

Zeitschrift für den
gesamten Ingenieurbau

Deutscher Bautechnik-Tag 2003
9. bis 11. April 2003
Ernst & Sohn – Saal 3 – Foyer – Stand-Nr. 11c

8. Verleihung des INGENIEURBAU-PREISES
9. April 2003 – 18.00 Uhr
Saal 1 des CCH Hamburg

Details: <http://www.ernst-und-sohn.de>



80. Jahrgang
März 2003
Heft 3
ISSN 0932-8351

Ernst & Sohn
A Wiley Company

Materialmodelle und Nachweise

Neubebauung am Marstallplatz in München

Tragfähigkeit von Queranschlüssen bei Holzträgern (Teil 1)

Fehlerbild bei der FE-Berechnung von Platten

Kriechen von bewehrten Holzträgern

Verbundmodell Glasfaser – Beton

Wasserräder als hydraulische Kraftmaschinen

Leitfaden zur strukturierten Mängelbeseitigung

Erinnerung an Robert Hooke (1635–1703)

Für die Nutzung des in Deutschland vorhandenen, auf 500 MW geschätzten Microhydro-Potentials mit niedrigen Fallhöhen werden heute gelegentlich wieder Wasserräder anstelle von Turbinen angewendet. Die Leistungsdaten und Kennkurven dieser Räder sind jedoch weitgehend unbekannt. Entwurf und Betrieb eines Wasserrades beruhen daher vor allem auf empirischen Formeln und Erfahrungswerten. Um die für eine effektive Stromerzeugung wichtigen Leistungsdaten der Wasserräder zu ermitteln, wurde als erster Schritt die heute weitgehend in Vergessenheit geratene Fachliteratur zu diesem Thema gesammelt und ausgewertet. Diese Analyse zeigt, daß Wasserräder für eine gegebene Wassermenge, Höhendifferenz und für ein bestimmtes Betriebsregime entworfen werden müssen. Auf diese Weise können Effizienzen bis 77 % (unterschlächtig) bzw. 85 % (oberschlächtig), für $0,2 < Q/Q_{\max} < 1,0$ erreicht werden, d. h. kaum weniger als bei den modernsten Kaplan-turbinen, bei 30 bis 70 % geringeren Kosten pro kW. Zur Nutzung kleiner Wasserkraftquellen mit niedrigen Fallhöhen bilden Wasserräder somit eine klare wirtschaftliche Alternative zu Turbinen.

Water wheels as hydro power engines. *In Germany, the micro-hydro potential with low head differences can be estimated at 500 MW. Even today, water wheels are occasionally built, instead of turbines, for the exploitation of such sites. The performance characteristics of water wheels are however unknown, and the design and operation depends on empirical formulae and experience. In order to determine these characteristics, which are important for the generation of electricity, a detailed literature review was conducted. The available literature, which is today virtually unknown, was then analysed. It was found that water wheels have to be designed for a given head difference, flow volume and operating regime. Well designed water wheels have an efficiency of 72–77 % (undershot wheel) and 80–85 % (overshot wheel) for $0.2 < Q/Q_{\max} < 1.0$, only slightly less than Kaplan turbines. Water wheels offer a cost advantage of 30–70 % when compared with such turbines, and can thus be considered as economic alternatives for micro-hydro applications with low heads and variable flows.*

1 Einführung

Wasserräder werden heute oft als Relikte angesehen: romantische, aber ineffiziente Maschinen, aus Holz gebaut und einer vergange-

nen Zeit angehörend [1]. Es wird allgemein angenommen, daß Turbinen weitaus effizienter als Wasserräder sind und folglich deren Rolle als hydraulische Kraftmaschinen übernommen haben. Ein Blick in die Statistik zeigt allerdings ein anderes Bild: In Bayern wurden z. B. noch im Jahr 1927 7554 Wasserräder mit Leistungen von 0,75 bis 75 kW gezählt, die fast ausschließlich als mechanische Energiequellen zum Antrieb von Maschinen verwendet wurden [2]. Der Entwurf von Wasserrädern war damals Teil des Lehrstoffs für Studenten der technischen Hochschulen [3]. Technische Handbücher über den Entwurf und die Berechnung der Wasserräder erschienen bis 1939. Heute wird das in Deutschland vorhandene Microhydro-Potential mit niedrigen Fallhöhen, d. h. Wasserkraftquellen mit Leistungen kleiner als 100 kW und Fallhöhen von 1 bis 6 m, auf etwa 500 MW geschätzt [4]. Es besteht also in diesem Leistungsbereich durchaus ein Marktpotential für einen kostengünstigen Energiewandler, das bis heute nicht abgedeckt wird. Herkömmliche Turbinen (Kaplan- oder Ossbergerturbinen) können bei diesen geringen Fallhöhen nicht wirtschaftlich eingesetzt werden. Wasserräder bieten eine attraktive Lösung für diesen Bereich. Einige Firmen in Europa und den USA bauen heute Wasserräder zur Stromerzeugung [vgl. Internet-Referenzen]. Eine Übersicht über die heute gebauten Typen und deren Nutzung wird in [5] und [6] gegeben. Die genauen Leistungsdaten der Wasserräder sind jedoch größtenteils noch unbekannt. Die Abschätzung der möglichen Stromerzeugung an einer gegebenen Wasserkraftquelle, der Vergleich mit herkömmlichen gut erforschten Turbinenarten sowie die Bestimmung der optimalen Betriebsbedingungen

von Wasserrädern beruhen daher weiterhin auf Erfahrungswerten und empirischen Daten. In den meisten modernen Lehrbüchern über Wasserkraft werden Wasserräder nicht mehr erwähnt. Nur zwei derzeit erhältliche Bücher geben Entwurfshilfen [2], [4], wobei die Angaben in [4] zum größten Teil aus [2] entnommen sind.

Die Autoren haben, um die wissenschaftlichen Grundlagen zur Nutzung von Wasserrädern zu erweitern, detaillierte Literaturrecherchen zu diesem Thema durchgeführt. Diese ergaben, daß noch eine bedeutende Menge an Informationen über oberschlächtige Wasserräder existiert, jedoch nur wenig über die Eigenschaften der unter- und mittelschlächtigen Wasserräder bekannt ist. Die heute oftmals unbekannteren Berichte und Bücher wurden gesammelt und im Hinblick auf die Nutzung der Wasserräder zur Stromerzeugung ausgewertet.

