

Renaissance einer alten Technik: Leistungsanalyse eines halbseitig beplankten Zuppinger-Wasserrads

Julius Maier, Daniel Heim, Kevin Rieger, Martin Weber und Nicole Saenger

Zusammenfassung

In Zeiten hohen Energiebedarfs ist jede generierte Kilowattstunde von Bedeutung. Dennoch wird das Potential der Kleinwasserkraft, welche in ihrer Definition eine installierte Leistung von unter 1 MW aufweist, nicht vollständig genutzt. Um ein Wasserrad in Betrieb nehmen zu dürfen, müssen unterschiedliche Auflagen erfüllt sein. So sind beispielsweise ökologische Vorgaben wie die der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie äußerst strikt. Es werden Fischwanderhilfen benötigt, um eine gefahrlose Passierbarkeit für Fische und andere aquatische Lebewesen zu gewährleisten. An der Hochschule Darmstadt wird an einem Zuppinger-Wasserrad geforscht. Das Rad ist in der Mitte seiner Breite halbiert, weshalb es ein halbbeplanktes Zuppinger-Wasserrad, kurz ein Halbrad, darstellt. Durch den zusätzlichen Raum neben dem Rad soll dem Fisch die Möglichkeit gegeben werden, am Wasserradstandort vom Unter- ins Oberwasser zu gelangen. Dabei wird ein Leistungsverlust in Kauf genommen. Diverse Leistungsmessungen wurden durchgeführt, wobei das Hauptaugenmerk auf dem Verhältnis der Leistung des Halbrads zur Leistung der konventionellen Bauweise liegt. Somit können Aussagen zur Wirksamkeit des entwickelten Wasserkraftwandlers getroffen werden.

1 Einleitung

Wasserräder sind heute weitgehend aus dem Erscheinungsbild verschwunden. Daher ist es schwierig, ihren Einfluss auf den deutschen Energiemix zu beziffern. Die Literatur bezieht sich häufig allgemein auf Kleinwasserkraft unter 1 MW. Heute existieren in Deutschland noch etwa 7400 Wasserkraftanlagen. Die Mehrheit entspricht der Ausbaugröße der Kleinwasserkraft. Und dennoch sind es nur etwa 100 Anlagen, die mehr als zwei Drittel der gesamten Stromerzeugung durch Wasserkraft generieren. (Giesecke et al. 2014, S. 37)

Mit einem Blick in die Vergangenheit lässt sich die Bedeutung von Wasserrädern darlegen. Im Jahr 1927 existierten alleine in Bayern 7571 Wasserräder mit einer Gesamtleistung von 35,62 MW. Mit 4,70 kW liegt die Durchschnittsleistung demnach am unteren Spektrum moderner Anlagen. Im vergangenen Jahrhundert hat sich die Anzahl an Wasserradanlagen bis auf ein Minimum reduziert. So sind zu Beginn des neuen Jahrtausends nur noch 33 Wasserräder im gesamten süddeutschen Raum in Betrieb gewesen. Dies ist verwunderlich, da ein Vorteil von Wasserrädern doch darin liegt, gerade im ländlichen Raum die Energieversorgung mit dezentralen Anlagen sicherzustellen. (Müller und Kauppert 2002, S. 185)

Hinzu kommt, dass die Kleinwasserkraft in der breiten Bevölkerung ein höheres Ansehen genießt als große Wasserkraftanlagen (Giesecke et al. 2014, S. 37). Wenngleich die Technik alt und beinahe vergessen ist, kann sie auch heute noch Einfluss auf den Energiemix nehmen und somit lohnenswert sein.

Soll ein Wasserrad installiert werden, sind ökologische Vorgaben zu jeder Zeit einzuhalten. Die Fischdurchgängigkeit ist dabei ein wichtiger Aspekt. Für Fische stellen Wasserräder, wie auch nahezu jede andere Form von Wasserkraftnutzung, ein Wanderhindernis dar (Deutsche

Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA) 2014, S. 25). Um den guten ökologischen Zustand eines Fließgewässers zu wahren, ist nach der EU-WRRL (2000, S. 55) jegliche Barriere für Fische und Makrozoobenthos passierbar zu gestalten. In der Regel ist hierfür ein separater Fischpass erforderlich, welcher jedoch die Gesamtbaukosten einer Wasserkraftanlage steigert und dadurch die Amortisationszeit verlängert. Um dies zu vermeiden, sollte es das Ziel sein, eine Durchgängigkeit vom Unter- in das Oberwasser direkt am Wasserrad zu gewährleisten.

