



43. IWASA

Internationales Wasserbau-Symposium
Aachen 2013

Wasser als Energieträger

10. und 11. Januar 2013

Hydraulische Strömungsmaschinen für kleine Durchflüsse und niedrige Fallhöhen

Stephan Heimerl und Beate Kohler

Abstract

Regarding mainly smaller discharges as well as lower fall heads many ideas of hydraulic machinery of completely different types exist which give the possibility to use the potential and kinetic energy of natural water resources and transform them into electricity. This paper gives an overview over the main ideas of hydraulic machinery currently in usage and under discussion concerning discharges in the range up to $10 \text{ m}^3/\text{s}$ and fall heads up to 8 m.

Zusammenfassung

Insbesondere im Bereich kleiner Durchflüsse und niedriger Fallhöhen existieren eine Vielzahl von Konzepten für hydraulische Strömungsmaschinen unterschiedlichster Art, um die den natürlichen Wasserressourcen innewohnende potenzielle sowie kinetische Energie zu nutzen und insbesondere in elektrischen Strom umzuwandeln. In diesem Beitrag wird ein Überblick über die wesentlichen aktuell eingesetzten und diskutierten Konzepte der hydraulischen Strömungsmaschinen für Durchflüsse bis ca. $10 \text{ m}^3/\text{s}$ und Fallhöhen bis etwa 8 m gegeben.

1 Vorbemerkung

Insbesondere im Bereich kleiner Durchflüsse und niedriger Fallhöhen existieren eine Vielzahl von Konzepten für hydraulische Strömungsmaschinen unterschiedlichster Art, um die den natürlichen Wasserressourcen innewohnende potenzielle sowie kinetische Energie zu nutzen und insbesondere in elektrischen Strom umzuwandeln.

Dieser Beitrag soll versuchen, einen strukturierten Überblick über die wesentlichen aktuell eingesetzten und diskutierten Konzepte der hydraulischen Strömungsmaschinen für Durchflüsse bis ca. $10 \text{ m}^3/\text{s}$ und Fallhöhen bis etwa 8 m zu geben.

Dabei ist festzustellen, dass sich in diesem Bereich sehr viele Erfinder und euphorische Planer tummeln, da offensichtlich diese Anlagengrößen sowohl finanziell als auch bautechnisch für diese noch überschaubar sind. Des Weiteren ist bei etlichen Konzepten auffällig, dass nur unzureichende Angaben zur Effizienz gemacht werden, indem nicht der Anlagengesamtwirkungsgrad, sondern z. B. nur der mechanische Wirkungsgrad der hydraulischen Strömungsmaschine oder der des Generators angegeben wird. Diesbezüg-

lich wären klare Aussagen für alle Beteiligten hilfreich, um nicht zuletzt Fehlinvestitionen vorzubeugen.

In diesem Beitrag sollen daher

- nur ernst zu nehmende Maschinenkonzepte aufgegriffen werden;
- keine Ideen weiterverfolgt werden, die nicht über das Patent und/oder den Modellstatus hinaus gekommen sind;
- nicht auf einzelne periphere Maßnahmen eingegangen werden, wie z. B. Frequenzumrichter, mittels derer bekannte Konzepte verbessert werden sollen;
- bekannte Turbinentypen, die in größeren Dimensionen eingesetzt werden können, wie z. B. Hydromatrix-Turbinen, Kompaktbauweisen, Turbinen für Rohrleitungssysteme (Axent-Turbine, rückwärts laufende Pumpen etc.), ausgespart bleiben (s. [Giesecke, Mosonyi, Heimerl, 2009]);
- auf manche Konzepte v. a. der kinetischen Turbinen ebenfalls nicht eingegangen werden, die eher für Meeresströmungen und nicht für Strömungen in Binnengewässern geeignet sind, wie beispielsweise oszillierende Tragflächen etc.

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

2 Wasserräder

Nach wie vor kommen heutzutage die bereits in früher Zeit bekannten unterschiedlichen Arten von Mühl- und Wasserrädern bei Wasserkraftanlagen an kleinen Gewässern mit geringem Durchfluss und niedrigem Gefälle vor (s. Abb. 1).

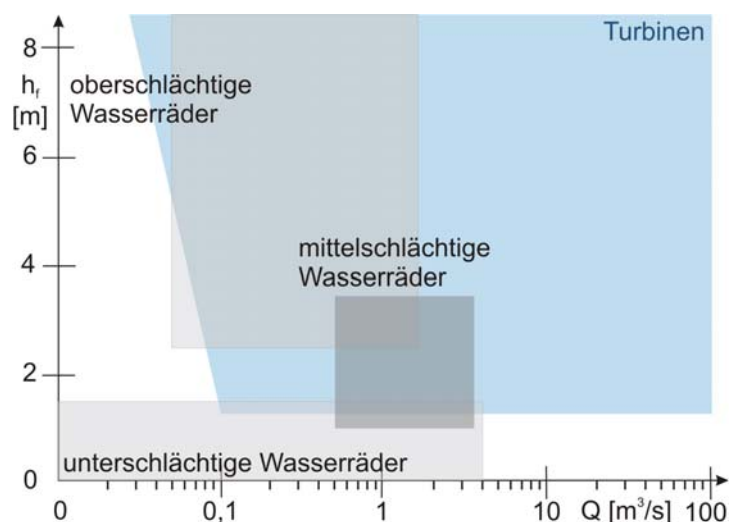


Abb. 1: Haupteinsatzbereiche für Wasserräder im Vergleich zu Turbinen bezogen auf die Fallhöhe und den Durchfluss

Auch heute noch stellen sie eine sinnvolle Ergänzung der Turbinen im unteren Leistungsbereich bis ca. 100 kW und z. T. darüber dar. Sie zeichnen sich durch eine leichte Wartung, eine Unempfindlichkeit gegenüber Verstopfungen sowie häufig geringe Investitionsaufwendungen infolge der einfachen Bauweise (klare Strukturen, geringer Tiefbau etc.) und wenigen notwendigen peripheren Anlagenkomponenten aus (s. u. a. Müller, Kauppert, 2003; Nuernbergk, 2005; Nuernbergk, 2007; Giesecke, Mosonyi, Heimerl, 2009).

Bei den Wasserrädern unterscheidet man im Wesentlichen hinsichtlich der Radtypen drei Gruppen, die in Abb. 2 schematisch dargestellt sind.

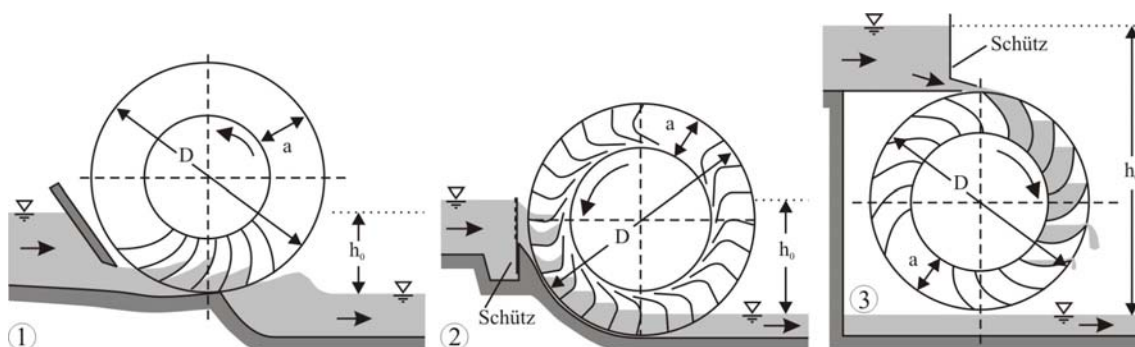


Abb. 2: Haupttypen von Wasserrädern: 1) unterschlächtiges Schaufelrad; 2) mittelschlächtiges Zellenrad, 3) ober Schlächtiges Zellenrad [nach Giesecke, Mosonyi, Heimerl, 2009]