2 Einteilung der Wasserräder

Um die vorhandenen Fallhöhen optimal ausnutzen zu können, wurden verschiedene Wasserradtypen entwickelt:

1. Oberschlächtige Wasserräder, Bild 1a: Das Wasser läuft von oben auf das Rad. Dieser Radtyp wird heute für Fallhöhen von 2,5 bis ca. 6 m und Durchflüsse von 0,1 bis $1,2 \text{ m}^3/\text{s}$ gebaut.
2. Mittelschlächtige Wasserräder, Bild 1b: Das Antriebswasser läuft hier etwa in Achshöhe in das Rad ein. Dieser Radtyp wurde für kleinere Fallhöhen von etwa 1,5 bis 3 m und Durchflüsse von 0,2 bis $2,0 \text{ m}^3/\text{s}$ angewendet.
3. Unterschlächtige oder *Zuppinger*-räder, Bild 1c: Das Antriebswasser läuft unterhalb der Radachse zu; mit dieser Radart können heute Fallhöhen von 0,5 bis etwa 2,5 m und

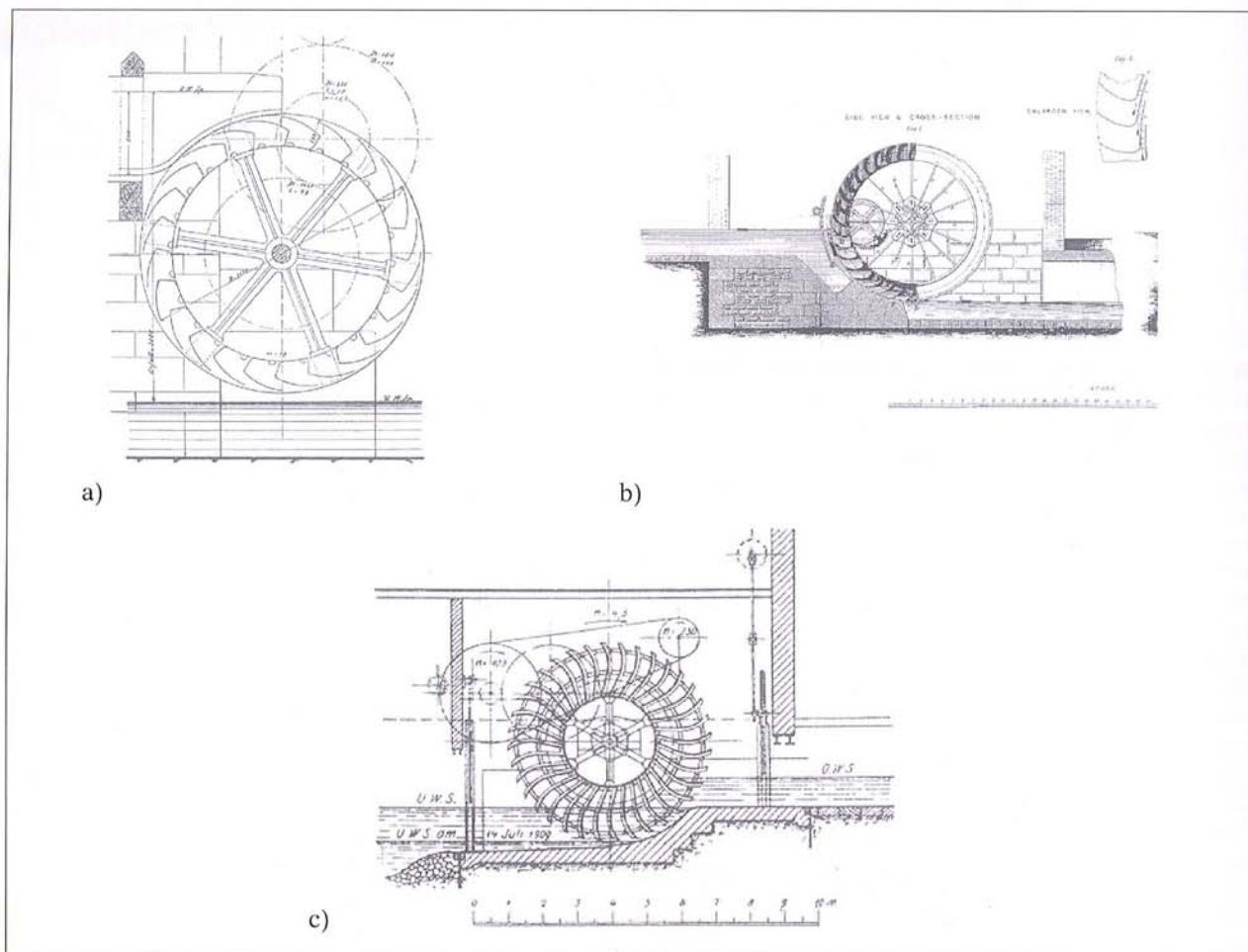


Bild 1. Wasserradtypen, a) überschlächtiges Wasserrad [2], b) mittelschlächtiges Wasserrad [7], c) unterschlächtiges Wasserrad [2]

Fig. 1. Types of water wheels, a) overshot water wheel [2], b) breast shot water wheel [7], c) undershot water wheel [2]

Wassermengen von 0,5 bis 3 m³/s ausgenutzt werden.

Zwischen den einzelnen Radtypen existieren eine große Anzahl von Übergangsformen. Alle „modernen“, d. h. nach wissenschaftlichen Prinzipien entworfenen Wasserräder, nutzen die potentielle Energie des Wassers. Heute werden nur ober- und unterschlächtige Räder wieder in geringen Stückzahlen gebaut; die folgenden Betrachtungen beschränken sich daher auf diese Radtypen. Die mittelschlächtigen Räder werden, nach Wissen der Autoren, seit über 80 Jahren nicht mehr angewendet, obwohl diese für „mittlere“ Fallhöhen von 1,5 bis etwa 2,5 m durchaus interessant sein könnten.

3 Das überschlächtige Wasserrad

3.1 Funktionsprinzip

Ein modernes Wasserrad besteht aus drei Bauteilen: Einlauf, Wasserrad

und Auslauf. Die seit der zweiten Hälfte des 19. Jh. entwickelten Wasserräder sind aus Metall gebaut und haben sowohl eine charakteristische Zellenform als auch ein speziell entworfenes Einlaufdetail. Das in Bild 2a gezeigte Rad besitzt einen Einlauf mit Schütz, der bewirkt, daß das Wasser mit gleichbleibender, von der Wassermenge unabhängiger, Geschwindigkeit in das Rad einlaufen kann. Die Zellen selbst sind so geformt, daß das Wasser in seinem natürlichen Fallwinkel eintreten kann. Diese besondere Zellenform hält gleichzeitig das Wasser solange wie möglich in der Zelle. Eine detaillierte Betrachtung der Bestimmung der optimalen Zellengeometrie ist u. a. in [9] gegeben. Das Wasser wird bis zur niedrigst möglichen Position innerhalb der Zelle gehalten und dann schnell entleert, so daß kein Wasser über den unteren Totpunkt mitgenommen wird. Das in Bild 2b gezeigte

Einströmdetail besteht aus einer Rinne mit schlitzzartigen Öffnungen am Boden, die mittels eines Kulisenschiebers ganz oder teilweise geschlossen werden können. Die Schlitze sind so geformt, daß sie den Wasserstrahl im richtigen Winkel in die Zellen einleiten. Das überschlächtige Rad in Bild 1a besitzt einen wehrähnlichen Einlauf ohne Steuerungselement; der Wasserspiegel oberstrom und damit die Geschwindigkeit des einlaufenden Wasserstrahls hängt hier von der Durchflußmenge ab.

