



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech

Schlussbericht vom 13.11.2020

Pilotprojekt eines PaT-Francis-Gesamtpakets zur Nutzung kleiner Wasserkraftpotentiale

in Fischwanderhilfen und historischen Wehr- und Kanalanlagen



Quelle: Hydro Engineering 2019



Datum: 13.11.2020

Ort: Bern

Subventionsgeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Subventionsempfänger/innen:

Hydro Engineering GmbH
Im Langwingerten 8
8450 Andelfingen
www.hydro-engineering.ch

JMC Engineering
Rue des Jacquettes 8
1446 Baulmes

revita power GmbH
Weyackerweg 484
4712 Laupersdorf
www.revita.ch

Autor/in:

Peter Eichenberger, Hydro Engineering GmbH, peter.eichenberger@hydro-engineering.ch
Patrick Kamber, revita power, [patrick.kamber@revitapower.ch](mailtopatrick.kamber@revitapower.ch)

BFE-Projektbegleitung:

Dr. Men Wirz, men.wirz@bfe.admin.ch
Dr.-Ing. Klaus Jorde, klaus.jorde@kjconsult.net

BFE-Vertragsnummer: SI/501752-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.



Zusammenfassung

Zur Nutzung kleiner und kleinster Wasserkraftpotentiale im Nieder- und Mitteldruckbereich gibt es im postindustriellen Europa keine Turbinenbauweise, die kompakt, standfest und gleichzeitig wirtschaftlich ist. Ausgehend von rückwärtslaufenden Standard-Kreiselpumpen als Turbinen (PaT) wurde ein neues Konzept entwickelt, wie mit Hilfe moderner Fertigungsmethoden und Standardkomponenten aus der Gebäudetechnik und anderen Erneuerbaren Energietechnologien eine kostengünstige Wasserkraftmaschine - genannt PaT-Francis – gebaut werden kann, die imstande ist, ein variables Wasserdargebot dank Einsatz eines Leitapparats abzuarbeiten. Damit wird das Anwendungsfeld einer PaT wesentlich ausgeweitet. Schwachstellen kleiner Francis-Turbinen wie stark abfallende Wirkungsgrade im Teillastbetrieb oder die Verschmutzungsanfälligkeit wurden mit einem drehzahlvariablen Betrieb resp. einem besonderen Spülprogramm verbessert.

In einem Pilotprojekt im Zürcher Weinland wurde eine 2.5 kW PaT-Francis installiert und während den ersten anderthalb Betriebsjahren ausgiebig getestet. Der praktisch unterbruchsfreie Betrieb der Anlage bestätigt die hohe Zuverlässigkeit, die mit der gewählten Konstruktion und Ausrüstung beabsichtigt worden war. Die Output-Leistung der Pilotanlage von 2.5 kW bei 80 l/s Durchfluss und einem max. Wirkungsgrad der PaT-Francis-Turbine von 74.5% liegen in Anbetracht der kleinen Grösse im Rahmen der Erwartung. Verbesserungspotential konnte hingegen im Gesamtwirkungsgrad identifiziert werden, der wegen zu gross gewähltem Generator und Frequenzumrichter nur bei max. 64% liegt.

Das PaT-Francis-Konzept eignet sich für Anwendungen im Leistungsbereich bis ca. 50 kW und kann dank einer kompakten und schallminimierenden Bauweise für die Nutzung von verschiedenen Potentialen inmitten von bewohnten Gebieten in historischen Kanälen aber auch in Fischwanderhilfen eingesetzt werden.

Résumé

Dans l'Europe post-industrielle, il n'existe pas de conception de turbine pour l'utilisation de petits et très petits potentiels hydroélectriques dans la gamme des basses et moyennes chutes qui soit à la fois compacte, fiable et économique. Sur la base des pompes centrifuges fonctionnant en turbines (PaT), un nouveau concept a été développé pour construire une machine hydroélectrique rentable - appelée PaT-Francis - en utilisant des méthodes de production modernes et des composants standard issus de l'ingénierie des services du bâtiment et d'autres technologies d'énergie renouvelable. Les points faibles des petites turbines Francis, tels que les rendements fortement décroissants à charge partielle ou la susceptibilité à l'encrassement, ont été améliorés grâce à un fonctionnement à vitesse variable ou à un programme spécial de purge respectivement.