2.1 Unterschlächtige Wasserräder

Die wohl ursprünglichste Form der Wasserräder stellen die unterschlächtigen Wasserräder als Schaufelräder dar (s. Abb. 2), die üblicherweise anstatt Zellen radial angeordnete, allseits offene Schaufeln (Holzbretter oder gegen die Drehrichtung gekrümmte Blechschaufeln) besitzen. Um die Wasserverluste zwischen Wasserrad und Boden sowie den seitlichen Berandungen so gering wie möglich zu halten und damit eine optimale Ausnutzung zu ermöglichen, wird das Triebwasser im Radbereich durch ein trogförmiges Gerinne, auch als Kropfrinne bezeichnet, geführt. Bei unterschlächtigen Wasserrädern ist dieses freie Kropfgerinne relativ einfach ausgeführt und besitzt allenfalls nahe dem Tiefpunkt eine leichte Erhöhung. Nach dem Tiefpunkt wird die Sohle häufig tiefer gelegt, um ein rasches Entleeren zu ermöglichen. Diese Wasserradform hat ihr wesentliches Einsatzgebiet bei kleineren Gefällen bis etwa 1,5 m sowie größeren Durchflüssen bis zu ca. 4,0 m³/s (s. Tab. 1) und erreicht bei der überwiegenden Nutzung der kinetischen Energie, d. h. des Strömungsdruckes des anströmenden Wassers normalerweise Wirkungsgrade bis zu maximal etwa 50 %, bei gekrümmten Schaufeln können bis zu maximal 55 % erreicht werden.

Tab. 1: Zusammenfassung der Haupteinsatzbereiche und der jeweiligen wesentlichen Kennwerte der verschiedenen Wasserradtypen [nach Giesecke, Mosonyi, Heimerl, 2009; Nuernbergk, 2012a]

Typ des Wasserrades (WR)	h_f [m]	Q_{\max} [m ³ /s]	η [-]	$P_{\text{mech,max}}$ [kW]	Q_{spez} [m ³ /(s · m)]	Bemerkung
1. Unterschlächtiges WR	0-1,5	1-4	0,30 (max. 0,55)	12	0,80	$\eta = 0,55$ nur bei gekrümmten Schaufeln; i. d. R. unwirtschaftlich
2a. Mittelschlächtiges WR (Zuppinger-WR)	1-3	0,5-3,75	0,75 (max. 0,80)	83 (meist <50)	0,75	$\eta = 0,80$ nur bei langsam umlaufenden WR ($u_a < 1,3$ m/s)
2b. Mittelschlächtiges WR (Bachsches Kullissenrad)	1,5-3,5	0,5-3,25	0,80 (max. 0,85)	90 (meist <50)	0,65	-
3. Oberschlächtiges WR	2,5-10	0,05-1,15	0,80 (max. 0,85)	90 (meist <50)	0,23	$\eta = 0,85$ nur bei vollständig ausgerundeten Blechzellen

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

Dieser Wasserradtyp besitzt mit seiner Einfachheit einen entscheidenden Vorteil, den nahezu alle Weiterentwicklungen, wie z. B. die sogenannte Staudruckmaschine (s. Kapitel 2.4), die auf dessen strömungsmechanischen Grundlagen zurückzuführen sind, nicht mehr besitzen.

2.2 Mittelschlächtinge Wasserräder

Diese Wasserräder, die sich zwischen den beiden vorgenannten Bauarten einordnen lassen, 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 (s. Abb. 2) [Nuernbergk, 2005]. Hierfür kommen Zellenräder und Schaufelräder in Frage, denen das Wasser im Idealfall über Blenden, den sogenannten Kulissen, zugeführt wird. Dem anschließenden kreisrunden Kropfgerinne kommt mit seiner an den Radaußendurchmesser angepassten Ausbildung eine sehr wichtige Rolle zu, um das Wasser optimal nutzen zu können, bevor es das Rad tangential verlässt. Auch in diesem Fall sind Wirkungsgrade bis zu 85 % möglich, indem neben der potenziellen, durch das Wassergewicht bedingten Energie auch ein Teil der kinetischen Energie des zuströmenden Wassers umgesetzt werden kann. Der übliche Einsatzbereich liegt bei etwa 1,5–3,0 m Fallhöhe und 0,2–2,0 m³/s Durchfluss (s. Tab. 1).

2.3 Oberschlächtinge Wasserräder

Diese Wasserräder (s. Abb. 2), auch als Wasserräder mit Freihang bezeichnet, werden im Bereich des Radscheitels beaufschlagt, wobei das über ein Zulaufgerinne herbeige-

fürte Triebwasser meist über ein Holzgerinne mit oder ohne Gefälle zum Rad selbst geführt wird [Nuernbergk, 2007]. An dessen Ende wird das Wasser dann entweder mittels eines einfachen freien Überfalls, über eine Bodenöffnung oder über eine Blende – auch als Zungen- oder Kulisseneinlauf bezeichnet – auf das Rad abgegeben. Nachdem das Wasser am Scheitel in die Zellen fließt, treibt es durch die Schwerkraft das Rad an und verlässt dieses nach etwa einer viertel bis maximal halben Radumdrehung wieder. Ihr Einsatzbereich liegt gemäß Abb. 2 bzw. Tab. 1 bei einem Durchfluss normalerweise bis ca. $0,8 \text{ m}^3/\text{s}$, in Sonderfällen bis zu $1,15 \text{ m}^3/\text{s}$, sowie einer Fallhöhe von üblicherweise ca. 2–7 m, wobei berücksichtigt werden muss, dass durch den notwendigen unterwasserseitigen Freihang ein kleiner Fallhöhenverlust auftritt. Je nach Bauart können mit diesen Radtypen Wirkungsgrade bis zu knapp 85 % erreicht werden. Ein besonderer Vorteil dieses Radtypes ist, dass meist auf den Einbau eines Rechens sowie der dazugehörigen Reinigungseinrichtungen verzichtet werden kann. Auch kann bei einem entsprechend großen Durchmesser ein hohes Drehmoment erzeugt werden.

Das Kehrrad stellt schließlich eine Sonderform eines besonders im Bergbau eingesetzten oberflächigen Wasserrades dar. Dieses weist ein Doppelrad mit zwei gegenläufig angeordneten Zellenreihungen auf, deren Drehrichtung je nach gewünschter Förderrichtung durch entsprechende Beaufschlagung umgekehrt werden kann.

2.4 Allgemeine Entwurfsgrundsätze und Weiterentwicklungen

Bei allen Wasserrädern sind zwei Grundsätze von besonderer Bedeutung [Giesecke, Mosonyi, Heimerl, 2009]. Zum einen soll das Wasser möglichst tangential zum Radumfang und ohne Stoß in das Rad eintreten sowie es mit einer möglichst kleinen Geschwindigkeit verlassen. Des Weiteren sollte die Umfangsgeschwindigkeit des Rades die Hälfte der Geschwindigkeit betragen, mit der das Wasser in das Rad eintritt. Daher laufen Wasserräder normalerweise 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 in Form eines Getriebes oder eines Riemenantriebes.

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. Hinzu kommen noch zahlreiche weitere Details, die bei der Dimensionierung hin zu einem möglichst verlustarm arbeitenden Wasserrad zu berücksichtigen sind [Nuernbergk, 2005; Nuernbergk, 2007; Giesecke, Mosonyi, Heimerl, 2009]. Generell gilt, dass sich die Schluckfähigkeit in der Regel mit steigender Fallhöhe reduziert.