3.2 Hydraulische Berechnung

Wasserräder werden für eine bestimmte Anwendung, Fallhöhe und Durchfluß entworfen. Der Durchmesser wird durch die vorhandene Fallhöhe bestimmt. Bereits hier muß der Betriebsmodus (konstante oder variable Geschwindigkeit) berücksichtigt werden, da dieser den maximal möglichen Durchmesser be-

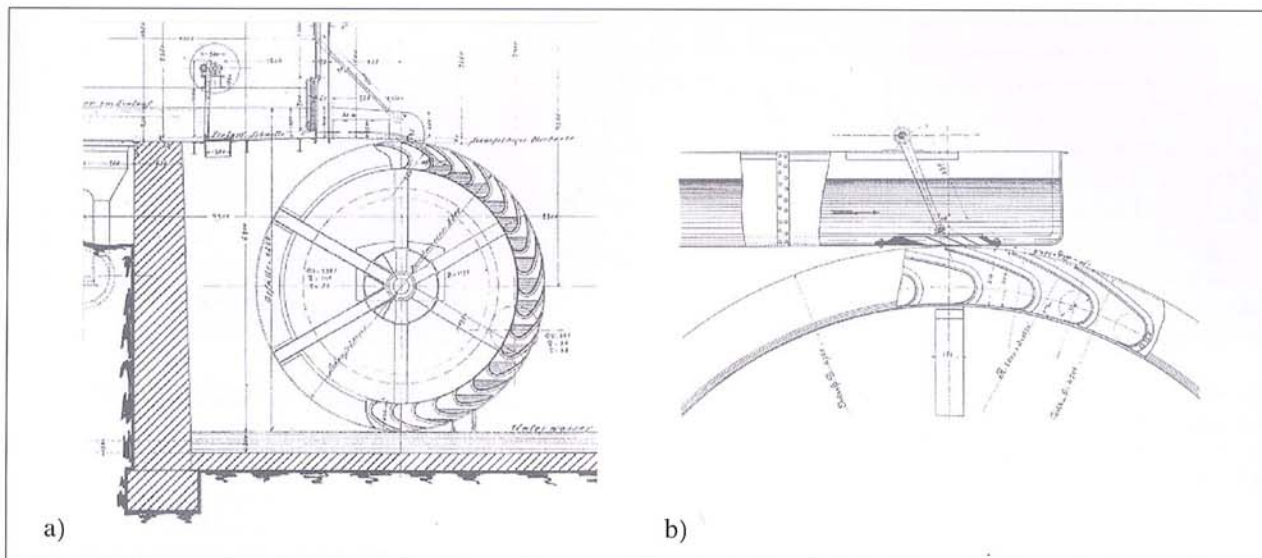


Bild 2. Oberschlächtiges Zellenrad und Einlaufdetail, a) overschlächtiges Wasserrad mit Schütz-Einlauf [8], b) Kulissen-Einlauf [2]

Fig. 2. Overshot wheel and inflow detail, a) overshot wheel [8], b) inflow Detail [2]

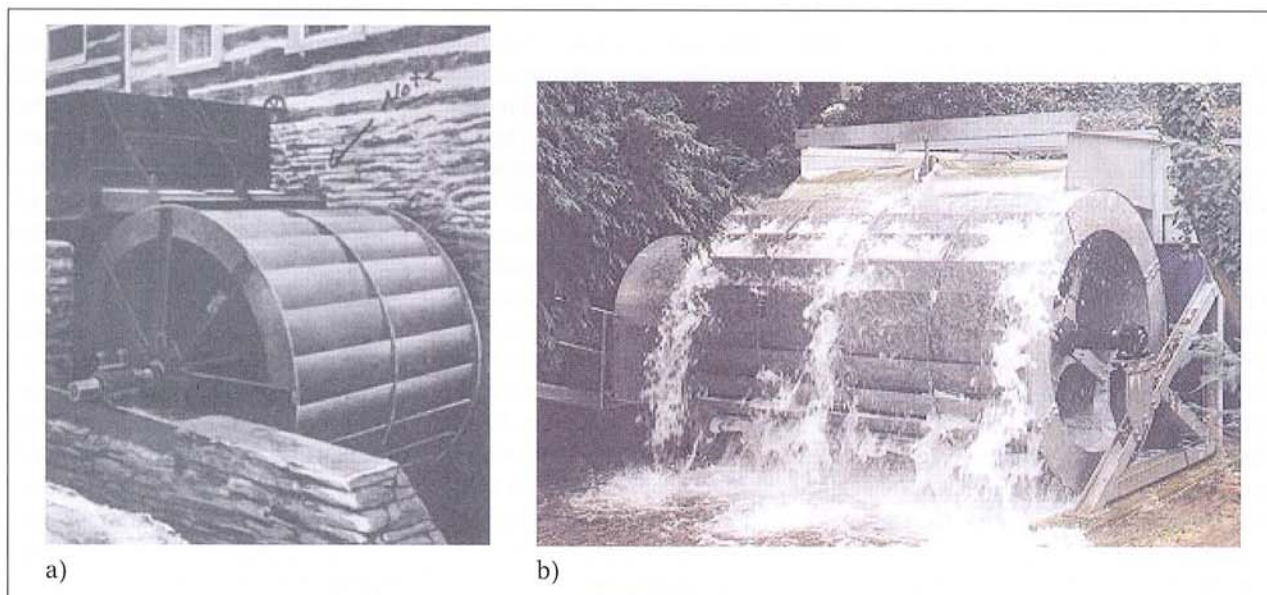


Bild 3. Oberschlächte Wasserräder, a) mit Schützeinlauf (USA, ca. 1900), b) 30 kW (el.) Wasserrad mit freiem Einlauf (Hydrowatt GmbH, 2000)

Fig. 3. Overshot water wheels, a) with sluice gate inflow (USA, ca. 1900), b) 30 kW (el.) water wheel with free inflow (Hydrowatt GmbH, 2000)

einfließt (vgl. Abschn. 6.2). Die Rad-drehzahl und die Anzahl, Tiefe und Form der Zellen werden für die gegebene Entwurfswassermenge berechnet. Das Einströmdetail wird so entworfen, daß die Entwurfswassermenge in der richtigen Geschwindigkeit und Strahldicke in das Rad eintritt. Lehr- und Handbücher, die die hydraulische Berechnung und Detailkonstruktion behandeln, wurden bis 1939 publiziert, z. B. [2], [7] bis [13]. Bild 3 zeigt typische Wasserräder mit geregelt und unreguliertem Einlauf.

4 Kennlinien der overschlächtigen Wasserräder

4.1 Allgemeines

Bislang gibt es kein theoretisches Modell des Wasserrades. Die tatsächliche Effizienz und die Leistungscharakteristika dieser Räder müssen daher durch Versuche ermittelt werden. Obwohl im letzten Jahrhundert eine sehr große Zahl an Wasserrädern in Betrieb war, wurden nach Wissen der Autoren nur drei Versuchsreihen durchgeführt. Die meisten dieser Versuchsergebnisse wurden nie in Büchern

oder Zeitschriften publiziert und sind nur in weitgehend unbekanntem und teilweise schwer zugänglichen Berichten erhalten geblieben. So blieben beispielsweise die in den USA publizierten Daten in Deutschland unbekannt und umgekehrt [14] bis [17]. Die Hauptergebnisse dieser Versuchsreihen werden im folgenden dargestellt.

