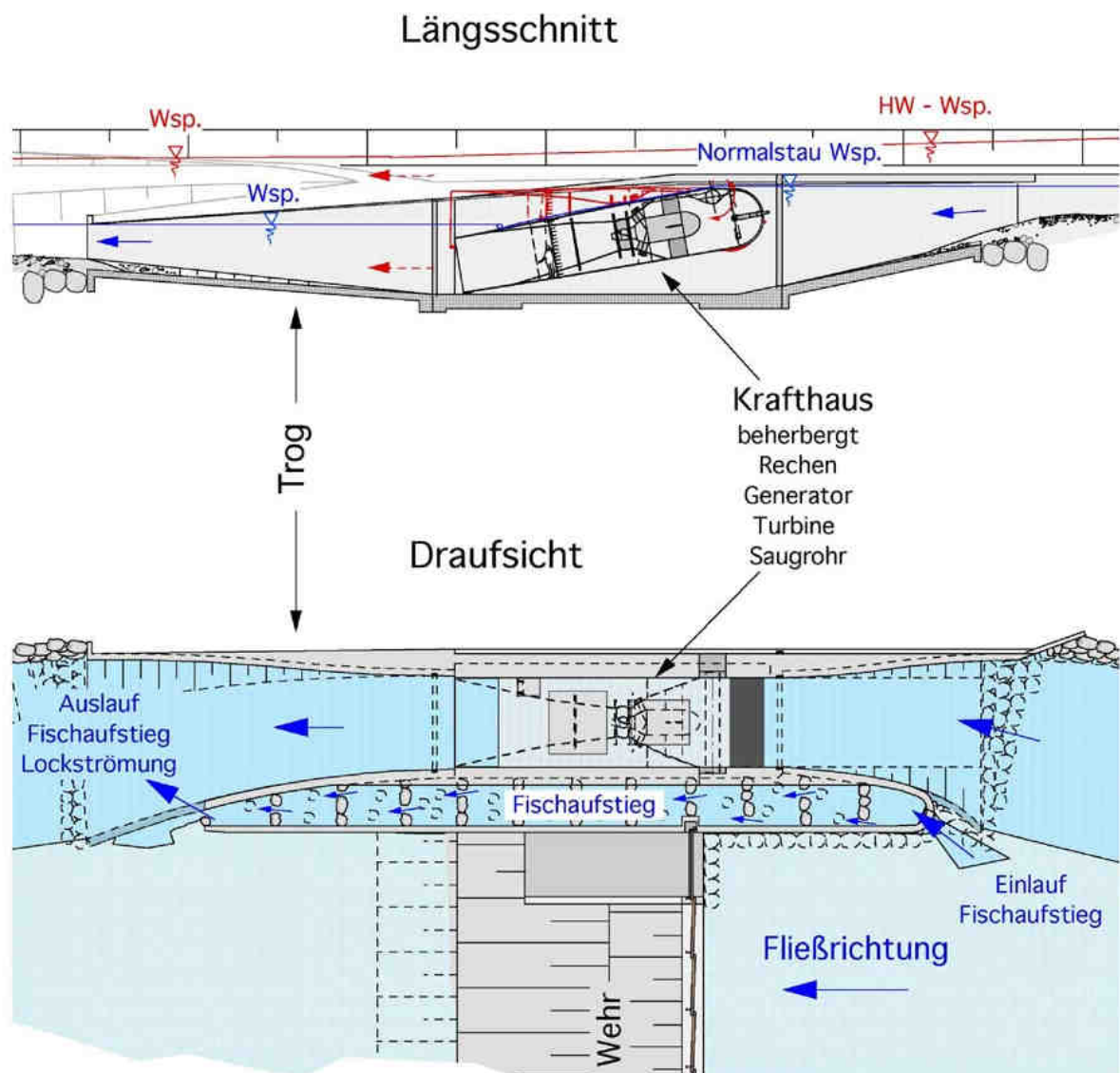


Fig. 35: bewegliches Kraftwerk im Längsschnitt mit Rechen-Turbine-Generator-Saugrohr in einer Klapp („Krafthausgehäuse“) eingebaut (Quelle: Hydro-Energie Roth GmbH)

Beim beweglichen über- und unterströmbaren Wasserkraftwerk werden in einem Bauwerk folgende Anlagenteile integriert:

- das schwenkbare Krafthausgehäuse ersetzt einen beweglichen Wehrverschluss;
- ein Spülkanal zur Weitergabe der Sedimente bzw. des Geschiebes;
- ein hydraulisch optimierter Zu- und Ablauftrichter;
- am Turbineneinlauf ist ein Rundbogenrechen installiert;
- sowohl ein sohl- wie auch ein oberflächennaher Fischabstieg ist möglich;
- seitlich neben dem Trog ist eine Fischaufstiegshilfe angeordnet.

Die weltweit erste bewegliche, über- und unterströmbare Wasserkraftanlage wurde am Sophienwehr / Ilm in Bad Sulza (D) Ende September 2009 in Betrieb genommen. Die Anlage erzeugt 60kW elektrische Leistung. Drei weitere Anlagen wurden in der Zwischenzeit ausgeführt und zwar in D-Gengenbach an der Kinzig (Mai 2010; 550kW), in D-Offenburg am Grossen Deich, Kinzig (Juli 2010, 465kW) und in CH-Kradolf-Schönenberg an der Thur (Mai 2011, 2 x 800kW).

Die Anlagen Sophienwehr und Gengenbach wurden in die Evaluation aufgenommen und besucht.

Technischen Daten der Anlage Sophienwehr an der Ilm, Bad Sulza (D)

- Fallhöhe brutto: ca. 1.9 m
- Fallhöhe netto: 1.75 m
- Nenndurchfluss: 4.3 m³/s
- hydraulische Leistung 74 kW
- Nennleistung: 60 kW elektrisch; Gesamtwirkungsgrad ca. 81%
- Laufraddurchmesser: 1000 mm
- Nenndrehzahl Turbine 231 min⁻¹
- Jahresenergie ?

Die Anlage wurde inkl. Wehr und Fischaufstiegshilfe komplett neu gebaut.