Waren anfangs die Wasserräder rein aus Holz gebaut, so setzten sich bald Radachsen, Speichen und Radkränze aus Stahl durch, da diese eine gleichmäßige Form unabhängig der äußeren Beeinflussungen gewährleisten. Bei den Schaufeln sind einerseits reine

Holz- oder Stahlkonstruktionen sowie andererseits Kombinationen aus Stahlhalterungen mit Holzflächen anzutreffen. Seit Mitte der 1990er Jahre werden Wasserräder auch zunehmend aus Leichtmetallen gefertigt, um die zu bewegende Radmasse und damit die Verluste bei Erhalt der Stabilität zu verringern. Aus konstruktiven Gründen sind die Radachsen normalerweise beidseitig gelagert und die Radbreite ist normalerweise auf ca. 5 m begrenzt, da die Radachse sonst zur Vermeidung übermäßiger Biegeschwingungen zu massiv und damit zu schwer ausgebildet werden muss

Die Steuerung der Wasserräder erfolgt im Wesentlichen über einfache Schütze, durch die die Wasserzufuhr geregelt wird. In Verbindung mit einer vollautomatischen Steuerung sowie idealerweise eines kleinen Zwischenspeichers in Form eines Mühlenteiches kann eine optimale Ausnutzung des zur Verfügung stehenden Wassers ermöglicht werden.

Bei Anlagen mit Wasserrädern können insbesondere zwei Problemfelder zum Tragen kommen. Dies sind zum einen Lärmemissionen, die auch bei einer optimalen Konstruktion unumgänglich sind, sowie die Notwendigkeit, bei starkem Frost die Anlage außer Betrieb zu nehmen. Durch die Unterbringung des Wasserrades in einer geschlossenen Radstube können diese Probleme deutlich reduziert werden.

Wenngleich es sich bei den Wasserrädern um eine sehr alte und weitestgehend ausgereifte Technik handelt, so lassen sich auch heute immer noch Weiterentwicklungen zur Wirkungsgradoptimierung verzeichnen, im Rahmen derer beispielsweise neuere Werkstoffe oder Techniken wie erwähnt zum Einsatz gelangen. Auch helfen die modernen Methoden der hydraulischen Auslegung mittels numerischer Verfahren, um die Wasserradanströmung oder die geometrischen Größen (Schaufelgeometrie, Verhältnis Schaufelgröße und -anzahl zu Raddurchmesser etc.) zu prüfen und zu verbessern.

Zu nennen sind hier insbesondere folgende Entwicklungen:

- **Turas-Wasserrad:** Mit dem speziell zur Stromerzeugung entwickelten oberflächigen Turas-Wasserrad, das sich durch die einseitige Lagerung an einer kompakten, wesentlich vereinfachten Generatoren-Getriebe-Einheit auszeichnet, wird erstmals bei einer Serienfertigung von der beidseitigen Radachsenlagerung abgewichen [Bega, 1997]. Durch diese kompakte Konstruktion kann die komplette Wasserradanlage im Werk vorgefertigt und mit geringem Aufwand am Einsatzort aufgestellt werden, wodurch der bisher nicht wirtschaftlich betreibbare Leistungsbereich unter 10 kW für die Stromgewinnung mit einem Wirkungsgrad von über 70 % im Beaufschlagungsbereich von 30–100 % erschlossen wurde.
- **Wasserdruckmaschine:** Dieser im Rahmen eines größeren EU-Forschungsprojektes weiterentwickelte Laufradtyp baut auf einem mittelschlächtigen Wasserrad auf und nutzt den vorhandenen Druckunterschied zwischen Ober- und Unterwasser [Müller et al., 2012]. Dabei wird eine durchgehende Nabe verwendet, die etwa gleich groß wie die vorhandene Fallhöhe ist, und durch die mit den daran angebrachten Schau-

feldern der durchströmte Querschnitt komplett abgeschlossen werden kann, so dass auf das sonst notwendige Einlaufschütz zur Regelung verzichtet werden kann. Die Schaufeln selbst sind schräg zur Nabenachse angebracht, damit eine gute Befüllung und Entleerung der Kammern erfolgt. Derzeit werden im drehzahlvariablen Betrieb Gesamtwirkungsgrade von bis zu 64 % erreicht.

- **Staudruckmaschine:** Hierbei handelt es sich im Grunde um ein modifiziertes mittelschlächtiges Wasserrad, das bisher offensichtlich nur in einer Pilotanlage bei Wien realisiert wurde [Wicon, 2012]. Wirkungsgradangaben sind nicht verfügbar.
- **Lamellenturbine:** Bei dieser Strömungsmaschine handelt es sich prinzipiell um ein unterschlächtiges Wasserrad, das überwiegend die kinetische Energie nutzt. Die Schaufeln sind als gebogene Blech-Lamellen ähnlich einer Durchströmturbine ausgeführt, die darüber hinaus noch tiefenversetzt angeordnet sind. Ziel dieser Lamellen-Anordnung ist nach Herstellerangaben, damit das Wasser im Außenkranz zu halten und damit bestmöglich wieder abgeben zu können [BEW-Power, 2012]. Erwähnenswert ist, dass das Wasserrad durch die Lagerung auf einem Rahmen durch entsprechende Antriebe aus dem Bauwerksquerschnitt herausgeschwenkt bzw. -gehoben werden kann, womit ggf. dieser Querschnitt für eine sichere Hochwasserabfuhr freigegeben werden kann. Der Gesamtwirkungsgrad dürfte bei maximal etwa 60 % liegen.

3 Wasserkraftschnecken

Die Archimedische Schnecke ist bereits seit dem Altertum zur Wasserförderung bekannt und fand im 20. Jahrhundert durch ihre Anwendung in der Abwassertechnik eine erneute Verbreitung. Durch die Umkehrung der Arbeitsweise kann die Förderschnecke zur Energieerzeugung verwendet werden, wie dies bereits von Navier erwähnt, dann verstärkt seit Anfang der 1990er Jahre wieder in den Fokus kam und seitdem systematisch weiterentwickelt wurde und wird [Nuernbergk, 2012b; Giesecke, Mosonyi, Heimerl, 2009].

Grundsätzlich sind Wasserkraft- und Wasserförderschnecken in ihrer Form und ihren Abmessungen hydraulisch ähnlich, und jede der Maschinen kann für beide Anwendungsbereiche eingesetzt werden. Dabei ändern sich allerdings Drehrichtung, Wasserführung und Betriebsverhalten.

Von seiner Wirkungsweise ist dieser Maschinentyp eher den Wasserrädern als den Turbinen zuzuordnen, denn er nutzt analog einem oberschlächtigen Wasserrad unter atmosphärischem Gleichdruck vor allem die potenzielle Energie des Wassers.

Mit einem typischen Schluckvermögen von ca. $0,25\text{--}6,5\text{ m}^3/\text{s}$ und üblicherweise nutzbaren Fallhöhen von etwa $1,0\text{--}6,5\text{ m}$ (max. $0,5\text{--}8,0\text{ m}$) deckt dieser Maschinentyp einen größeren Einsatzbereich als Wasserräder ab (s. Abb. 3), wobei dieser letztlich konstruk-

tiv durch die Dimensionen bzw. den v. a. längenabhängigen Durchhang der Schnecke, d. h. die notwendigen statisch-konstruktiven Anforderungen begrenzt ist. Von Bedeutung ist des Weiteren, dass das Schluckvermögen einer Wasserkraftschnecke unabhängig von der Fallhöhe der Anlage ist, sondern von den geometrischen Dimensionen bestimmt wird.

