

Physikalische Kriterien zur Differenzierung der Einsatzbedingungen für ober- unter- und mittelschlächlige Wasserräder

Dipl.-Phys. Dr.-Ing. Klaus Brinkmann



Lehrgebiet Elektrische Energietechnik

Feithstraße 140, Philipp-Reis-Gebäude, D-58084 Hagen, fax: +49/2331/987 357,

e-mail: klaus.brinkmann@fernuni-hagen.de

1. Einleitung

Für kleinste Leistungen stellen auch heute noch Wasserräder eine sinnvolle Möglichkeit zur Energiewandlung dar, die sich in zukünftige komplexe hybride Energieversorgungssysteme integrieren lassen. Insbesondere bei Teillast zeichnen sich Wasserräder im Wirkungsgradverhalten aus /1/, /2/, /3/. Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage nach den Auslegungskriterien von Wasserrädern aus heutigem Blickwinkel. Die heute noch verfügbare Literatur über Wasserräder ist sehr spärlich. Eingehende analytische Betrachtungen, sowohl hydraulisch als auch konstruktiv, nach heutigen Standards sind, falls überhaupt, schwer zu finden. Aus diesem Grunde ist es sinnvoll, eine physikalisch-mathematische Analyse vorzunehmen, mit dem Ziel, eine systematische Abhandlung der Kriterien zur Auslegung (und damit auch zur Optimierung) von Wasserrädern in moderner Fassung zu erhalten.

Aufbauend auf die anlässlich des zweiten und dritten Anwenderforums präsentierten Ansätze zur Bereitstellung und Verfeinerung grundlegender Auslegungs- und Optimierungskriterien für den Bau von ober- unter- und mittelschlächtigen Wasserrädern /4/, /5/, liefert dieser Beitrag den Versuch einer Systematisierung der Erfassung von Entscheidungskriterien für den jeweiligen Einsatz dieser drei grundlegenden Wasserrad-Typen.

Ausgangspunkt für die folgende analytische Betrachtung ist das physikalisch beschreibbare Potential von Fließgewässern, welches zur Nutzung mit den bereits erarbeiteten Auslegungskriterien in /4/ und /5/ verknüpft werden kann.

2. Grundlagen

Die Abb. 1 zeigt das Höhenprofil eines frei fließenden Gewässers von A nach B, in hinreichendem Abstand von Staustufen bzw. Becken und ohne weitere Zuflüsse.

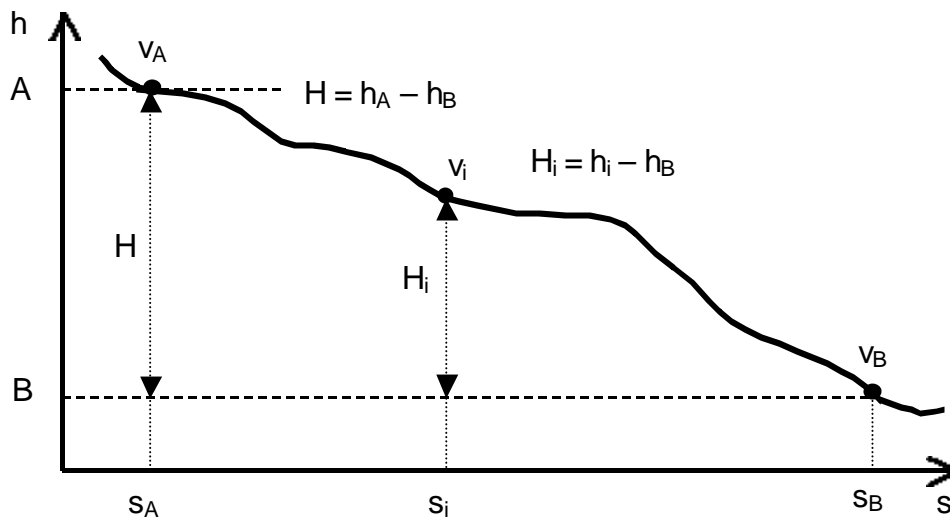


Abb. 1 beispielhaftes Höhenprofil eines Fließgewässers

Aufgrund des Energieerhaltungssatzes unter Berücksichtigung von Reibungsverlusten (x) gilt für die Strömungsgeschwindigkeit an einem beliebigen Ort i

zwischen A und B die Formel $v_i = x \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (H - H_i) + v_A^2}$, mit $0 < x \leq 1$.

3. Oberschlächtinge Wasserräder

Eine geeignete Geländeform für überschlächtige Wasserräder zeigt Abb. 2 mit einem stufenförmigen Verlauf.