Fig. 36: Übersicht über die Anlage Sophienwehr in D-Bad Sulza

Technischen Daten der Anlage Gengenbach an der Kinzig, Nähe Offenburg (D)

- Fallhöhe brutto: ca. 3.30 m
- Fallhöhe netto: 3.20 m
- Nenndurchfluss: 20 m³/s
- hydraulische Leistung: 628 kW
- Nennleistung: 530 kW elektrisch; Gesamtwirkungsgrad ca. 84%
- Laufraddurchmesser: 2000 mm
- Nenndrehzahl Turbine 143 min⁻¹
- Jahresenergie 2.75 GWh

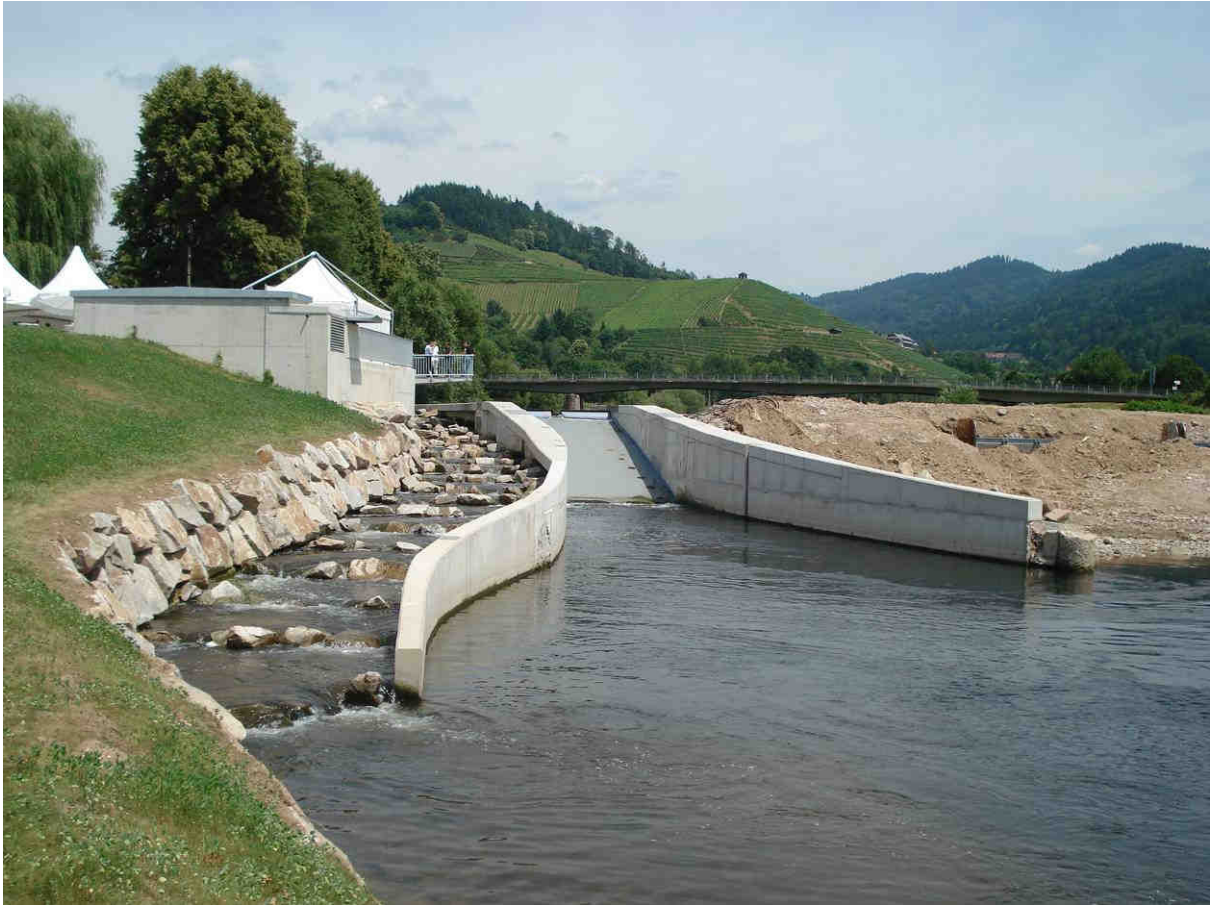


Fig. 37: Übersicht über die Anlage Gengenbach an der Kinzig

Anlässlich der Besuche durch das Evaluationsteam vor Ort, konnten die folgenden Feststellungen gemacht werden:

Umwelt

Längsvernetzung – Fischabstieg

Für den schadenfreien Fischabstieg besteht ein Schlitz zwischen den beiden Geschwemmselklappen auf dem Krafthausgehäuse, durch welchen ein permanenter Abfluss auch bei $Q < Q_A$ erfolgt (offiziell: Bad Sulza 55 l/s; Gengenbach 400l/s). Dieser Abfluss war aber an beiden Anlagen während der Besuche so gering, dass die Fische diese Bypass-Möglichkeit in der Regel nicht nutzen werden.

Im schwenkbaren Krafthaus ist jeweils eine vierflügelige Rohrturbine eingebaut, die je nach Baugrösse (Lauf- und Nabendurchmesser, Flügelanzahl), Drehzahl und vorgeschalteter Fischschutzeinrichtung (Feinrechen) eine kalkulierbare Fischmortalität aufweist. Die Mortalitätsrate beträgt in der Regel unter 15%. Insbesondere sind Kleinfische und Jungtiere gefährdet, die durch die Rechenstäbe (Abstand in Gengenbach ca. 15mm, in Bad Sulza ca. 20mm) hindurchschwimmen oder gesogen werden: die Anströmgeschwindigkeiten des Rundrechens am Turbineneinlauf sind eher zu hoch für eine ökologisch ausgerichtete Dimensionierung.



Fig. 38: Fischabstiegsmöglichkeit durch eine permanente Öffnung zwischen den Geschwemmselklappen an der Anlage Gengenbach

Im Überwasserfall, d.h., bei Abflüssen über der Ausbauwassermenge, wird den abstiegswilligen Fischen dank dem schwenkbaren Krafthausgehäuse ein Abstieg unter und über der Maschine geboten. Diese Bedingungen herrschen aber nur während ca. 70 Tagen im Jahr, wovon noch die Hochwasserzeiten abgezogen werden müssen, während denen die Fische ohnehin nicht wandern (oder dann direkt über das Wehr verdriftet werden).

Ein schadensfreier Abstieg durch Anlagen mit beweglichem Krafthaus kann deshalb nicht garantiert werden; eine Verbesserung gegenüber konventionellen Anlagen besteht jedoch.

