

Alte Energiewandler: Wasserräder und ihre Herausforderung für Forschung und Praxis

Olivier Schwyzer, Matthias von Harten, Shakun Paudel und Nicole Saenger

Zusammenfassung

An der Hochschule Darmstadt werden unterschiedliche Wasserräder zu Nutzung geringer Fallhöhen an Modellen unter Laborbedingungen untersucht. Dabei wird ein Rad mit offener Nabe (Zuppinger-Wasserrad) und zwei Wasserräder mit geschlossener Nabe (Dethridge Wheel und Wasserdruckmaschine) hinsichtlich ihrer Leistung analysiert und optimiert. Die Untersuchung macht deutlich, dass mit dem seit dem 19. Jh. bekannten Zuppinger-Wasserrad ein Wirkungsgrad von ca. 80 % erzielt werden kann. Neue Entwicklungen von Wasserrädern mit geschlossener Nabe erzielen Wirkungsgrade von knapp 60 % und haben somit einen ca. 20 % niedrigeren Wirkungsgrad als Räder mit offener Nabe. Wasserräder mit geschlossener Nabe müssen im Gegensatz zu Rädern mit offener Nabe zwingend mit variabler Drehzahl betrieben werden, um ein breites Abflussspektrum effizient nutzen zu können. Zudem ist durch die geringe Anzahl Schaufeln bei Rädern mit geschlossener Nabe die Drehbewegung sehr ungleichmäßig. Für diese Räder ist die Realisierung einer drehzahlvariablen Lastabnahme die maßgebende Herausforderung für die Zukunft. Beim Zuppinger-Wasserrad kann mit einer drehzahlvariablen Lastabnahme der hohe Wirkungsgrad von 80 % über ein größeres Abflussspektrum genutzt werden, beim Dethridge Wheel und der Wasserdruckmaschine mit geschlossener Nabe ist sie zwingende Voraussetzung zur Nutzung unterschiedlicher Abflüsse.

1 Einleitung

Die Wasserkraft ist eine der ältesten erneuerbaren Energiequellen. In den Anfängen wurde die kleine Wasserkraft in Form von Wasserrädern genutzt, die Anfang des 20. Jahrhunderts der großen Wasserkraft durch die Entwicklung von Turbinen wich. Die bestehenden Mühlen wurden oft stillgelegt und verfielen. Heute spielt die Wandlung der kleinen Wasserkraft zunehmend wieder eine Rolle im Kanon der erneuerbaren Energien. Immer häufiger werden an ehemaligen Mühlenstandorten oder bestehenden Wehren Wasserräder eingebaut, da sie sehr gut mit geringen Fallhöhen und schwankenden Abflüssen umgehen können.

Es existieren unterschiedliche Arten von Wasserrädern, die sich in ihrer Bau- und Funktionsweise unterscheiden. Die geläufigste Einteilung ist eine Unterscheidung nach dem Eintrittspunkt des Wassers in das Rad in oberflächliche (oberhalb der Radachse), mittelschlächliche (etwa auf Höhe der Radachse) und unterschlächliche (unterhalb der Radachse) Wasserräder (Giesecke und Heimerl 2014). Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal ist die Ausbildung der Nabe. Oberschlächliche Wasserräder besitzen innere Begrenzungen, die Radboden oder Nabe genannt werden und ein Übertreten des Wassers in das Radinnere verhindern. In der Literatur wird von der Installation von einem Radboden an mittel- und unterschlächlichen Wasserrädern (z.B. Zuppinger-Wasserrad) abgeraten (Redtenbacher 1846; Bach 1886). Mittelschlächliche Wasserkraftwandler aus der jüngeren Entwicklungsgeschichte der Wasserkraft besitzen allerdings diese geschlossene Nabe (z.B. Wasserdruckmaschine und Dethridge Wheel), um den Oberwasserstand selbst aufstauen und somit auf ein Wehr verzichten zu können.

An der Hochschule Darmstadt werden die Wasserräder beider Arten an physikalischen und numerischen Modellen analysiert. Zum einen geht es hierbei um die hydraulische Optimierung und damit um die Erhöhung der Leistungsausbeute, zum anderen wird die ökologische Qualität hinsichtlich Fisch- und Sedimentdurchgängigkeit der Räder genauer untersucht.

2 Charakteristika der Räder

Im Folgenden werden die beiden Radtypen nach offener und geschlossener Nabe unterschieden und mit ihren Spezifika dargestellt.