4.2 Wirkungsgrade

Die Wirkungsgrad-Kennlinie zeigt eine der wesentlichen Eigenschaften einer Turbine: die Abhängigkeit des

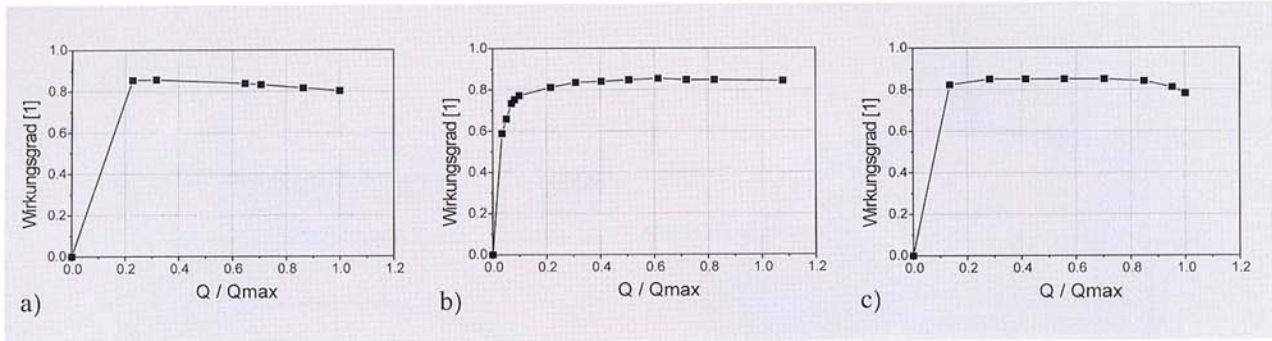


Bild 4. Gemessene Wirkungsgrad-Kennlinien, a) 3,054 m Wasserrad [14], b) 3,60 m Wasserrad [16], c) 3,60 m Wasserrad, 9,0 U/min [17]

Fig. 4. Measured performance characteristics, a) 3.054 m water wheel [14], b) 3.60 m water wheel [16], c) 3.60 m water wheel, 9,0 rpm [17]

Wirkungsgrades von der Beaufschlagung. Wie bei anderen hydraulischen Maschinen auch, ist der Wirkungsgrad eines Wasserrades eine Funktion der Beaufschlagung. Bild 4 zeigt die Wirkungsgrade für drei in der Literatur angegebene Messungen. Die Ergebnisse sind übereinstimmend: Die Wirkungsgrade steigen selbst bei geringer Beaufschlagung steil an und erreichen etwa 85 % schon für ein sehr kleines Verhältnis von $Q/Q_{max} = 0,3$, um dann bis $Q = Q_{max}$ nahezu konstant zu bleiben. Bereits für sehr kleine Durchflüsse werden hohe Wirkungsgrade und damit eine effiziente Energieumwandlung erreicht. Gewöhnliche Turbinen für niedrige Fallhöhen können konstante hohe Wirkungsgrade für variable Durchflüsse nur mit Hilfe aktiver Steuerelemente (verstellbare Propellerflügel und Leitschaukeln) und mit komplexen Einlaufbauwerken erreichen. Bei den in Bild 4 gezeigten Messungen sollte beachtet werden, daß die in [14]

beschriebenen Messungen mit einer Vorlegewelle mit einem Übersetzungsverhältnis von 1 : 4 durchgeführt wurden. Anschließende Messungen an der Welle ergaben Übersetzungsverluste von 4 bis 4,5 %. Die in [16] und [17] beschriebenen Bremsversuche wurden an einer Vorlegewelle mit einem Übersetzungsverhältnis von 1 : 25 durchgeführt. Übersetzungsverluste wurden dabei nicht gemessen. Der „wahre“ maximale Wirkungsgrad eines Wasserrades im Labor kann daher mit etwa 88 bis 89 % angenommen werden. Eine vierte Messung im Jahr 1997 ergab Wirkungsgrade von 77 %, mit einer ähnlichen Q/Q_{max} -Verteilung [18]. Da keine Drehzahlvariation berichtet wurde, muß vermutet werden, daß die Messungen nicht notwendigerweise am optimalen Arbeitspunkt des Wasserrades durchgeführt wurden.

4.3 Leistungskennlinien

Die Leistung hydraulischer Maschinen ist eine Funktion des Durchflusses und der Geschwindigkeit der Maschine. Um die maximale Leistungsabgabe für eine gegebene Wasserkraftquelle zu erzielen, ist daher das Wissen um die optimalen Betriebsbedingungen der Maschine notwendig. Derartige Versuche sind in [14], [15], [17] beschrieben. Bild 5 zeigt einige typische Ergebnisse: Leistung als Funktion der Drehzahl für ein Wasserrad von 3,60 m Durchmesser und Durchflüsse von $Q = 0,060$ bis $0,149 \text{ m}^3/\text{s}$. Die erzielte Leistung ist eine Funktion der Drehzahl. Für bestimmte Drehzahlen wird die maximale Leistungsabgabe erzielt. Die Leistungsabgabe

erreicht für Drehzahlen von 6 bis 12 U/min ein Optimum, sinkt aber für niedrigere und höhere Drehzahlen schnell ab. Dies ist insbesondere bei größeren Durchflüssen zu beobachten. Die Wahl der richtigen Drehzahl ist für den effizienten Betrieb von Wasserrädern deshalb von entscheidender Bedeutung. Dies kann wie folgt erklärt werden: Der Wirkungsgrad des Wasserrades muß eine Funktion der relativen Geschwindigkeit der Zellen und des einlaufenden Wasserstrahls sein. Bewegen sich die Zellen zu langsam, werden sie zu voll gefüllt und beginnen sich vorzeitig zu entleeren. Dies senkt den Wirkungsgrad. Bewegen sich die Zellen zu schnell, können sie nicht mehr bis zum vorgesehenen Füllungsgrad gefüllt werden. Der Wirkungsgrad sinkt ebenfalls. Zwischen beiden Extremen liegt der optimale Arbeitspunkt.

4.4 Betrieb mit variabler Drehzahl

Versuche, unter Bedingungen durchgeführt, die einem freien Zufluß gleichzustellen sind (Zulauf mit Schütz, wobei die Schützöffnung nicht gefüllt war), sind in [14] und [15] beschrieben. Die Zulaufgeschwindigkeit des Wassers war hier eine Funktion der Wassermenge. Bild 6 zeigt einige der Versuchsergebnisse, wobei der Wirkungsgrad als Funktion der Drehzahl für vier verschiedene Durchflüsse (und Zulaufgeschwindigkeiten, die jedoch nicht gemessen wurden) gegeben wurde (Anm. der Autoren: 1 sec. ft. = $0,0278 \text{ m}^3/\text{s}$). Der Wirkungsgrad des Wasserrades war in diesen Versuchen eine Funktion der

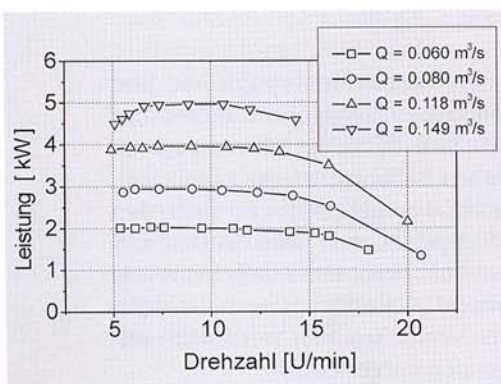


Bild 5. Leistung als Funktion der Drehzahl [17]

Fig. 5. Power output as a function of speed [17]