+ guter Erfüllungsgrad (5)

Längsvernetzung - Fischaufstieg

Der Fischaufstieg direkt durch die Turbine hindurch ist nicht möglich. Eine Fischaufstiegshilfe (FAH) um das Wanderhindernis und die Wasserkraftmaschine herum besteht bei beiden besuchten Anlagen in Form eines Borstenfischpasses (Bad Sulza) resp. eines Raugerinne-Beckenpasses. Der Aufwand zum Bau dieser FAH ist hoch.

- geringer Erfüllungsgrad (3)

Sedimentdurchgängigkeit

Das bewegliche Krafthaus erfüllt dieses Kriterium gut, weil die Maschine im Hochwasserfall angehoben werden kann und keine Störung der Sedimentdurchgängigkeit verursacht.

++ sehr hoher Erfüllungsgrad (6)

Landschaftsbild – Landbedarf

Das auf Höhe des OW-Spiegels ins Wehr integrierte Krafthausgehäuse tritt nur wegen der erforderlichen Kanalanlage in Erscheinung, ansonsten ist sie nicht sichtbar. Das Technikgebäude mit den Nebenanlagen und Hilfsbetrieben (Hydraulikaggregat, Steuerung und Elektrotechnik) ist in Bad Sulza in 20m Entfernung vom Fluss in einem bestehenden Schuppen untergebracht und damit landschaftsneutral. In Gengenbach liegt das Technikgebäude aus Beton direkt neben der Fischaufstiegsanlage am Ufer (siehe Fig. 37).

++ sehr hoher Erfüllungsgrad (6)

Lärmimmissionen

Die Turbinen-Generator-Einheit ist unhörbar, weil sie im Wasser liegt und die Kühlung nicht mit Umgebungsluft sondern mit dem Triebwasser geschieht. Die Nebenanlagen und Hilfsbetriebe im separaten Technikgebäude können gewisse Lärmimmission verursachen, insb. Luftkompressor und Hydraulikaggregate; diese können in sensibler Umgebung in schalldämmter Ausführung bezogen werden. Bei grösseren Anlagen liegen die Hydraulikaggregate der Turbine im Krafthausgehäuse.

++ sehr hoher Erfüllungsgrad (6)

Wasserbau und bauliche Gestaltung

Bauvolumen

Der Kanal für das bewegliche Krafthaus kann in eine bestehende Wehranlage eingebaut werden; das Konzept benötigt deshalb auf den ersten Blick kaum zusätzlichen Wasserbau.

Hingegen sind die Wasserbau- und Spezialtiefbauarbeiten beim Einsatz eines beweglichen Krafthauses an bestehenden Schwellen an Schweizer Flüssen 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 ist hochwassergefährdet (in Schweizer Flüssen können mittlerweile auch Winterhochwasser heftig und häufig vorkommen). Bei konventionellen Buchtenkraftwerken geschieht dies ausserhalb des Flusses im Trockenen.
- In Gengenbach wurde für die Baugrubenumschliessung rückverankerte, überschnittene Bohrpfähle verwendet (siehe **Fig. 39**). Eine Zufahrt für das Bohrgerät besteht oft nicht und muss zuerst gebaut werden und ist damit mit grossen Kosten verbunden. Für kleinere Anlagen im Stile von Bad Sulza mit 60kW Nennleistung rechnen sich solche Bauweisen in der Regel nicht. Auch ist diese Bauart in der Schweiz nicht immer bewilligungsfähig, weil sie nicht rückgebaut werden kann und damit den Grundwasserleiter (falls ein solcher vorhanden ist) einstaut⁷.
- 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.

⁷ Das machen die Dichtschirme in Form von Spundwänden ö.ä. der bestehenden Wehrschwelle meist auch, aber die Gewässerschutzgesetzgebung kennt für neue Baugesuche an alten Standorten keine Ausnahmeregelung, so dass Bohrpfähle für die neue Anlage häufig nicht angewendet werden können.



Fig. 39: Anlage Gengenbach im Bau; rückverankerte Bohrpfehlwand (Quelle: Hydro-Energie Roth GmbH)

Die augenscheinliche Kompaktheit des beweglichen Krafthauses muss während der Bauausführung sehr teuer erkauft werden. Für kleinere Anlagen kann dies bis zur Unwirtschaftlichkeit des Projekts führen.

- geringer Erfüllungsgrad (3)

Wetter- und hochwassersicherer Bau

Das bewegliche Krafthaus benötigt keine zusätzliche Schutzhülle, um Hochwasser und Wettereinflüsse zu überdauern. Hingegen muss das überströmte Krafthausgehäuse ständig dicht gehalten werden, was aufwändig ist. Der Bulb mit dem Generator wird mit entfeuchter Druckluft vor eindringendem Wasser (Wellenabdichtung, Kabelein- und ausföhrungen) geschützt.

Der Technikraum mit den Nebenanlagen und Hilfsbetrieben (Steuerung und Elektrotechnik) kann problemlos über dem Hochwasserspiegel angeordnet werden, wird dadurch aber zu einem landschaftsbildenden Element.

Bei Netzausfall oder Netztrennung (Störung) wird die Turbine zurückgefahren. Da das Krafthausgehäuse die Funktion eines Wehrverschlusses hat, muss dieses trotzdem in praktisch geschlossener Position gehalten werden, obwohl ein grosser Auftrieb wirkt (Turbine gegen OW abgeschlossen/ohne Wasser). Das wird mit den seitlichen Hydraulikzylindern und mit gefüllten Ballasttanks bewerkstelligt. Fallen die Zylinder aus oder sind die Tanks leer, öffnet sich das Wehr und eine Flutwelle ergiesst sich ins Unterwasser.

Die Technologie des überströmten Krafthauses ist zwar schon seit langem bekannt, doch deren praktische Handhabung ist nach wie vor eine Herausforderung im technischen wie auch im wirtschaftlichen Sinne.

- geringer Erfüllungsgrad (3)

Elektromechanische Ausrüstung

Wirkungsgrad (Auslegungspunkt)

Die eingesetzte doppelt-regulierte Rohrturbine hat einen Wirkungsgrad von zwischen 88% und 90% im Auslegungspunkt. Der direkt gekoppelte permanent-magnetisch erregte Synchrongenerator erreicht einen Spitzenwirkungsgrad von 95% bis 96% (keine Verluste durch eine externe Erregung). Kleinere Maschinen werden falls möglich direkt ans Niederspannungsverteilstromnetz angeschlossen (Bad Sulza), grössere brauchen einen Transformator. Im Konzept des beweglichen Krafthauses werden keine Getriebe, Frequenzumrichter etc. benötigt. Die Gesamtwirkungsgrade liegen deshalb unschlagbar hoch bei 84% und mehr.