2.1 Offene Nabe: Mittel- und unterschlächtige Wasserräder

In den letzten 200 Jahren haben sich verschiedene mittel- und unterschlächtige Wasserräder bewährt, die unterschiedliche Einsatzbereiche aus Fallhöhe und Durchfluss abdecken. Das als Zuppinger-Wasserrad bezeichnete, von Walter Zuppinger Ende des 19. Jh. entwickelte Rad, setzte sich in den vergangenen Jahrzehnten als Anlage mit einem besonders breiten Einsatzspektrum durch (siehe Abbildung 1a). Die Besonderheit der Zuppinger-Wasserräder ist, dass die Schaufeln die Form einer Evolvente haben. Gegenüber anderen mittel- und unterschlächtigen Rädern hat das Zuppinger-Wasserrad die Vorteile, dass es für Standorte mit stark schwankendem Unterwasserspiegel und deutlich vom Bemessungsdurchfluss variierender Wasserdotation geeignet ist (Müller 1899). Zuppinger-Wasserräder finden ihre Anwendung bei Fallhöhen zwischen 0,6 bis 4,0 m und nutzen Durchflüssen zwischen 0,3 und 5,0 m³s⁻¹. In der historischen Literatur werden zu Zuppinger-Wasserrädern Wirkungsgrade von etwa 80% angegeben (Müller 1899).

2.2 Geschlossene Nabe: Dethridge Wheel und Wasserdruckmaschine

Ein Wasserrad mit geschlossener Nabe ähnelt in seinem Aussehen einem oben beschriebenen mittelschlächtigen Wasserrad, weist jedoch hinsichtlich der Funktionsweise deutliche Unterschiede auf. Die Wasserräder mit geschlossener Nabe haben im Vergleich zu mittelschlächtigen Wasserrädern deutlich weniger Schaufeln (12 statt ca. 40) und in der Radmitte eine geschlossene Nabe (siehe Abbildungen 1b und 1c). Die Nabe dient dazu, das Oberwasser aufzustauen und damit den Oberwasserstand zu erhöhen. Der so entstehende erhöhte hydrostatische Druckunterschied zwischen Ober- und Unterwasser wird zur Energiegewinnung genutzt (Senior et al. 2010). Wasserräder mit geschlossener Nabe werden mit Drehzahlen zwischen 2 und maximal 12 min⁻¹ drehzahlvariabel betrieben, um möglichst das ganze Abflussspektrum energetisch nutzen zu können. Die Technologie ist potenziell geeignet Fallhöhen zwischen 0,5 bis 2,5 m in kleinen und mittleren Fließgewässern, Betriebs- und Bewässerungskanälen bis zu einem Durchfluss von maximal 4,25 m³s⁻¹ pro Meter Radbreite energetisch zu nutzen.

Wasserräder mit geschlossener Nabe sind vergleichsweise wenig erforscht. Obwohl die ersten Aufzeichnungen aus dem 19. Jh. stammen, wurde die Technologie erst zum Ende des 20. Jh. wiederentdeckt und weiterentwickelt. Forschungsarbeiten aus jüngster Zeit deuten darauf hin, dass Räder dieser Art zur energetischen Nutzung prinzipiell geeignet sind. Es ist eine vergleichsweise einfache und robuste Technologie, und könnte im ländlichen Raum (z.B. Entwicklungsländern) zur Herstellung einer unabhängigen und zuverlässigen Stromversorgung zum Einsatz kommen.

