Kleinwasserkraft-Konzepte

Autor(en): **Heimerl, Stephan / Kohler, Beate**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin.ch : Fachzeitschrift und Verbandsinformationen von Electrosuisse, VSE = revue spécialisée et informations des associations Electrosuisse, AES**

Band (Jahr): **105 (2014)**

Heft 2

PDF erstellt am: **29.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-856188

Nutzungsbedingungen

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

Haftungsausschluss

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

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Kleinwasserkraft-Konzepte

Hydraulische Strömungsmaschinen für kleine Durchflüsse und niedrige Fallhöhen

Im Kleinwasserkraftbereich tummeln sich viele Erfinder und euphorische Planer, da diese Anlagengrössen sowohl finanziell als auch bautechnisch für sie noch überschaubar sind. Es fällt auf, dass oft nur unzureichende Angaben zur Effizienz gemacht werden. Häufig wird z.B. nur der mechanische Wirkungsgrad der hydraulischen Strömungsmaschine oder der des Generators angegeben, aber nicht der Anlagengesamtwirkungsgrad. Eine Übersicht über mögliche Konzepte schafft Klarheit und hilft, Fehlinvestitionen zu vermeiden.

Stephan Heimerl, Beate Kohler

Dieser Beitrag stellt nur ernst zu nehmende Maschinenkonzepte vor, die über das Patent bzw. den Modellstatus hinausgekommen sind. Bekannte Turbinentypen, die in grösseren Dimensionen eingesetzt werden können – Hydromatrix-Turbinen, Kompaktbauweisen, Turbinen für Rohrleitungssysteme wie die Axent-Turbine oder rückwärtslaufende Pumpen etc. – werden nicht berücksichtigt. Zudem wird nicht auf gewisse Konzepte, hauptsächlich der kinetischen Turbinen, eingegangen, die eher für Meeresströmungen und nicht für Binnengewässer geeignet sind.

Die folgenden Erläuterungen gehen primär auf typische Einsatzbereiche unabhängig vom Ort ein; Sonderlösungen sind vielfach denkbar und möglich.

Wasserräder

Die seit Langem bekannten Arten von Mühl- und Wasserrädern werden auch heute noch bei Wasserkraftanlagen an kleinen Gewässern eingesetzt **(Bild 1)**.

Sie stellen eine sinnvolle Ergänzung der Turbinen im unteren Leistungsbereich bis ca. 100 kW und teilweise darüber dar. Sie lassen sich einfach warten, sind unempfindlich gegen Verstopfungen und infolge der einfachen Bauweise relativ preisgünstig.

Bei Wasserrädern unterscheidet man drei Hauptgruppen **(Bild 2)**.

Unterschlächtige Wasserräder

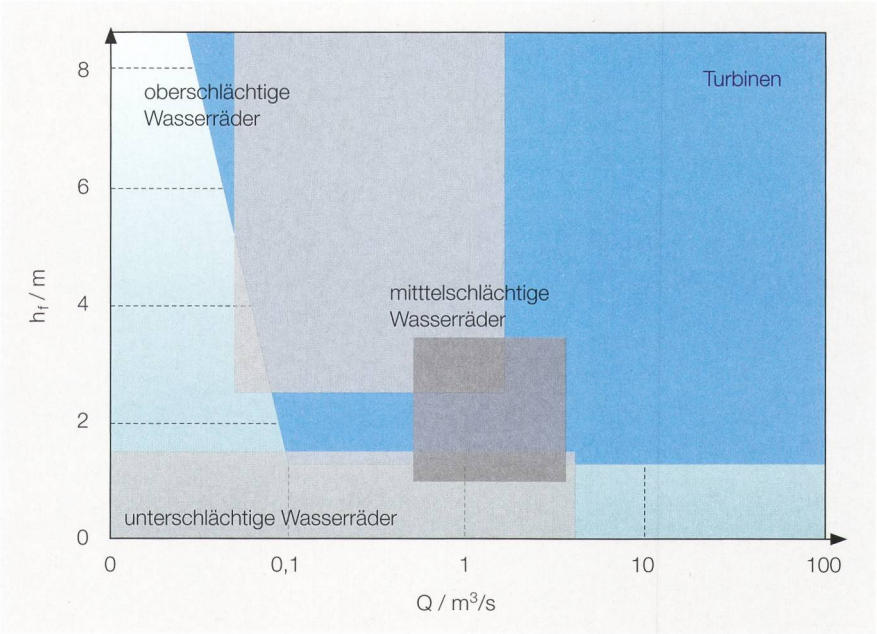
Die wohl ursprünglichste Form der Wasserräder stellen die unterschlächtigen Wasserräder als Schaufelräder dar **(Bild 2)**, die statt Zellen meist radial angeordnete, allseits offene Schaufeln besitzen. Um die Wasserverluste so gering wie möglich zu halten, wird das Triebwasser im Radbereich durch ein trogförmiges Gerinne (Kropfrinne) geführt. Diese Wasserradform wird meist bei kleineren Gefällen bis etwa 1,5 m sowie grösseren Durchflüssen bis zu ca. 4,0 m³/s eingesetzt **(Tabelle 1)**.

Unterschlächtige Wasserräder mit seitlich offenen und nicht durch eine Kulisse geführten Schaufeln entsprechen denjenigen, die bei breiten Wasserschöpfrädern, Schaufelraddampfern und Schiffsmühlen eingesetzt wurden.

Der Vorteil dieses Wasserradtyps ist seine Einfachheit. Nahezu alle Weiterentwicklungen, wie z.B. die sogenannte Staudruckmaschine, sind komplizierter.

Mittelschlächtige Wasserräder

Diese Wasserräder sind vielfach nach dem System «Zuppinger» mit relativ flachen, nur leicht geneigten und tiefen Schaufeln oder als einfache Schaufelräder gebaut und werden etwa auf Nabenhöhe oder etwas unterhalb davon beaufschlagt **(Bild 2)** [1]. Zellenräder und Schaufelräder, denen das Wasser im Idealfall über Blenden, den sogenannten Kulissen, zugeführt wird, werden in ihm eingesetzt. Um das Wasser optimal nutzen zu können, bevor es das Rad tangential verlässt, wird anschliessend ein kreisrundes Kropfgerinne mit einer an den Radaussendurchmesser angepassten Ausbildung genutzt. Auch in diesem Fall sind Wirkungsgrade bis zu 85 % möglich, indem neben der potenziellen auch ein Teil der kinetischen Energie des Wassers umgesetzt werden kann **(Tabelle 1)**.



Heimerl, Kohler

Bild 1 Haupteinsatzbereiche für Wasserräder im Vergleich zu Turbinen, bezogen auf die Fallhöhe und den Durchfluss.