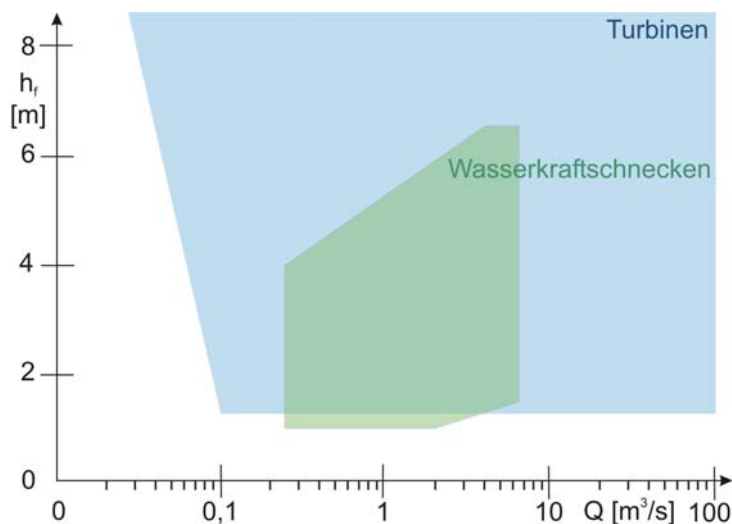


Abb. 3: Haupteinsatzbereich für Wasserkraftschnecken im Vergleich zu Turbinen bezogen auf die Fallhöhe und den Durchfluss

Entsprechend vorgenommener Messungen im Labor und an ausgeführten Anlagen verhält sich ihr Wirkungsgrad ähnlich dem von überschlächtigen Wasserrädern, 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 v. a. auf schwankende Durchflüsse reagiert und somit 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.

In den meisten Fällen wird die Schnecke als sogenannte Trogschnecke ausgeführt, bei der die Schnecke in einem nach oben offenen U-förmigen Trog läuft. 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 i. d. R. 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.

Üblicherweise werden die Wasserkraftschnecken mit einem Anstellwinkel von etwa 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 (s. Abb. 4). Die Lagerung

erfolgt oberwasserseitig in der Regel über ein als Traglager ausgebildetes Wälzlager und unterwasserseitig durch ein wasserdicht gekapseltes, wartungsfreies Gleitlager. Direkt hinter dem oberen Lager ist die Getriebe-Generator-Einheit angeordnet, die bedarfsweise überströmsicher ausgeführt werden kann. Aus Sicherheitsgründen ist eine Abdeckung der Schnecke mit einem Gitterrost o. ä. zu empfehlen.

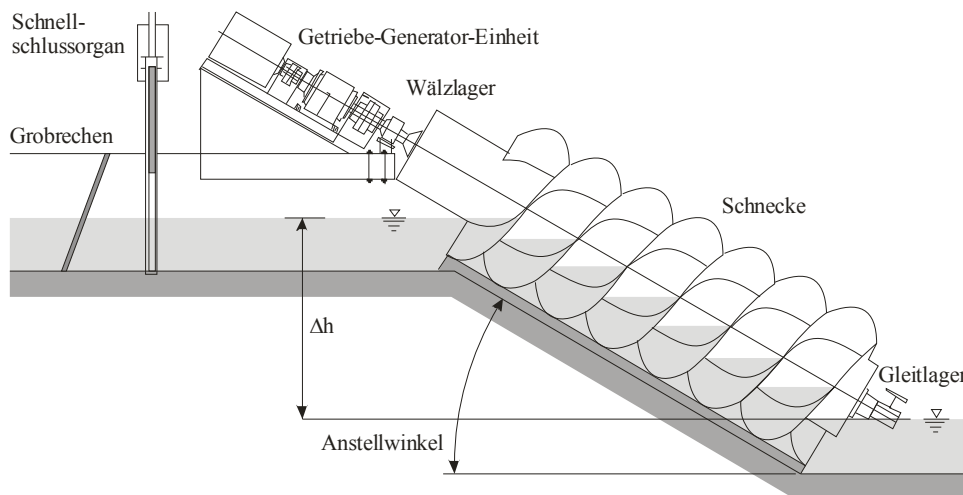


Abb. 4: Prinzipieller Aufbau einer Wasserkraftschnecke [nach Giesecke, Mosonyi, Heimerl, 2009]

Von Vorteil ist bei Wasserkraftschnecken, dass die notwendigen baulichen Maßnahmen und somit die Kosten sehr gering gehalten werden können, da sie werksseitig fast vollständig vorgefertigt werden. Hinzu kommt noch, dass diese sehr robust sind, keinen Feinrechen zur Treibgut- und Sedimentabweisung benötigen sowie eine hohe Verschleißbeständigkeit und damit Wartungsfreundlichkeit aufweisen.

Auch ist Wasserkraftschnecken eine verhältnismäßig gute abwärtsgerichtete Durchgängigkeit für Fische u. a. Lebewesen zuzuschreiben, wobei hier besondere Bedeutung dem Schneckenblätterabstand im Hinblick auf die relevanten Fischgrößen sowie insbesondere der gering zu haltenden Spaltweite zwischen Trog und Schnecke zukommen, um den gefahrlosen Fischabstieg zu ermöglichen. Hinzu kommen die niedrigen Drehzahlen zwischen 80 min^{-1} bei kleineren und 20 min^{-1} bei größeren Schnecken, die diesen Maschinentyp als verhältnismäßig fischfreundlich einstufen lassen. Des Weiteren sind die im Vergleich zu klassischen Überdruckturbinen fehlende Druckunterschiede zu nennen sowie die Tatsache, dass bei entsprechend abgerundeter Ausgestaltung der Schneckenflügel keine besondere Schlaggefährdung für Fische existiert.

Inzwischen wurden zahlreiche Anlagen an alten Mühlenstandorten, Kläranlagenausläufen oder Dotationskraftwerken etc. im Leistungsbereich bis ca. 235 kW ausgeführt und haben sich im Betrieb bewährt. Weitere Leistungssteigerungen scheinen in begrenztem Umfang möglich.

4 Weiterentwicklungen von hydraulischen Strömungsmaschinen

4.1 Wasserwirbelkraftwerk

Bereits seit vielen Jahrzehnten werden Untersuchungen angestellt, die Energie aus Wasserwirbeln zur Stromerzeugung zu nutzen, wie dies u. a. durch ein entsprechendes US-Patent aus 1968 dokumentiert ist. Anfang der 2000er Jahre wurden die Überlegungen erneut in Österreich aufgegriffen und führten zur Anmeldung verschiedener Patente und in der Folgezeit zur Realisierung einiger Anlagen [Rathke et al., 2012].

Das Wasserwirbelkraftwerk, auch als Gravitationswasserwirbelkraftwerk bezeichnet, ist prinzipiell wie eine im Wasserbau bekannte Wirbelkammerdiode aufgebaut, in deren Ablaufzentrum eine hydraulische Strömungsmaschine angeordnet ist (s. Abb. 5 links). Diese vertikalachsige Maschine gleicht in ihrer Form einem einfachen Wasserrad, das vom zentralen Wasserwirbel angetrieben wird. Aufgrund der geringen Drehzahl ist die Kopplung mit einem Getriebe und zur Vergleichmäßigung der Stromeinspeisung mit 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 – die derzeit einzig frei verfügbare Messung –, nur max. 23,5 % aufzeigen [Ceri, Gafner, 2010].

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

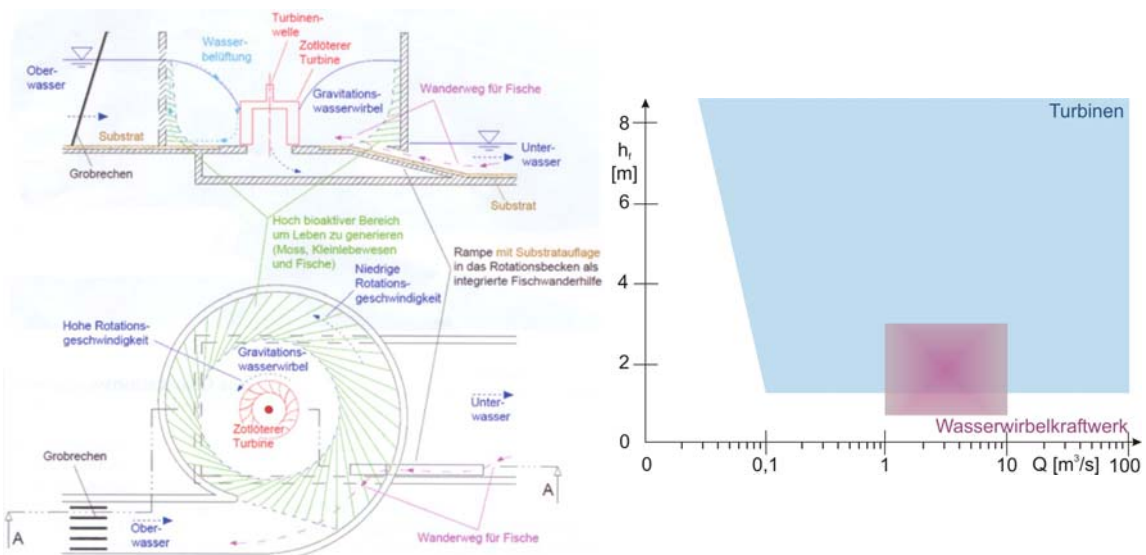


Abb. 5: Wasserwirbelkraftwerk: Prinzipskizze [Rathke et al., 2012] (links); Haupteinsatzbereich im Vergleich zu Turbinen bezogen auf die Fallhöhe und den Durchfluss (rechts)