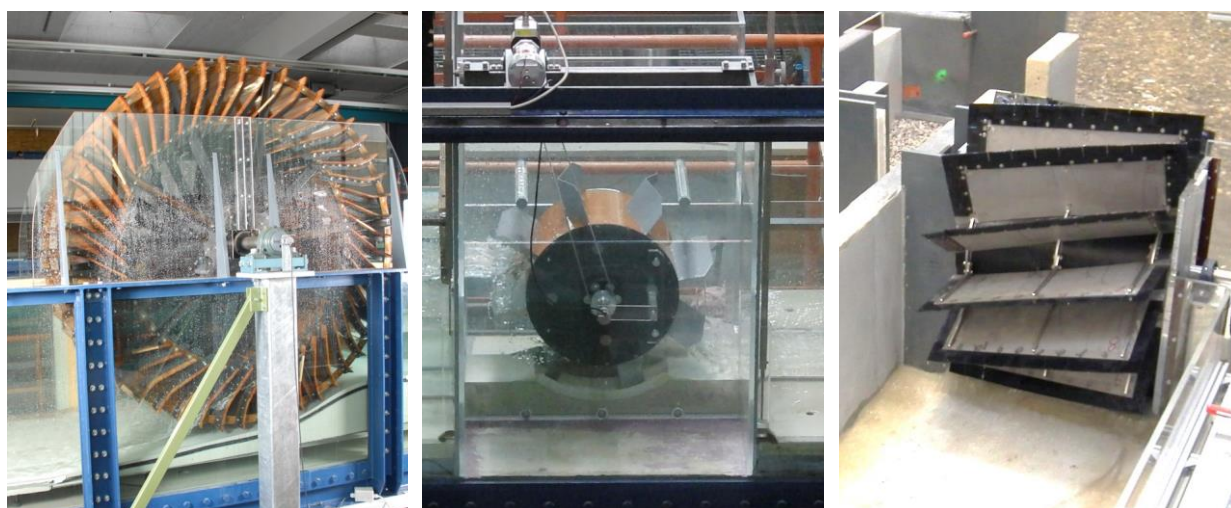
2.3 Unterscheidungsmerkmale

Die geschlossene Nabe führt zu zwei wesentlichen Charaktereigenschaften im Betrieb. Durch die abgeschlossenen Zellen, die im Betrieb, immer vollgefüllt sind, ergibt sich im relevanten Durchflussbereich ein lineares Verhältnis zwischen Drehzahl und Durchfluss. Weiter existiert ein ebenfalls lineares Verhältnis von Drehmoment zu Drehzahl.

Dies führt in der Praxis dazu, dass Räder mit geschlossener Nabe zwingend drehzahlvariabel betrieben werden müssen, um einen, für gute Wirkungsgrade erforderlichen konstanten Oberwasserstand erreichen zu können. Aufgrund des beschriebenen linearen Verhältnisses zwischen Drehzahl und Durchfluss sind die Räder mit geschlossener Nabe prinzipiell auch zur Durchflussmessung geeignet.

3 Hydraulische Modelle

Zur Untersuchung der beiden beschriebenen Wasserrad-Typen wurden in den letzten fünf Jahren drei maßstäbliche Modell in der Wasserbauhalle der Hochschule Darmstadt aufgebaut und detailliert untersucht. Im Folgenden wird der Versuchsaufbau der drei Modelle kurz beschrieben. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die wichtigsten geometrischen Größen der drei Modelle.



a) Zuppinger-Wasserrad

b) Dethridge Wheel

c) Wasserdruckmaschine

Abb. 1 An der Hochschule Darmstadt untersuchte Wasserräder

3.1 Versuch 1: Zuppinger-Wasserrad

In einer 20 m langen und 1 m breiten Rinne wurde ein Zuppinger-Wasserrad im Maßstab 1:5 aufgebaut (siehe Abbildung 1a). Das Modell hat einen Außendurchmesser von 1,80 m und eine Breite von 0,90 m. Der maßstabsgetreue Bemessungsdurchfluss (Q_{Bem}) beträgt 125 l s^{-1} . Die 50 Schaufeln sind in der für Zuppinger-Wasserräder charakteristischen evolventenform ausgebildet und besitzen eine Holzbeplankung aus Lärchenholz mit einer Stärke von 8 mm. Das seitliche Spaltmaß und das Spaltmaß zwischen Wasserrad und Kropf betragen jeweils 5 mm.

Es werden die Wasserstände über Drucktransmitter (Keller: PR-41X), die Drehzahl über einen Drehgeber (ifm electronic: RB1015), der Durchfluss über einen magnetisch-induktiven Durchflussmesser (MID) (Krohne: AQUAFLUX F/6) und das Drehmoment über einen Drehmomentaufnehmer (ETH-Messtechnik: DRFL-VI-1000-A) gemessen. Die Fallhöhe wird aus der Differenz des Oberwasserstandes und des Wasserstandes im Unterwasser bestimmt – direkt

dort, wo die letzte Schaufel aus dem Wasser auftaucht. Die Messwerte für Wasserstände, Durchfluss, Drehmoment und Drehzahl werden elektronisch über eine Messkarte (NI USB 6210) erfasst.

Jede Messreihe besteht aus der Aufnahme unterschiedlicher Durchfluss-Unterwasserstands-Kombinationen, während die Drehzahl auf einem konstanten Wert gehalten wird. Das untersuchte Durchflussspektrum hat eine Spannweite von 25 bis 200 ls^{-1} . Die Unterwasserstände variieren zwischen freiem Ausfluss und steigern in 5 cm-Schritten bis 35 cm.