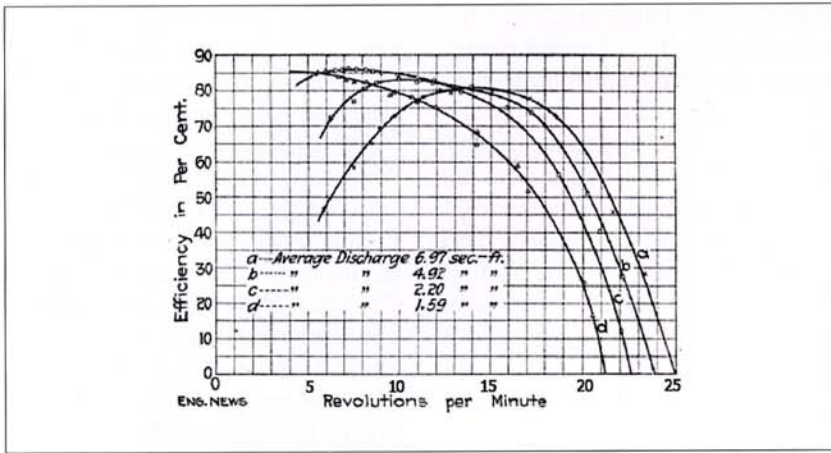


Bild 6. Wirkungsgrad (Efficiency) in [%] als Funktion der Drehzahl (Revolutions per Minute = U/min) [14]

Fig. 6. Efficiency in [%] as a function of speed [14]

Drehzahl und der Durchflußmenge und erreichte für jede Durchflußmenge ein Optimum. Bei niedrigeren oder höheren Drehzahlen ist ein Abfall des Wirkungsgrades zu beobachten (vgl. Abschn. 4.3). Für höhere Durchflüsse bewegt sich der optimale Arbeitspunkt in Richtung höhere Drehzahlen. Für diese Betriebsart muß die Drehzahl also der Wassermenge angeglichen werden.

4.5 Betrieb mit konstanter Drehzahl

Die in [17] beschriebenen Versuche zur Ermittlung des optimalen Arbeitspunktes wurden mit zwei verschiedenen Wassertiefen (0,20 und 0,40 m) und acht verschiedenen Durchflüssen im Zulaufkanal mit Schütz durchgeführt. Dies ergab Zulaufgeschwindigkeiten (in Zellenmitte) von 2,58 und 3,25 m/s. Die hier gezeigten typischen Versuchs-

ergebnisse wurden mit konstanter Wassermenge von $0,118 \text{ m}^3/\text{s}$ für beide Zulaufhöhen und Drehzahlen von 5 bis 20 U/min gemessen. Die Ergebnisse wurden, um allgemeingültige Schlüsse ziehen zu können, umgerechnet und als Funktion des Verhältnisses von Zellen- zu Zulaufgeschwindigkeit aufgetragen. Bild 7 zeigt die so gewonnenen Daten, nämlich Wirkungsgrad und Leistung als Funktion der relativen Geschwindigkeiten. Für beide Durchflüsse erreicht der Wirkungsgrad für Geschwindigkeitsverhältnisse zwischen 0,4 und 0,6 ein Optimum. Ein überschlächtiges Wasserrad, das mit konstanter Drehzahl betrieben wird, sollte folglich in diesem Bereich laufen. Obwohl die Wirkungsgrade für beide Zulaufhöhen etwa gleich sind, ist die Leistung für $t = 0,20 \text{ m}$ etwas geringer, da das vorhandene Potential geringer ist.

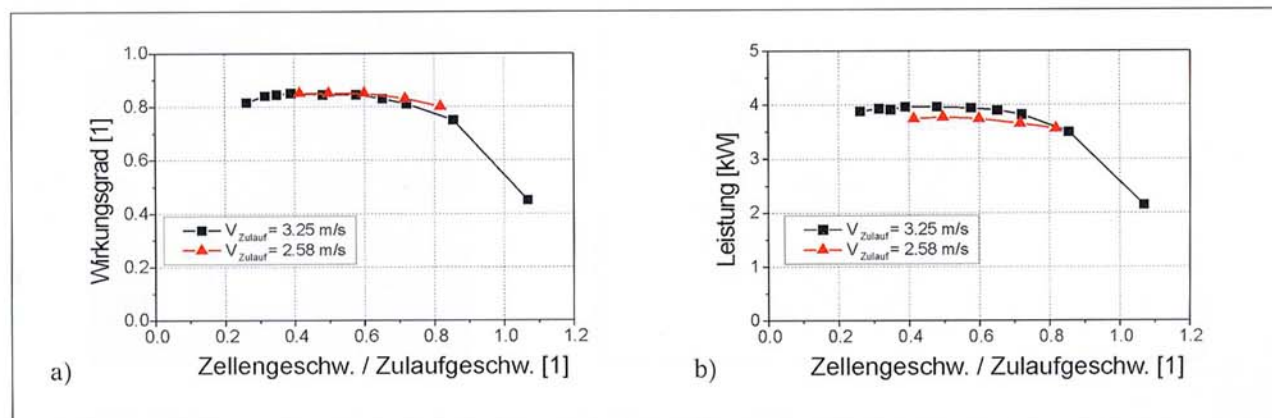


Bild 7. Einfluß variabler Zellen- und Zulaufgeschwindigkeit auf Leistung und Wirkungsgrad [17], a) Wirkungsgrad, b) Leistung

Fig. 7. Effect of variable inflow velocity and wheel speed on the efficiency [17], a) efficiency, b) power output

5 Unterschlächtige Wasserräder (Zuppingeräder)

Die Schaufelräder zur Ausnutzung auch kleinster Fallhöhen wurden in der Mitte des 19. Jh. von Zuppinger perfektioniert. Das Bild 1c zeigt ein unterschlächtiges oder Zuppingerad mit den typischen, gegen die Drehrichtung gekrümmten Schaufeln. Dieser Wasserradtyp ist besonders für niedrige Fallhöhen zwischen 0,5 und etwa 2,0 m geeignet. Die Raddurchmesser variieren bei Schaufellängen von 1,0 bis 1,4 m zwischen 4 und etwa 7 m.

Die Schaufeln sind so entworfen, daß Verluste beim Eintritt des Wassers in das Rad, und beim Austritt der Schaufeln aus dem Wasser, vermieden werden. Der Wasserspiegel zwischen den Schaufelblättern wird allmählich von oberstrom nach unterstrom reduziert (vgl. Bild 8). Dies bewirkt eine hydrostatische Kraft, die das Rad antreibt. Das Rad nutzt also allein die potentielle Energie des Wassers als Antriebskraft. Die Hydrowatt GmbH hat in den letzten 10 Jahren ca. 15 Zuppingeräder mit Durchmessern von 4,0 bis 7,5 m und Breiten von 0,5 bis 3,0 m installiert. Die Fallhöhen reichten dabei von 1,0 bis 2,2 m, mit typischen Durchflüssen von $0,5$ bis $3,1 \text{ m}^3/\text{s}$, und Leistungen (elektrisch) von 4 bis 45 kW. Bild 9a zeigt eine Seitenansicht eines neu installierten Rades, Bild 9b das eingebaute Rad, das einen Durchmesser von 6,5 m, eine Breite von 2,3 m und eine Fallhöhe von 1,2 m hat. Mit Durchflüssen von 1,5 bis $3,1 \text{ m}^3/\text{s}$ wird eine maximale elek-

trische Leistung von 20 kW erzeugt. Damit kann die Gesamteffizienz (elektrische Leistung geteilt durch die vorhandene Wasserkraft) in diesem Fall auf etwa 68 % geschätzt werden. Es sollte beachtet werden, daß für diesen Radtyp ein Rechen unbedingt erforderlich ist, um mechanische Beschädigungen der Schaufeln durch Treibgut zu vermeiden. Über die Leistungscharakteristika der unterschlächtigen Räder ist wenig bekannt. Einige in der Literatur erwähnte Bremsversuche, die bei der Abnahme bzw. in Streitfällen zwischen Betreiber und Hersteller durchgeführt wurden, ergaben eine Effizienz von 72 bis 76 %, bei sehr niedrigen Fallhöhen von 0,5 bis 1,0 m verringert sich die Effizienz auf 60 bis 65 % [8]. Diese Zahlen sind jedoch, da sie am eingebauten Rad ermittelt wurden,