Interessant ist die positive Einschätzung der Umweltwirkungen durch die Protagonisten (s. z. B. [Rathke et al., 2012]) 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 sind jedoch bislang nicht veröffentlicht worden. Die abwärtsgerichtete Passierbarkeit dürfte aufgrund der geringen Umdrehungszahl der hydraulischen Strömungsmaschine sowie der nicht vollständigen Absperrung des Wasserstromes durch das Rad relativ unkritisch sein. Ob die in jüngster Zeit verwendete Bezeichnung dieser Bauweise als „Fischfreundliches Wehr“ daher gerechtfertigt ist, ist fraglich.

4.2 Steffturbine

Die Steffturbine (Eigenname) nutzt ähnlich wie ein überschlächtiges Wasserrad die potenzielle Energie des Wassers mittels profilierten Schaufeln, die auf eine über zwei Räder laufende Förderkette montiert sind (s. Abb. 6 links). Über diese Förderkette auf einer schiefen Ebene mit einer dem natürlichen Gelände anpassungsfähigen möglichen Neigung von 30–80° wird ein integrierter Permanentmagnet-Generator zur Erzeugung elektrischen Stroms angetrieben.

Die Entwicklung wurde seit 2009 maßgeblich von einer schweizerischen Firma, der Walter Reist Holding AG, vorangetrieben, die seit Jahrzehnten Förder- und Verarbeitungssysteme produziert und so über das notwendige technische Fachwissen verfügt. Mit Unterstützung der Universität der Bundeswehr München wird die Technik seitdem optimiert, wobei in ersten Messserien Anlagenwirkungsgrade von ca. 67 % ermittelt wurden [Malcherek et al., 2011]. Seit Oktober 2011 läuft eine Pilotanlage am Kleinkraftwerk Pilgersteg in Rüti, Schweiz, weitere Anlagen sind in der Ausführungsplanung.

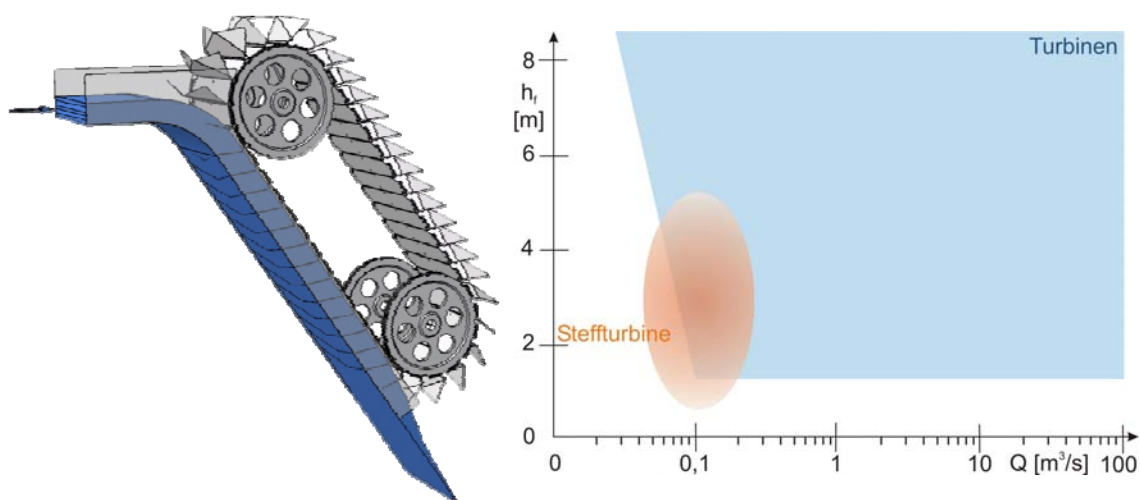


Abb. 6: Steffturbine: Prinzipskizze [Malcherek et al., 2011] (links); Haupteinsatzbereich im Vergleich zu Turbinen bezogen auf die Fallhöhe und den Durchfluss (rechts)

Diese hydraulische Strömungsmaschine ist als Kompaktsystem derzeit für einen Durchfluss von 50–200 l/s und Fallhöhen bis ca. 5 m ausgelegt (s. Abb. 6 rechts), um sowohl den Transport als auch die Infrastrukturmaßnahmen vor Ort zu vereinfachen. Darüber hinaus sollen auf diese Weise mehrere Module kombiniert werden können, um größere Abflüsse abarbeiten zu können. Ähnlich der Wasserräder soll die Anlage unempfindlich gegen Feststoffe bzw. unkritisch für abwandernde kleinere Fische sein.

4.3 Very-Low-Head-Turbine

Das Konzept der Very-Low-Head-Turbine, auch als VLH-Turbine bezeichnet, zielt gegenüber klassischen Kaplan- und Rohrturbinen auf große Laufraddurchmesser mit geringen spezifischen Durchflüssen und kleinen Drehzahlen, woraus geringe Geschwindigkeiten resultieren (s. Abb. 7 links). Damit werden aufwändige, kostenintensive Ein- und Auslaufbauwerke unnötig, ohne wesentliche Wirkungsgradeinbußen zu erhalten [Juhrig 2011]. Dieses Niedriggefälle-Turbinen-Konzept wurde beginnend mit der ersten französischen Patentanmeldung im Jahr 2003 stetig weiterentwickelt und zwischenzeitlich in knapp 40 Anlagen (Stand 01/2013) verwirklicht. Infolge der geringen Drehzahl und der relativ großen Abmessungen wird diese Turbinenform als verhältnismäßig fischfreundlich eingestuft.

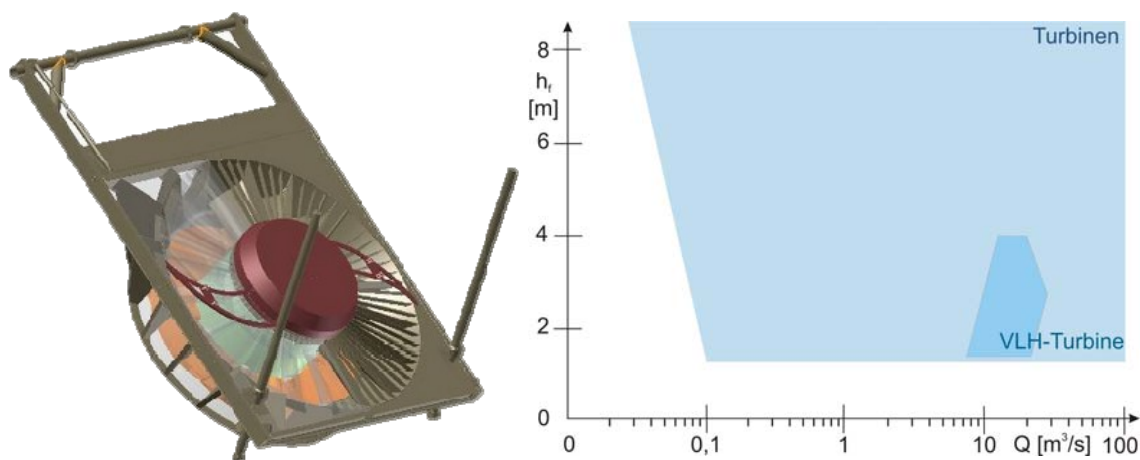


Abb. 7: VLH-Turbine: Prinzipskizze [MJ2 Technologies, 2012] (links); Haupteinsatzbereich im Vergleich zu Turbinen bezogen auf die Fallhöhe und den Durchfluss (rechts)