In den Modellversuchen wird geprüft, wie sich beispielsweise variierende Durchflüsse, unterschiedliche Unterwasserstände, Spaltweiten zwischen Schaufeln und Kropfgerinne, Schaufelanzahl, Drehzahl und Schaufelform auf den Wirkungsgrad / die Leistung des Wasserrades auswirken und wie sie die ökologische Durchgängigkeit beeinflussen.

3.2 Versuch 2: Dethridge Wheel

Ein Modell eines Dethridge Wheels im Maßstab 1:2 wurde in einer Laborrinne mit 20 m Länge, 1 m Breite und 1,5 m Höhe aufgebaut (siehe Abbildung 1b). Das Rad hat einen Außendurchmesser von 0,60 m, einen Nabendurchmesser von 0,40 m und eine Breite von 0,25 m. Am Nabenumfang sind am Rad acht, 10 cm lange, V-förmige Schaufeln mit einem Innenwinkel von 127° gleichmäßig verteilt angeordnet. Das Kropfgerinne schließt 70° mit ein und ist symmetrisch unter der Radachse angeordnet. Die Nabe und das Kropfgerinne sind aus Kunststoff (PVC) und die Welle und Schaufeln aus Stahl hergestellt. Das Spaltmaß zwischen Schaufel und Kropfgerinne und Schaufel und seitlichem Gehäuse beträgt 1 mm.

Der Durchfluss wird mittels MID (Krohne IFC 110), das Drehmoment an der Wasserradwelle mittels Drehmomentaufnehmer (HBM T22) und die Drehzahl mittels Drehzahlgeber (ifm HB 1015) gemessen. Die Wasserstände Ober- und Unterstrom des Rades werden mit Stechpegel in kommunizierenden Röhren am Rinnenrand bestimmt. Die Drehzahl des Rades wird durch Variation der Bremsleistung eines angeschlossenen Hysteresebremssystems (Magtrol) geregelt. Die Messwerte für Durchfluss, Drehmoment und Drehzahl werden elektronisch über eine Messkarte (NI USB 6210) und die Wasserstände händisch aufgenommen. Abbildung 1b zeigt das aufgebaute Modellrad.

Die Untersuchungen wurden bei Abflüssen zwischen 5 und 35 ls^{-1} durchgeführt. Bei den Modellversuchen zum Dethridge Wheel wurden unterschiedliche Schaufelanzahl, Spaltweiten zwischen Kropf und Schaufel und Gehäuselängen über das gesamte Abflussspektrum der Anlage analysiert. Zur genauen Analyse von Strömungsvorgängen, insbesondere Turbulenzen, wurden bei diesem Rad auch numerische Modelle eingesetzt; das physikalische Modell diente dabei der Kalibrierung und Validierung der numerischen Ergebnisse. Die Übereinstimmung zwischen numerischem und physikalischem Modell kann insgesamt als gut bewertet werden (Paudel 2016).

3.3 Versuch 3: Wasserdruckmaschine

Die Versuchsanlage wurde in einer ca. 20 m langen und 3 m breiten Versuchsrinne aufgebaut. Bei der Versuchsanlage handelt es sich um ein Modell im Maßstab 1:2,5 einer bestehenden Pilotanlage am Iskar (BG). Das Rad hat einen Außendurchmesser von 1,1 m, einen Nabendurchmesser von 0,4 m und eine Breite von 0,8 m. Das ist vergleichsweise groß, damit auch Tierversuche am Modell durchgeführt werden können. Um verschiedene Schaufelformen und Schaufelanzahlen zu untersuchen, wurde das Modell mit maximaler Flexibilität konzipiert. In

der ersten untersuchten Variante hat das Modell 12 flache, in einem Winkel von 20° zur Radachse angeordnete, am Nabenkörper angebrachte, Schaufeln. Das Kropfgerinne schließt 45° ein und endet am unteren Totpunkt der Maschine. Die Nabe ist aus Kunststoff (PE), die Schaufeln, Welle sowie die tragenden Bauteile sind aus rostfreiem Stahl und das Kropfgerinne aus Beton und extrudiertem Polystyrol (XPS) hergestellt. Die Schaufelenden sind mit Kunststoffleisten (EPDM) ausgestattet, um das Verletzungsrisiko für Tiere, wenn sie von einer Schaufel getroffen werden, zu minimieren (siehe Abbildung 1c). Das Spaltmaß zwischen drehendem Rad / Schaufel und Umgebung beträgt seitlich und unten 1 mm.

