

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Conference Paper, Published Version

**Schiffer-Rosenberger, J; Jaberg, H.; Fritsch, R.**  
**Ejektorwirkung bei vertikalen Kaplan turbinen**  
**Experimentelle Untersuchungen am Modell und**  
**Feldversuche an Prototypenanlagen**

Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:  
**Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik**

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/106336>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Schiffer-Rosenberger, J; Jaberg, H.; Fritsch, R. (2019): Ejektorwirkung bei vertikalen Kaplan turbinen Experimentelle Untersuchungen am Modell und Feldversuche an Prototypenanlagen. In: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hg.): Komplexe Planungsaufgaben im Wasserbau und ihre Lösungen. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 62. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik. S. 455-464.

**Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



## **Ejektorwirkung bei vertikalen Kaplan turbinen – Experimentelle Untersuchungen am Modell und Feldversuche an Prototypenanlagen**

J. Schiffer-Rosenberger, Jaberg&Partner GmbH, Vasoldsberg, Österreich  
H. Jaberg, TU Graz, Hydraulische Strömungsmaschinen, Österreich  
R. Fritsch, ZT Fritsch GmbH, Steyr, Österreich

Die Nutzung der Ejektorwirkung stellt bei vertikalen Kaplan turbinen eine Möglichkeit der Leistungssteigerung bei Überwasser dar und kann sich vor allem bei geringen Fallhöhen rentieren. Das Ejektorprinzip basiert auf einer konstruktiven Lösung zur möglichst verlustarmen Vereinigung des in der Turbine energetisch genutzten Triebwassers mit dem sonst ungenutzten Überwasser. Die historische Entwicklung von Ejektor kraftwerken geht zurück bis ins 19. Jahrhundert. Erstmals umfangreich behandelt wurde das Thema in der Fachliteratur von Slisskii und später Mosonyi [Slisskii 1953, Mosonyi 1966]. Die beinahe wieder in Vergessenheit geratene Idee wurde vom Ingenieurbüro ZT Fritsch GmbH aufgegriffen und erfolgreich weiterentwickelt. An drei in den letzten Jahren in Österreich errichteten Referenzanlagen konnte nachweislich gezeigt werden, dass die Integration des Ejektorprinzips zu einer markanten Erhöhung der Jahresarbeit führt.

Durch bauliche Kombination einer geeigneten Ejektorrampe für das Überfallwasser und einem im Grundriss gekrümmten Saugrohr wird am Saugrohr austritt ein Impulsaustausch eingeleitet. Im Vergleich zu konventionellen Wasserkraftwerken, wo der Unterwasserspiegel mit zunehmendem Abfluss steigt, wird der Unterwasserspiegel am Saugrohr austritt durch die Aktivierung des Ejektors deutlich abgesenkt. Dies führt einerseits zu einer Fallhöhensteigerung und andererseits zu einer Erhöhung des Turbinendurchflusses. Bei idealer Gestaltung der Ejektorrampe und des Turbinenauslaufs wird bei großen Wassermengen eine markante Leistungssteigerung von bis zu 25% gegenüber der konventionellen Bauart erreicht.

Obwohl es aus der Vergangenheit generelle Untersuchungen zur Ejektorwirkung für überströmte Anlagen gibt, sind diese nicht direkt auf die Referenzanlagen mit dem gekrümmten Saugrohr übertragbar. Um einen fundierten, wissenschaftlichen Nachweis der Ejektorwirkung bei vertikalen Kaplan turbinen zu erbringen, wurde daher ein Forschungsprojekt initiiert. Neben umfangreichen Feldmessungen wurde im Labor des Instituts für Hydraulische Strömungsmaschinen der Technischen Universität Graz ein Modell eines Ejektor kraftwerks errichtet. Begleitet wurden die experimentellen Untersuchungen von stationären, zweiphasigen CFD-Simulationen. Die wissenschaftlichen Untersuchungen verdeutlichten die aus den Prototypenanlagen bekannten Erkenntnisse und trugen dazu bei, wesentliche Einflussgrößen auf die Ejektorwirkung zu identifizieren.