wegen der mit Ungenauigkeiten behafteten damaligen Durchflußmessungen nur bedingt aussagekräftig. Um die Effizienzen der unterschlächtigen Wasserräder zu bestimmen, wurden Messungen von der Universität Stuttgart im Jahre 1977 durchgeführt [19]. Ein im Jahre 1886 gebautes *Zuppinger*rad, das noch in einer Getreidemühle in Betrieb war, wurde hierfür mit den notwendigen Meßgeräten ausgestattet. Das Wasserrad war für eine Fallhöhe von 1,36 m und einen Bemessungsdurchfluß von $3,0 \text{ m}^3/\text{s}$ entworfen worden und hatte einen Durchmesser von 6,00 m, bei einer Schaufelbreite von 2,50 m. Es war noch unverändert erhalten, außer daß einige der Holzplanken ersetzt worden waren. Bei zwei Messungen wurden Durchflüsse von 1,48 bzw. $3,10 \text{ m}^3/\text{s}$ bestimmt, die entsprechenden Lei-

stungen an der Welle waren 20,34 bzw. 41,36 kW bei einer Umdrehungszahl von 4,8 U/min. Bild 10 zeigt die Effizienzen, die aus den Messungen ermittelt wurden. Das Wasserrad erreichte 77 % für $Q/Q_{\text{max}} = 0,5$ und 71 % für $Q/Q_{\text{max}} = 1$; eine „erwartete“ Leistungskurve ist eingepasst. Diese Effizienzwerte sind erstaunlich hoch, insbesondere wenn man bedenkt, daß das Rad seit 91 Jahren kontinuierlich in Betrieb war und noch immer die originalen Gleitlager besaß. Außerdem wies das Wasserrad laut Bericht Spalten von 5 cm seitlich und 3 cm unten zwischen Beplankung und Kropfgerinne auf, so daß erhebliche Wasserverluste auftraten. Die Messungen zeigten deutlich, daß *Zuppinger*räder einen hohen Entwicklungsstand erreicht hatten; von einem modernen Rad mit besseren Lagern und niedrigeren seitlichen Wasserverlusten können noch deutlich bessere Effizienzen erwartet werden. Die in Bild 10 gezeigten Messungen reichen jedoch nicht aus, um eine Leistungskurve zu bestimmen und geben keine Information über den Einfluß der Drehzahl auf die Leistungsabgabe.

Die Abschätzung des Potentials einer bestehenden Wasserkraftquelle sowie die Bestimmung der optimalen Betriebsparameter für diese Räder beruhen daher vor allem auf

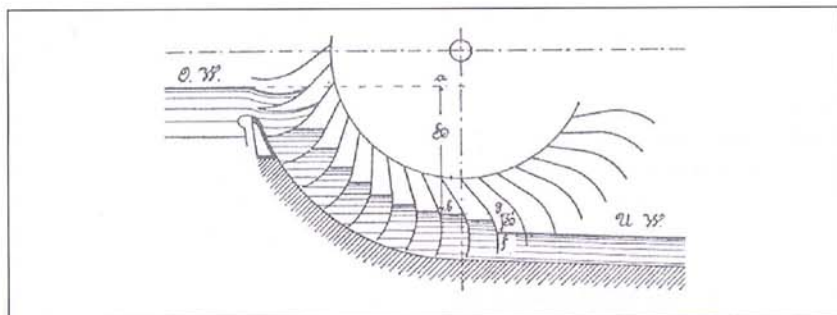


Bild 8. Durchströmung eines Zuppingerades [2]
Fig. 8. Flow through an undershot wheel

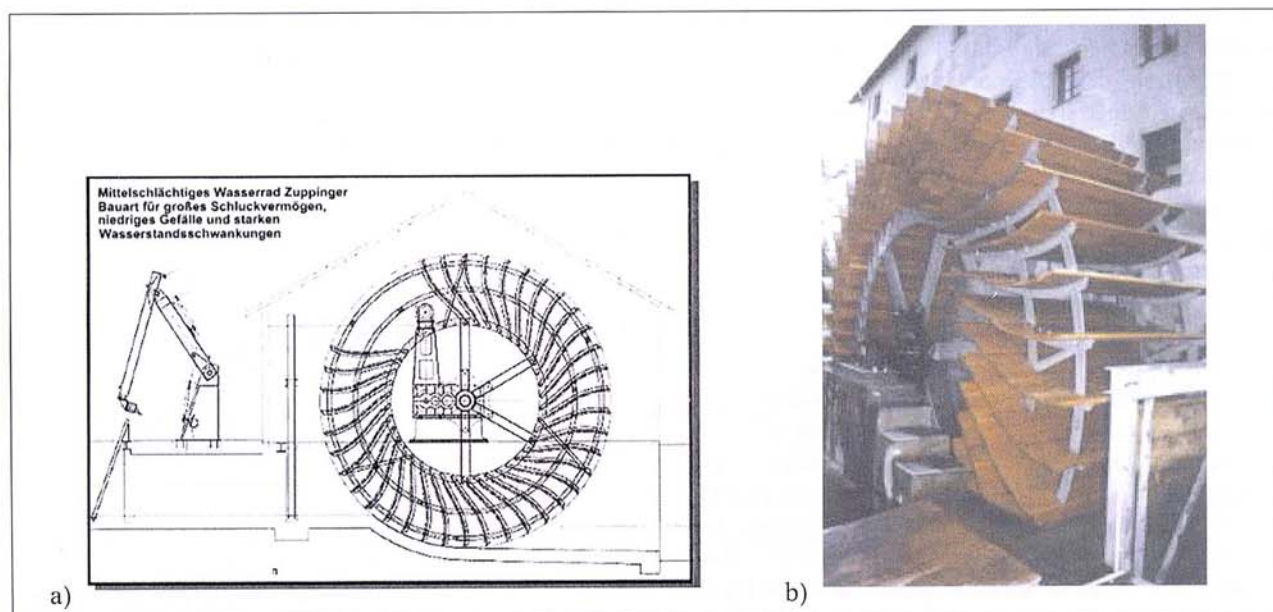


Bild 9. Zuppingerad (Neubau Hydrowatt GmbH), a) Seitenansicht Zuppingerad und Rechen, b) eingebautes Wasserrad

Fig. 9. Undershot or Zuppinger-wheel (Hydrowatt, 1996), a) side elevation, undershot wheel and trash rack, b) newly built water wheel

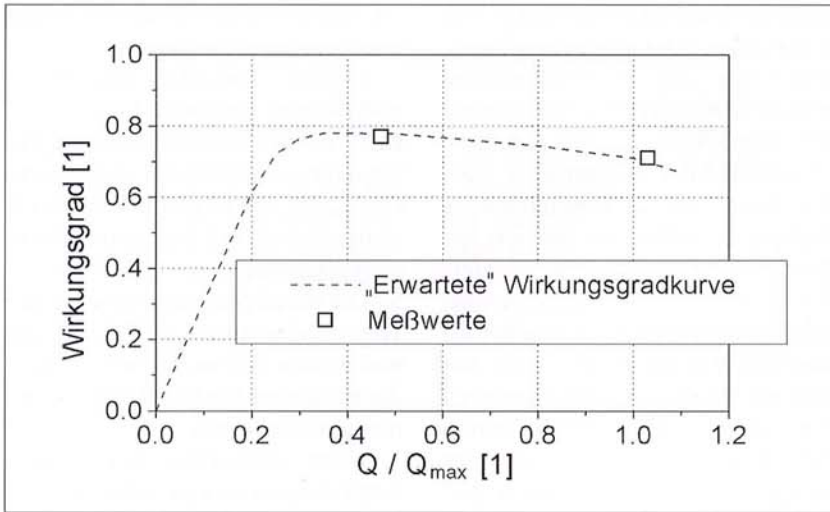


Bild 10. Effizienzmessungen an einem 91 Jahre alten Zuppingerad [19]
Fig. 10. Efficiency measurements on a 91 year old Zuppinger-wheel [19]

den Erfahrungswerten der Konstrukteure.