Die Wasserdruckmaschine wird elektronisch über eine Magnetpulverbremse vom Typ FRAT 2002 der Firma Mobac GmbH gebremst. Die Drehmomentenmessung erfolgt mittels TRS 200 der Fa. Liedtke, die Drehzahlmessung mit einem Drehzahlgeber vom Typ ITD 01 A 4 1024 H NX KR1 S6 der Fa. Thalheim und die Wasserstände werden mit Ultraschallsensoren vom Typ BUS R06K1-XA-12/070-S75G der Fa. Balluff erfasst. Der Durchfluss wird durch Messung der Überfallhöhe über ein Thomson Wehr mit einem Ultraschallsensor bestimmt. Die Datenverarbeitung und -aufzeichnung erfolgt für alle Messwerte elektronisch durch einen Compact RIO-9074 von National Instruments.

Am Modell Wasserdruckmaschine werden unterschiedliche Spaltmaße und Materialien für die Schaufelenden bei Durchflüssen zwischen 50 und 180 ls⁻¹ untersucht. Es werden hierbei Experimente mit alternativen Schaufelmaterialien aus EPDM zum Fischschutz sowie allgemeine Untersuchungen zur Durchgängigkeit für Fische mit Dummies und echten Fischen sowie Sedimenten durchgeführt.

Tab. 1 Zusammenfassung der geometrischen Parameter der untersuchten Wasserräder

	Zuppinger-Wasserrad	Dethridge Wheel	Wasserdruckmaschine
Durchmesser [m]	1,8	0,60	1,1
Breite [m]	0,9	0,25	0,8
Anzahl Schaufeln	50	8	12
Durchflussbereich [ls ⁻¹]	25-200	6-35	50-180

3.4 Auswertung

Bei allen Rädern werden die Größen für Drehmoment (M), Drehzahl (n), Wasserstand Oberstrom (h_1), Wasserstand Unterstrom (h_2) und Durchfluss (Q) messtechnisch erfasst. Der Wirkungsgrad (η) wird als Quotient aus mechanischer Leistung (P_{Me}) und hydraulischer Leistung (P_{Hy}) gebildet (Giesecke und Heimerl 2014).

$$\eta = \frac{P_{Me}}{P_{Hy}} \quad [1]$$

mit

$$P_{Me} = 2\pi Mn \quad [2]$$

$$P_{Hy} = \rho g Q H \quad [3]$$

Das gesamte Energiegefälle (H) am Energiewandler wird als Differenz aus Druck- und Geschwindigkeitshöhe vom Einlauf zum Auslauf definiert

$$H = \left(h_1 + \frac{v_1^2}{2g} \right) - \left(h_2 + \frac{v_2^2}{2g} \right) \quad [4]$$

Die mittlere Geschwindigkeit wird dabei aufgrund der komplexen Fließvorgänge direkt vor und nach dem Rad mit der Kontinuitätsgleichung ($v=Q/A$) aus der Breite, Höhe und Durchfluss gebildet.

Weil die drei Wasserräder bei sehr unterschiedlichen Durchflüssen betrieben werden, wird zum Vergleich der Ergebnisse in Abbildung 2 der Durchfluss in Relation zum Durchfluss mit dem höchsten Wirkungsgrad (η_{max}), dem sogenannten Bemessungsdurchfluss (Q/Q_{Bem}) dargestellt.

4 Erkenntnisse aus den Modellversuchen

Aus den Modellversuchen an den drei Wasserrädern können umfangreiche Erkenntnisse gewonnen werden. Im Folgenden werden die Ergebnisse der oben beschriebenen Grundeinstellungen der Räder miteinander verglichen. Daraus können erste Erkenntnisse bezüglich der Wirkungsgrade, Einsatzgebiete und Grenzen zu dieser Art von Wasserrädern gewonnen werden.

4.1 Zuppinger Wasserrad

Die Auswertung der Messergebnisse des Zuppinger-Wasserrades bestätigt die Angaben in der Literatur zu den hohen Wirkungsgraden dieser Energiewandler. Beim Bemessungsdurchfluss $1,0 Q_{Bem}$ und der Bemessungsdrehzahl von $7,6 \text{ min}^{-1}$ (entspricht einer Umfangsgeschwindigkeit von $0,72 \text{ ms}^{-1}$) liegt der Wirkungsgrad bei $81,3 \%$. Die Kurve des maximalen Wirkungsgrades (η) ist in Abbildung 2 aufgetragen und entspricht den höchsten Wirkungsgraden der Einzelkurven der unterschiedlichen Unterwasserstände, welche den eigentlichen Wirkungsgradverlauf darstellt. Der gesamte flache Verlauf des Wirkungsgrades spiegelt die Vorteile wider, die in der gesamten Literatur über Zuppinger-Wasserräder genannt werden, nämlich hohe Wirkungsgrade bei unterschiedlichen Durchflüssen und wechselnden Unterwasserständen. Selbst bei 60% des Bemessungsdurchflusses liegt der Wirkungsgrad des Modells bei $76,6 \%$ und bei einer deutlichen Überschreitung des Bemessungsdurchflusses um 40% liegt dieser immer noch bei $77,1 \%$.