Diese Veröffentlichung zielt darauf ab, die Technologie des Wasserrads aus heutiger Sicht zu denken. Zu diesem Zweck wird das Halbrad vorgestellt. Dessen Leistung wird mit der konventionellen Bauform des Zuppinger-Wasserrads verglichen. Das Verhältnis gibt Aufschluss über die Effektivität des Halbrads. Für mehrere Betriebspunkte liegt das besagte Verhältnis über 50%. Während die Konstruktion zwar zu einer Reduktion der Leistung führt, stellt sie für die ökologischen Ziele einen wichtigen Baustein dar, da die offene Hälfte künftig als Fischpass fungieren soll.

2 Ökologische Herausforderungen für die Kleinwasserkraft

Nur wenige Wissenschaftler haben sich in den letzten Jahrzehnten mit Wasserrädern auseinandergesetzt. Ein halbiertes Zuppinger-Wasserrad wurde nicht untersucht. An dieser Stelle lohnt sich ein allgemeiner Vergleich von Wasserrädern mit einem anderen Wasserkraftwandler: der Turbine. Im Vergleich zu Turbinen haben bereits konventionelle Wasserräder ökologische Vorteile. Aber auch aus ökonomischer Sicht sind Wasserräder unter bestimmten Bedingungen zu bevorzugen.

Wasserräder sind wirtschaftlich im Vorteil, wenn wenig Durchfluss und nur eine geringe Fallhöhe zur Verfügung stehen. Für den Ausbaudurchfluss unterscheiden sich die Wirkungsgrade nicht. Liegen schwankende Abflussverhältnisse vor, sinkt der Wirkungsgrad von Turbinen. Wasserräder dahingegen decken ein größeres Abflussspektrum ab. Auch die Instandhaltungskosten sind bei Wasserrädern niedriger als bei Turbinen. (Mueller 2010, S. 165)

Während Turbinenanlagen üblicherweise hohe Mortalitätsraten aufweisen (Jacoby, D., Gollock, M. 2014, S. 12), gelten Wasserräder laut Wolter et al. (2019, S. 94) als wesentlich fischfreundlicher. Zwar wird zu Turbinen und deren stromabwärts gerichteten Passierbarkeit geforscht (Watson et al. 2022), die ökologischen Vorteile von Wasserrädern dahingegen sind bereits bewiesen.

Den guten ökologischen Zustand der Fließgewässer und damit auch die Durchgängigkeit für aquatische Lebewesen gilt es zu gewährleisten. Diese beiden Kriterien nehmen maßgebend Einfluss auf die zur Energiewandlung zur Verfügung stehende Wassermenge.

Die Möglichkeit zur Migration an unnatürlichen Barrieren wie Wasserkraftanlagen ist ein äußerst wichtiges Thema. Für die Durchgängigkeit entgegen der Fließrichtung bedarf es für beide Varianten von Wasserkraftanlagen Aufstiegsanlagen. Diese Veröffentlichung stellt eine Variante des Zuppinger-Wasserrads vor, die zukünftig die vollständige Fischdurchgängigkeit gewährleisten soll.

3 Methodik

Basierend auf einem existierenden physikalischen Modell eines Zuppinger-Wasserrads im Wasserbaulabor der Hochschule Darmstadt wurde eine Radvariante eingebaut und analysiert. Ziel ist es, eine stromaufgerichtete Fischdurchgängigkeit herzustellen.

Nachfolgend wird die Leistung des Wasserrads analysiert. Untersuchungen zur Durchwanderbarkeit, im Sinne der Prüfung hydraulischer Parameter, sind im weiteren Forschungsverlauf vorgesehen.