[3]

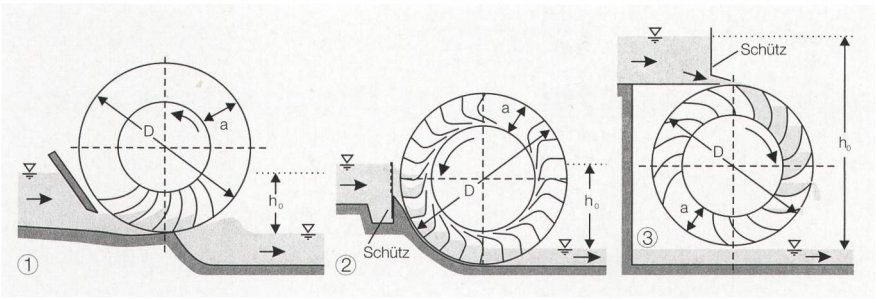


Bild 2 Haupttypen von Wasserrädern: 1) unterschlächtiges Schaufelrad; 2) mittelschlächtiges Zellenrad; 3) oberschlächtiges Zellenrad.

Oberschlächtige Wasserräder

Diese Wasserräder, auch als Wasserräder mit Freihang bezeichnet, werden im Bereich des Radscheitels beaufschlagt, wobei das Triebwasser meist über ein Holzgerinne zum Rad geführt wird [2], an dessen Ende es dann entweder mittels eines einfachen freien Überfalls, über eine Bodenöffnung oder über eine Blende (Zungen- oder Kulisseneinlauf) auf das Rad abgegeben wird. Das Wasser treibt das Rad durch die Schwerkraft an und verlässt es nach etwa einer viertel bis maximal halben Radumdrehung wieder. Ihr Einsatzbereich ist in **Tabelle 1** spezifiziert. Durch den notwendigen unterwasserseitigen Freihang tritt ein kleiner Fallhöhenverlust auf. Je nach Bauart können mit diesen Radtypen Wirkungsgrade bis zu knapp 85 % erreicht werden. Ein Vorteil dieses Radtypes ist, dass meist auf den Einbau eines Rechens sowie der dazugehörenden Reinigungseinrichtungen verzichtet werden kann.

Entwurfsgrundsätze und Weiterentwicklungen

Bei allen Wasserrädern sind zwei Grundsätze wichtig [3]. Das Wasser soll möglichst tangential zum Radumfang und ohne Stoss in das Rad eintreten und dieses möglichst langsam verlassen. Die Umfangsgeschwindigkeit des Rades sollte die Hälfte der Wassereintrittsgeschwindigkeit betragen. Daher laufen Wasserräder gewöhnlich mit einer langsamen Drehzahl von 5–8 Umdrehungen pro Minute bzw. einer Umfangsgeschwindigkeit von etwa 1,5–2,0 m/s und benötigen eine Drehzahlübersetzung (Getriebe oder Riemenantrieb).

Bei der Auslegung spielt das optimale Verhältnis von Wasserdargebot bzw. Ausbaudurchfluss, Zellengrösse, je nach Bauweise auch Zellenform und Umdrehungsgeschwindigkeit eine wichtige Rolle, um vor allem bei den Befüll- und Entleerungsvorgängen der Zellen weder Überwasser zu verschenken noch ein rechtzeitiges verlustarmes Entleeren am Tiefpunkt bzw. nach dem Auftauchen aus dem Unterwasser zu verhindern. In der Regel reduziert sich die Schluckfähigkeit mit steigender Fallhöhe.

Bei Anlagen mit Wasserrädern gibt es zwei Problemfelder: Lärmemissionen sowie die Notwendigkeit der Ausserbetriebsetzung der Anlage bei starkem Frost. Durch die Unterbringung des Wasserrades in einer geschlossenen Radstube können diese Probleme deutlich reduziert werden.

Obwohl es sich bei Wasserrädern um eine ausgereifte Technik handelt, gibt es auch heute noch Weiterentwicklungen (z.B. Einsatz neuer Werkstoffe) zur Wirkungsgradoptimierung. Mit numerischen Methoden lassen sich die Wasserradanströmung und die geometrischen Grössen (Schaufelgeometrie, Verhältnis Schaufelgrösse/-anzahl zu Raddurchmesser etc.) verbessern. Erwähnenswert sind folgende Entwicklungen:

Turas-Wasserrad

Mit dem speziell zur Stromerzeugung entwickelten oberschlächtigen Turas-Wasserrad, mit einseitiger Lagerung an einer kompakten Generatoren-Getriebe-Einheit, wird erstmals bei einer Serienfertigung von der beidseitigen Radachsenlagerung abgewichen [4]. Die komplette Anlage kann vorgefertigt und mit geringem Aufwand am Einsatzort aufgestellt werden. So kann der bisher nicht wirtschaftlich betreibbare Leistungsbereich unter 10 kW für die Stromgewinnung mit einem Wirkungsgrad von über 70 % im Beaufschlagungsbereich von 30–100 % erschlossen werden.

Wasserdruckmaschine

Dieser weiterentwickelte Laufradtyp baut auf einem mittelschlächtigen Wasserrad auf und nutzt den vorhandenen Druckunterschied zwischen Ober- und Unterwasser [5]. Dabei wird eine durchgehende Nabe verwendet, die etwa gleich gross wie die Fallhöhe ist, und durch die mit den daran angebrachten Schaufeln der durchströmte Querschnitt komplett abgeschlossen werden kann, sodass auf das sonst notwendige Einlaufschütz zur Regelung verzichtet werden kann. Derzeit werden im drehzahlvariablen Betrieb Gesamtwirkungsgrade von bis zu 64 % erreicht.

Staudruckmaschine

Dies ist ein modifiziertes mittelschlächtiges Wasserrad, das bisher offensichtlich nur in einer Pilotanlage bei Wien realisiert wurde [6]. Wirkungsgradangaben sind nicht verfügbar.

Lamellenturbine

Bei dieser Strömungsmaschine handelt es sich um ein unterschlächtiges Wasserrad, das überwiegend die kinetische Energie nutzt. Die Schaufeln sind als gebogene, tiefenversetzt angeordnete Blech-Lamellen ausgeführt, um gemäss Hersteller das Wasser im Aussenkranz zu halten und damit bestmöglich wieder ab-

Wasserradtyp	Fallhöhe m	Durchfluss m^3/s	Wirkungsgrad	Mech. Leistung kW	Q_{spez} $m^3/(s \cdot m)$	Bemerkungen
1. Unterschlächtig	0 – 1,5	1 – 4	0,30 (max. 0,55)	12	0,80	η = 0,55 nur bei gekrümmten Schaufeln; meist unwirtschaftlich
2a. Mittelschlächtig (Zuppinger-Wasserrad)	1 – 3	0,5 – 3,75	0,75 (max. 0,80)	83 (meist < 50)	0,75	η = 0,80 nur bei langsam umlaufenden WR (u_a < 1,3 m/s)
2b. Mittelschlächtig (Bachsches-Kulissenrad)	1,5 – 3,5	0,5 – 3,25	0,80 (max. 0,85)	90 (meist < 50)	0,65	–
3. Oberschlächtig	2,5 – 10	0,05 – 1,15	0,80 (max. 0,85)	90 (meist < 50)	0,23	η = 0,85 nur bei vollständig ausgerundeten Blechzellen

Tabelle 1 Haupteinsatzbereiche und wesentliche Kennwerte der diversen Wasserradtypen [3].