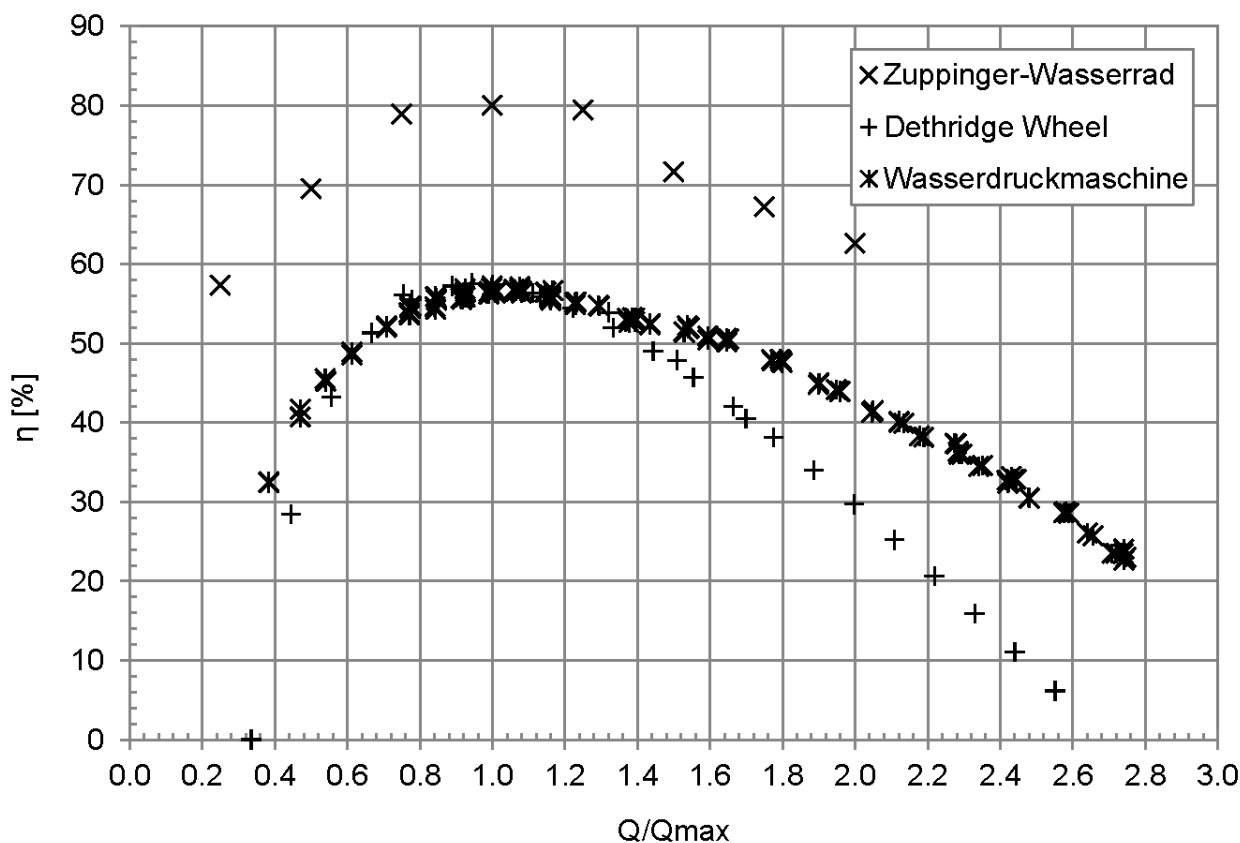


Abb. 2 Wirkungsgradverlauf der unterschiedlichen Wasserräder

4.2 Dethridge Wheel und Wasserdruckmaschine

Die in Abbildung 2 dargestellten Ergebnisse zeigen die Ergebnisse der Räder in der Standardausführung wie oben beschrieben und mit Wasserständen Oberstrom an der Nabenoberkannte und Unterstrom an der Nabenunterkannte des Rades. Vorversuche mit anderen Wasserstandskombinationen zeigen zwar minimal höhere Wirkungsgrade, würden aber die Baugröße und somit Baukosten einer realen Anlagen signifikant erhöhen.

