Zeitschrift: Bulletin Electrosuisse
Herausgeber: Electrosuisse, Verband für Elektro-, Energie- und Informationstechnik
Band: 105 (2014)
Heft: 2

Artikel: Francisturbinen in Trinkwassersystemen
Autor: Amstutz, Oliver / Borer, Silvan / Borer, Silvan / Staubli, Thomas
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-856191

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Francisturbinen in Trinkwassersystemen

Spezielle Bauart ermöglicht ökonomisch sinnvollen Betrieb

Ein Vorteil von Francisturbinen ist, dass sie bei beliebigem Gegendruck zur Druckreduktion und Energiegewinnung eingesetzt werden können. Auch in leistungsmässig kleinen Trinkwassersystemen können sie auf wirtschaftliche Weise elektrischen Strom erzeugen. Eine Francisturbine wird hier vorgestellt, die konkret für die Kraftwerke Schatzalp und Rüchiwald entwickelt wurde. Um unter den gegebenen Umständen einen akzeptablen Wirkungsgrad zu erreichen, wurde die Laufradgeometrie gegenüber klassischen Francisturbinen angepasst.

Oliver Amstutz, Silvan Borer, Thomas Staubli

Francisturbinen sind Reaktionsturbinen und bauen sowohl Druck als auch kinetische Energie über das Laufrad ab. Der Druck am Austritt der Turbinen kann anlagebedingt beliebig hoch sein, darf aber wegen Kavitationsgefährdung einen minimalen Druck nicht unterschreiten.

Aktionsturbinen, wie zum Beispiel Pelton- oder Querstromturbinen, verarbeiten einzig die kinetische Energie mit ihren in Luft drehenden Laufrädern. Normalerweise handelt es sich dabei um Luft bei Umgebungsdruck. Bei Bedarf kann dieser Druck im geschlossenen Gehäuse auch leicht erhöht werden. Man spricht in diesem Fall von Gegendruckturbinen, obwohl dieser Begriff eigentlich für Dampfturbinen eingeführt wurde.

In geschlossenen Trinkwassersystemen haben Francisturbinen wegen des einfacheren Einbaus wesentliche Vorteile gegenüber Peltonturbinen, denn Francisturbinen können bei beliebigem Gegendruck zur Druckreduktion und Energiegewinnung eingesetzt werden.

Druckreduzierventile beim Trinkwasser

Druckreduzierventile (Druckvernichter) werden in Trinkwassersystemen eigentlich in jedem Haus eingesetzt, da der Versorgungsdruck dort in den allermeisten Fällen grösser als der benötigte Druck ist. Bei diesen kleinen Druckreduzierventilen lohnt sich der Einsatz von Energierückgewinnungsturbinen aber nicht, da die Anzahl der Betriebsstunden zu gering ist, der Volumenstrom zu stark variiert und die umzusetzenden Energiemengen zu klein sind.

Wenn beispielsweise in Talschaften ganzen Siedlungen ein Druckvernichter vorgeschaltet ist, könnte sich der Einbau einer Turbine als ökonomisch sinnvoll erweisen, wobei allerdings die starken Verbrauchsvariationen eine besondere Herausforderung darstellen.

Im Gegensatz dazu liefern Quellfassungen einen wesentlich konstanteren Volumenstrom. Das Quellwasser wird in Reservoirs eingespeist, von wo das Wasser dann weiter verteilt wird. Je nach Druck- und Volumenstromverhältnissen lohnt sich hier der Einsatz von Turbinen. Da in den Reservoirs ein freier Wasserspiegel bei Umgebungsdruck vorhanden ist, ist die Peltonturbine für diesen Einsatz prädestiniert. Wenn hingegen das Wasser von den Reservoirs in tiefer gelegene Systeme weitergeleitet wird, wäre eine Turbine, die im geschlossenen System arbeiten kann, bedeutend besser geeignet.