Heimerl, Köhler

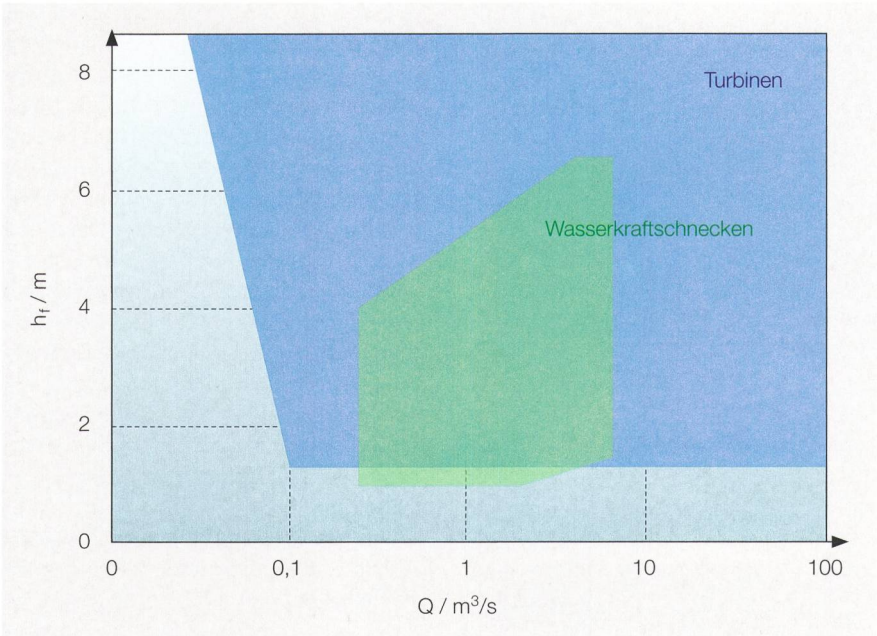


Bild 3 Haupteinsatzbereich für Wasserkraftschnecken im Vergleich zu Turbinen, bezogen auf die Fallhöhe und den Durchfluss.

zugeben [7]. Wird das Wasserrad auf einem Rahmen gelagert, kann es für eine sichere Hochwasserabfuhr durch entsprechende Antriebe aus dem Bauwerksquerschnitt herausgeschwenkt werden. Der Gesamtwirkungsgrad dürfte bei maximal 60 % liegen.

Wasserkraftschnecken

Die Archimedische Schnecke ist seit dem Altertum zur Wasserförderung bekannt und fand im 20. Jahrhundert in der Abwassertechnik eine erneute Verbreitung. Durch die Umkehrung der Arbeitsweise kann die Förderschnecke zur Energieerzeugung verwendet werden. Seit Anfang der 1990er-Jahre kam sie deshalb wieder in den Fokus und wird seitdem weiterentwickelt [3, 8].

Von seiner Wirkungsweise ist dieser Maschinentyp eher den Wasserrädern als den Turbinen zuzuordnen, denn er nutzt vor allem die potenzielle Energie des Wassers.

Mit einem typischen Schluckvermögen von ca. 0,25–6,5 m³/s und üblicherweise nutzbaren Fallhöhen von etwa 1,0–6,5 m (max. 0,5–8,0 m) deckt dieser Maschinentyp einen grösseren Einsatzbereich als Wasserräder ab (Bild 3), wobei dieser konstruktiv durch die statisch-konstruktiven Anforderungen (Durchhang der Schnecke) begrenzt ist.

Messungen haben gezeigt, dass ihr Wirkungsgrad vergleichbar mit dem von oberschlächtigen Wasserrädern ist, wobei dieser in günstigen Fällen bei optimaler Auslegung im Beaufschlagungsbereich zwischen 70–80 % um bis zu 5 % darüber, d.h. bei insgesamt über 80 % liegen kann. Durch einen drehzahlvariablen Betrieb mit Frequenzumrichtern kann auf schwankende Durchflüsse reagiert und der Oberwasserspiegel konstant gehalten werden. Insgesamt erweist sich damit die Wasserkraftschnecke im Vergleich zu einem Wasserrad v. a. beim Wirkungsgrad, der Jahresenergieerzeugung und den Kosten als vorteilhaft.

Meist wird die Schnecke als sogenannte Trogschnecke ausgeführt. Seltener sind Rohr- bzw. Rohrmantelschnecken, bei denen die Schnecke frei in einem geschlossenen Rohr läuft bzw. fest mit diesem als Mantel verbunden ist, da diese infolge der meist ungenügenden Belüftung zum «Verschlucken» neigen. Auch Spiralschnecken, bei denen Röhren schraubenmässig um das Zentralrohr gebogen sind, weisen diese Problematik auf und sind daher äusserst selten.

Gewöhnlich werden die Wasserkraftschnecken mit einem Anstellwinkel von 20–35° gegenüber der Horizontalen angeordnet und bestehen aus einem auf eine biegesteife Hohlwelle aufgeschweissten Schneckenkörper mit einer sogenannten Gangzahl, d.h. Anzahl von Schneckenflügeln, von üblicherweise 3–6 (Bild 4). Die Lagerung erfolgt oberwasserseitig in der Regel über ein als Traglager ausgebildetes Wälzlager und unterwasserseitig durch ein wasserdicht gekapseltes, wartungsfreies Gleitlager. Hinter dem oberen Lager ist die Getriebe-Generator-Einheit angeordnet. Aus Sicherheitsgründen ist eine Abdeckung der Schnecke mit einem Gitterrost o.ä. zu empfehlen.

Da Wasserkraftschnecken fast vollständig werksseitig vorgefertigt werden, können die baulichen Massnahmen und somit die Kosten gering gehalten werden. Zudem sind sie robust, verschleissbeständig, wartungsfreundlich und benötigen keinen Feinrechen zur Treibgut- und Sedimentabweisung.