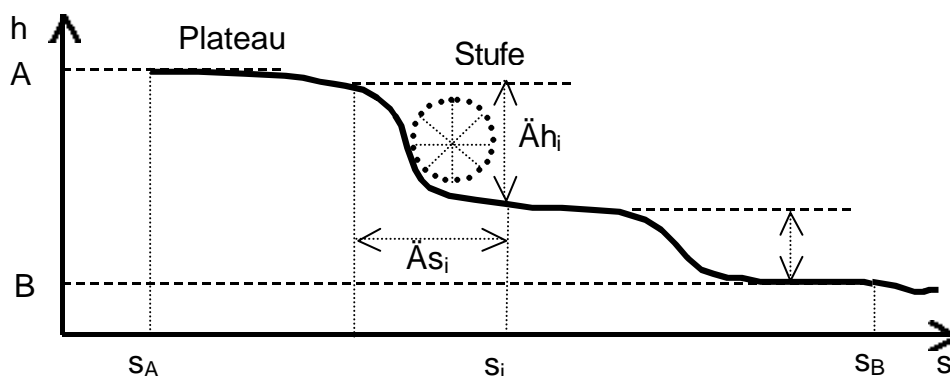


Abb. 2 Höhenprofilmuster für überschlächtige Wasserräder

Dabei erfährt das Gewässer seinen jeweiligen Geschwindigkeitszuwachs im Wesentlichen während der Stufenpassage.

Dies hat zur Folge, dass beim Einlauf über ein Schütz zum Wasserrad nicht übermäßig viel kinetische Energie vernichtet (gebremst) werden muss. Mit den Ergebnissen aus /4/ sollte die Geschwindigkeit v_i vor der Stufe optimalerweise die folgende Beziehung $v_i \leq v_{\max} = \mathbf{x}_s \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_s}$ [m/s] erfüllen, d.h. die Geschwindigkeit des Zulaufs ist kleiner als die des maximalen Schützausflusses. Mit der verfügbaren Wassermenge Q gilt für die Geometrie des Wasserradeinlaufs $L \cdot B \approx Q/v_i$ [m²]. Diese muss mit der technisch realisierbaren Drehzahl mit Hilfe der Formel $n = \frac{60 \cdot L \cdot B}{z \cdot \mathbf{e} \cdot V_z} \cdot v_i$ [min⁻¹] abgestimmt werden. Dabei ist z die Anzahl der Zellen mit dem jeweiligen max. Füllvolumen V_z und dem Füllgrad $0 \leq \mathbf{e} \leq 1$. Der maximal mögliche Durchmesser D des Wasserrades ist dabei gegeben durch die verfügbare Stufenhöhe Δh_i , also $D = 2 \cdot R \leq \Delta h_i$. Für die Steilheit der natürlichen Stufe könnte man mit Rücksicht auf erforderliche Erdarbeiten $0 \leq \Delta s_i \leq (2 \dots 3) \cdot D$ ansetzen.

4. Unterschlächtige Wasserräder

Da diese Wasserrad-Variante die kinetische Energie nutzt, ist ein ausgeprägtes Stufenprofil wie in Abb. 2 gezeigt weniger geeignet. Für unterschlächtige Wasserräder eignet sich insbesondere ein Geländeprofil mit annähernd konstantem Gefälle. Wie in /4/ bereits präsentiert, ergibt sich für unterschlächtige Wasserräder ein Leistungsmaximum, wenn die freie Strömungsgeschwindigkeit durch den Energieentzug auf ein Drittel ihres Wertes abgebremst wird. Wiederum lässt sich für eine Auslegung ein Zusammenhang zwischen der Radgeometrie D [m], realisierbarer Drehzahl n [min⁻¹] und der Strömungsgeschwindigkeit in der Form

$D \approx \frac{20 \cdot v_i}{\mathbf{p} \cdot n}$ finden. Mit den Bezeichnungen und Verhältnissen wie in Abb. 1 dargestellt

gilt mit $H_i = H - \Delta h_i$ für die Geschwindigkeit $v_i = \mathbf{x} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h_i + v_A^2}$ und für die

Projektierungshöhe H_i die Formel $H_i \approx H + \frac{1}{2 \cdot g} \cdot \left(v_A^2 - \left(\frac{\mathbf{p} \cdot D \cdot n}{20 \cdot \mathbf{x}} \right)^2 \right)$.

Mit $H_i \leq H$ gilt als grobe Auslegungsbedingung des Rades $n \cdot D \geq \frac{20 \cdot v_A}{p}$. Für die strömende Wassermenge Q , in die das Wasserrad eingetaucht werden soll, muss mindestens $Q \geq v_i \cdot A_s$ gelten, wobei A_s den wirksamen Schaufelflächen-Querschnitt darstellt. Bei konstantem Q , aufgrund der Kontinuitätsgleichung (Massenerhaltung), ergibt sich bei einer Abbremsung auf ein Drittel der Geschwindigkeit die Notwendigkeit, danach einen dreifachen Querschnitt zu realisieren. Daher sollte für den Querschnitt $A [m^2]$ des Fließgewässers die Bedingung $A > \dots \gg A_s$ erfüllt sein, mit der dazugehörigen Wassermenge $Q \approx v_i \cdot A \cdot 3600$ in $[m^3/h]$.

5. Mittelschlächlige Wasserräder

Für das mittelschlächlige Wasserrad, als eine Art Kombination von ober- und unterschlächligem Rad, gelten entsprechend für das Höhenprofil ähnliche, aber abgeschwächte Stufenbedingungen wie in Abb. 2, und mit kontinuierlicherem Zuwachs an kinetischer Energie sowie entsprechend größerem Volumenfluss analog zu den unterschlächligen Wasserrädern.