Dans le cadre d'un projet pilote dans le Weinland zurichois, une PaT-Francis de 2,5 kW a été installé et largement testé pendant la première année et demie de fonctionnement. Le fonctionnement pratiquement ininterrompu de la centrale confirme la grande fiabilité qui était recherchée avec la conception et l'équipement choisis. La puissance de la centrale pilote de 2,5 kW à un débit de 80 l/s et un rendement maximal de 74,5 % pour la turbine PaT-Francis sont conformes aux attentes, compte tenu de la petite taille. Un potentiel d'amélioration a toutefois été identifié dans le rendement globale, qui n'est que de 64 % au maximum en raison d'un générateur et d'un convertisseur de fréquence surdimensionnés.



Le concept PaT-Francis est adapté aux applications dans la gamme de puissance jusqu'à environ 50 kW et, grâce à sa conception compacte et silencieuse, il peut être utilisé pour exploiter différents potentiels au milieu des zones habitées dans les canaux historiques mais aussi dans les passes à poissons.

Summary

In post-industrial Europe, there is no turbine design for small and very small hydropower potentials in the low and medium head range that is compact, reliable and at the same time economically viable. Based on standard reverse-rotating centrifugal pumps as turbines (PaT), a new concept has been developed now, with the use of modern production methods and standard components from building services engineering and other renewable energy technologies, a cost-effective hydro turbine - called PaT-Francis - can be built, which is capable of handling a variable flow thanks to the use of a guide vane. This greatly extends the field of application of a PaT. Weak points of small Francis turbines, such as strongly decreasing efficiency in part-load operation or the susceptibility to clogging, have been improved with variable speed operation or a special flushing programme respectively.

In a pilot project in the Zürcher Weinland, a 2.5 kW PaT-Francis was installed and extensively tested during the first year and a half of operation. The practically uninterrupted operation of the plant confirms the high reliability that was intended with the chosen design and equipment. The pilot plant's output of 2.5 kW at 80 l/s flow rate and a maximum efficiency of 74.5% for the PaT-Francis turbine are within expectations, considering the small size. However, potential for improvement could be identified in the overall efficiency, which is only a maximum of 64% because the generator and frequency converter were chosen too large.

The PaT-Francis concept is suitable for applications in the power range up to approx. 50 kW and, thanks to its compact and noise-reducing design, can be used to exploit various potentials in the midst of inhabited areas in historical canals but also in fish ladders.

Take-home messages

- Die Weiterentwicklung einer Pumpe als Turbine (PaT) zu einer vollwertigen, aber bezahlbaren Francis-Turbine – genannt PaT-Francis – konnte in einer 2.5 kW Pilotanlage an einer historischen Mühle im Zürcher Weinland installiert und während den ersten anderthalb Betriebsjahren ausgiebig getestet werden.
- Die PaT-Francis-Turbine der Pilotanlage mit 5.15 m Nettofallhöhe kann dank drehzahlvariablem Betrieb und permanent-magnetische erregtem Generator einen weiten Betriebsbereich von 20 l/s bis 90 l/s Durchfluss abarbeiten und erzielt mit einem Turbinenwirkungsgrad von 74.5 % im Bestpunkt eine im Verhältnis zur geringen Grösse angemessene Leistungsfähigkeit.
- Die Pilotanlage wurde als Gesamtpaket oder neudeutsch «water-to-wire» konzipiert – mit der PaT-Francis Turbine im Zentrum – und bietet bei einer Gesamtinvestition von CHF 80'000 Standardlösungen für alle relevanten Bereiche einer Kleinstwasserkraftanlage, vom Umgang mit Geschwemmssel über die Schall- und Körperschallminderung bis hin zur gesetzeskonformen Netzeinspeisung.