Auch ist Wasserkraftschnecken eine relativ gute abwärtsgerichtete Durchgängigkeit für Fische u. a. Lebewesen zuzuschreiben, auch dank den niedrigen Drehzahlen. Zudem fehlen die Druckunterschiede im Vergleich zu klassischen Überdruckturbinen und bei abgerundeten Schneckenflügeln existiert keine besondere Schlaggefährdung für Fische.

Inzwischen wurden zahlreiche Anlagen an alten Mühlenstandorten, Kläranlagenausläufen oder Dotationskraftwerken etc. im Leistungsbereich bis ca. 235 kW ausgeführt und haben sich im Betrieb bewährt.

[3]

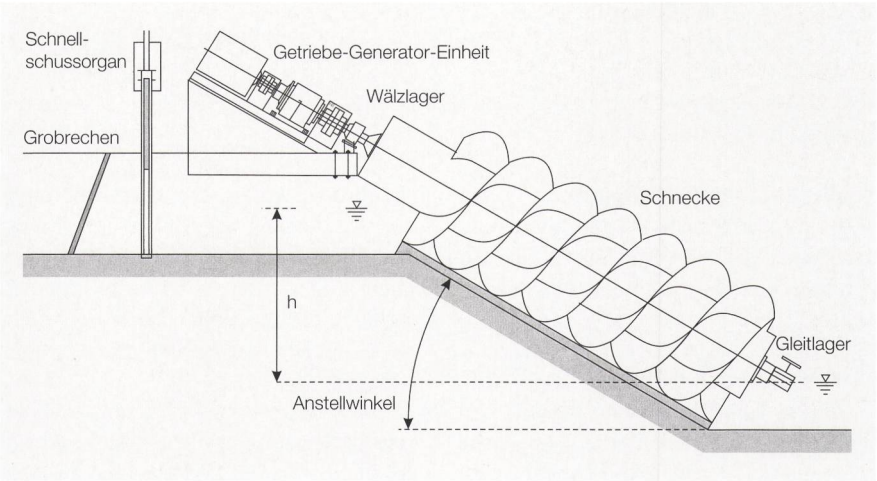


Bild 4 Prinzipieller Aufbau einer Wasserkraftschnecke.

Heimerl, Kohler

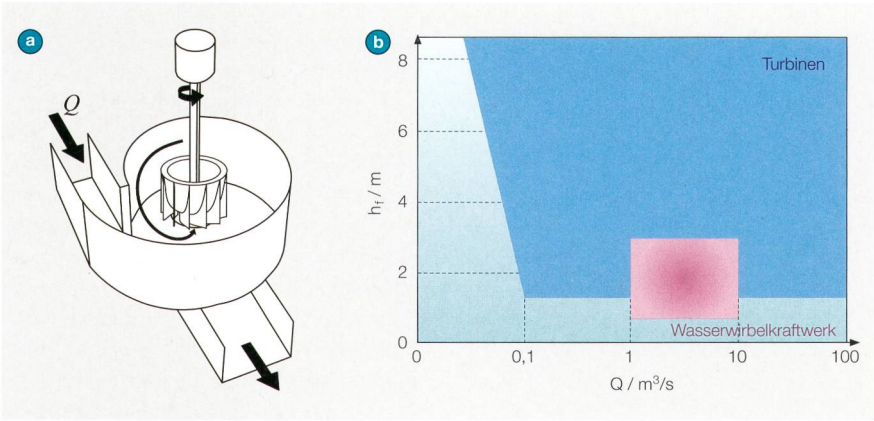


Bild 5 Wasserwirbelkraftwerk: a) Prinzipskizze [17] sowie b) Haupteinsatzbereich im Vergleich zu Turbinen, bezogen auf Fallhöhe und Durchfluss.

Heimerl, Kohler

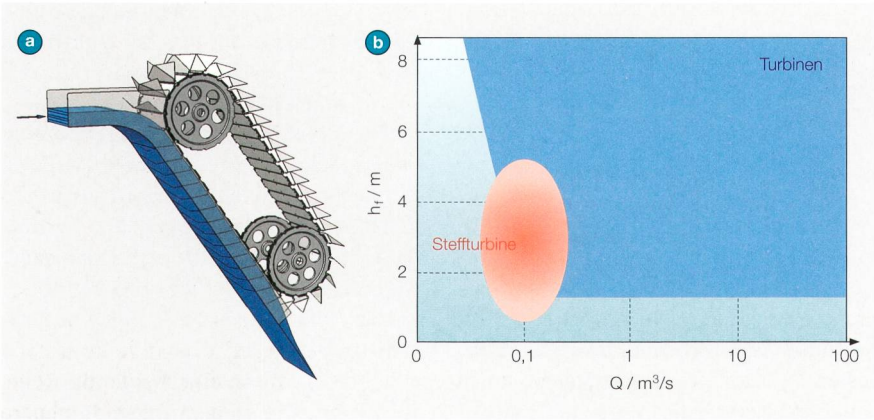


Bild 6 Steffturbine: a) Prinzipskizze [11] und b) Haupteinsatzbereich im Vergleich zu Turbinen, bezogen auf Fallhöhe und Durchfluss.

Heimerl, Kohler

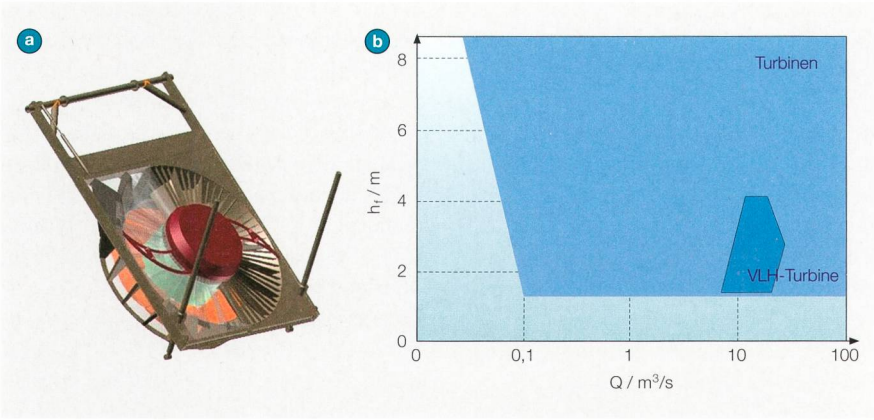


Bild 7 VLH-Turbine: a) Prinzipskizze [13] und b) Haupteinsatzbereich im Vergleich zu Turbinen, bezogen auf Fallhöhe und Durchfluss.

Weiterentwicklungen

Es gibt zahlreiche Weiterentwicklungen von klassischen Konzepten. Die folgenden sind dabei besonders erwähnenswert.