Die VLH-Turbine ist als kompakte Turbinen-Generatoren-Gruppe ausgebildet, die eine in sich geschlossene Einheit darstellt und die im Werk weitestgehend vormontiert wird. Kern der Einheit ist ein Kaplan-Laufrad mit 8 drehbaren Laufradschaufeln, dem ein Leitapparat mit 18 festen Leitschaufeln vorangestellt sowie ein direkt gekuppelter, drehzahlvariabler, permanent erregter Generator nachgeordnet ist. Dieser Generator ist in der kompakten Laufradnabe angeordnet. Der Einlaufrechen mit Rechenreiniger ist in den Leitapparat integriert. Die gesamte Einheit ist in eine stabile Tragkonstruktion eingebettet, die mittels eines Schwenklagers oberhalb des Oberwasserspiegels gelagert und

mit Hilfe einer Hubvorrichtung für Unterhaltungsmaßnahmen oder zur Freigabe des kompletten Querschnittes im Hochwasserfall angehoben werden kann. Für den definierten Fallhöhenbereich von 1,4–4,0 m und Durchflüsse von 10–26 m³/s (s. Abb. 7 rechts) werden bei Anlagenwirkungsgraden von knapp 80 % Klemmenleistungen von max. 500 kW erzielt.

4.4 Wasserkraftwerke in Unterwasseranordnung

Um vorhandene Querbauwerke in Fließgewässern wirtschaftlich zur Stromerzeugung nutzen zu können und dabei die mannigfaltigen genehmigungsrechtlichen Ansprüche v. a. des Umweltschutzes bzgl. des Fließgewässerlebensraumes 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 Kraftwerkskonzept wird das Triebwasser über eine horizontale Einlaufebene einer vollständig unter Wasser in einer Schachtkammer angeordneten Turbine zugeführt [Rutschman et al., 2011]. Als Turbine wird die bereits seit gut 10 Jahren eingesetzte DIVE-Turbine verwendet, einer kompakten, voll gekapselten Propeller-Turbinen-Generatoreneinheit für eine Unterwasseranordnung. Dieses Konzept wird derzeit in einer Pilotanlage eingehend untersucht und soll je Schachtkraftwerkseinheit bei einem Durchflussbereich von 1–20 m³/s und Fallhöhen von 2–10 m eine installierte Leistung von 30 bis max. ca. 1000 kW aufweisen (s. Abb. 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, so dass 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“ (s. a. Abschnitt 5.1) beschleunigt, wobei dieses hydraulische Prinzip früher auch als „Fallhöhenmehrer“ bezeichnet wurde und u. a. in den Rheinkraftwerken Kembs und Ottmarsheim seit den 1930er Jahren eingesetzt wird. Dieses Kraftwerkskonzept wurde seit Anfang 2000 entwickelt und bisher in drei Anlagen mit einer max. Leistung von 530 kW realisiert. Die Auslegung geht

von einem abzudeckenden Fallhöhenbereich von 1–8,5 m sowie Durchflüssen von 4–25 m³/s aus (s. Abb. 8), womit dann Leistungen von 50–1800 kW erreicht werden sollen [Hydro Energie Roth & EWM, 2012].

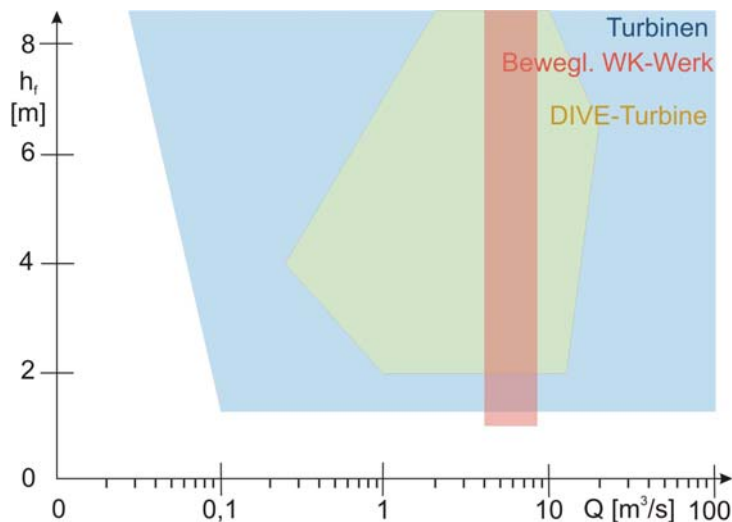


Abb. 8: Haupteinsatzbereich der überströmbaren Kraftwerkskonzepte im Vergleich zu Turbinen bezogen auf die Fallhöhe und den Durchfluss

5 Kinetische Strömungsmaschinen

5.1 Grundlagen

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

Grundsätzlich kann man folgende wesentliche Strömungsquellen unterscheiden:

- Strömung in Binnengewässern resultierend aus dem natürlicherweise vorgegebenen Höhenunterschied.
- Meeresströmungen infolge der Gezeiten, d. h. Ebbe und Flut.
- Meeresströmungen infolge von großräumigen Massenströmungen, bei denen vielfältige Einflussfaktoren zu beobachten sind, von denen insbesondere die Wassertemperatur (Meeresoberflächentemperatur infolge Sonneneinstrahlung), die Corioliskraft, die Salinität und daraus resultierend die Dichte des Wassers sowie die Windreibung an der Oberfläche des Meeres zu nennen sind. Exemplarisch kann der Golfstrom als Teil des globalen maritimen Strömungssystems genannt, der mehr als 80 Mio. m³/s Wasser an Miami/USA in Richtung Europa vorbeitransportiert und dort zum Nordatlantikstrom wird.

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 derselben vorbeifließt. Dieser Wirkmechanismus wurde 1919 von A. Betz für Windturbinen näher beschrieben und wird seitdem als Betz'sches Gesetz bezeichnet, das aber für alle frei umströmten Strömungsmaschinen gilt. Entsprechend diesem Gesetz kann in diesem Fall der maximal mögliche Energieentzug nur $16/27$ (ca. 59 %) der gesamten kinetischen Energie betragen. Damit ergibt sich für eine frei umströmte Strömungsmaschine folgende theoretische Leistung:

$$P = c_p \cdot \frac{\rho}{2} \cdot A \cdot v^3 = c_p \cdot \frac{\rho}{2} \cdot Q \cdot v^2 \quad [\text{kW}] \quad (1)$$

P Leistung [kW]

c_p Leistungsbeiwert oder Betz'scher Faktor [-]

für klassische Wasserkraftanlagen: $c_p = 1$

für frei umströmte Strömungsmaschinen: $c_p = 16/27$

ρ Dichte des Fluids [kg/m^3]

A Rotorfläche [m^2]

v Strömungsgeschwindigkeit [m/s]

Q Durchfluss [m^3/s]

Betrachtet man die mögliche Leistung eines „klassischen“ Wasserkraftwerks mit Aufstau:

$$P = \rho \cdot g \cdot h_f \cdot Q \quad [\text{kW}] \quad (2)$$

h_f Fallhöhe [m]

g Erdbeschleunigung [m/s^2]

und setzt die beiden Gleichungen (1) und (2) gleich, so erhält man das Verhältnis der kinetischen Energie zur äquivalenten Fallhöhe $h_{f,\ddot{a}q}$ wie folgt:

$$\begin{aligned} c_p \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 &= \rho \cdot g \cdot h_{f,\ddot{a}q} \\ \Leftrightarrow h_{f,\ddot{a}q} &= f(v^2) = c_p \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \\ \Leftrightarrow h_{f,eff,max} &= \frac{16}{27 \cdot 2 \cdot g} \cdot v^2 \approx 0,030 \cdot v^2 \end{aligned} \quad (3)$$

Auf diese Weise wird deutlich, dass die theoretisch nutzbare kinetische Energie deutlich geringer als die potenzielle Energie bei einem Aufstau ist (s. Abb. 9 rechts). Für einen Fluss, wie den Rhein, mit einer Strömungsgeschwindigkeit von 2 m/s ergibt sich somit

theoretisch nutzbare äquivalente Fallhöhe für klassische Wasserkraftanlagen von $h_{f,\text{äq,theo}} = 0,203 \text{ m}$ und für frei umströmte Strömungsmaschinen von $h_{f,\text{eff,max}} = 0,12 \text{ m}$.