++ sehr hoher Erfüllungsgrad (6)

Teillastverhalten

Der Teillastwirkungsgrad bleibt auch bei abnehmendem Wasserdargebot dank doppelt regulierter Rohrturbine und dem permanent-magnetisch erregten Synchrongenerator hoch. Diese Technologie wird nicht nur im beweglichen Krafthaus sondern auch bei anderen Anlagentypen verwendet.

Der Vorteil des beweglichen Krafthauses ist jedoch der, dass bei Hochwasser und Unterströmen der Anlage am Saugrohrende eine Ejektorwirkung auftritt, welche zur Steigerung der Energieproduktion genutzt werden kann. Diese Idee zur indirekten Nutzung des Überwassers ist nicht neu, sondern wurde bereits 1909 vorgeschlagen und später in den Rhein-Kanalkraftwerken in Kembs und Ottmarsheim auch umgesetzt.

Gemäss 3D-Simulation IHS Universität Stuttgart, beträgt die Ejektorwirkung für das bewegliche Krafthaus bei einer Bruttofallhöhe von 3m ca. 0.3m. Diese zusätzliche Leistungssteigerung tritt je nach Auslegung der Anlage (Überschreitungsdauer der Ausbaubauwassermenge) und je nach hydraulischen Bedingungen des Standorts (Ansteigen des Wasserspiegels im Unterwasser bei zunehmenden Abflüssen / Hochwasser) nur an wenigen Wochen im Jahr auf.

Wären nicht die positiven Umweltwirkungen, wäre der Aufwand für die Ausführung eines über- und unterströmbaren Krafthauses mit Ejektorwirkung wirtschaftlich nicht tragbar.

++ sehr hoher Erfüllungsgrad (6)

Elektrotechnik

Aufwand, um Netzbedingungen zu erreichen

Die permanent-magnetisch erregten Generatoren des beweglichen Krafthauses werden als einzige im Rahmen der hier vorgestellten Konzepte direkt ohne Frequenzumrichter und z.T. ohne Trafo mit dem (Niederspannungs-)Netz verbunden. Die Polzahl ist auf die fixe Maschinendrehzahl und die Netzfrequenz abgestimmt; es entstehen diesbezüglich keine zusätzlichen Kosten.

Bei diesem Generatortyp kann die reaktive Leistung nicht beeinflusst werden und der $\cos\phi$ stellt sich je nach Netzspannung und bei sorgfältiger Auslegung des Generators irgendwo zwischen 0.9 und 1.0 (eventuell auch kapazitiv) ein. Für Kleinwasserkraftanlagen an Ultraniederdruckstandorten mit Leistungen meist unter 1MW wird vom Netzbetreiber selten eine Lieferung oder Absorption von reaktiver Leistung verlangt. Ist das Netz nicht stabil und die Spannung variiert stark im Tagesverlauf, wird auch der Leistungsfaktor der permanent-magnetisch erregten Generatoren aus den erlaubten Grenzen fallen und ein Trafo mit

verstellbarer Übersetzung oder ein Umrichter mit Leistungsfaktor-Funktionalität muss eingebaut werden, was die Kosten erhöht.

Für den Netzbetreiber noch problematischer sind Netzurückwirkungen (z.B. ungerade harmonische Ströme), die durch die direkte Koppelung eines permanent-magnetisch erregten Generators entstehen können. Der zusätzliche Einbau von Filtern kann erforderlich werden.

+ guter Erfüllungsgrad (5)

Betrieb und Unterhalt

Geschwemmselentnahme

Das Geschwemmsel wird mit einem Feinrechen (halbkreisförmig direkt auf dem Turbineneinlauf montiert) gefasst. Ein Reinigungsbalken streift es ab. Durch Öffnen von zwei kleinen Klappen auf dem Krafthausgehäuse kann das Geschwemmsel ins Unterwasser abgeschwemmt werden.



Fig. 40: Anlage Bad Sulza mit Rechenreinigungsbalken links und den Geschwemmselklappen rechts (wobei nur eine nach dem Reinigungszyklus wieder in Normalstellung zurückgefahren ist, die rechtsufrige klemmt)

Rechenreiniger und Geschwemmselklappen sind ständig im Wasser eingetaucht und ölhydraulisch angetrieben. Das ist eine Kombination, die besonders in Umweltschutzkreisen nicht gern gesehen ist, auch wenn biologisch abbaubares Öl eingesetzt wird. Die oberflächennahen Geschwemmselklappen können auch durch Eisbildung im Winter funktionsuntüchtig werden.

Bei diesem System besteht zudem keine Möglichkeit, punktuell Zivilisationsmüll (PET-Flaschen, Plastik, Tennisbälle, etc.) aus dem Gewässer zu entnehmen.

- / + geringer bis guter Erfüllungsgrad (4)

Sedimentablagerungen

Mögliche Ablagerung von Sedimenten am beweglichen Krafthaus können durch Anheben der gesamten Maschine leicht durch den Trog abgespült werden. Der Einlauf zum Trog wird nicht durch eine Geschiebeschwelle im Oberwasser abgegrenzt, sondern geht kontinuierlich in die Flusssohle über. Das Problem der rückwärtsschreitenden Erosion, welches bei konventionellen Wehrverschlüssen beobachtet wird, könnte auch beim beweglichen

Krafthaus auftreten: bei Geschiebespülungen durch die Wehranlage während Hochwasserereignissen (und nur dann ist das ja erlaubt) wird Geschiebe in den Trog gezogen; der richtige Zeitpunkt, wann die Spülungen beendet werden sollen, ist schwierig zu finden. Oft lagert nach dem Hochwasserereignis mehr Geschiebe vor dem Wehr und damit auch vor der Maschine als vor dem Ereignis. Für späteres Nachspülen fehlen das Wasser (um die erforderlichen Schleppspannungen zu erzeugen) und meistens auch die Bewilligung der Behörden.

Die Betriebserfahrungen sind noch zu kurz, als dass dazu ein abschliessendes Urteil gefällt werden könnte oder ob eine Geschiebeschwelle am oberen Ende des Troges nicht doch nötig wäre.

- / + geringer bis guter Erfüllungsgrad (4)

Zugänglichkeit

Das bewegliche Krafthausgehäuse ist im Normalfall nicht zugänglich. Der Einstieg geschieht über Druckdeckel im Gehäuse bei hochgeklappter Maschine. Für grössere Inspektionen und länger geöffneter Maschine muss der gesamte Trog mit Dammbalken hochwassersicher geschlossen und entwässert werden.