## 1 Die Referenzanlagen

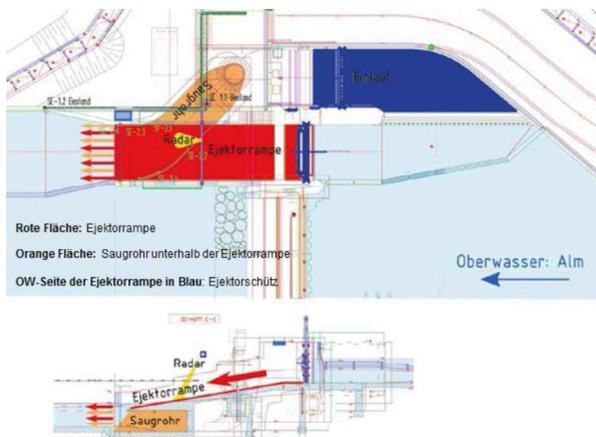
Im Jahre 2005 wurde an der Alm das Kraftwerk Mühlthalwehr errichtet. Für die gegebenen Ausbauverhältnisse mit etwa 5 m Fallhöhe und etwa 15 m<sup>3</sup>/s Ausbauwassermenge stellt die bewusste Anordnung eines Ejektorkraftwerkes eine Neuentwicklung dar. Im Betrieb zeigte sich, dass die prognostizierten Leistungssteigerungen im Überwasserfall weitaus übertroffen werden. Im Zuge eines Forschungsprojekts wurden an dieser Anlage in weiterer Folge umfangreiche Feldmessungen durchgeführt. Die Leistung im Überwasserfall wurde über einige Jahre hinweg gemessen und aufgezeichnet. Auf Basis der Messwertaufzeichnung kann mittlerweile nachweislich gezeigt werden, dass die Steigerung der Maximalleistung gegenüber konventioneller Nutzung mind. 20% beträgt.

Die zweite Referenzanlage, die das Prinzip der Ejektorwirkung nutzt, wurde in das Stadtwehr Waidhofen an der Ybbs integriert und im Jahre 2012 in Betrieb genommen. Im Vergleich zum Kraftwerk Mühlthalwehr machen die Höhenverhältnisse und die Oberligersituation weitere Verbesserungen notwendig. So ist zur effizienten Nutzung der möglichen Fallhöhe und des Ejektors eine dynamische Stauregulierung, angeglichen an die im Bestand bestehenden Spiegellagen am festen Wehr, ins Projekt integriert. Im Vergleich zum Standort Mühlthalwehr ist die Fallhöhe mit etwa 4 m etwas geringer und der Ausbaudurchfluss mit etwa 30 m<sup>3</sup>/s deutlich höher. Aufgrund einer nicht projektmäßig durchgeführten Abtragung von Brückenfundamenten im Unterwasser und dem damit verbundenen relativ starken Einstau der Ejektorrampe, fällt die Leistungssteigerung gegenüber der konventionellen Bauform hier mit max. 10% etwas geringer aus.

Die dritte Referenzanlage, an welcher das Ejektorprinzip in die Praxis umgesetzt wurde ist das Kraftwerk Gaissulz an der Ybbs, welches ursprünglich in den Jahren 1933-1935 errichtet und im Jahr 2017 durch eine zweite Turbine erweitert wurde. Die gegebenen Anlageverhältnisse mit einer Brutto-Fallhöhe von 8,60m blieben unverändert. Die Ausbauwasserung von ursprünglich 11 m<sup>3</sup>/s wurde durch die Ausstattung mit einer zweiten Turbine auf der linken Wehrseite mit einem Schluckvermögen von 16 m<sup>3</sup>/s auf  $Q_T = 27 \text{ m}^3/\text{s}$  erweitert, wodurch die Leistung der Kraftanlage auf zukünftig  $P_G = 1900 \text{ kW}$  erhöht wurde. Ab Erreichen der Ausbauwassermenge fließt das Überwasser an ca. 85 Tagen im Jahr über den sogenannten Ejektorablass, was bei Überwasser eine Fallhöhenoptimierung und damit verbunden auch eine Leistungssteigerung bewirkt. Aufgrund der Umsetzung der im Zuge des Forschungsprojekts gewonnenen Erkenntnisse kann hier im Hochwasserfall eine Leistungssteigerung von über 25% gegenüber dem konventionellen Betrieb ohne Ejektor erreicht werden.