6 Stromerzeugung mit Wasserrädern

6.1 Allgemeines

Die Analyse der technischen Literatur zum Thema Wasserräder ergab, daß überschlächlige Wasserräder überraschend hohe Wirkungsgrade für stark schwankende Wassermengen haben. Von unterschlächtigen Wasserrädern kann angenommen werden, daß sie – wegen des gleichen Wirkmechanismus – einen ähnlichen Leistungskurvenverlauf bei etwa 10 % geringerer Leistung haben. Für die Anwendung der Wasserräder zur Stromerzeugung ergeben sich Anforderungen und Betriebsbedingungen, die nicht unwesentlich von denen abweichen, die früher für die Nutzung als mechanischer Antrieb für einfache Maschinen notwendig waren. Dies ist insbesondere der Fall, weil das Wasserrad zur Stromerzeugung am Leistungsoptimum betrieben werden sollte und das Stromnetz im Parallelbetrieb als variable Last wirken kann.

6.2 Oberschlächlige Wasserräder

Das Verhältnis von Peripheriegeschwindigkeit der Zellen und der Geschwindigkeit des zulaufenden Wasserstrahles soll im Bereich von 0,4 bis 0,6 liegen und konstant sein. Dies kann wie folgt erreicht werden: 1. Zulaufregelung mit einem Schütz oder Kulissenschieber: Wasserspiegel und damit die Zulaufgeschwin-

digkeit bleiben oberstrom für alle Durchflüsse konstant, konstante Drehzahl für den Betrieb am optimalen Arbeitspunkt (siehe Versuche in [17])

2. keine Zulaufregelung: Betrieb mit variabler Drehzahl am optimalen Arbeitspunkt (siehe Versuche in [14])

Hinsichtlich des Wirkungsgrades besteht kein Unterschied zwischen beiden Betriebsarten. Betriebsart (1) erfordert durch die Art der Einlaufgestaltung ein kleineres und damit preislich günstigeres Wasserrad. Für die Erzeugung elektrischen Stroms hat der Betrieb mit konstanter Drehzahl große Vorteile, da Wechselstromgeneratoren mit konstanter Drehzahl betrieben werden müssen, um den Synchronbetrieb mit dem Wechselstromnetz zu erreichen. Ein Betrieb mit variabler Drehzahl ist möglich, dann sind jedoch besondere Zusatzgeräte (Gleichrichter, Kontrolle, Wechselrichter) notwendig. Für die Stromerzeugung ist daher das Wasserrad mit konstanter Drehzahl und gesteuertem Einstrom geeigneter bzw. kostengünstiger. Für beide Betriebsarten ist jedoch ein aktives Steuerungselement (Schütz bzw. Steuerung nach Durchflußmenge) erforderlich, um das Rad bei wechselnder Beaufschlagung am optimalen Arbeitspunkt zu halten. Weitere Untersuchungen zu diesem Thema sind nach Ansicht der Autoren notwendig. Die niedrige Drehzahl der Wasserräder erfordert Getriebe mit großen Übersetzungsverhältnissen

(etwa 1 : 80), um Standard-Wechselstromgeneratoren mit 50 Hz betreiben zu können. Heute sind sehr effiziente Getriebe für solche Einsatzbereiche mit Verlusten von weniger als 3 % erhältlich.

6.3 Unterschlächtige Wasserräder

Das derzeit vorhandene Wissen gestattet es nicht, Leistungs- oder Betriebskriterien für Zuppingeräder aufzustellen. Da diese Räder jedoch ebenfalls die potentielle Energie des Wassers nutzen, kann angenommen werden, daß hier ebenfalls zwei Betriebsarten möglich sind und daß ein Leistungsoptimum als Funktion der Drehzahl besteht. Die Fachliteratur empfiehlt Umdrehungsgeschwindigkeiten der Schaufelenden von 1,4 bis 1,8 m/s an [2], [8]. Diese müßten mit der Zulaufgeschwindigkeit korreliert werden, um die für eine Stromerzeugung notwendige konstante Drehzahl am Leistungsoptimum zu erhalten. Hier besteht – in Kombination mit der Forderung nach einem besseren Preis-Leistungsverhältnis – noch erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

7 Marktpotential und Wirtschaftlichkeit

7.1 Marktpotential

Gegenwärtig gibt es in Deutschland im Bereich Kleinstwasserkraft ein geschätztes Potential von 500 MW, das mit Wasserrädern genutzt werden könnte [4]. Dabei kann nach Schätzungen der Autoren davon ausgegangen werden, daß auf einen Standort für ein überschlächliges Wasserrad etwa 3 bis 4 Standorte für unterschlächtige Räder kommen. Gegenwärtig beträgt die Leistung der installierten Wasserräder im Mittel 17 kW. Diese Zahlen weisen auf eine signifikante Menge an ungenutzter Energie sowie auf ein bedeutendes Marktpotential – vor allem für unterschlächtige Wasserräder – hin.

7.2 Wirtschaftlichkeit

Der Preis für überschlächlige Wasserräder wird mit 4500 bis 5000 €/kW installierte Leistung angegeben. Vereinfachend wird im folgenden der break-even der Investition als Vergleichskriterium für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

verwendet. Folgende Annahmen werden getroffen:

1. Der Betreiber verbraucht die erzeugte Energie selbst.
2. Der Strompreis beträgt 11,5 c/kWh.
3. Das Wasserrad läuft 6000 Stunden (ca. 68 %) pro Jahr mit nominaler Leistung.

Damit ergibt sich – unter bewußter Vernachlässigung von Unterhaltungskosten, Abschreibung, Fremdfinanzierungskosten und Inflation – der break-even nach 7,25 Jahren. Die Lebensdauer eines Wasserrades kann mit mindestens 25 Jahren angesetzt werden.

Unterschlächlige Wasserräder werden für 8000 bis 10000 €/kW gebaut. Dies führt wegen der geringeren Effizienz und der höheren Investitionskosten pro Leistungseinheit zum break-even nach 14,5 Jahren. Dieser Radtyp befindet sich damit in der derzeit gebauten Form an der Grenze der Wirtschaftlichkeit. Zum Vergleich: Eine Kaplan-turbine in der Leitungsklasse bis 100 kW kostet etwa 15000 bis 16000 €/kW installierte Kapazität [20]. Unterschlächlige Räder wurden empirisch optimiert, jedoch noch nie wissenschaftlich erforscht. Es darf daher angenommen werden, daß bei dieser Wasserradform noch ein bedeutendes Entwicklungspotential besteht und bereits kleine Verbesserungen die Wirtschaftlichkeit der unterschlächtigen Wasserräder beachtlich steigern werden. Wasserräder bieten daher die Möglichkeit zur wirtschaftlichen Ausnutzung kleiner Wasserkräfte und stellen – wegen ihrer im Vergleich zur break-even-Zeit langen Lebensdauer – eine sehr interessante Alternative zu Turbinen dar.