Beim Dethridge Wheel wird ein maximaler Wirkungsgrad (η) von 57,4 % bei einem Durchfluss von $10,6 \text{ ls}^{-1}$ erreicht. Bei der Wasserdruckmaschine wird ein maximaler Wirkungsgrad (η) von 57,2 % bei einem Durchfluss von 66 ls^{-1} erreicht (siehe Abbildung 2: Wirkungsgradverlauf). Die Drehzahl bei maximalem Wirkungsgrad beträgt $12,0 \text{ min}^{-1}$ beim Dethridge Wheel und $4,8 \text{ min}^{-1}$ bei der Wasserdruckmaschine was einer Umfangsgeschwindigkeit an der Schaufelspitze von $0,38 \text{ ms}^{-1}$ bzw. $0,28 \text{ ms}^{-1}$ entspricht. Bei Wasserrädern mit geschlossener Nabe (Dethridge Wheel / Wasserdruckmaschine) sind somit Wirkungsgrade von knapp 60 % bei an sich vergleichsweise geringen Durchflüssen erreichbar.

Auffallend ist bei beiden Anlagen der flache Wirkungsgradverlauf über ein großes Abflussspektrum. Bei halbem (33 ls^{-1}) und bei doppeltem (132 ls^{-1}) Durchfluss wird bei der Wasserdruckmaschine immer noch ein Wirkungsgrad von ca. 40 % erzielt. Mit steigendem Abfluss sinkt der Wirkungsgrad kontinuierlich. Dies ermöglicht in der Praxis die Nutzung eines breiten Abflussspektrums und einen beinahe ganzjährigen Betrieb der Anlage. Eine weitere Besonderheit ist, dass der maximale Wirkungsgrad bei vergleichsweise kleinem Durchfluss und geringer Drehzahl auftritt: $10,6 \text{ ls}^{-1}$ und $12,0 \text{ min}^{-1}$ beim Dethridge Wheel und 66 ls^{-1} und $4,8 \text{ min}^{-1}$ bei der Wasserdruckmaschine.

Im Betrieb bedeutet dies, dass Räder mit geschlossener Nabe mit einem drehzahlvariablen Generator, um einen schwankenden Abfluss nutzen zu können, betrieben werden müssen. Die Drehbewegung ist aufgrund der geringen Anzahl Schaufeln unförmig - die Drehzahl und Drehmoment schwanken. Beispielsweise schwankt bei der Wasserdruckmaschine bei optimalen Betriebsbedingungen (66 l s^{-1} und $4,8 \text{ min}^{-1}$) die Drehzahl innerhalb 1 s zwischen $4,5$ und $5,3 \text{ min}^{-1}$. Diese ruckartige Bewegung führt zu Lastspitzen, die von den nachfolgenden Komponenten wie Getriebe, Generator und Wechselrichter, aufgenommen werden müssen.

Es konnte bestätigt werden, dass Wasserräder mit geschlossener Nabe robust und vergleichsweise einfach herzustellen sind. Sie sind deshalb potenziell geeignet in Entwicklungsländern zur Herstellung einer ersten Stromversorgung eingesetzt zu werden.

4.3 Zusammenfassung

Die detaillierte Auswertung der Ergebnisse bezüglich Leistung und Wirkungsgrad von Wasserrädern mit physikalischen Modellversuchen macht deutlich, dass die Räder sehr unterschiedliche Charakteristika aufweisen.

Mit dem Zuppinger-Wasserrad werden Wirkungsgrade von über 80 % erzielt. Dabei treten hohe Wirkungsgrade im Durchflussbereich zwischen $0,2$ bis $2,0 Q_{\text{Bem}}$ auf. Bei Rädern mit geschlossener Nabe werden maximale Wirkungsgrade von knapp 60 % bei Nutzung eines Abflussspektrums von $0,4$ bis $2,7 Q_{\text{Bem}}$ genutzt. Der Wirkungsgrad ist bei den Rädern mit geschlossener Nabe um ca. 20% geringer als bei dem Rad mit offener Nabe. Dafür kann zumindest bei der Wasserdruckmaschine ein geringfügig breiteres Abflussspektrum energetisch genutzt werden.