3.1 Beschreibung des Versuchsaufbaus

Die experimentellen Versuche wurden an einem Modell eines Zuppinger-Wasserrads (siehe Abb. 1) mit dem Durchmesser $d = 1,80$ m und der Breite $b = 0,90$ m durchgeführt. Das Rad hat 25 Schaufeln mit einem Spaltmaß $s = 5$ mm zwischen Schaufelvorderkante und Kropfgerinne. Die Schaufelform ist ausgelegt nach den Bemessungsempfehlungen von Nuernbergk (2013). Die Länge der Rinne, in welche das Wasserrad eingesetzt ist, beläuft sich auf $l = 20,00$ m. Die Rinnenbreite beträgt $w = 0,91$ m. Mit einer am Rinnenende verbauten Wehrklappe wird die Einstellung von unterschiedlichen Unterwasserständen h ermöglicht. Mittels eines Stechpegels werden die Wasserstände kontrolliert.

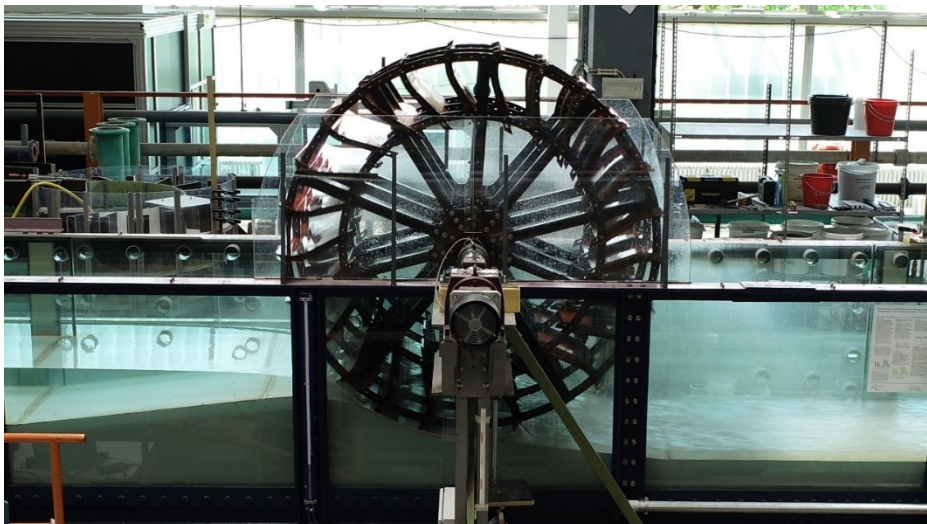


Abb. 1 Seitenansicht des ursprünglichen Versuchsaufbaus

Um die Leistung des Wasserrads zu bestimmen sind Messinstrumente installiert. Das Drehmoment M wird mit einer Drehmomentmesswelle (ETH DRFL-VI-1000-A) abgegriffen. Die vorhandene Drehzahl n wird über einen Drehgeber (ifm RB1015) ermittelt. Deren Einstellung erfolgt über eine Magnetpulverbremse in Kombination mit einer auf den Versuchsstand abgestimmten LabView-Umgebung. Der Durchfluss wird über einen im Rinnenzulauf eingebauten Schieber geregelt. Mittels eines MIDs (Krohne Aquaflux F/6) wird der Durchfluss kontrolliert. In Tab. 1 sind die Messinstrumente mit den zugehörigen Genauigkeiten aufgeführt.