## 2 Feldmessungen am Kraftwerk Mühlthalwehr

Vor allem am Kraftwerk Mühlthalwehr, dessen Grundriss und Schnitt in Abbildung 1 dargestellt ist, wurden über mehrere Jahre umfangreiche Langzeitmessungen durchgeführt [Fritsch 2015]. Um die Wirkung des Ejektors gründlich zu untersuchen, wurden Parameter wie Turbinendurchfluss, Ejektorabfluss, Pegelstände, Druck am Saugrohraustritt sowie die Turbinenleistung im Normalbetrieb sowie im Überwasserfall über einige Jahre hinweg gemessen und aufgezeichnet. Zusätzlich zum Standard-Messequipment wurde das Kraftwerk mit mehreren Druckmessstellen im Saugrohr, einer ADCP-Bodensonde (Acoustic Doppler Current Profiler) am Turbineneinlauf sowie einem Radar-Durchflussmessgerät an der Ejektorrampe ausgestattet.



**Abbildung 1:** Grundriss und Schnitt des Pilotprojektes KW Mühlthalwehr an der Ybbs

Beispielhaft werden an dieser Stelle die Messergebnisse im Kraftwerks-Regelbetrieb während des Hochwassers im Mai 2015 präsentiert. Dort lag die maximale Generatorleistung bei maximaler Turbinenbeaufschlagung von  $Q = 15 \text{ m}^3/\text{s}$ , also kurz bevor der Ejektor geöffnet wurde, bei  $P = 696 \text{ kW}$ . Eine höhere Leistung wäre aufgrund der durch den Unterwasseranstieg verursachten Fallhöhenreduktion ohne Ejektor nicht zu erwarten. Die maximale Generatorleistung bei Ejektorbetrieb mit einem Ejektorabfluss von  $21 \text{ m}^3/\text{s}$  lag allerdings bei  $P = 788 \text{ kW}$ . Bei einem Ejektorabfluss von ca.  $27 \text{ m}^3/\text{s}$ , was beinahe dem doppelten Schluckvermögen der Turbine entspricht, konnte immerhin noch eine Leistung von ca.  $P = 700 \text{ kW}$  gemessen werden. Bei maximaler Ejektoröffnung bzw. ca.  $46 \text{ m}^3/\text{s}$  Ejektorabfluss sank die Generatorleistung auf  $P = 561 \text{ kW}$  ab. Die theoretisch erzielbare Leistung ohne Ejektor fällt an diesem Betriebspunkt hingegen

mit  $P = 458 \text{ kW}$  wesentlich geringer aus, was in dieser Phase einem Zugewinn an Leistung von  $22.5 \%$  entspricht.

### 3 Modellaufbau zur experimentellen Untersuchung

Zur experimentellen Untersuchung der Ejektorwirkung [Schiffer 2015] wurde im Labor des Instituts für Hydraulische Strömungsmaschinen an der TU-Graz ein Modell einer Ejektorturbine errichtet, welches in den Kreislauf des Hauptprüfstands integriert wurde. Durch Aktivieren der Hauptprüfstandpumpe ist es somit möglich, einen Gesamtabfluss von bis zu  $400 \text{ l/s}$  zu erreichen. Die wesentlichen Bestandteile des Kraftwerkmodells wurden mit einem Modellmaßstab von  $M = 1:10$  an die Wasserkraftanlage Stadtwehr Waidhofen angepasst. Mit Hilfe einer Adaption des Saugrohrbodens ist es zudem möglich, auch die zweite Referenzanlage (KW-Mühlthalwehr) modellhaft experimentell zu untersuchen. Die im Zuge der Experimente verwendeten Wassermengen sowie Wasserspiegel wurden mit Hilfe der Froude-Ähnlichkeit, welche für Gerinneströmungen mit freien Oberflächen zu verwenden ist, von der Wasserkraftanlage Stadtwehr Waidhofen umgerechnet, wodurch sich folgende Gesetzmäßigkeiten ergeben:

$$Q_{\text{Modell}} = Q_{\text{Real}} \cdot M^{5/2} A = r^2 \cdot \pi \cdot \alpha \cdot 180^\circ - \sin \alpha \quad (1)$$

$$H_{\text{OW-Modell}} = H_{\text{OW-Real}} \cdot M A = r^2 \cdot \pi \cdot \alpha \cdot 180^\circ - \sin \alpha \quad (2)$$

$$H_{\text{UW-Modell}} = H_{\text{UW-Real}} \cdot M A = r^2 \cdot \pi \cdot \alpha \cdot 180^\circ - \sin \alpha \quad (3)$$

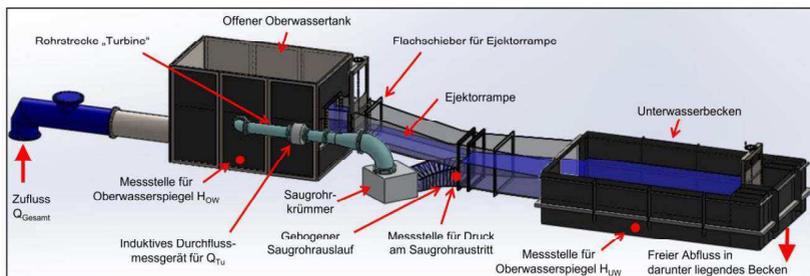
Um die Strömungsphänomene der Anlage Stadtwehr Waidhofen bei Ausbaudurchfluss ( $Q_{\text{TU-Max}} = 30 \text{ m}^3/\text{s}$ ) am Modell realitätstreu nachbilden zu können, ist am Prüfstand beispielsweise ein Saugrohrdurchfluss von  $Q = 94,8 \text{ l/s}$  einzustellen. Die Unter- und Oberwasserspiegel bzw. die Bruttofallhöhe sind mit dem Modellmaßstab linear zu skalieren, wodurch sich für die Nachbildung von realen Fallhöhen  $5$  und  $8 \text{ m}$  Modellfallhöhen zwischen  $0,5$  und  $0,8 \text{ m}$  ergeben. Im Vergleich zur Großausführung wurden am Prüfstand lediglich zwei Vereinfachungen vorgenommen. Zum einen konnte die Modellierung der vollen Breite des Oberwassers sowie die Modellierung des Kraftwerkseinlaufs aus Platzgründen nicht realitätstreu vorgenommen werden. Das Oberwasser wurde mit einem offenen Oberwassertank in maximal möglicher Baugröße nachgebildet. Zum anderen wurde am Prüfstand auf den Einsatz einer Modellturbine verzichtet, da die Leistungsausbeute bei wenigen  $100 \text{ W}$  gelegen wäre, was den Nachweis der positiven Wirkung des Ejektors erschwert hätte. Stattdessen wurde die Turbine als verlustbehaftete Rohrstrecke modelliert. Um die positive Wirkung des Ejektors nachzuweisen, kann am Prüfstand anstatt der Leistungssteigerung der Tur-

bine die Steigerung des Leistungsarbeits  $P_{Hydr.}$  gemessen werden, welches mit Hilfe der gemessenen Größen wie folgt berechnet werden kann.

$$P_{Hydr.} = \rho \cdot g \cdot Q_{TU} \cdot H_{TU} A = r^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot \alpha \cdot 180^\circ \cdot \sin^2 \alpha \quad (4)$$

$$H_{TU} = H_{Total, Turbineneintritt} - H_{Total, Saugrohraustritt} A = r^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot \alpha \cdot 180^\circ \cdot \sin^2 \alpha \quad (5)$$

Das 3D-CAD-Modell des konzipierten Prüfstands sowie dessen Hauptbestandteile sind in Abbildung 2 ersichtlich. Die für die Ejektorwirkung wesentlichen Prüfstandbauteile, wie Ejektorrampe, Saugrohrauslauf, Ejektornase (am Übergang zwischen Rampe und Saugrohrauslauf) sowie der Übergang ins Unterwasser wurden aus Plexiglasteilen angefertigt, um die auftretenden Strömungsphänomene auch visuell erfassen zu können.