Um keine Feuchtigkeit in den Generator im Bulb eindringen zu lassen, wird entfeuchtete Luft mit Überdruck in den Bulb gepumpt; das mindert das Schadenspotential, sollten die Wellenabdichtungen undicht werden oder die Deckel nach einer Reparatur einmal nicht dicht verschlossen worden sein. Auch alle Zu- und Ableitungen (Energieableitung, Hydraulik- und Steuerleitungen) müssen druckdicht ausgeführt und nach jeder Reparatur auch wieder entsprechend dicht zurück gelassen werden.

Das Gehäuse mit Hydraulikaggregat, Leitapparat, etc. besitzt eine Entwässerungspumpe mit Rückflussverhinderer, um eindringendes Wasser wieder aus der dauernd überströmten Maschine zu entfernen.

- - nicht erfüllt (1)



Fig. 41: Turbineneinlauf mit Bulb des beweglichen Kraftwerksgehäuses an der Anlage Kradolf-Schönenberg vor der Montage in den Trog

Lebensdauer

Allgemein ist für eine vollständig im Wasser eingetauchte Maschinengruppe eine geringere Lebensdauer anzunehmen als für eine klassische vertikalachsige Kaplan-Turbine, deren relevanten Teile alle zugänglich und über dem Wasserspiegel angeordnet sind.

Obwohl das Konzept des beweglichen Krafthauses gerade für den Umweltbereich besondere Anstrengungen unternimmt, ist der grosse Einsatz von ölhydraulisch angetriebenen Komponenten direkt im Wasser eher als Rückschritt zu beurteilen, wenn andere Hersteller auch aus Umweltschutzgründen das ölfreie Kraftwerk propagieren (ölfreie Lager; wasserhydraulische Antriebe, etc.). Hydraulikleitungen und Hochdruckschläuche sind regelmässig zu kontrollieren, was beim beweglichen Krafthaus nicht einfach ist. Hochdruckschläuche sind alle 5 Jahre zu ersetzen.

Der Technikeinsatz für das bewegliche Krafthaus in Unterwasser-Anordnung ist hoch. Ob die gewählten Komponenten und Ausführungsdetails eine lange Lebensdauer garantieren, ist abzuwarten. Die Skepsis ist berechtigt, da sich frühere Ausführungen von überströmbaren Kraftwerken (z.B. Lechkraftwerke / Bayern) nicht durchgesetzt haben.

Über die Lebensdauer des permanent-magnetisch erregten Generators bestehen unterschiedliche Ansichten (siehe VLH-Konzept).

- / + geringer bis guter Erfüllungsgrad (4)

Es ist Sache des Investors zu entscheiden, ob er die schwierigen Bedingungen der Wartung zu Gunsten der unbestritten hohen Umweltwirkungen des beweglichen Krafthauses akzeptieren will oder nicht.

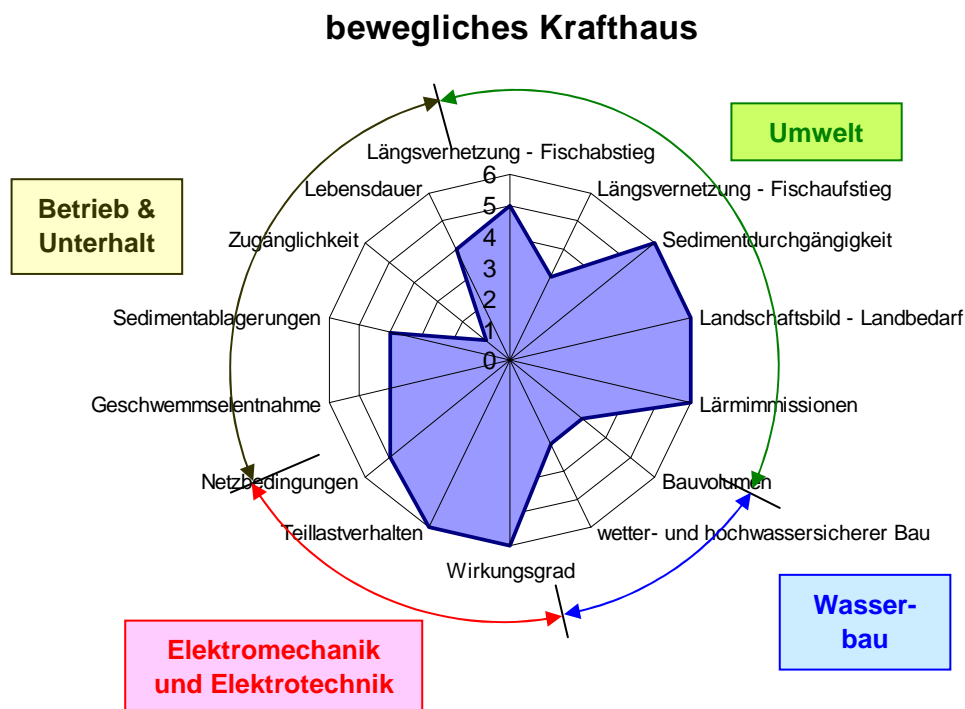


Fig. 42: Evaluation des beweglichen Krafthauses

Konzept 9a: DIVE-Turbine

Die DIVE-Turbine ist – wie der Name schon sagt – eine Unterwasseranordnung der Turbinen-Generatoren-Gruppe der Firmen Fella (Turbine), Oswald (Generator) und Schodo (Elektrotechnik, Steuerung).

Die Zielsetzung für die aufwändige Unterwasseranordnung ist nicht klar. Neben der Schonung des Landschaftsbildes und dem guten Lärmschutz können keine besonderen Vorteile ausgemacht werden, die nicht auch mit anderer Anordnung und der Verwendung eines permanent-magnetisch erregten Synchrongenerators (Oswald) und einer einfach regulierten Propeller-Turbine (Fella) mit Frequenzumrichter (Schodo) zu erreichen wären.

Es wurden bisher nur 3 Anlagen in den Jahren 2006 und 2007 mit DIVE-Turbinen ausgerüstet. Anschliessend fand eine Zusammenarbeit des DIVE-Teams mit der TU München im Rahmen des Schachtkonzepts statt (siehe nächstes Kapitel). Die Anlagen mit DIVE-Turbinen wurden deshalb weder besucht noch im Detail evaluiert.