Wasserwirbelkraftwerk

Bereits seit Jahrzehnten werden Untersuchungen angestellt, die Energie aus Wasserwirbeln zur Stromerzeugung zu nutzen, wie dies u. a. durch ein entsprechendes US-Patent von 1968 dokumentiert ist. Anfang der 2000er-Jahre wurden die Überlegungen erneut in Österreich aufgegriffen und führten zur Anmeldung verschiedener Patente sowie in der Folgezeit zur Realisierung einiger Anlagen [9].

Das Wasserwirbelkraftwerk, auch als Gravitationswasserwirbelkraftwerk bezeichnet, ist prinzipiell wie eine im Wasserbau bekannte Wirbelkammerdiode aufgebaut, in deren Ablaufzentrum eine hydraulische Strömungsmaschine angeordnet ist **(Bild 5)**. Diese vertikalachsige Maschine gleicht einem einfachen Wasserrad, das vom zentralen Wasserwirbel angetrieben wird. Aufgrund der geringen Drehzahl ist die Kopplung mit einem Getriebe und einem Frequenzumrichter notwendig. Infolge des geringen Maschinenwirkungsgrades von offensichtlich unter 50 % und der daraus folgenden Verluste kommt die Anlage auf einen Gesamtwirkungsgrad von deutlich unter 40 %, wobei Messergebnisse der FH Nordwestschweiz nur max. 23,5 % [10] und diejenigen der TU München ca. 31 % [17] aufweisen.

Als sinnvolle Einsatzbereiche werden Abflüsse im Bereich von 1,0–10 m³/s und Fallhöhen von 0,7–3 m angegeben, sodass ein Leistungsbereich von 6 bis max. 150 kW abgedeckt werden soll **(Bild 5)**.

Interessant ist die positive Einschätzung der Umweltwirkungen durch die Protagonisten (z.B. [9]) im Hinblick auf die geschaffene Möglichkeit einer aufwärtsgerichteten Passage für Fische durch eine Rampe, die vom Unterwasser in den Aussenbereich der Wirbelkammer führt; verifizierbare Funktionsprüfungen wurden jedoch bislang nicht veröffentlicht. Die abwärtsgerichtete Passierbarkeit dürfte aufgrund der geringen Umdrehungszahl sowie der nicht vollständigen Absperrung des Wasserstromes durch das Rad relativ unkritisch sein.

Steffturbine

Die Steffturbine (Eigenname) nutzt die potenzielle Energie des Wassers mittels profilierten Schaufeln, die auf eine über zwei Räder laufende Förderkette montiert sind **(Bild 6)**. Die Förderkette treibt einen Permanentmagnet-Generator an und kann mit einer dem natürlichen Gelände anpassungsfähigen Neigung von 30–80° betrieben werden.

Die Entwicklung wurde seit 2009 massgeblich von der Walter Reist Holding AG, Hinwil, vorangetrieben. Mit Unterstützung der Universität der Bundeswehr München wird die Technik seitdem optimiert, wobei in ersten Messserien Anlagenwirkungsgrade von ca. 67 % ermittelt wurden [11]. Seit Oktober 2011 läuft eine Pilotanlage am Pilgersteg in Rüti ZH, weitere Anlagen sind geplant.

Ähnlich der Wasserräder soll die Anlage unempfindlich gegen Feststoffe bzw. unkritisch für abwandernde kleinere Fische sein.

Heimerl, Kohler

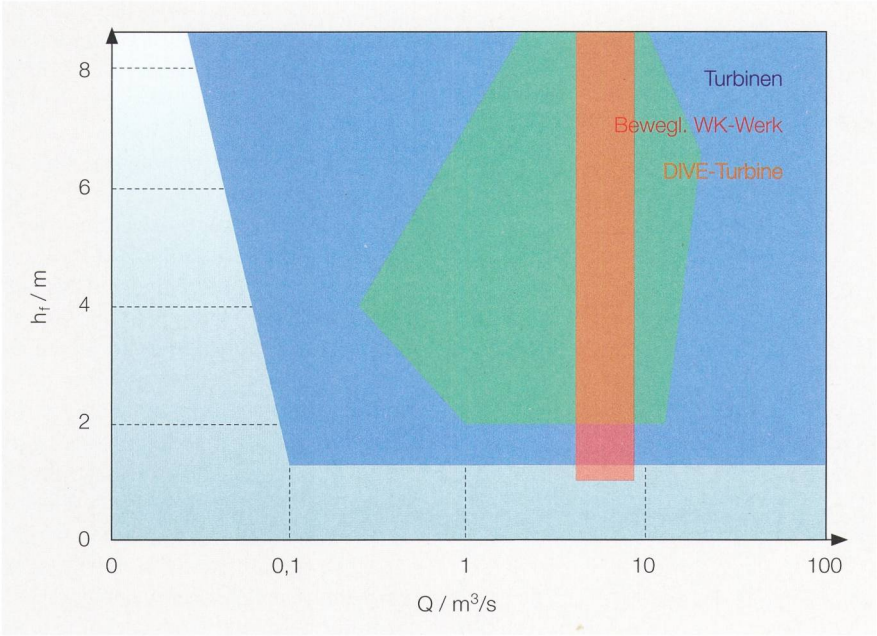


Bild 8 Haupteinsatzbereich der überströmbaren Kraftwerkskonzepte im Vergleich zu Turbinen.

Very-Low-Head-Turbine

Das Konzept der Very-Low-Head-Turbine (VLH-Turbine) zielt gegenüber klassischen Kaplan- und Rohrturbinen auf grosse Laufraddurchmesser mit geringen spezifischen Durchflüssen und kleinen Drehzahlen, woraus geringe Geschwindigkeiten resultieren (**Bild 7**). Damit entfallen bei leicht niedrigerem Wirkungsgrad kostenintensive Ein- und Auslaufbauwerke [12]. Dieses Konzept wurde seit der ersten französischen Patentanmeldung im Jahr 2003 stetig weiterentwickelt und in knapp 40 Anlagen (Stand 01/2013) verwirklicht. Infolge der geringen Drehzahl und der relativ grossen Abmessungen wird diese Turbine als relativ fischfreundlich eingestuft.

Die VLH-Turbine ist als kompakte Turbinen-Generatoren-Gruppe ausgebildet, die im Werk weitestgehend vormontiert wird. Kern der Einheit ist ein Kaplan-Laufrad mit acht drehbaren Laufradschaufeln, dem ein Leitapparat mit 18 festen Leitschaufeln vorangestellt sowie ein direkt gekuppelter, drehzahlvariabler, permanent erregter Generator nachgeordnet ist. Der Einlaufrechen mit Rechenreiniger ist in den Leitapparat integriert. Die gesamte Einheit ist in eine Tragkonstruktion eingebettet, die mittels eines Schwenklagers oberhalb des Oberwasserspiegels gelagert und mit Hilfe einer Hubvorrichtung für Unterhaltungsmassnahmen oder zur Freigabe des Querschnittes im Hochwasserfall angehoben werden kann. Für die in **Bild 7** definierten Fallhöhen und Durchflüsse werden bei Anlagenwirkungsgraden von knapp 80 % Klemmenleistungen von maximal 500 kW erzielt.