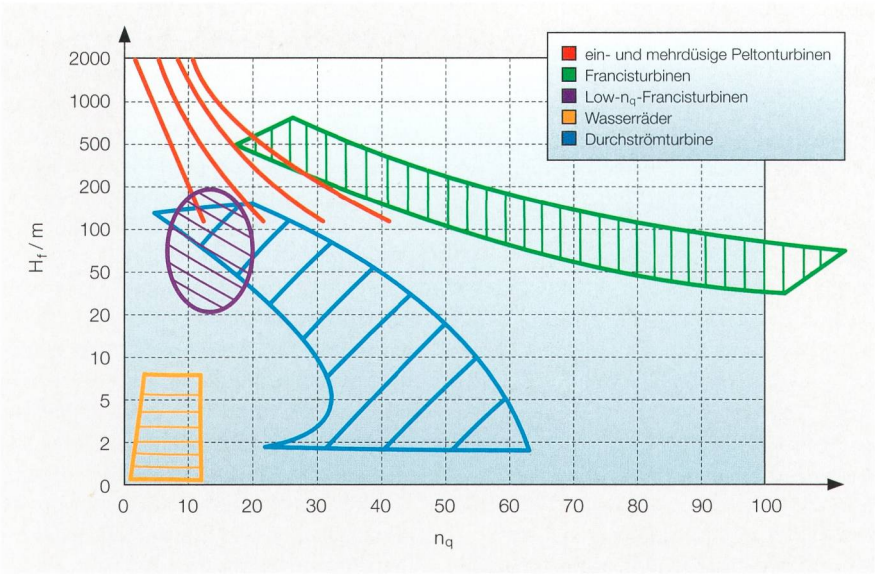
Die Analyse von Situationen in Trinkwassersystemen, in denen Turbinen Druckreduzierventile ersetzen könnten, zeigt, dass meist grosse Differenzdrücke bei vergleichsweise kleinen Volumenströmen vorliegen. Für diese Randbedingungen eignen sich Peltonturbinen eigentlich meist besser als Francisturbinen. Da sich Francisturbinen bei Gegendruck aber einfach einbauen lassen, wurde im hier vorgestellten Projekt eine Francisturbine entwickelt, die sich für ein Peltonturbinen-Umfeld eignet.

Geeignete Turbinentypen

Die Betriebsbereiche der verschiedenen Turbinentypen lassen sich über die spezifische Drehzahl charakterisieren. Sie bildet die Ausgangslage zur Wahl von Turbinen. Historisch bedingt wird meist keine dimensionslose Kennzahl verwendet, sondern die nicht dimensionslose Kennzahl n_q, welche wie folgt definiert wird:

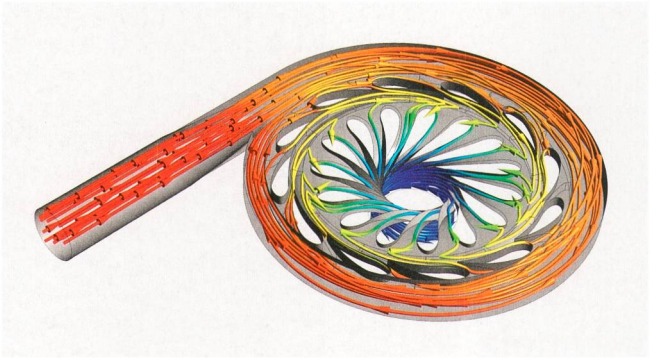
$$n_q = n_{BEP} \cdot \frac{\sqrt{Q}}{H^{3/4}}$$

mit Q = Volumenstrom in m³/s, H = Fallhöhe in m, n = Drehzahl in U/min. Diese Angaben beziehen sich im Allgemeinen auf den Bestpunkt (BEP) der Turbinen.



[1]

Bild 1 Turbinentypen in Funktion der Fallhöhe und der spezifischen Drehzahl.



Amstutz, Borer, Staubli

Bild 2 Simulationsdomäne der Francisturbine mit Stromlinien.

Eine geringe spezifische Drehzahl bedeutet bei technisch möglichen Drehzahlen einen geringen Volumenstrom und eine hohe Fallhöhe; eine hohe spezifische Drehzahl folgt aus einem grossen Volumenstrom und geringer Fallhöhe.