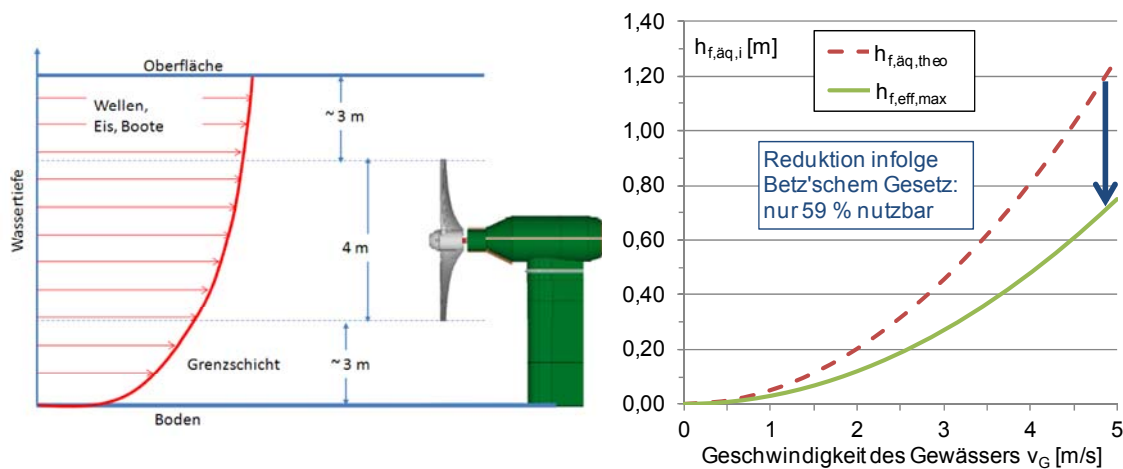


Abb. 9: Kinetischen Strömungsmaschinen: Qualitative Strömungsgeschwindigkeitsverteilung über die Wassertiefe am Beispiel eines 10 m tiefen Fließgewässers (links) [Ruprecht, Ruopp, 2011]; Äquivalente Fallhöhen $h_{f,\text{äq,theo}}$ der vorhandenen kinetischen Energie und $h_{f,\text{eff,max}}$ der durch frei umströmte Strömungsmaschinen nutzbaren kinetischen Energie (rechts)

Des Weiteren sind noch zwei weitere Faktoren für die Leistungsausbeute von Bedeutung [Ruprecht, Ruopp, 2011]:

- **Größe der kinetischen Strömungsmaschine** (s. Abb. 9 links): Aufgrund zweier Randbedingungen reduziert sich die Maschinengröße. Zum einen ist in Sohlennähe eine Grenzschicht mit niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten infolge von v. a. Rauheit vorhanden. Zum zweiten ist ein Sicherheitsabstand zur Wasseroberfläche zu berücksichtigen, um Interaktionen infolge Bootsbetrieb, Wellen, Eisbildung etc. auszuschließen. Daraus ergibt sich, dass verhältnismäßig große Wassertiefen vorhanden sein müssen, um nennenswerte Leistungen erzielen zu können.
- **Gesamtwirkungsgrad**, der je nach Maschinentyp im Bereich von 72 bis 78 % liegt.

Damit wird deutlich, dass die meisten Binnengewässer, wie beispielsweise der Rhein, aufgrund der niedrigen Geschwindigkeiten und geringen Wassertiefen für frei umströmte kinetische Strömungsmaschinen ungeeignet sind und dies somit wirtschaftlich nicht darstellbar ist. So ergibt sich beispielsweise für den Rhein bei einer optimistischen Betrachtung von 2 m/s und einem möglichen Rotordurchmesser von 2 m eine elektrische Leistung von unter 10 kW.

5.2 Entwicklungen kinetischer Strömungsmaschinen

Trotz der erläuterten physikalischen Randbedingungen werden unterschiedliche Maschinen entwickelt, wobei nachfolgend nur auf diejenigen eingegangen werden soll, 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 [Ruprecht, Ruopp, 2011]. Beispiele hierfür sind:
 - Die **TREK-Turbine** ist als großmaßstäblicher Prototyp mit einem Laufraddurchmesser von 2,8 m im St.-Lorenz-Strom, Kanada, seit August 2010 in Betrieb und erzeugt bei einer Fließgeschwindigkeit von etwa 3 m/s eine Leistung von ca. 100 kW [RER Hydro, 2012].
 - Die sogenannte **KSB-Flussturbine** wurde im September 2010 vom Pumpenhersteller KSB als Prototyp im Rhein bei St. Goar installiert und erzeugt dort offensichtlich bei einer Fließgeschwindigkeit von ca. 2 m/s eine überschaubare Leistung von ca. 5 kW ([KSB, 2010]; aktuellere Angaben zu diesem Projekt sind nicht verfügbar).
 - Die **Strom-Boje®** stellt ein frei schwimmendes Strömungskraftwerk dar, das ohne feste Installationen auskommt und nur über eine Ankerkette an einem im Fluss eingebrachten Ankerstab gehalten wird. Dieses Strömungskraftwerk für Wassertiefen ab 2 m wird seit Mitte der 2000er Jahre entwickelt und derzeit ist der 3. Prototyp in der Donau bei Weißenkirchen in der Wachau, Österreich, mit 2,5 m Rotordurchmesser im Einsatz, der bei 2 m/s eine Leistung von ca. 19 kW erzeugen soll [Aqua Libre, 2013].
 - Ein ähnliches System stellt die **Smart-Hydro-Power-Turbine** dar, bei der eine dreiflügelige Mantelturbine an zwei Schwimmkörpern aufgehängt ist und die bei einer Bauhöhe von knapp 2 m ab 250 W Leistung erbringen soll. Konkrete Einsatzorte sind noch nicht bekannt [Smart Hydro Power GmbH, 2012].
- **Schwimmende Mühlen**, auch als Schiffsmühlen, Stromräder, Freistromwandler oder schwimmende Energiewandler bezeichnet, nutzen die freie Strömung durch Wasserräder, die auf oder an einen Schwimmkörper montiert sind. Auch aktuelle Untersuchungen und Forschungsprojekte zeigen, dass derartige Anlagen einen Gesamtwirkungsgrad von max. 30 % erreichen können. Lediglich bei Stromrädern mit einer seitlichen Führung aus Schwimmern, auch als Schussgerinne bezeichnet, womit das Gesamtsystem dem Prinzip eines unterschlächtigen Wasserrades mit Kropfgerinne ähnelt, bleibt der Wirkungsgrad unter 40 % [Weichbrodt et al., 2012].

6 Fazit und Zusammenfassung

Insgesamt ist festzustellen, dass es zwar zahlreiche „neue“ Entwicklungen gibt, die aber genau genommen bei näherer Betrachtung Weiterentwicklungen und Kombinationen bekannter Techniken darstellen. Dies führt in etlichen Fällen zu besseren, 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.