Wasserkraftwerke in Unterwasseranordnung

Um vorhandene Querbauwerke in Fliessgewässern wirtschaftlich zur Stromerzeugung nutzen und dabei die genehmigungsrechtlichen Ansprüche v. a. des Umweltschutzes erfüllen zu können, sind einige Wasserkraftkonzepte entwickelt worden bzw. noch in der Entwicklung, bei denen durch eine Unterwasseranordnung diesen Restriktionen begegnet werden soll. Durch die direkte Anordnung im Querbauwerk selbst werden darüber hinaus die Strömungsverhältnisse im Oberwasser weitestgehend erhalten und so verlustbehaftete Umlenkungen, wie z.B. bei einer Buchtenanordnung, vermieden.

Bei diesen Konzepten spielt neben der korrekten Wahl des Typs und der Auslegung der hydraulischen Strömungsmaschine die bauliche und hydraulische Optimierung eine entscheidende Rolle. Derzeit sind vor allem folgende neuere Konzepte zu nennen:

Schachtkraftwerk

Bei diesem an der TU München entwickelten Konzept wird das Triebwasser über eine horizontale Einlaufebene einer vollständig unter Wasser in einer Schachtkammer angeordneten Turbine zugeführt [14]. Als Turbine kann die

Heimerl, Kohler

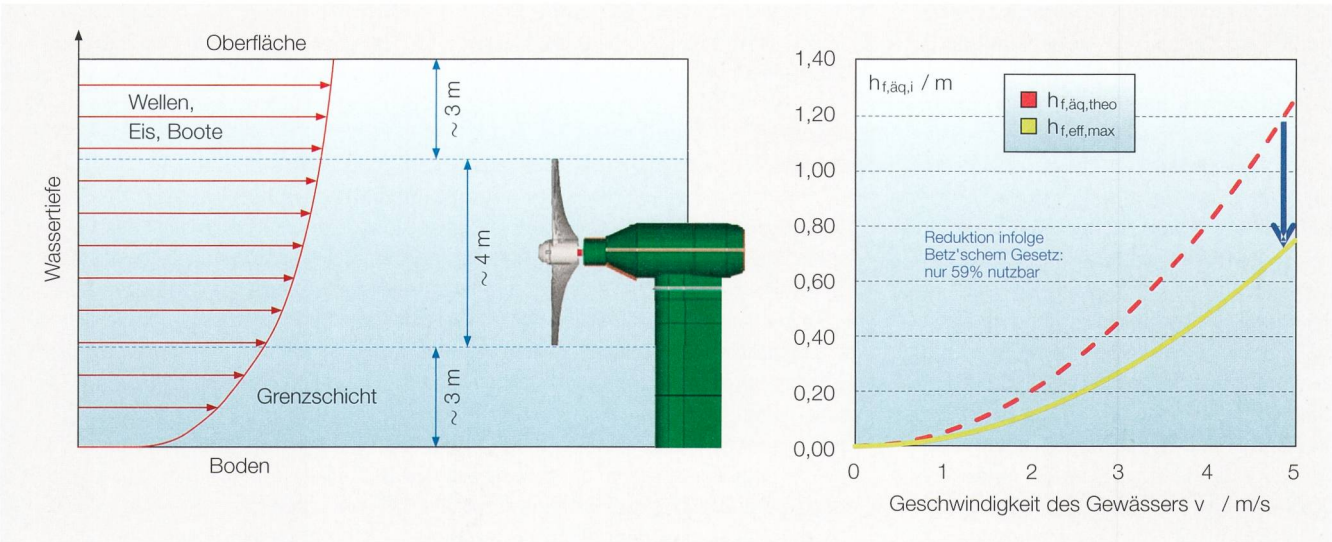


Bild 9 Kinetische Strömungsmaschinen: Qualitative Strömungsgeschwindigkeitsverteilung über die Wassertiefe am Beispiel eines 10 m tiefen Fliessgewässers (links) [16]; Äquivalente Fallhöhen $h_{f,äq,theo}$ der vorhandenen kinetischen Energie und $h_{f,eff,max}$ der durch frei umströmte Strömungsmaschinen nutzbaren kinetischen Energie (rechts).

Heimerl, Kohler

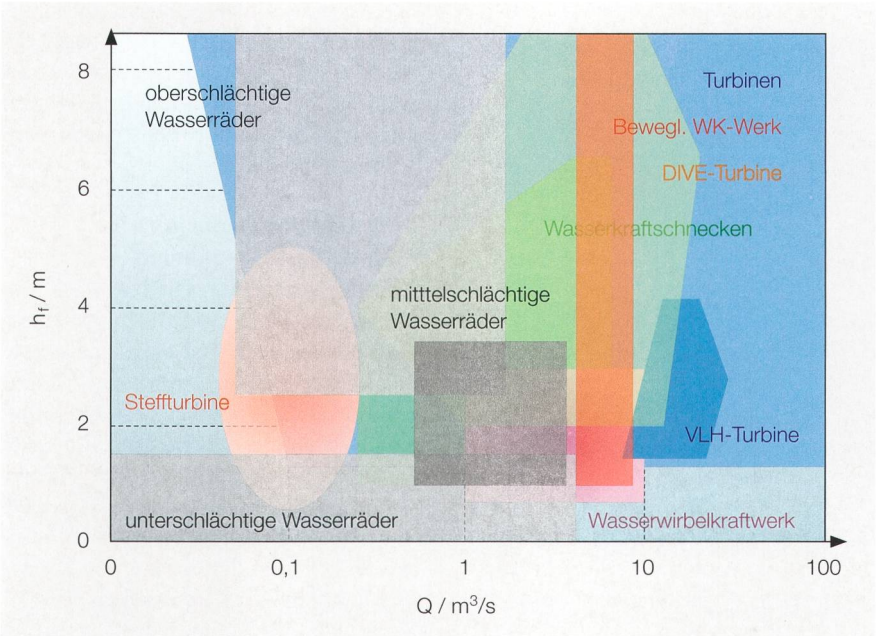


Bild 10 Zusammenfassende Darstellung der Haupteinsatzbereiche unterschiedlicher hydraulischer Strömungsmaschinen im Vergleich zu Turbinen bezogen auf die Fallhöhe und den Durchfluss (die Grenzen sind fliessend).

bereits seit gut zehn Jahren eingesetzte Dive-Turbine verwendet werden, eine kompakte, voll gekapselte Propeller-Turbinen-Generatoren-Einheit für eine Unterwasseranordnung. Dieses Konzept wird in einer Pilotanlage untersucht und soll je Schachtkraftwerkseinheit bei einem Durchflussbereich von 1–20 m³/s und Fallhöhen von 2–10 m eine installierte Leistung von 30 kW bis maximal rund 1 MW aufweisen (Bild 8).