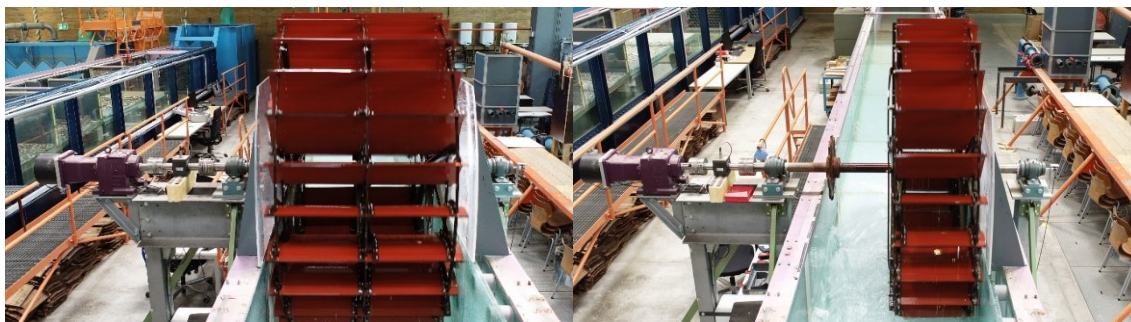
Tab. 1 Messinstrumente

Parameter	Instrument	Hersteller	Modell	Genauigkeit
Drehmoment M	Messwelle	ETH	DRFL-VI-1000-A	± 1 Nm
Drehzahl n	Drehgeber	ifm	RB1015	$\pm 4\%$
Durchfluss Q	MID	KROHNE	Aquaflux F/6	$\pm 0,5\%$

Die Leistungsberechnung erfolgt gemäß [1]:

$$P = 2 * \pi * M * \frac{n}{60} \quad [1]$$

Wie in Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** beschrieben, wirkt eine Wasserkraftanlage in einem Fließgewässer als Barriere für aquatische Lebewesen. In diesem Beitrag wird das Zuppinger-Wasserrad ertüchtigt, um es fischfreundlich zu gestalten. **Abb. 2 Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt das ursprüngliche Wasserrad (links, nachfolgend Vollrad) im Vergleich mit dem Halbrad (rechts).

**Abb. 2** Vergleich des Vollrads (links) mit dem Halbrad (rechts)

Beim Halbrad wurden die Schaufelbreiten halbiert, was einer Reduzierung auf $b = 0,45$ m entspricht. Die Schaufelanzahl beträgt weiterhin 25 Stück. Die nun durchgängige Seite soll es Fischen ermöglichen, die Anlage stromaufwärts zu passieren. Auf der einen Seite führt dies dazu, dass eine konventionelle Fischaufstiegsanlage (kurz: FAA) nicht mehr benötigt wird. Die entfallenden Baukosten haben positive Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit einer Wasserkraftanlage. Andererseits führt die offene Hälfte zu einem Leistungsverlust. Im Vergleich zu einem vollständig beplankten Wasserrad kann somit nicht die gleiche mechanische Leistung generiert werden. Der Forschungsansatz basiert darauf, diese Auswirkung genau zu quantifizieren. Auf Basis unterschiedlicher Betriebspunkte werden die Leistungen der Wasserräder ins Verhältnis gesetzt.

3.2 Analytische Methoden

Laut Ölke (2016, S. 64) liegt bei einem Durchfluss von $Q = 100$ l/s für die Drehzahl $n = 5,2^{-1}$ der höchste Wirkungsgrad für das Vollrad vor. Daher wurden die nachfolgenden Untersuchungen mit dieser Drehzahl und bis zu einem maximalen Durchfluss von $Q = 100$ l/s für das Vollrad durchgeführt. Da es sich beim Wirkungsgrad um einen Verhältniswert handelt, werden für die

Untersuchungen die Leistungen von Halbrad und Vollrad herangezogen und auf zwei Arten verglichen. Zuerst wird ein direkter Vergleich bei exakt gleichen Betriebspunkten, nachfolgend 1:1-Vergleich genannt, durchgeführt. Die Parameter sind in Tab. 2 aufgeführt.

Tab. 2 Betriebspunkte für den 1:1-Vergleich zwischen Halbrad und Vollrad

	Halbrad und Vollrad	
n [min⁻¹]	5,2	
h [cm]	25	30
Q [l/s]	40, 50, 60, 70, 75, 80, 90, 100	

Der zweite Vergleich beruht auf einem erhöhten Durchfluss beim Betrieb des Halbrads (siehe Tab. 3). Grundlage für diese Annahme ist, dass bei einem konventionellen Vollrad ein Teil des vorhandenen Durchflusses für einen Fischpass und die Ökologie des Fließgewässers abgeschlagen werden muss. Liegt der prozentuale Durchflussabschlag bei 30%, kann das Vollrad mit 70% des gesamten Durchflusses betrieben werden. Hier orientiert sich der Autor an einem üblichen Wert auf Grundlage des Hessischen Mindestwassererlasses (Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (HMUKLV) 15.01.2018).