8 Weitere Aspekte

Die in diesem Beitrag dargestellten Versuchsergebnisse weisen Wasserräder als effiziente und wirtschaftliche Kraftmaschinen für kleine Wasserkraftquellen mit niedriger Fallhöhe aus. Wasserräder bieten ebenfalls die Möglichkeit, Siedlungsinseln zu versorgen oder dezentrale Stromversorgungen in Entwicklungsländern aufzubauen. Was die Genehmigung und den Betrieb von Wasserrädern angeht,

sollte noch angemerkt werden, daß diese wegen ihrer langsamen Drehzahl und der verhältnismäßig großen Zellen als sehr fischfreundlich angesehen werden können. Oberschlächlige Wasserräder werden kaum durch schwimmendes Treibgut beeinflusst, so daß ein Rechen hier meistens nicht erforderlich ist. Für Genehmigungsverfahren ist häufig auch der visuelle Einfluß der Baumaßnahme von Bedeutung. Hier wird ein Wasserrad von der Öffentlichkeit aufgrund der langsamen Bewegung und des „Images“ (das sich hier positiv auswirkt) häufig als nicht beeinträchtigend oder gar als Bereicherung empfunden.

9 Schluß

Obwohl bis in die 30er Jahre des 20. Jh. mehrere zehntausend Wasserräder in Deutschland in Betrieb waren, ist sehr wenig über die Eigenschaften dieser hydraulischen Maschinen bekannt. Einige detaillierte Untersuchungen zu diesem Thema wurden in Deutschland und den USA zwischen 1910 und 1935 durchgeführt, deren Ergebnisse heute jedoch praktisch unbekannt sind. Um eine breitere Wissensbasis über Wasserräder zu schaffen, wurden die erhältlichen Informationen gesammelt und unter besonderer Berücksichtigung der Nutzung von Wasserrädern zur Erzeugung elektrischer Energie ausgewertet. Die folgenden Schlußfolgerungen können gezogen werden:

1. Oberschlächlige Wasserräder sind sehr effiziente Energiewandler mit maximalen Wirkungsgraden von mehr als 80 bis 85 % für den weiten Bereich von Beaufschlagungen von $0,2 \leq Q/Q_{\max} \leq 1$.
2. Messungen an einem unterschlächtigen Wasserrad ergaben Effizienzen von 71 bis 77 % für $0,5 < Q/Q_{\max} < 1,0$.
3. Wasserräder werden, genau wie Turbinen, für eine gegebene Situation berechnet und entworfen. Sie müssen innerhalb gewisser Parametergrenzen betrieben werden, um optimale Wirkungsgrade zu erhalten.
4. Für den Betrieb am optimalen Arbeitspunkt sind zwei Betriebsarten möglich:

- konstante Zuflußgeschwindigkeit und konstante Drehzahl
 - variable Zuflußgeschwindigkeit und variable Drehzahl
- Beide Betriebsarten erfordern aktive Steuerungsmaßnahmen. Zur Stromerzeugung im Netz-Parallelbetrieb ist der Betrieb mit konstanter Drehzahl geeigneter.

5. Die günstigen Eigenschaften der Wasserräder sind sowohl der Öffentlichkeit als auch noch vielen der in diesem Bereich tätigen Ingenieure unbekannt.

Gut entworfene Wasserräder können somit als eine attraktive und wirtschaftliche Lösung für die Nutzung kleiner Wasserkräfte mit niedrigen Fallhöhen angesehen werden.

Literatur

- [1] Reynolds, T. S.: Stronger than a hundred men. J. Hopkins University Press: Baltimore & London, 1983.
- [2] Müller, W.: Die Wasserräder. Unveränderter Nachdruck der 2. Aufl., Moritz Schäfer Verlag Detmold, 1939.
- [3] Albrecht, O.: Theorie der hydraulischen Kraftmaschinen, nach der Vorlesung von Franz Grashof, Handschrift, Universitätsbibliothek Karlsruhe, 1900.
- [4] König, F., Jehle, C.: Bau von Wasserkraftanlagen, 3. Aufl., C. F. Müller Verlag Karlsruhe, 1997.
- [5] Müller, G., Kauppert, K.: Old Water Mills-Britain's new Source of Energy?, Proc. ICE Civil Engineering, (2002), Vol. 150, No. 4, S. 178–186.
- [6] Müller, G., Kauppert, K., Mach, R.: Back to the Future. Int. Water Power & Dam Construction, (2002), Nr. 8, S. 30–33.
- [7] Fairbairn, W.: Treatise on Mills and Mill-Works, Part 1., 3rd Ed., Longmans, Green & Co., London, 1874.
- [8] Müller, W.: Die eisernen Wasserräder, Erster Teil: Die Zellenräder & Zweiter Teil: Die Schaufelräder. Veit & Comp., Leipzig, 1899.
- [9] v. Bach, C.: Die Wasserräder. Konrad Wittwer Verlag Stuttgart, 1886.
- [10] Frizell, J. P.: Water power: An outline of the Development and Application of the Energy of Flowing Water. John Wiley & Sons New York, 1901.
- [11] v. Bach, C.: Die Wasserräder: Atlas. Konrad Wittwer Verlag Stuttgart, 1886.

- [12] *Bresse, M.*: Water-Wheels or Hydraulic Motors. J. Wiley & Sons New York, 1876.
- [13] *Müller, W.*: Die eisernen Wasserräder: Atlas. Veit & Comp., Leipzig, 1899.
- [14] *Weidner, C. R.*: Theory and test of an overshot water wheel. Bulletin of the University of Wisconsin No. 529, Engineering Series (1913), Vol. 7, No. 2, S. 117–254.
- [15] *Weidner, C. R.*: Test of a steel overshot water wheel. Engineering News (1913), Vol. 69, No. 1, S. 39–40.
- [16] *Staus, A.*: Wasserradversuche. Die Mühle (1928), Jg. 65, Nr. 47.
- [17] *Meerwarth, K. D.*: Experimentelle und theoretische Untersuchungen am überschlächtigen Wasserrad. Dissertation. Technische Hochschule Stuttgart, 1935.
- [18] *Günther, T.*: Das Turas-Wasserrad, ein einseitig gelagertes Wasserrad. *Wasserkraft & Energie* (1997), Jg. 3, S. 52–56.
- [19] *Neumayer, H., Rempp, W., Ruppert, J., Schwörer, R.*: Untersuchungen am Wasserrad-Triebwerk der Kunstmühle W. Seifried KG Waldkirch/Br. Techn. Bericht der Universität Stuttgart, 1979.
- [20] *Hydrowatt.*: Informationsbrochure. 2000.

Internetadressen:

www.bega-wasserkraft.de
www.hydrowatt.de
www.waterwheelfactory.com

Autoren dieses Beitrages:

Dr. Gerald Müller, Klemens Kauppert, IFMW – gemeinnützige Forschungsgesellschaft mbH, Bahnhofstraße 9, 76137 Karlsruhe, email: info@ifmw-ka.de