Bild 1 gibt einen Überblick über die Turbinentypen, welche sich aus empirischer Erfahrung heraus für geforderte spezifische Drehzahlen und Fallhöhen am besten eignen, d.h. einen guten Wirkungsgrad aufweisen. Wie aus **Bild 1** ersichtlich, eignen sich Peltonturbinen am besten für spezifische Drehzahlen unter n_q = 15, während Francisturbinen typischerweise im Bereich von spezifischen Drehzahlen zwischen n_q = 25 bis 100 eingesetzt werden. Für Drehzahlen ausserhalb des typischen Bereichs nimmt der Wirkungsgrad ab. Durch Massnahmen zur Verbesserung der Strömungsführung kann dieser physikalisch bedingte Wirkungsgradabfall aber reduziert werden.

Im Diagramm sind typische Anwendungsbereiche in Trinkwasserversorgungen violett eingekreist. Das Ziel war, Francisturbinen mit gutem Wirkungsgrad für diese Anwendungsbereiche zu entwickeln.

Entwicklung

Die hier vorgestellte Francisturbine wurde konkret für zwei Kraftwerke entwickelt. Im Kraftwerk Schatzalp ist $n_q = 9$ und im Kraftwerk Rüchiwald $n_q = 11$. Diese zwei Turbinen liegen im violett markierten Bereich von **Bild 1**. Für Turbinen mit grösseren spezifischen Drehzahlen bis n_q = 20 wären weitere Entwicklungsarbeiten notwendig.

Um bei den gegebenen Randbedingungen einen akzeptablen Wirkungsgrad zu erreichen, wurde die Laufradgeometrie gegenüber klassischen Francisturbinen wie folgt angepasst:

- Verlängerte Führung der Strömung in den Laufradkanälen.
- Reduktion der Kanalhöhe.
- Verdickung der Laufschaufeln im Eintrittsbereich.

Die daraus resultierende Laufradgeometrie ist in **Bild 2** dargestellt. Die Formgebung des Laufrades und des Leitapparates wurde mithilfe numerischer Strömungsberechnung schrittweise verbessert.

Numerische Strömungsberechnung

In **Bild 2** ist das Simulationsgebiet abgebildet. Für die Kennlinienberechnungen wurde eine Strömungspassage durch den Leitapparat und einen Laufschaufelkanal simuliert. Die Rotationssymmetrie der Strömung und der Geometrie wurde angenommen. Es wurden Simulationen mit und ohne Rauheit der Oberflächen durchgeführt. Die Spirale wurde vollumfänglich simuliert und über ein Stage-Interface mit der Leitvorrichtung gekoppelt. Als Simulationsrandbedingungen wurden am Eintritt der Totaldruck und am Austritt der statische Druck gewählt. Bei der Simulation handelt es sich um eine zeitgemittelte Rechnung.

Nebst der Kennlinienberechnung wurden diverse weitere Simulationen zur Verifikation der Qualität der Kennlinienpunkte durchgeführt, unter anderem eine transiente 360°-Simulation der Turbine, inklusive Spirale.

In **Tabelle 1** sind die Randbedingungen der Computational-Fluid-Dynamics-Simulation (CFD) aufgelistet.

Herstellung der Turbine

Das Laufrad der Klein-Francisturbine auf der Schatzalp wurde mit dem «Selective Laser Sintering»-Prozess (SLS-Prozess) aus Polyamid hergestellt. Beim SLS-Prozess wird das 3D-CAD-Modell in einzelnen Schichten (0,05 mm bis 0,15 mm) aufgebaut. Die Kosten eines so hergestellten Laufrades betragen einen Fünftel einer Ausführung als Stahllaufrad mit einem «Selective Laser Melting»-Herstellungsverfahren (SLM).

Das im SLS-Prozess verwendete Material ist Polyamid 12 (PA 12) und zeichnet sich durch folgende Eigenschaften [3] aus:

- Gute mechanische Eigenschaften.
- Zertifiziert für Lebensmittelkontakt gemäss der EU-Kunststoff-Direktive 2002/72/EC (Ausnahme: hochalkoholische Genussmittel).
- Biokompatibel nach EN ISO 10993-1 und USP/level VI/121 °C.
- Geringe Wasseraufnahme.
- Niedriger Reibungskoeffizient und sehr gute Abriebsbeständigkeit.