Der Einsatzort des Halbrads soll das Mutterbett des Fließgewässers sein, weshalb es hierfür keines Abschlags bedarf. Gleiches gilt für die übliche Fischaufstiegsanlage. Kann der Fisch unmittelbar neben dem Wasserrad wandern, muss keine FAA mehr betrieben werden. Während für das Halbrad somit der Durchfluss zu 100% angesetzt wird, beträgt dieser aufgrund der Reduktion um 30% für das Vollrad noch 70%. Nachfolgend wird diese Kombination als 1:0,7-Vergleich deklariert.

Tab. 3 Betriebspunkte für den 1:0,7-Vergleich zwischen Halbrad und Vollrad

	Halbrad		Vollrad	
n [min⁻¹]	5,2			
h [cm]	25	30	25	30
Q [l/s]	57, 71, 86, 100, 107, 114, 129, 143	86, 100, 107, 114, 129, 143	40, 50, 60, 70, 75, 80, 90, 100	60, 70, 75, 80, 90, 100

Anhand des Verhältnisses $r_{h25/h30}$ (s. [2]) wird erörtert, wie hoch die Leistung $P_{Halbrad}$ des Halbrads im Vergleich zum Vollrad ($P_{Vollrad}$) ist.

$$r_{h25/h30} = P_{Halbrad} / P_{Vollrad} \quad [2]$$

Aufbauend auf den Betriebspunkten aus den Tabellen Tab. 2 und Tab. 3 werden die Leistungen ermittelt und ins Verhältnis gesetzt. Die Resultate der analytischen Methode werden im folgenden Kapitel präsentiert und diskutiert.

4 Resultate und Diskussion

Die Resultate werden in zwei Unterkapiteln erläutert. Der 1:1-Vergleich wird in Kapitel 4.1 behandelt. Darauf aufbauend folgt in Kapitel 4.2 der Vergleich mit erhöhtem Durchfluss für den Betrieb des Halbrads. Des Weiteren werden die Ergebnisse skaliert, um die Leistungsfähigkeit an einer realen Wasserradanlage darzustellen. In der abschließenden Diskussion werden die Ergebnisse analysiert und verglichen. Es wird erläutert, bis zu welchem Betriebspunkt das Halbrad als ökonomisch gut arbeitendes System betrachtet werden kann.

4.1 Leistungsvergleich Halbrad – Vollrad 1:1

Das höchste Verhältnis der Leistungen von Halbrad zu Vollrad wurde für niedrige Durchflüsse ermittelt. Wird der Durchfluss erhöht, verringert sich das Verhältnis. Das gleiche Phänomen kann für steigendes Unterwasser h beobachtet werden. Für $Q = 60 \text{ l/s}$ beträgt $r_{h25} = 51\%$, wohingegen r_{h30} 43% entspricht.

Tab. 4 Leistungsvergleich Halbrad – Vollrad 1:1

Q [l/s]		h ₂₅ [cm]			h ₃₀ [cm]		
		P [W]		r [%]	P [W]		r [%]
Halbrad	Vollrad	Halbrad	Vollrad		Halbrad	Vollrad	
40	40	14,11	23,84	59	*	*	*
50	50	24,83	46,15	54	*	*	*
60	60	33,82	66,67	51	14,77	34,71	43
70	70	41,39	89,08	46	24,19	56,40	43
75	75	45,28	98,33	46	29,12	67,70	43
80	80	49,08	110,65	44	32,09	78,95	41
90	90	55,25	144,18	38	41,59	113,01	37
100	100	61,71	183,00	34	46,59	154,29	30

*Drehzahl von $n = 5,20^{-1}$ konnte nicht erreicht werden

4.2 Leistungsvergleich Halbrad – Vollrad 1:0,7

Wird der Durchfluss beim Betrieb des Halbrads erhöht, werden folgerichtig höhere Verhältnisse der Leistungen beider Räder als im 1:1-Vergleich erzielt. In der vorliegenden Studie konnten Verhältnisse von über 100% ermittelt werden.