**Abbildung 2:** 3D-CAD-Modell des Ejektorprüfstands inklusive Messstellendefinition und Bezeichnung der wesentlichen Prüfstandsbauteile



**Abbildung 3:** Links: Seitenansicht der Ejektorwalze mit charakteristischen Abmaßen  
 Rechts: Blick auf den Modellprüfstand im Betrieb mit aktiviertem Ejektor

Abbildung 3 vermittelt eine erste Impression der sich bei der Nutzung des Ejektorprinzips einstellenden Strömungsphänomene. Das Bild zeigt eine Seitenansicht der lokalen Wasserspiegelabsenkung am Saugrohraustritt, die beim Kraft-

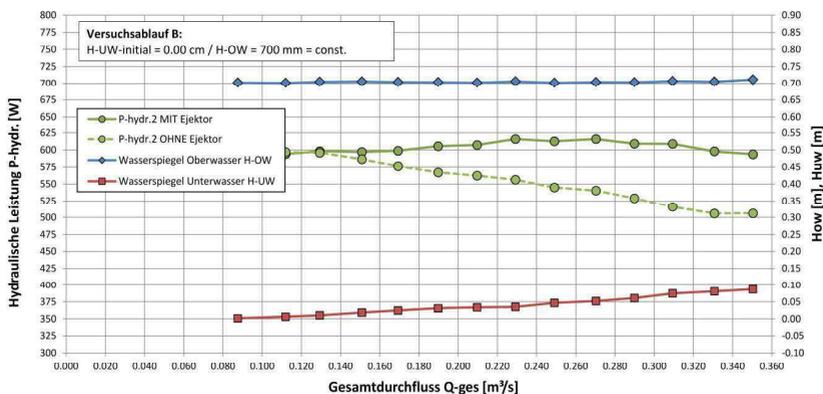
werksbetrieb mit Ejektor typischerweise beobachtet werden kann. Die oberhalb des Saugrohraustritts eingeleitete Ejektorströmung bewirkt im Unterwasser eine lokale Absenkung des Wasserspiegels (siehe „Y-Position Ejektorwalze“), welche am Saugrohraustritt zu einer eindeutig messbaren Druckabsenkung führt.

## 4 Versuchsdurchführung und Messergebnisse

Als Grundlage der Versuche war es zu Beginn wichtig festzustellen, welcher Turbinendurchfluss  $Q_{TU}$  bzw. welche Turbinenfallhöhe  $H_{TU}$  sich ohne aktiviertem Ejektor abhängig von der anliegenden Bruttofallhöhe ( $H_{Brutto} = H_{OW} - H_{UW}$ ) einstellt. Im Zuge von Zuordnungsmessungen wurden daher die Funktionen „ $Q_{TU}$  vs.  $H_{Brutto}$ “ bzw. „ $H_{TU}$  vs.  $H_{Brutto}$ “ ermittelt. Diese Funktionen sind von großer Bedeutung, um den Nutzen bzw. Mehrwert des Ejektors im Vergleich zur Situation ohne Ejektor für jeden Betriebspunkt bewerten zu können.

Für den eigentlichen Versuch wird der Prüfstand über die Hauptpumpe bei geschlossenem Ejektor langsam befüllt, bis ein definierter Oberwasserspiegel  $H_{OW}$  erreicht ist. Durch Höhenvariation der Wehrtafel im Unterwasserbecken, welche den abflussabhängigen Unterwasseranstieg definiert, ist der Unterwasserspiegel so einzustellen, dass die Ejektornase gerade noch eingestaut ist. Ausgehend von diesem Initialzustand, bei welchem sich abhängig von der Bruttofallhöhe ein Turbinendurchfluss von knapp 95 l/s einstellt, wird der Ejektor durch Öffnung des Flachschiebers aktiviert und die Drehzahl der Prüfstandhauptpumpe und somit auch der Gesamtabfluss Schritt für Schritt erhöht, wobei der Oberwasserspiegel konstant zu halten ist. Das beschriebene Basismessprogramm wurde für 4 weitere initiale Unterwasserspiegel, die mit Hilfe einer Höhenverstellung der Wehrtafel im Unterwasserbecken eingestellt werden konnten, wiederholt. Der Versuchsablauf sollte den Einfluss der Lage des Unterwasserspiegels (in Bezug auf die Ejektornase) auf die Wirkung des Ejektors zeigen.