Damit die Turbine im Trinkwasserbereich verwendet werden darf, muss sie SVGW-zertifiziert sein [4] und durch die örtliche SVGW-Stelle abgenommen werden.

Das Laufrad für das Kraftwerk Rüchiwald wurde aus Chromstahl zweiteilig gefräst. Dies war notwendig, da die Zertifizierung mit der SVGW-Stelle noch nicht erreicht werden konnte. Um den Wirkungsgrad des Laufrades zu verbessern, wurde ausserdem die Oberfläche poliert.

Generator

Als elektrische Maschine wurde ein von der Firma Jakob Müller AG entwickeltes Produkt gewählt, welches eine

Netzdaten	Netzgrösse 1,0 bis 1,2 Mio. Knoten (strukturiert) Y+ zwischen 40 und 70
Solver	OpenFoam 2.2 [2]
Zeitdiskretisierung	Stationär
Advektives Schema	High Resolution
Transientes Schema	High Resolution
Turbulenzmodell	SST mit automatischen Wandfunktionen
Konvergenzkriterium	Max. RMS, Abbruchgrenze 10^{-4} Imbalance, Abbruchgrenze 10^{-5}
Hardware	Cluster mit Intel CPUs und 24 Gb Memory

Tabelle 1 Übersicht über die Grundeinstellungen der CFD-Simulation.

Drehzahl / min^{-1}	Lastwiderstand / Ω	Wirkungsgrad / %
1000	175	91,9
3000	150	93,2
3500	175	92,7

Tabelle 2 Kennwerte des neu entwickelten PMSM-Generators.

Amstutz, Borer, Staubli

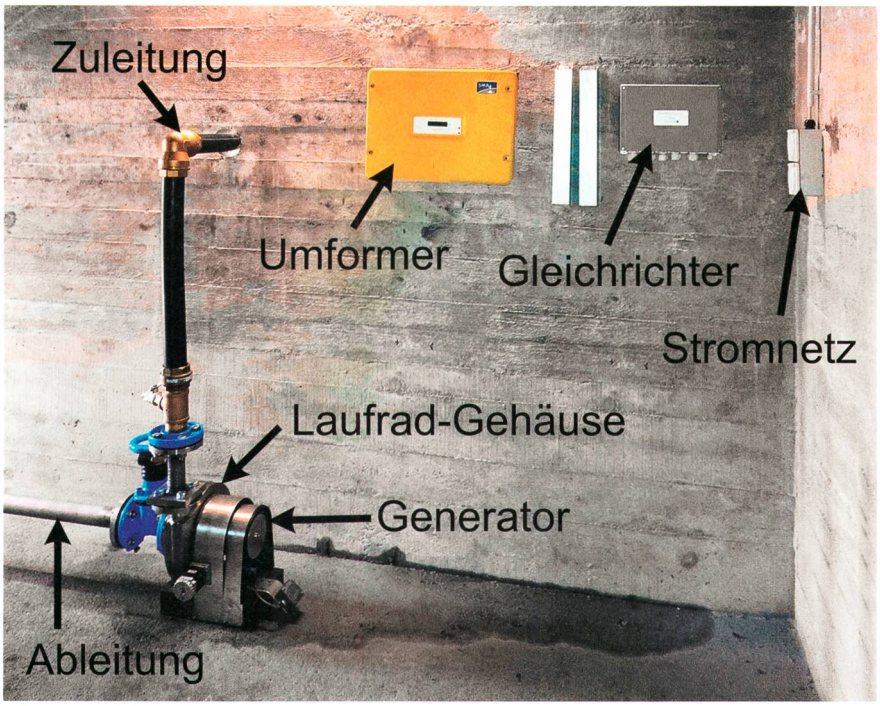


Bild 3 Installation der Klein-Francisturbine im Kraftwerk Schatzalp in Davos.

wesentliche Drehzahlerhöhung gegenüber konventionellen Maschinen erlaubt. Dies bringt den Vorteil, dass die spezifische Drehzahl in einen höheren, realisierbaren Bereich verschoben werden kann.