Tab. 5 Leistungsvergleich Halbrad – Vollrad 1:0,7

Q [l/s]		h ₂₅ [cm]			h ₃₀ [cm]		
		P [W]		r [%]	P [W]		r [%]
Halbrad	Vollrad	Halbrad	Vollrad		Halbrad	Vollrad	
57	40	30,09	23,84	126	13,62	*	*
71	50	41,63	46,15	90	24,21	*	*
86	60	52,20	66,67	78	36,96	34,71	106
100	70	61,71	89,08	69	46,59	56,40	83
107	75	67,28	98,33	68	51,15	67,70	76
114	80	70,21	110,65	63	53,72	78,95	68
129	90	79,33	144,18	55	64,31	113,01	57
143	100	88,50	183,00	48	75,63	154,29	49

*Drehzahl von $n = 5,20^{-1}$ konnte nicht erreicht werden

4.3 Realitätsnahe Skalierung

Um die Leistung eines realen Halbrads zu analysieren, wird diese anhand der Froud'schen Maßstabsfaktoren skaliert. Voraussetzung hierfür ist, dass sowohl Fallhöhe als auch Durchfluss am fiktiven Standort mit den Werten des physikalischen Modells maßstäblich übereinstimmen. Es werden drei Maßstäbe vorgestellt. Ausgangspunkt hierfür ist die Versuchskombination h_{25}/Q_{143} . Im Versuch lag die Fallhöhe Δh , bei etwa 20 cm.

Tab. 6 Realitätsnahe Skalierung

	Maßstab		
	2:1	3:1	4:1
Q [l/s]	809	2229	4576
Δh [m]	0,40	0,60	0,80
P [W]	1002	4141	11334

In Abhängigkeit von den Standortbedingungen können bis zu 11 kW im Maßstab 4:1 mit dem Halbrad generiert werden. Voraussetzung hierfür sind eine Fallhöhe $\Delta h = 0,80$ m bei einem Durchfluss von $Q = 4576$ l/s und eine Gewässerbreite von mindestens 3,60 m. Das Halbrad hätte demnach eine Breite von 1,80 m bei einem Durchmesser von 7,20m.

4.4 Diskussion der Ergebnisse

Im 1:1-Vergleich wurden keine hohen Verhältnisse ermittelt. Im Maximum liegen diese bei $r_{h25} = 59\%$ ($Q_{40/40}$), im Minimum bei $r_{h30} = 30\%$ ($Q_{100/100}$).

Anders gestalten sich die Verhältnisse bei einer Durchflusserhöhung für das Halbrad. Hierfür wurden Verhältnisse in der Spanne von $r_{h25} = 126\%$ ($Q_{57/40}$) und $r_{h25} = 48\%$ ($Q_{143/100}$) ermittelt. Darüber hinaus lassen sich Ähnlichkeiten in den Verhältnissen bei hohen Durchflüssen ungeachtet des Unterwasserstands feststellen. Das Verhältnis für $Q_{129/90}$ beträgt $r_{h25} = 55\%$ bzw. $r_{h30} = 57\%$. Die Ergebnisse für $Q_{143/100}$ bestätigen diese Beobachtung ($r_{h25} = 48\%$, bzw. $r_{h30} = 49\%$). Für die Auswahl möglicher Standorte hat dies eine große Bedeutung. Fluktuierende Unterwasserstände sind demnach kein Ausschlusskriterium für den Einbau eines Halbrads.

Trotz aller Erkenntnisse ist festzuhalten, dass die ökologische Durchgängigkeit stets über die Wirtschaftlichkeit gestellt werden muss. Notfalls muss eine Minderung der Leistung in Kauf genommen werden, um den ökologischen Belangen gerecht zu werden. Abb. 3 zeigt die vorherrschenden Bedingungen im Halbrad für h_{25}/Q_{143} . Ein niedriger Wasserstand kann über dem Kropfgerinne beobachtet werden. Im Auslaufbereich des Wasserrads treten Turbulenzen auf. Es stellt sich daher die Frage, ob Fische diese Strömung auf dem Weg ins Oberwasser überwinden können.