Bewegliches Wasserkraftwerk

Die Innovation bei dieser Bauweise besteht darin, dass die Rohrturbineneinheit in ein wasserdurchströmtes Stahlgehäuse integriert ist, das vom Rundbogenrechen am Einlauf bis zum Saugrohrende reicht. Diese Einheit ist in einem einfachen U-förmigen Betontrog oberwasserseitig gelagert, sodass das Kraftwerk am unterwasserseitigen Saugrohrende angehoben und somit neben der ohnehin möglichen Überströmung eine komplette Unterströmung zur Geschiebe- und Hochwasserabfuhr sowie zum Fischabstieg erreicht werden kann. Darüber hinaus wird auf diese Weise das aus dem Saugrohr strömende Triebwasser zur besseren Energieausbeute über den «Ejektoreffekt» beschleunigt, wobei dieses hydraulische Prinzip früher auch als «Fallhöhenmehrer» bezeichnet wurde. Dieses Konzept wurde Anfang 2000 entwickelt und bisher in drei Anlagen mit einer max. Leistung von 530 kW realisiert. Bei einer Auslegung gemäss Bild 8 sollen Leistungen von 50–1800 kW erreicht werden [15].

Kinetische Strömungsmaschinen

Bereits seit Jahrtausenden wird die kinetische Energie von strömendem Wasser ohne nennenswerten Aufstau u.a. in Fluss- oder Schiffsmühlen genutzt, wobei in den letzten Jahrzehnten auch andere Formen in den Fokus gerückt sind.

Grundsätzlich kann man folgende Strömungsquellen unterscheiden:

- Strömung in Binnengewässern (Höhenunterschied).
- Meeresströmungen (Gezeiten).
- Meeresströmungen infolge von grossräumigen Massenströmungen mit vielfältigen Einflussfaktoren (Meeresoberflächentemperatur infolge Sonneneinstrahlung, Corioliskraft, Salinität, Windreibung an der Meeresoberfläche). Beispiel: Golfstrom.

Mit kinetischen Strömungsmaschinen kann der Strömung nicht die gesamte kinetische Energie entzogen werden, da ein Teil der Strömung aufgrund des Aufstaus vor der Strömungsmaschine und des fehlenden seitlichen Verbaus an ihr vorbeifliesst. Dieser Wirkmechanismus wurde 1919 von Albert Betz für Windturbinen näher beschrieben und wird seitdem als Betzsches Gesetz bezeichnet. Entsprechend diesem für alle frei umströmten Strömungsmaschinen geltenden Gesetz kann hier der maximal mögliche Energieentzug nur 16/27 (rund 59 %) der gesamten kinetischen Energie betragen. Die theoretisch nutzbare kinetische Energie ist deutlich geringer als die potenzielle Energie bei einem Aufstau (Bild 9).

Zudem sind noch zwei weitere Faktoren für die Leistungsausbeute relevant [16]:

- Grösse der kinetischen Strömungsmaschine (Bild 9): Aufgrund zweier Randbedingungen – niedrige Strömungsgeschwindigkeiten in Sohlennähe sowie Sicherheitsabstand zur Wasseroberfläche, um Interaktionen mit Bootsbetrieb, Wellen, Eisbildung etc. auszuschliessen, reduziert sich die Maschinengrösse. Für nennenswerte Leistungen braucht man also relativ grosse Wassertiefen.
- Der Gesamtwirkungsgrad liegt je nach Maschinentyp zwischen 72 bis 78 %. Die meisten Binnengewässer sind aufgrund der niedrigen Geschwindigkeiten und geringen Wassertiefen für frei umströmte kinetische Strömungsmaschinen ungeeignet. So ergibt sich beispielsweise für den Rhein bei einer

Résumé **Concepts relatifs à la petite hydraulique**

Des turbomachines hydrauliques pour petits débits et faibles hauteurs de chute

De nombreux concepts de turbomachines hydrauliques de divers types existent dans le but d'utiliser l'énergie potentielle et cinétique des ressources hydrauliques naturelles et de la transformer en courant électrique, et ce, en particulier pour le domaine des petits débits et des faibles hauteurs de chute. Cet article fournit une vue d'ensemble des principaux concepts de turbomachines hydrauliques, utilisés actuellement ou qui font l'objet de discussions, destinées aux débits allant jusqu'à environ 10 m³/s et aux hauteurs de chute d'environ 8 m au maximum.

Pour chaque cas d'application, un concept global bien élaboré et spécifique au site est essentiel pour une utilisation optimale de l'énergie hydraulique offerte par la nature. De plus, la règle générale relative à tous les concepts d'installations et de machines, selon laquelle une optimisation et un perfectionnement continus permettent de tabler sur environ 1 % d'augmentation du rendement total des installations tous les dix ans, s'applique également dans ce contexte.

No

optimistischen Betrachtung von 2 m/s und einem möglichen Rotordurchmesser von 2 m eine elektrische Leistung von unter 10 kW.

Entwicklungen kinetischer Strömungsmaschinen

Trotz der erläuterten physikalischen Randbedingungen werden unterschiedliche Maschinen entwickelt, wobei nachfolgend nur auf diejenigen eingegangen wird, die in Binnengewässern zum Einsatz kommen können:

Mantelturbinen

Mit Hilfe eines um die Turbine herum angeordneten Saugmantels kann durch den resultierenden Druckabfall hinter dem Laufrad in Verbindung mit einer sich am Mantelaustritt einstellenden Sogwirkung («Ejektoreffekt») eine Druckdifferenz erreicht werden, die zu einer Leistungssteigerung führt. Bei einem einfachen symmetrischen Saugmantel beträgt diese Steigerung bis zu ca. 10 %, bei asymmetrischen, sich stärker aufweitenden Saugmantelformen kann dies durchaus 20–40 % betragen [16]. Beispiele hierfür sind die Trek-Turbine, die sogenannte KSB-Flussturbine, die Strom-Boje sowie die Smart-Hydro-Power-Turbine.

Schwimmende Mühlen

Diese werden auch als Schiffsmühlen, Stromräder, Freistromwandler oder schwimmende Energiewandler bezeichnet. Sie nutzen die freie Strömung durch Wasserräder, die auf oder an einen Schwimmkörper montiert sind. Aktuelle Untersuchungen zeigen, dass solche Anlagen einen Gesamtwirkungsgrad von max. 30 % erreichen können.