Der entwickelte Generator ist eine permanenterregte Synchronmaschine (PMSM), ausgeführt als Aussenläufer mit Vielpolen. Die Konstruktion als Aussenläufer ermöglicht kleine Abmessungen des Rotors und somit dessen Einbau in die Lagerung der Turbine. Weil die Anzahl der Magnete um 2 grösser ist als die Anzahl der Statorpole, liegt eine elektrische Übersetzung vor. Dies ergibt eine optimale Frequenz für den Gleichrichter vor dem Umformer. Mit dem speziellen Design der Statorbleche wird erreicht, dass maschinell hergestellte Spulen aufgesteckt und Kühlbohrungen für den Stator angebracht werden können.

Am Generatorausgang wird ein Gleichrichter und ein Umformer zur Erzeugung der Wechselspannung angeschlossen. Damit wird die Drehzahl nach einer vorgegebenen Leistungskurve geregelt, bevor die Einspeisung ins Netz vorgenommen wird.

In **Tabelle 2** ist der Wirkungsgrad der PMSM der neusten Generation bei drei unterschiedlichen Drehzahlen und Lastwiderständen aufgelistet.

Die Installation des ersten Prototypen der Kleinturbine in der Schatzalp ist in **Bild 3** gezeigt. Der hier eingesetzte PMSM-Generator entspricht noch einer älteren Generation und erreicht lediglich einen Wirkungsgrad von 80 %. Für die Rüchiwaldturbine wird der weiterentwickelte Generator verwendet.

Wirkungsgradmessungen

Die Turbinen wurden im Prüfstand der Jakob Müller AG getestet. Dabei wurden die Generatorleistung, der Volumenstrom und die Drücke vor und nach der Turbine gemessen. Im Bestpunkt betrug der Wirkungsgrad des Maschinensatzes der Rüchiwaldturbine 73 %. Der Maschinensatzwirkungsgrad der Schatzalpturbine betrug lediglich 52 %. Dies ist auf den Generatorwirkungsgrad, auf die grössere Leckage und vor allem auch auf die Rauheit des Laufrades zurückzuführen.

Der Maschinensatzwirkungsgrad ist das Verhältnis der erhaltenen elektrischen Leistung zur zugeführten hydraulischen Leistung. Damit der hydraulische Wirkungsgrad der Messung bestimmt werden konnte, wurden Annahmen für die Leckage, die Lagerreibungsverluste und einen Wirkungsgrad für den Generator gemacht. Der in der Messung verwendete Generator entspricht der neuen Generation und weist einen Wirkungsgrad gemäss **Tabelle 1** aus. Die Leitschaufelstellung wurde bei diesen Versuchen konstant gehalten, die Drehzahl variiert.

Der experimentell bestimmte Verlauf des hydraulischen Wirkungsgrades und die aus den CFD-Simulationen ermittelten Werte der Rüchiwaldturbine sind in **Bild 4** im Bereich von 80 % bis 125 % des Nennvolumenstroms dargestellt. Die Messresultate liegen im Vergleich zur Simulation deutlich tiefer. Dies könnte auf einen unterschätzten Einfluss der Rauheit oder auf die getroffenen Annahmen zu Leckage, Lagerreibung und Generator-Wirkungsgrad zurückzuführen sein.

Bei der Schatzalpturbine mit dem rauen Polyamidlaufrad ergab die Simulation im BEP einen hydraulischen Wirkungsgrad von 71 %. Simuliert man die Schatzalpturbine ohne den Einfluss der