Abb. 3 Halbrad / h_{25}/Q_{143} / Seitenansicht (links) und Blick aus dem Unterwasser (rechts)

5 Fazit

Im Leistungsvergleich des Vollrads als konventionelle Bauweise mit dem Halbrad können Verhältnisse von über $r = 50\%$ erreicht werden. Wird der Durchfluss für den Betrieb des Halbrads erhöht, steigt der Wert weiter an. Die Leistungsanalyse kann im weiteren Forschungsverlauf auf verschiedene Wege erweitert werden. Sowohl die Drehzahl, der Durchfluss als auch der Unterwasserstand können angepasst werden. Es ist vor allem der These nachzugehen, ob für hohe Durchflüsse ein einheitliches Verhältnis erwartet werden kann. Darauf aufbauend ist zu hinterfragen, ob sich dies mit weiteren Drehzahlen bestätigen lässt.

Von besonderer Bedeutung ist jedoch die Analyse des Halbrads hinsichtlich der Fischfreundlichkeit. Hierfür sind Messungen in der offenen Hälfte, dem künftigen Fischeaufstieg, notwendig. Einbauten wie Trennwände aus Holz mit Öffnungen für Fische könnten die Situation weiter verbessern.

6 Literaturverzeichnis

Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA) (2014): Fischaufstiegsanlagen und fischpassierbare Bauwerke. Gestaltung, Bemessung, Qualitätssicherung M 509.

EU-WRRL (2000): Richtlinie 2000/60/EG des europäischen Parlaments und des Rates zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik, 23.10.2000.

Giesecke, Jürgen; Heimerl, Stephan; Mosonyi, Emil (2014): Wasserkraftanlagen. Planung, Bau und Betrieb. 6., aktualisierte und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.

Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (HMUKLV) (15.01.2018): Regelung zur Ermittlung der Mindestwasserführung in Ausleitungsstrecken hessischer Fließgewässer. In: Staatsanzeiger für das Land Hessen.

Jacoby, D., Gollock, M. (2014): *Anguilla Anguilla*. IUCN Red List of Threatened Species. 2014: e.T60344A45833138.

Mueller, Wilhelm (2010): Die Wasserräder. Berechnung, Konstruktion und Wirkungsgrad. 2., durchges. und erw. Aufl. ; [4.] unveränd. photomech. Nachdr. d. 2. Auflage Leipzig 1939. Detmold: Schäfer.

Müller, Gerald; Kauppert, Klemens (2002): Old watermills—Britain's new source of energy? In: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Civil Engineering* 150 (4), S. 178–186. DOI: 10.1680/cien.2002.150.4.178.

Nuernbergk, Dirk (2013): Wasserräder mit Kropfgerinne. Berechnungsgrundlagen und neue Erkenntnisse. [2., vollst. überarb. Aufl.]. Detmold: Schäfer.

Ölke, Patrick (2016): Bemessung und Analyse der Schaufelform für Zuppinger Wasserräder nach dem Ansatz von Nuernbergk (2013). unveröffentlichte Bachelorarbeit. University of Applied Sciences Darmstadt, Darmstadt.

Watson, Sterling; Schneider, Abraham; Santen, Leon; Deters, Katherine A.; Mueller, Robert; Pflugrath, Brett et al. (2022): Safe passage of American Eel through a novel hydropower turbine. In: *Trans Am Fish Soc*, Artikel tafs.10385. DOI: 10.1002/tafs.10385.

Wolter, Christian; Schomaker, Christian; Harten, Matthias von; Saenger, Nicole (2019): Entwicklung eines ökologisch verträglichen, modularen Systems zur Nutzung kleiner Wasserkräfte mit sehr niedrigen Fallhöhen. Teilprojekt Analyse der Fischfreundlichkeit von Wasserrädern. 1. Aufl. Darmstadt: Hochschule Darmstadt.

Anschrift der Verfasser

Julius Maier, M.Eng.

Daniel Heim, B.Eng.

Kevin Rieger, M.Eng.

Martin Weber, M.Eng

Prof. Dr.-Ing. Nicole Saenger

Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwesen, Hochschule Darmstadt

Schöfferstraße 1, 64295 Darmstadt

julius.maier@h-da.de