Eine Darstellung von repräsentativen Messergebnissen des Basismessprogramms wird als Funktion des Gesamtabflusses  $Q_A = Q_{TU} + Q_{Ejektor}$  in Abbildung 4 gezeigt. Während die mit Rauten markierte Kurve die jeweiligen Messwerte des Oberwasserspiegels repräsentiert, der bei  $H_{OW} = 700$  mm konstant gehalten wurde, stellt die mit Quadraten markierte Kurve den unvermeidlichen Anstieg des Unterwassers dar. Die Subtraktion der beiden Werte ergibt die Bruttofallhöhe  $H_{Brutto}$ , auf Basis derer die Turbinenfallhöhe sowie der Turbinendurchfluss beim gleichen Betriebspunkt ohne Ejektor sowie das daraus resultierende Leistungsdarbot berechnet werden kann. Das Leistungsdarbot ohne Ejektor wird als gestrichelte Kurve, jenes mit aktiviertem Ejektor als durchgezogene Kurve dargestellt. In beiden Fällen dienen gefüllte Kreise als Markierungssymbol.



**Abbildung 4:** Experimenteller Nachweis der Leistungssteigerung für Versuchsablauf B bei einem initialen Unterwasserspiegel von 0 cm in Bezug auf die Ejektornase

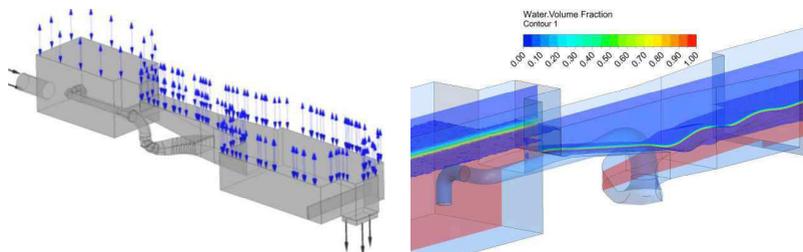
Ein Vergleich der Messergebnisse zeigt, dass es durch die Ejektorwirkung zu einer deutlichen Steigerung des Leistungsdarbots kommt, welche allerdings stark von der Abflussmenge und der initialen Einstauung der Ejektorrampe abhängig ist. Bei einem initialen Unterwasserspiegel von 0 cm in Bezug auf die Ejektornase kann eine mit dem Gesamtabfluss linear zunehmende Leistungssteigerung beobachtet werden. In diesem Fall lag die maximale Steigerung des Leistungsdarbots durch die Aktivierung des Ejektors bei etwa 18 %, welche bei einem Gesamtabfluss von  $Q_{ges} = 350$  l/s erreicht wurde. Das entspricht etwa dem 3.5-fachen des Ausbaudurchflusses der Turbine.

## 5 Numerische Strömungssimulation

Begleitet wurden die Modellversuche von numerischen Strömungssimulationen [Schiffer 2015]. Unter Verwendung des Softwarepakets ANSYS Workbench wurde für den zu untersuchenden Strömungsraum ein einziges, zusammenhängendes Rechennetz erzeugt. Während die Kernströmung mit Tetraederelementen vernetzt wurde, wurden Prismenschichten zur Auflösung der Grenzschicht an der Wand verwendet. Im Bereich des Phasenübergangs von Fluid auf Luft wurde eine zusätzliche Verdichtung des Rechennetzes implementiert.