Amstutz, Borer, Staubli

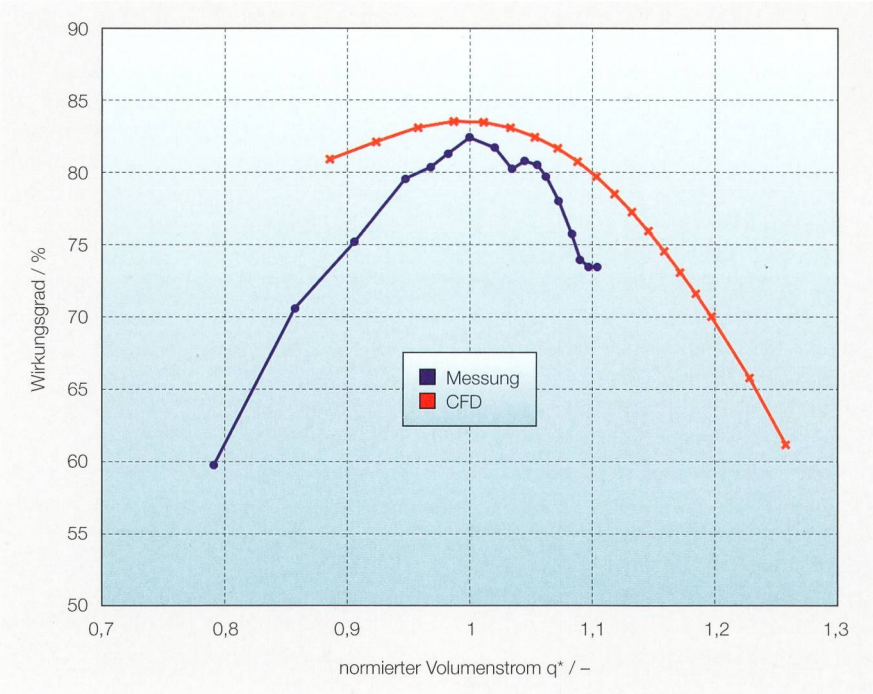
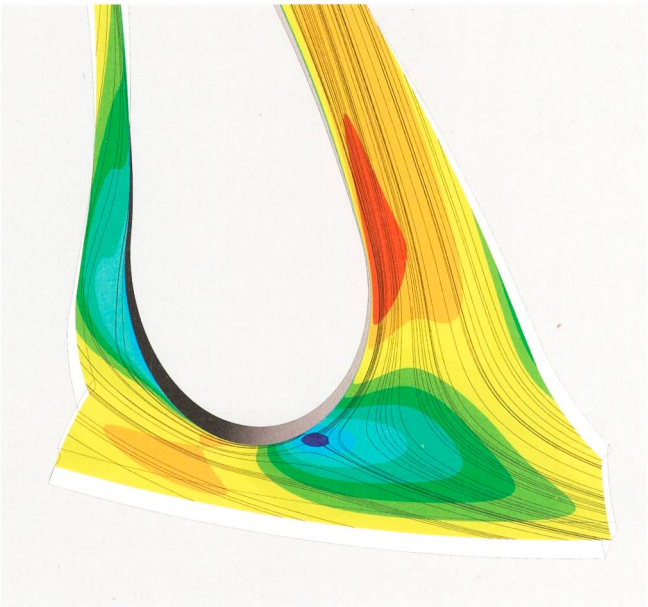


Bild 4 Wirkungsgradverlauf der Rüchiwaldturbine bei konstanter Fallhöhe.



Amstutz, Borer, Staubli

Bild 5 Umströmung der Laufradschaufeleintrittskante bei Teillast (blau = langsam, rot = schnell).

Rauheit, so steigt der Wirkungsgrad auf 83 %. Aus dem Vergleich der Simulationen mit rauen und glatten Oberflächen wird der sehr grosse Einfluss der Rauheit bei diesen sehr kleinen spezifischen Drehzahlen auf den Wirkungsgrad deutlich.

Ein Vorteil der breiten Laufradschaufeln mit den stark gerundeten Eintrittskanten ist das verbesserte Teil- oder Überlastverhalten. Der Staupunkt ist variabel, die Strömung löst weniger schnell an der Laufradschaufel ab, wie dies anhand eines Teillastpunktes bei 0,88 des Nennvolumenstroms in **Bild 5** illustriert ist. Leider bestätigte sich dieses erwartete gutmütige Off-Designverhalten nicht bei den Messungen.