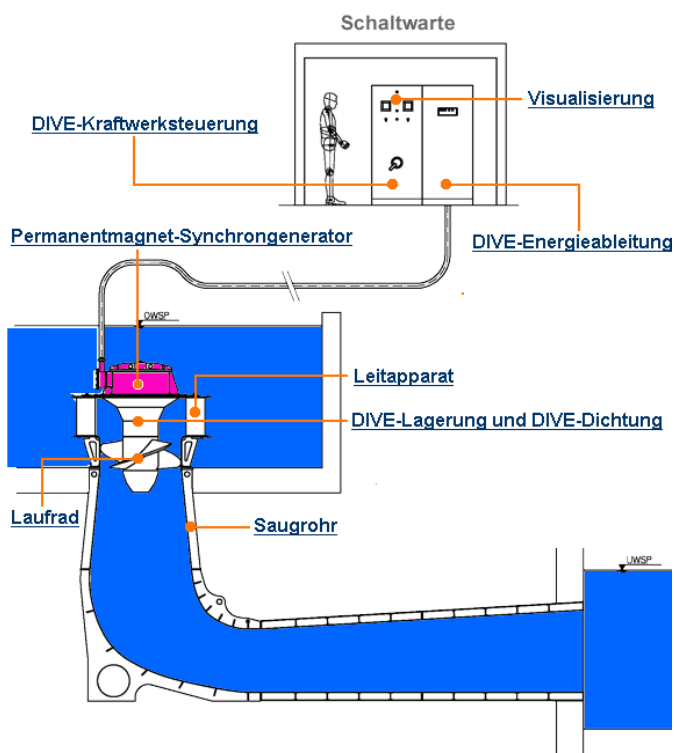


Fig. 43: Übersicht über das DIVE-Konzept (Quelle: Fella GmbH)

Konzept 9b: Schachtkonzept TU München

Die Unterwasseranordnungen der Konzepte Nr. 7: VLH und Nr. 8: bewegliches Krafthaus haben gezeigt, dass die vertikale (oder geneigte) Rechenfläche direkt vor den Turbinen nicht so gross gewählt werden kann, wie für den Fischschutz (Anströmungsgeschwindigkeit bei 0.5m/s oder darunter) und die effiziente Geschwemmselreinigung erforderlich wären. Das Schachtkonzept beschreitet deshalb einen neuen Weg und legt den Einlauf des Kraftwerks von der vertikalen in die horizontale Ebene. Die Wasserefassung liegt damit nicht mehr in der Wehrachse sondern in einem Schacht oberhalb der Wehrschwelle, wo das Wasser über einen Horizontalrechen in die Vertikale umgelenkt wird und schliesslich durch die Turbine strömt. Der Saugschlauch der Turbine führt durch die Wehrachse ins Unterwasser.

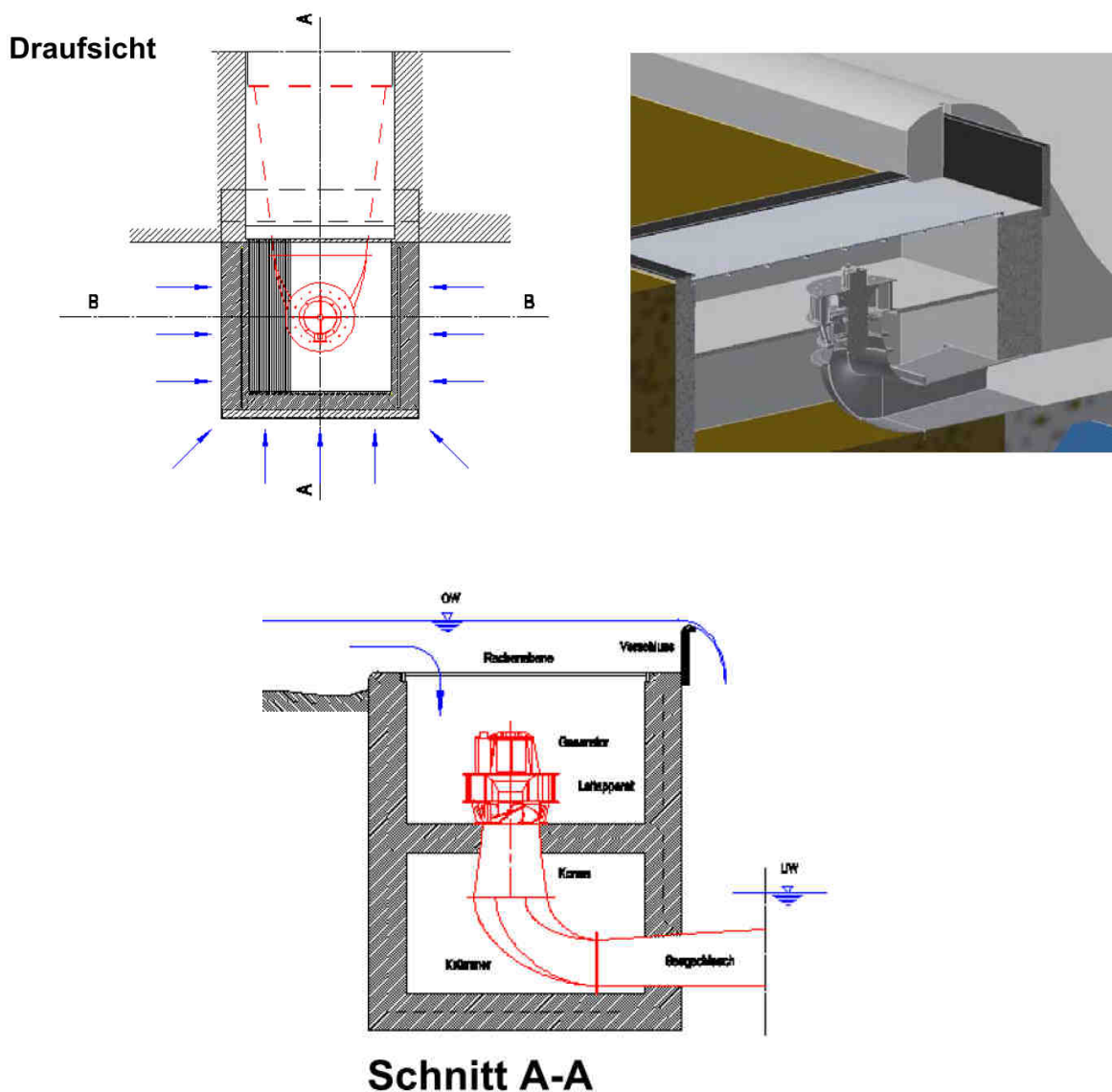


Fig. 44: Übersicht über das Schacht-Konzept (Quelle: TU München; Prof. Dr.-Ing. Rutschmann, Dipl.-Ing. Sepp, Dipl. Phys. Geiger)