Für die stationäre Simulation des Strömungsproblems mit freier Oberfläche wurde das in ANSYS-CFX implementierte homogene Mehrphasen-Modell in Kombination mit dem dafür empfohlenen  $k-\epsilon$ -Turbulenzmodell verwendet. Für die räumliche Diskretisierung der RANS-Gleichungen wurde das High-Resolution-Verfahren verwendet, welches über einen sogenannten Blend-Factor zwischen einer Diskretisierung 1. bzw. 2. Ordnung wechselt. Als Eintrittsrand-

bedingungen wurde der Gesamtdurchfluss in 5 Schritten ( $Q = 87.5$  l/s für die Simulation mit geschlossenem Ejektor,  $Q = 130 / 170 / 210 / 250$  l/s für die Simulation mit aktiviertem Ejektor) definiert. Am Austritt aus dem Modell wurde eine konstante Einstau-Wasserhöhe von 0.30 m vorgegeben. An der oberen Öffnung des Modells wurde ein Absolutdruck von 0 bar verwendet und lediglich eine Zirkulation von Luft zugelassen.

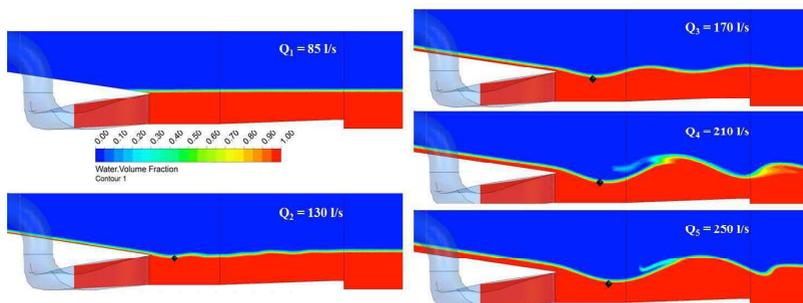


**Abbildung 5:** Links: CFD-Modell mit Randbedingungen  
Rechts: Simulationsergebnis bei  $Q_{\text{ges}} = 170$  l/s mit einer Darstellung der Phasengrenze bzw. der freien Wasseroberfläche

Eine wichtige Voraussetzung für eine stabile Strömungssimulation war die Definition von Startwerten für den Wasser-Volumen-Anteil. Auf Basis der Erkenntnisse aus dem Modellversuch wurden die Wasserspiegel im Ober- und Untertank daher zu Beginn der Simulationen vorgegeben. Die freie Wasseroberfläche konnte sich danach im Zuge der Simulation von selbst einstellen.

Es stellte sich heraus, dass die Kombination der oben genannten Randbedingungen, Solver-Einstellungen und Startwerte zu einem zufriedenstellenden Konvergenzverhalten führten. Nichts desto trotz dauerte es mehrere Tausend Iterationen, bis stabile Abflüsse sowie stabile Ober- und Unterwasserspiegel erreicht wurden (siehe Abbildung 5, rechts).

Ein beispielhaftes Ergebnis der CFD-Simulation wird in Abbildung 6 dargestellt, welche die Veränderung der Wellenstruktur im Unterwasser präsentiert. Zum einen zeigt sich, dass die Aktivierung des Ejektors und die Zunahme des Gesamtabflusses zu einer deutlichen Absenkung des Unterwasserspiegels im Bereich des Saugrohraustritts führen. Zum anderen wird ersichtlich, dass die simulierte Position des Scheitelpunkts der Ejektorwelle erstaunlich gut mit der im Zuge des Experiments ermittelten Position (siehe schwarze Markierungspunkte) übereinstimmt.