Die Umfangsgeschwindigkeit beim Bemessungsdurchfluss ist mit $0,72 \text{ ms}^{-1}$ beim Zuppinger-Wasserrad doppelt so groß wie beim Dethridge Wheel ($0,38 \text{ ms}^{-1}$) und der Wasserdruckmaschine ($0,28 \text{ ms}^{-1}$). Es wird aufgrund der geringeren Schaufelanzahl und der langsameren Umfangsgeschwindigkeit vermutet, dass die Räder mit geschlossener Nabe hinsichtlich der Durchgängigkeit für Fische noch günstiger als Wasserräder mit offener Nabe sind.

Die Drehbewegung ist beim untersuchten Zuppinger-Wasserrad deutlich gleichmäßiger als bei Dethridge Wheel und Wasserdruckmaschine; hier treten erhebliche Schwankungen von Drehmoment und Drehzahl auf. Dies führt zu Lastspitzen, die im Betrieb von den nachgeschalteten Komponenten aufgefangen werden müssen.

5 Herausforderungen für Forschung und Praxis

Ein allgemeines Optimierungspotential in der Wasserkraftnutzung durch Wasserräder liegt beim drehzahlvariablen Betrieb. Bei Wasserrädern mit geschlossener Nabe ist dies zwingende Voraussetzung für einen funktionierenden Betrieb, bei Wasserrädern mit offener Nabe führt dies zu einer noch effizienteren Nutzung der Wasserkraft, da der optimale Betriebspunkt damit an die aktuell herrschenden Bedingungen (den Abfluss) angepasst werden kann.

Die Lastabnahme (Wasserradwelle zu elektrischem Strom) und Steuerung von Rädern mit geschlossener Nabe steht zudem vor besonderen Aufgaben: Getriebe, Generator und Wechselrichter müssen präzise auf einander abgestimmt werden, weil durch die geringe Schaufelanzahl große Lastspitzen im Drehzyklus abgefangen werden müssen. Für einen reibungslosen Betrieb müssen zudem wegen des fehlenden Wehres und Regulierungsorgane (z.B. Schütz) Sensoren den Ober- und Unterwasserstand überwachen und Veränder-

ungen an die angeschlossenen Steuerung weitergeben. Diese muss in der Lage sein zügig und vorausschauend zu reagieren, damit die Anlage immer in einem optimalen Betriebszustand genutzt wird und kontinuierlich Leistung ins Netz einspeisen kann.

Die Entwicklung einer robusten, wirkungsgradeffizienten und insbesondere kostengünstigen Lastabnahme zum drehzahlvariablen Betrieb stellt aktuell für beide Radtypen die größte Herausforderung dar. Es handelt sich hierbei um eine umfangreiche und interdisziplinäre Aufgabe für Maschinenbau, Elektrotechnik und Regelungstechnik.

Weiter weisen erste ökologische Untersuchungen auf günstige Eigenschaften bezüglich der Durchgängigkeit für Fische und Sedimente für beide Wasserradtypen hin. Der Nachweis der Durchgängigkeit insbesondere für Fische ist aktueller Forschungsgegenstand und muss noch erbracht werden.

Literatur

Bach, C. (1886): Die Wasserräder. Stuttgart: Verlag von Konrad Wittwer.

Giesecke, Jürgen; Heimerl, Stephan (2014): Wasserkraftanlagen. Planung, Bau und Betrieb. 6., aktualisierte u. erw. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer (SpringerLink : Bücher).

Müller, Wilhelm (1899): Die eisernen Wasserräder. Die Schaufelräder. Berechnung Konstruktion und Bestimmung ihres Wirkungsgrades. 3 Bände. Leipzig: von Veit & Comp. (2).

Paudel, Shakun (2016): Experimental and Numerical study of Dethridge Wheel for Pico-scale Hydropower Generation. Dissertation. Technische Universität Darmstadt, Darmstadt. Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft.

Redtenbacher, Ferdinand Jacob (1846): Theorie und Bau der Wasserräder. Mannheim: Verlag von Friedrich Bassermann.

Senior, James Alexander; Saenger, Nicole; Müller, Gerald (2010): New hydropower converters for very low-head differences. In: *Journal of Hydraulic Research* 48 (6), S. 703–714.

Anschrift der Verfasser

Olivier Schwyzer M.Eng.

Dipl.-Ing. Matthias von Harten

Dr.-Ing. Shakun Paudel

Prof. Dr.-Ing. Nicole Saenger

Fachbereich Bauingenieurwesen, Fachgebiet Wasserbau, Hochschule Darmstadt

Haardtring 100, D-64295 Darmstadt

nicole.saenger@h-da.de