Die Initiatoren gehen noch von viel weitreichenderen Vorteilen des Schachtkonzepts aus:

- Die Schächte mit den Unterwasserturbinen sollen nicht am Ufer, sondern gegen die Flussmitte angelegt werden, damit die Rechenfläche von drei Seiten angeströmt werden kann (siehe **Fig. 44**). Damit ist keine Strömungsumlenkung in der Horizontalen zum Ufer hin z.B. in ein Buchtenkraftwerk erforderlich. Dadurch soll keine Verlandung des Stauraumes und des Unterwassers auf der dem Kraftwerk gegenüberliegenden Flussseite stattfinden.
- 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, konnte ausser einem Besuch an der Versuchsanlage (2kW im Labor und bis 80kW im Kanal / im Bau) der TU München in Oberrach keine eigentliche Evaluation durchgeführt werden. Es können aufgrund der bisherigen Untersuchungen im Labor noch keine schlüssigen Bewertungen vorgenommen werden.

Konzept 10: Heberturbine (MHyLab / Bunorm)

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 Wehrschwelle eingebaut, kleine Fallhöhen im Bereich von 0.5m bis 3.5m 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 Riementriebs) 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).

Technischen Daten der Anlage UMV in Vallorbe an der Orbe

- Fallhöhe netto: 2.20 m
- Nenndurchfluss: 2 x 2.50 m³/s
- hydraulische Leistung: 2 x 54 kW
- Nennleistung: 2 x 42.5 kW elektrisch; Gesamtwirkungsgrad ca. 79%
- Nenndrehzahl Turbine 150 min⁻¹
- Nenndrehzahl Generator 750 min⁻¹, (asynchron); Übersetzung mit Keilriemen



Fig. 45: Heberturbinen in der Anlage UMV in Vallorbe an der Orbe

Leider ist die Anlage für die vorliegende Studie 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.

Auch hier wurde nur das Potential, nicht aber die konkret ausgeführte Anlage des Heberkonzepts gemäss MHyLab evaluiert.

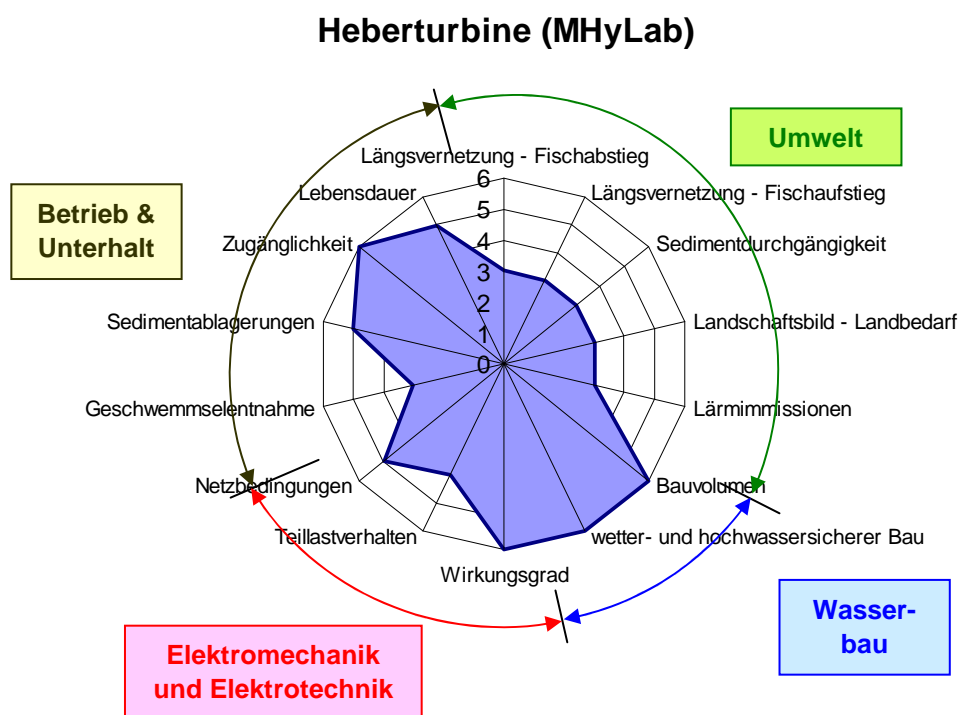


Fig. 46: Evaluation der Heberturbine gemäss Konzept MHyLab

Es zeigt sich, dass die Heberturbine im Umweltbereich keine neuen Lösungen anbietet und die heutigen Anforderungen nicht erfüllen kann. Es müssen deshalb zusätzliche Massnahmen für den Fischschutz, den Fischaufstieg, den Geschiebetrieb sowie den Lärm- und Landschaftsschutz geplant und gebaut werden, die die Kostenvorteile des Heberkonzepts zumindest teilweise wieder zunichte machen.

Gesamtbewertung und Zusammenfassung

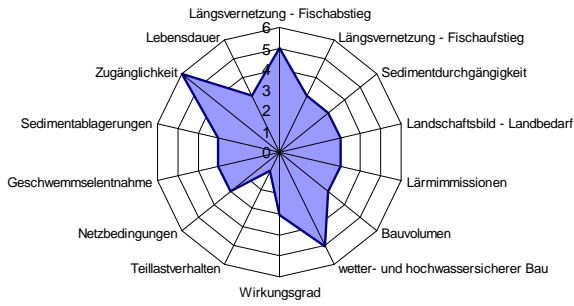
Ingesamt wurden 7 Pilotlösungen und 3 schon länger bekannte Wasserkraftmaschinen für kleinste Fallhöhen identifiziert und deren Anwendung für Schweizer Verhältnisse evaluiert. Es zeigte sich, dass:

- 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 (Wasserdruckmaschine 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 bestgeeignetste Konzept gewählt werden.