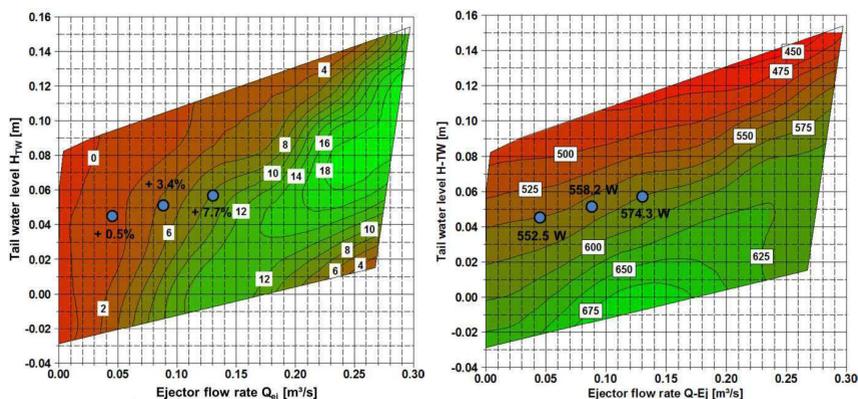
**Abbildung 6:** Konturplot des Wasser-Volums-Anteils auf einer Mittelebene im Modell bei einem Gesamtabfluss von  $Q_1 = 87.5 \text{ l/s}$  bis  $Q_5 = 250 \text{ l/s}$

Obwohl die präsentierten Ergebnisse auf den ersten Blick qualitativ sehr gut mit den Erkenntnissen aus dem Modellversuch übereinstimmen, zeigte sich bei der Simulation von Betriebspunkten mit sehr hohem Abfluss ( $Q_{\text{ges}} \geq 250 \text{ l/s}$ ) eine schlechte Konvergenz des Ober- und Unterwasserspiegels, was die Beurteilung des vollen Potentials der Ejektorwirkung erschwert. An dieser Stelle sind weitere Anpassungen des CFD-Modells sowie der Rechnetze erforderlich.

## 6 Vergleich von Feldversuch, Modellversuch und Simulation

Stellt man das experimentell ermittelte hydraulische Leistungsdarbot sowie die Leistungssteigerung als Funktion des Abflusses und der unterschiedlichen, untersuchten Unterwasserspiegel dar, so lässt sich das in Abbildung 7 gezeigte Kennfeld ableiten, welches für die geometrischen Verhältnisse des Kraftwerks Waidhofen eine maximale Leistungssteigerung von  $\sim 18\%$  zeigt. Da der UW-Spiegel in der Prototypenanlage wie erwähnt zu hoch liegt (siehe oberes Ende des farblich dargestellten Kennfeldausschnitts), kann hier nicht das volle Potential der Ejektorwirkung ausgeschöpft werden. Sehr wohl wird die Größenordnung einer 20%-igen Leistungssteigerung allerdings am ideal ausgeführten Standort KW-Mühlthalwehr erreicht.

Darüber hinaus wurden in das Kennfeld auch die im Zuge der CFD-Simulation ermittelten Leistungssteigerungen eingetragen, welche sich erstaunlich gut mit den experimentell ermittelten Ergebnissen decken.



**Abbildung 7:** Rechts: Kennfeld der experimentell ermittelten prozent. Leistungssteigerung  
Rechts: Kennfeld des experimentell ermittelten Leistungsarbeits  $P_{Hydr}$ .

## 7 Literatur

- Sliskii, S. M (1953): Ejection into tailraces of hydropower plants. 1. A. Moskau: Gosudarstvennoe Energeticheskoe Izdatel'stvo.
- Mosonyi, E. (1966): Wasserkraftwerke. Band1 Niederdruckanlagen. VDI-Verlag.
- Schiffer, J., et al. (2015): Experimentelle Untersuchung der Ejektorwirkung bei vertikalen Kaplan-Turbinen. WasserWirtschaft 105, Heft 5, S. 33-39.
- Fritsch, R., et al. (2015): Ejektorwirkung bei Überwasser mit Vertikaler Kaplan-Turbine. WasserWirtschaft 105, Heft 10, S. 32-35.
- Schiffer, J., et al. (2015): Numerical and experimental investigation of the ejector effect applicable to low head vertical Kaplan turbines. Proceedings of the Conference On Modelling Fluid Flow, Budapest.

Autor:  
Dipl.Ing., Dr.techn. Jürgen Schiffer-Rosenberger

Jaberg&Partner GmbH  
Kerscheckstraße 41, 8076 Vasoldsberg

Tel.: +43 316 873 7573  
E-Mail: juergen.schiffer@jabergundpartner.com