Zurückgreifend auf die Ergebnisse der in /5/ präsentierten Analyse erhält man eine maximale Leistung, wenn die Umfangsgeschwindigkeit des Rades $2/3$ der Geschwindigkeit des frei abfließenden Wassers $v_{ab,0}$ (d.h. ohne Energieabnahme) am Auslauf des Rades beträgt. Bei einer technisch möglichen Drehzahl $n [\text{min}^{-1}]$ kann man damit eine optimale effektive Fallhöhe H_{ab} bestimmen. Mit dem Raddurchmesser D und einem Reibungskoeffizienten $0 \leq x_{ab} \leq 1$ ergibt sich die

$$\text{folgende Formel } H_{ab} = \frac{1}{2 \cdot g} \cdot \left(\frac{3}{2} \cdot \frac{n \cdot D}{x_{ab}} \right).$$

Die Zulaufgeschwindigkeit des Gewässers kann hier wie beim ober- und unterschlächligen Wasserrad mit der Abflussgeschwindigkeit aus dem Schütz korreliert werden. Hierfür gilt analog $v_i \approx x_s \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_s}$. Die Kontinuitätsbedingung verlangt in diesem Fall, dass das über die Schützöffnung ($L \cdot B$) fließende Wasser gleich dem Abfluss sein muss.

Mit einer Radbreite B_{Rad} [m] und der Abflusshöhe h_{ab} [m] gilt daraufhin $(L \cdot B) \cdot v_i = v_{ab,0} \cdot h_{ab} \cdot B_{Rad}$. Mit der Geschwindigkeit v_i lässt sich damit weiterhin ein Zusammenhang zwischen der Strömung, dem Geländeparameter H_{ab} und den Geometriedaten der Wasserrad-Konstruktion gewinnen:

$$v_i \approx \frac{\mathbf{x}_{ab} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_{ab}} \cdot (h_{ab} \cdot B_{Rad})}{(L \cdot B)} \quad \text{bzw.} \quad H_{ab} = \frac{1}{2 \cdot g} \cdot \left(\frac{v_i \cdot L \cdot B}{\mathbf{x}_{ab} \cdot h_{ab} \cdot B_{Rad}} \right)^2.$$

Die im Vergleich zum überschlächtigen Wasserrad weniger ausgeprägten Geländestufen Δh_i liegen dann in der Größenordnung $D/2 \leq \Delta h_i$. Als Maß für die damit verbundene Steilheit empfiehlt sich entsprechend $0 \leq \Delta s_i \leq (2 \dots 3) \cdot D/2$.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Eine auch heute noch attraktive Möglichkeit zur dezentralen Stromversorgung stellt die Nutzung von Wasserkraft in Form von Wasserrädern dar, zum Beispiel im Rahmen eines regenerativen Hybridsystems. Die vorliegende Arbeit dient zur systematischen Erfassung der theoretischen Grundlagen für die Ermittlung praktikabler Kriterien zur Abschätzung und gegenseitigen Abgrenzung der Einsatzbedingungen der verschiedenen Wasserrad-Typen.

Referenzen:

- /1/ Felix von König: Bau von Wasserkraftanlagen. Verlag C.F. Müller Karlsruhe 1985
- /2/ Wilhelm Müller: Die Wasserräder. Verlag Moritz Schäfer Detmold 1983, Reprint der Ausgabe von 1939
- /3/ J. Giesecke, E. Mosonyi: Wasserkraftanlagen. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2. Auflage 1998
- /4/ Klaus Brinkmann: Physikalische Analyse zur Bestimmung von Kriterien für die Auslegung und Optimierung von ober- und unterschlächtigen Wasserrädern. Zweites Anwenderforum Kleinwasserkraftwerke, OTTI, Passau 1999
- /5/ Klaus Brinkmann: Physikalische Analyse zur Bestimmung von Kriterien für die Auslegung und Optimierung von mittelschlächtigen Wasserrädern. Drittes Anwenderforum Kleinwasserkraftwerke, OTTI, Passau 2000

Physical Criterion to Differentiate the Usage Conditions of Over- Under- and Middle-Shot Water Wheels

Dipl.-Phys. Dr.-Ing. Klaus Brinkmann



Chair of Electrical Power Engineering

Feithstraße 140, Philipp-Reis-Gebäude, D-58084 Hagen, fax: +49/2331/987 357,

e-mail: klaus.brinkmann@fernuni-hagen.de

Abstract: An extensive usage of renewable energy sources implies a more decentralised energy supply structure, because of the more or less stochastic behaviour of their availability. Therefore, it is unalterable to combine different energy converter to more or less complex hybrid systems. One possible component for such a hybrid system could be a water wheel. Unfortunately only rudimentary information about the construction and calculation of water wheels from the past are handed down to the posterity. For this reason, it makes sense to present a physical and mathematical analysis of water wheels.