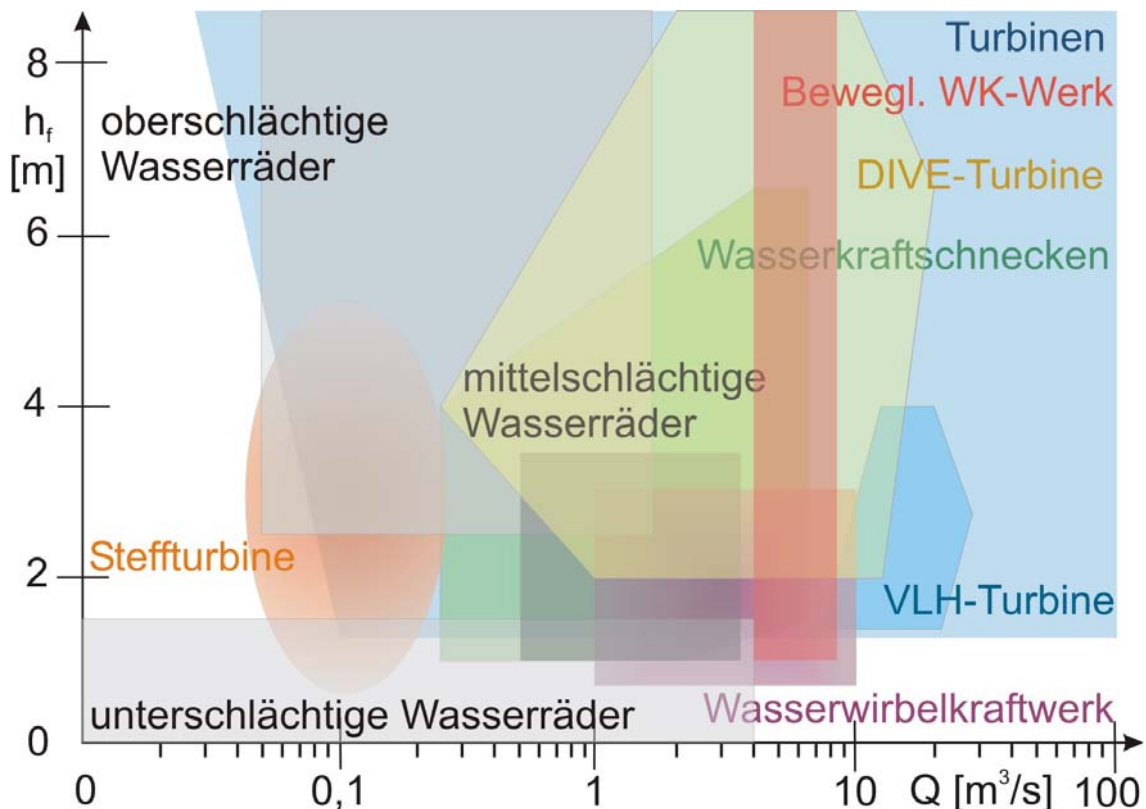


Abb. 10: Zusammenfassende Darstellung der Haupteinsatzbereiche unterschiedlicher hydraulischer Strömungsmaschinen im Vergleich zu Turbinen bezogen auf die Fallhöhe und den Durchfluss (die Grenzen sind als fließend zu sehen)

Kinetische Strömungsmaschinen werden hingegen im Bereich der Binnengewässer auch weiterhin nur ein Nischenprodukt für beispielsweise die Inselversorgung von abgelegenen, nicht erschlossenen Gebieten darstellen, da deren Effizienz nicht sehr hoch ist.

Letzten Endes ist in allen Anwendungsfällen ein durchdachtes standortspezifisches Gesamtkonzept entscheidend, um eine optimale Nutzung der von der Natur gebotenen Wasserkraftressource zu erreichen. Dabei gilt auch in diesem Zusammenhang die generelle Regel für alle Anlagen- und Maschinenkonzepte, dass durch permanente Weiterentwicklung und Optimierung alle 10 Jahre mit ca. 1 % Steigerung des Gesamtanlagewirkungsgrades gerechnet werden kann.

7 Literatur

Aqua Libre (2013): Die Strom-Boje® & persönliche Auskunft (www.aqualibre.at; Aufruf 28.03.2013).

Bega Wasserkraftanlagen GmbH (1997): Persönliche Informationen, Bochum.

BEW-Power (2012): Die Lamellenturbine (www.bew-power.com; Aufruf: 26.01.2013).

Cerri, C.; Gafner, S. (2010): Wasserwirbelkraftwerk. Bachelor Thesis an der FH Nordwestschweiz, Windisch.

Giesecke, J; Mosonyi, E.; Heimerl, S. (2009): Wasserkraftanlagen - Planung, Bau und Betrieb. 5. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 2009.

Hydro Energie Roth GmbH; Elektrizitätswerk Mittelbaden AG (2012): Das bewegliche Wasserkraftwerk (www.das-bewegliche-wasserkraftwerk.de; Aufruf 26.01.2013).

Juhrig, L. (2011): Die Very-Low-Head-Turbine - Technik und Anwendung. In: WasserWirtschaft 101 (2011), Nr. 10, S. 25-29.

KSB AG (2010): Flussturbinen am Netz. Pressemitteilung vom 13.09.2010.

Malcherek, A.; Kulisch, H.; Maerker, C (2011): Die Steffturbine - eine auf einem Umlaufband beruhende Kleinwasserkraftanlage. In: WasserWirtschaft 101 (2011), Nr. 10, S. 30-33.

MJ2 Technologies (2012): Very low head turbine (www.vlh-turbine.com; Aufruf: 26.01.2013).

Müller, G.; Kauppert, K. (2003): Die Wasserräder als hydraulische Kraftmaschinen. In: Bautechnik 80 (2003), Heft 3, S. 181-189.

Müller, G.; Linton, N.; Schneider, S. (2012): Das Projekt HYLOW: Die Wasserdruckmaschine. In: KW Korrespondenz Wasserwirtschaft 5 (2012), Nr. 1, S. 30-36.

Nuernbergk, D. M. (2005): Wasserräder mit Kropfgerinne. Detmold: Verlag Moritz Schäfer, 2005.

Nuernbergk, D. M. (2007): Wasserräder mit Freihang. Detmold: Verlag Moritz Schäfer, 2007.

Nuernbergk, D. M. (2012a): Persönliche Auskunft, Erfurt.

Nuernbergk, D. M. (2012b): Wasserkraftschnecken. Detmold: Verlag Moritz Schäfer, 2012.

Rathke, J.; Zotloeterer, F.; Wendland, M. (2012): Kleinwasserkraftwerk mit Gravitationswirbel. In: BWK 64 (2012), Nr. 3, S. 18-21.

RER Hydro (2012): TREK-Turbine (www.rerhydro.com; Aufruf 26.01.2013).

Ruprecht, A.; Ruopp, A. (2011): Entwicklung einer kinetischen Strömungsturbine. In: WasserWirtschaft 101 (2011), Nr. 10, S. 34-37.

Rutschmann, P.; Sepp, A.; Geiger, F.; Barbier, J. (2011): Das Schachtkraftwerk - ein Wasserkraftkonzept in vollständiger Unterwasseranordnung. In: WasserWirtschaft 101 (2011), Nr. 7-8, S. 33-36.

Smart Hydro Power GmbH (2012): Kinetisches Kleinstwasserkraftwerk (www.smart-hydro.de; Aufruf 26.01.2013).

Weichbrodt, F.; Dimke, D.; Behrendt, M.; Fröhle, P. (2012): Großmaßstäbliche Modellversuche mit einem schwimmenden Energiewandler. In: KW Korrespondenz Wasserwirtschaft 5 (2012), Nr. 5, S. 251-257.

WICON-Generatoren (2012): WICON-Staudruckmaschine (www.wicon.at; Aufruf: 26.01.2013).

Anschrift der Verfasser

Dr.-Ing. Stephan Heimerl
Dr.-Ing. Beate Kohler
Fichtner Water & Transportation GmbH
Sarweystraße 3
70191 Stuttgart
Stephan.Heimerl@FWT.Fichtner.de
Beate.Kohler@FWT.Fichtner.de