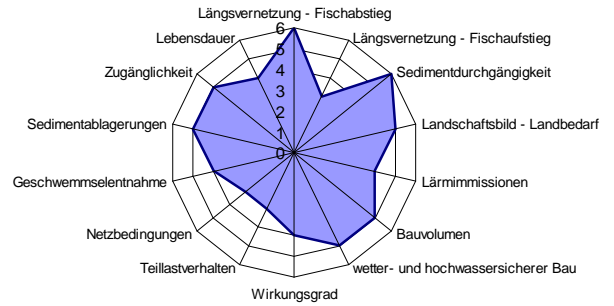
Die Darstellung der Evaluation in einem Radar- oder Spinnennetzdiagramm zeigt auf einen Blick die Stärken und Schwächen der verschiedenen Konzepte. Obwohl die Evaluation Schulnoten gemäss schweizerischer Praxis (1 schlechteste, 6 beste) benutzt, ist die Bildung eines Gesamtnotendurchschnitts über die 14 Kriterien nicht erlaubt, da absichtlich keine Gewichtung vorgenommen wurde (es herrscht z.B. ein Übergewicht von 5 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 fehlleiten lassen.

Nachfolgend werden die Spinnennetzdiagramme noch einmal dargestellt und zwar im Gesamtzusammenhang, so dass die Unterschiede und Gemeinsamkeiten der evaluierten Konzepte deutlicher zutage treten als in den vorangehenden Kapiteln:

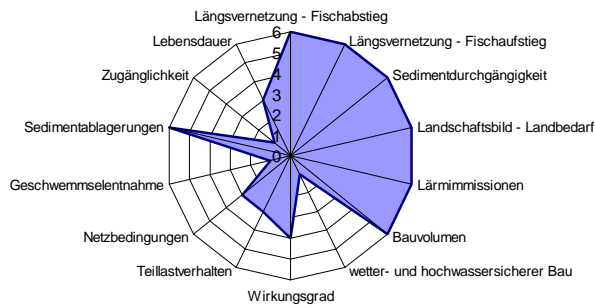
1) Wasserwirbelkraftwerk



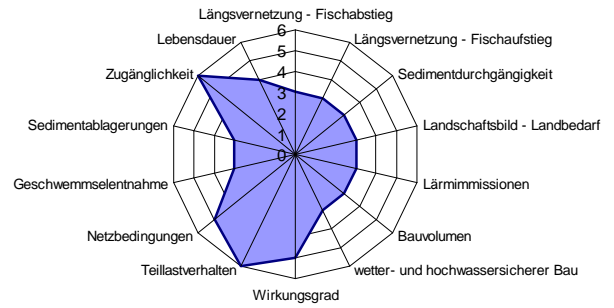
2) Wasserdruckmaschine



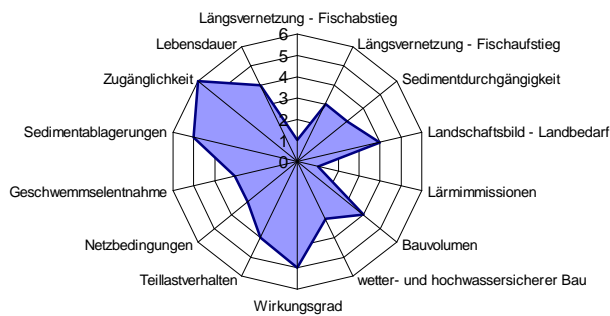
3) hydrokinetische Turbine / Strom-Boje



4) mittelschlächtiges Wasserrad



5) Lamellenturbine



6) Wasserkraftschnecke

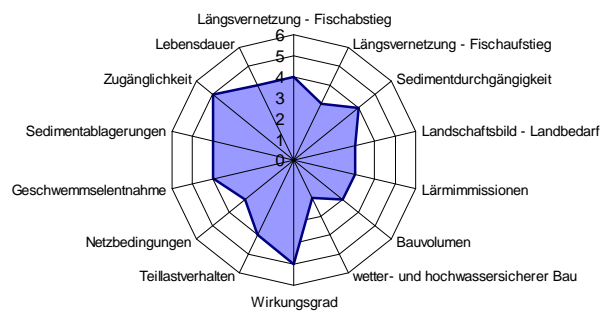
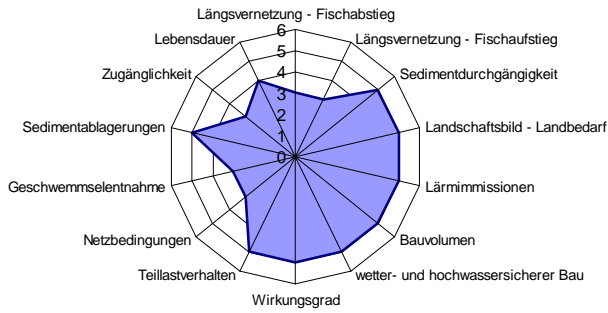
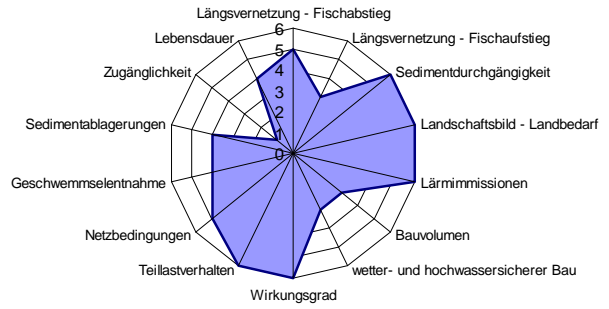


Fig. 47: Konzepte bis 100kW

7) Very-Low-Head Turbine (VLH-Konzept)



8) bewegliches Krafthaus



10) Heberturbine (MHyLab)

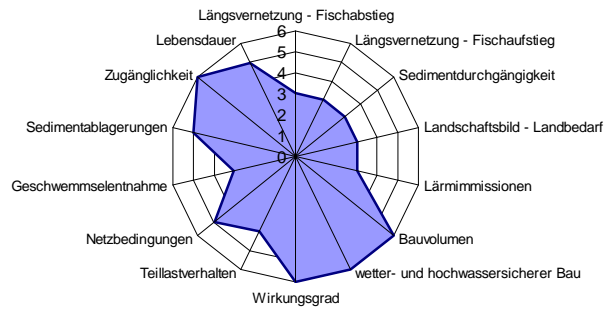


Fig. 48: Konzepte über 100kW

Zur Erinnerung: Eine schlechte Bewertung bedeutet nicht generell, dass das Konzept für dieses Kriterium ungeeignet wäre. Oft rührt eine schlechte Bewertung daher, dass die Maschine eine Bedingung von sich aus nicht erfüllt (z.B. zuviel Lärm verursacht) und deshalb zusätzliche Massnahmen erforderlich werden, die entweder das Anwendungsfeld des Konzepts einschränken oder zusätzliche Investitionen und/oder Betriebskosten verursachen.