Erkenntnisse

Bei mehrmonatigem Dauerbetrieb auf der Schatzalp hat sich die Turbine im Einsatz bewährt. Das eingesetzte und mit Selective-Laser-Sintering-Verfahren hergestellte Polyamid-Laufrad erwies sich als zuverlässig und zeigte nach dem Betrieb keine sichtbaren Abnutzungserscheinungen.

Lastabwurfversuche haben gezeigt, dass die Drehzahl vom Best Efficiency Point (BEP) zum Durchbrennpunkt um 35 % anstieg und der Volumenstrom um 20 % abnahm. Für den Maschinensatz stellt diese Drehzahlerhöhung keine unzulässige Belastung dar. Da die Abnahme des Volumenstroms bei Lastabwurf, wegen der durch die Verzögerung der Wassermassen im System bewirkte Druckzunahme vor der Turbine, nicht plötzlich erfolgt, ist nicht mit einem Druckstoss im hydraulischen System zu rechnen. Dadurch sind keine zusätzlichen, kostentreibenden Einbauten wie zum Beispiel eines Schwungrades, eines Windkessels oder eines Bypasses notwendig.

Mit der hier vorgestellten Francisturbine mit kleiner spezifischer Drehzahl wurde eine Alternative zu Druckvernichtern geschaffen, die auch in leistungsmässig kleinen Trinkwassersystemen wirtschaftlich sinnvoll elektrischen Strom erzeugen kann.

Referenzen

[1] J. Giesecke, E. Mosonyi. Wasserkraftanlagen: Planung, Bau und Betrieb, Springer, 2009.
[2] OpenFoam, www.openfoam.org.
[3] www.materialdatacenter.com.
[4] SVGW = Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches, www.svgw.ch.

Angaben zu den Autoren

Prof. Dr. **Thomas Staubli** doktorierte an der ETH Zürich. Er arbeitete auf dem Gebiet der experimentellen Fluidmechanik bei Sulzer Hydro (heute Andritz Hydro) in Zürich. Anschliessend leitete er das Hydraulische Labor an der ETHZ und arbeitet in Forschungsprojekten auf dem Gebiet der Wasserkraft. Seit 1996 ist er in Lehre und Forschung an der Hochschule Luzern – Technik & Architektur tätig.
HSLU, 6048 Horw, thomas.staubli@hslu.ch

Oliver Amstutz hat das Studium an der Hochschule Luzern – Technik & Architektur 2011 mit dem BSc in Maschinentechnik Vertiefung Fluiddynamik und Hydromaschinen abgeschlossen. Er hat sich anschliessend als Assistent ebenfalls an der Hochschule Luzern mit der Thematik Hydromaschinen, Optimierung und Strömungssimulationen auseinandergesetzt.
HSLU, 6048 Horw, oliver.amstutz@hslu.ch

Silvan Borer ist bei der Firma Jakob Müller AG als leitender Ingenieur in der Vorentwicklung von Aktuatoren tätig. In dieser Funktion ist er für die Entwicklung der Francisturbine verantwortlich.
Jakob Müller AG, 5070 Frick, s.borer@mueller-frick.com

Résumé

Des turbines Francis dans les systèmes d'eau potable

Un modèle spécial permet une exploitation judicieuse d'un point de vue économique

En lieu et place de réducteurs de pression, il est possible d'utiliser des turbines destinées à la production d'électricité dans les systèmes d'eau potable de certains sites. La plupart du temps, l'on se trouve en présence de grandes différences de pression pour des débits relativement faibles, ce qui suggérerait l'utilisation de turbines Pelton. Sachant que les turbines Francis peuvent être utilisées pour réduire la pression et produire de l'énergie, et ce, quelle que soit la contre-pression, une turbine Francis appropriée à un environnement de turbines Pelton a été conçue dans le cadre du présent projet. Cette nouvelle turbine Francis développée pour les centrales de Schatzalp et de Rüchiwald se distingue par un usinage non conventionnel de ses pales afin d'obtenir un rendement acceptable dans les conditions données.

No

Anzeige

Digital kommunizieren, verkaufen
und zusammenarbeiten.

mazze.ch
matthias walti informationsarchitekt | ch-5630 muri