Fazit

Es gibt zwar im Bereich der Kleinwasserkraftkonzepte zahlreiche «neue» Entwicklungen, die aber genau genommen Weiterentwicklungen und Kombinationen bekannter Techniken darstellen. Dies führt in etlichen Fällen zu effizienteren Lösungen, die nach einer erfolgreich abgeschlossenen, zwingend notwendigen Testphase einschliesslich der notwendigen Leistungsnachweise ggf. ihren jeweiligen Platz innerhalb der Vielfalt der hydraulischen Strömungsmaschinen finden werden.

Kinetische Strömungsmaschinen werden hingegen im Bereich der Binnengewässer auch weiterhin wegen ihrer geringen Effizienz nur ein Nischenprodukt, beispielsweise für die Inselversorgung von nicht erschlossenen Gebieten, darstellen.

Schliesslich ist in allen Anwendungsfällen für eine optimale Nutzung der von der Natur gebotenen Wasserkraft ein durchdachtes, standortspezifisches Gesamtkonzept entscheidend. Dabei gilt auch in diesem Zusammenhang die generelle Regel für alle Anlagen- und Maschinenkonzepte, dass durch permanente Weiterentwicklung und Optimierung alle zehn Jahre mit ca. 1 % Steigerung des Gesamtanlagenwirkungsgrades gerechnet werden kann.

Referenzen

[1] D. M. Nuernbergk, Wasserräder mit Kropfgerinne, 2. Auflage, Verlag Moritz Schäfer, 2013.
[2] D. M. Nuernbergk, Wasserräder mit Freihang, Verlag Moritz Schäfer, 2007.
[3] J. Giesecke, S. Heimerl, E. Mosonyi, Wasserkraftanlagen – Planung, Bau und Betrieb, 6. Auflage, Springer-Verlag, 2013.
[4] Bega Wasserkraftanlagen GmbH, Persönliche Informationen, Bochum, 1997.
[5] G. Müller, N. Linton, S. Schneider, «Das Projekt HY-LOW: Die Wasserdruckmaschine», KW Korrespondenz Wasserwirtschaft 5 (2012), Nr. 1, S. 30–36.
[6] WICON-Generatoren, WICON-Staudruckmaschine (www.wicon.at), 2012.
[7] BEW-Power, Die Lamellenturbine (www.bew-power.com), 2012.
[8] D. M. Nuernbergk, Wasserkraftschnecken, Verlag Moritz Schäfer, 2012.
[9] J. Rathke, F. Zotloeterer, M. Wendland, «Kleinwasserkraftwerk mit Gravitationswirbel», BWK 64 (2012), Nr. 3, S. 18–21.
[10] C. Cerri, S. Gafner, Wasserwirbelkraftwerk, Bachelor Thesis an der FH Nordwestschweiz, Windisch 2010.
[11] A. Malcherek, H. Kulisch, C. Maerker, «Die Steffturbine – eine auf einem Umlaufband beruhende Kleinwasserkraftanlage», WasserWirtschaft 101, 2011, Nr. 10, S. 30–33.
[12] L. Juhrig, «Die Very-Low-Head-Turbine – Technik und Anwendung», WasserWirtschaft 101, 2011, Nr. 10, S. 25–29.
[13] MJ2 Technologies, Very low head turbine, www.vlh-turbine.com, 2012.
[14] P. Rutschmann, A. Sepp, F. Geiger, J. Barbier, «Das Schachtkraftwerk – ein Wasserkraftkonzept in vollständiger Unterwasseranordnung», WasserWirtschaft 101, 2011, Nr. 7–8, S. 33–36.
[15] Hydro Energie Roth GmbH; Elektrizitätswerk Mittelbaden AG, www.das-bewegliche-wasserkraftwerk.de, 2012.
[16] A. Ruprecht, A. Ruopp, «Entwicklung einer kinetischen Strömungsturbine», WasserWirtschaft 101, 2011, Nr. 10, S. 34–37.
[17] F. Mühle, C. Rapp, O. Mayer, «Experimentelle Untersuchungen an einem Wasserwirbel-Kraftwerk», WasserWirtschaft 103, 2013, Heft 7–8, S. 41–46.

Literatur

- Aqua Libre (2013): Die Strom-Boje (www.aqualibre.at).
- KSB AG (2010): Flussturbinen am Netz. Pressemitteilung vom 13.09.2010.
- G. Müller, K. Kauppert, «Die Wasserräder als hydraulische Kraftmaschinen», Bautechnik 80, 2003, Heft 3, S. 181–189.
- RER Hydro: Trek-Turbine, www.rerhydro.com, 2012.
- Smart Hydro Power GmbH, Kinetisches Kleinstwasserkraftwerk, www.smart-hydro.de, 2012.
- F. Weichbrodt, D. Dimke, M. Behrrendt, P. Fröhle, «Grossmassstäbliche Modellversuche mit einem schwimmenden Energiewandler», KW Korrespondenz Wasserwirtschaft 5, 2012, Nr. 5, S. 251–257.

Angaben zu den Autoren

Dr.-Ing. **Stephan Heimerl** ist Leiter Abteilung Wasser und Umwelt bei Fichtner Water & Transportation und ö.b.u.v. Sachverständiger für Wasserbau und Wasserkraftanlagen sowie Fischaufstiegsanlagen.
Fichtner Water & Transportation GmbH, DE-70191 Stuttgart, stephan.heimerl@fwt.fichtner.de

Dr.-Ing. **Beate Kohler** ist Wasserbauingenieurin bei Fichtner Water & Transportation.
beate.kohler@fwt.fichtner.de

Dieser Beitrag basiert auf folgender Veröffentlichung: S. Heimerl, B. Kohler, «Hydraulische Strömungsmaschinen für kleine Durchflüsse und niedrige Fallhöhen», Mitteilungen des Lehrstuhls und Institutes für Wasserbau der RWTH Aachen, 2013, Nr. 167, S. 80–99.
Die Originalversion dieser gekürzten Fassung ist auf www.bulletin-online.ch verfügbar.

Anzeige

Kennen Sie www.bulletin-online.ch schon?
Die Beiträge dieser Ausgabe finden Sie auch auf Bulletin-Online. Dort können Sie die Artikel bewerten und Ihren Kommentar abgeben. Damit aus einer Einweg-Kommunikation ein spannender Dialog wird.
Das elektronische Bulletin lädt Sie ein zum Schnuppern, zum «Durchwühlen» des Archivs und zum Lesen der aktuellsten Kurzbeiträge. Wir freuen uns auf Ihren Besuch!

www.bulletin-online.ch
Bulletin
Fachzeitschrift von Electrosuisse und VSE
Revue spécialisée d'Electrosuisse et de l'AES