- Das PaT-Francis-Konzept eignet sich für die Nutzung kleiner Wasserkraftpotentiale bis ca. 50 kW in historischen Kanälen, Fischwanderhilfen und in Trink- und Abwassersystemen.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Résumé	3
Summary	4
Take-home messages	4
Inhaltsverzeichnis	6
Abkürzungsverzeichnis	8
1 Einleitung	9
1.1 Ausgangslage und Hintergrund	9
1.2 Motivation des Projektes	9
1.3 Projektziele	10
2 Anlagenbeschrieb	11
3 Vorgehen und Methode	12
3.1 Auswahl der Komponenten.....	12
3.1.1 Pumpe als Turbine.....	13
3.1.2 Generator	15
3.1.3 Netzeinspeisung	16
3.1.4 Leitschaufelverstellung mit Linearantrieb.....	18
3.1.5 Notschlussklappe mit Drehantrieb.....	18
3.1.6 Feinrechen.....	19
3.2 Aspekte der Konstruktion.....	20
3.2.1 Verschmutzungsanfälligkeit der PaT-Francis	20
3.2.2 Wartungsaufwand.....	21
3.2.3 Reparatur- und Revisionsaufwand	22
3.2.4 Luftschall, Be- und Entlüftung	23
3.2.5 Körperschalldämmung	23
3.2.6 Steuerungsanlage	24
4 Ergebnisse und Diskussion	25
4.1 Kostenstruktur.....	25
4.2 Durchgeführte Tests und Modifikationen.....	26
4.3 Optimierung Stopfbuchsenpackung.....	27
4.4 Erste Messreihe – Zusammenhang Drehzahl zu Leitradöffnung	27
4.5 Kavitation, Modifikation Laufrad.....	28
4.6 Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)	30
4.7 Zweite und dritte Messreihe	31
4.7.1 Messeinrichtung.....	31



4.7.2	Optimaler Zusammenhang Leitapparatöffnung und Drehzahl	32
4.7.3	Turbinenwirkungsgrad	34
4.7.4	Elektrischer Wirkungsgrad	35
4.8	Umgang mit Geschwemmsel.....	37
4.9	Luftschall	39
4.10	Körperschall.....	40
4.11	Betriebserfahrungen	41
5	Schlussfolgerungen und Fazit	41
6	Ausblick und zukünftige Umsetzung	42
7	Kommunikation	43
8	Publikationen	44
9	Literaturverzeichnis	44
10	Anhang	45



Abkürzungsverzeichnis

EMV	Elektro-magnetische Verträglichkeit
FAH	Fischaufstiegshilfe
HLK	Heizung Lüftung Klima in der Gebäudetechnik
PaT	Pumpe als Turbine
PM-Generator	permanent-magnetisch erregter Generator
min^{-1}	Drehzahl einer Turbine oder eines Generators in Umdrehungen pro Minute
RRM	Rechenreinigungsmaschine



1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Hintergrund

Mit dem aufkommenden Interesse an dezentraler Stromproduktion mit erneuerbaren Energien gab es in den letzten 15 Jahren eine zunehmende Nachfrage nach Turbinen zur Nutzung kleiner und kleinster Wasserkraftpotentiale. Während für den Hochdruckbereich solide Lösungen mit kleinen Peltonturbinen bestehen, gibt es für den Niederdruckbereich nichts Vergleichbares. Neuartige Konzepte kamen zwar auf den Markt, aber der Erfolg blieb grösstenteils aus.

Kleine Francis Turbinen bildeten ab ca. 1910 bis in die 1970er Jahre die Hauptantriebsquelle von tausenden von Gewerbebetrieben im Schweizer Mittelland, die nur zwischen 3 und 10 m Fallhöhe nutzen konnten und typischerweise einen Leistungsbereich von 5 bis 50 kW umfassten. Für die Reaktivierung solcher Potentiale ist die Fabrikation von kleinen Francis-Turbinen heute zu teuer.

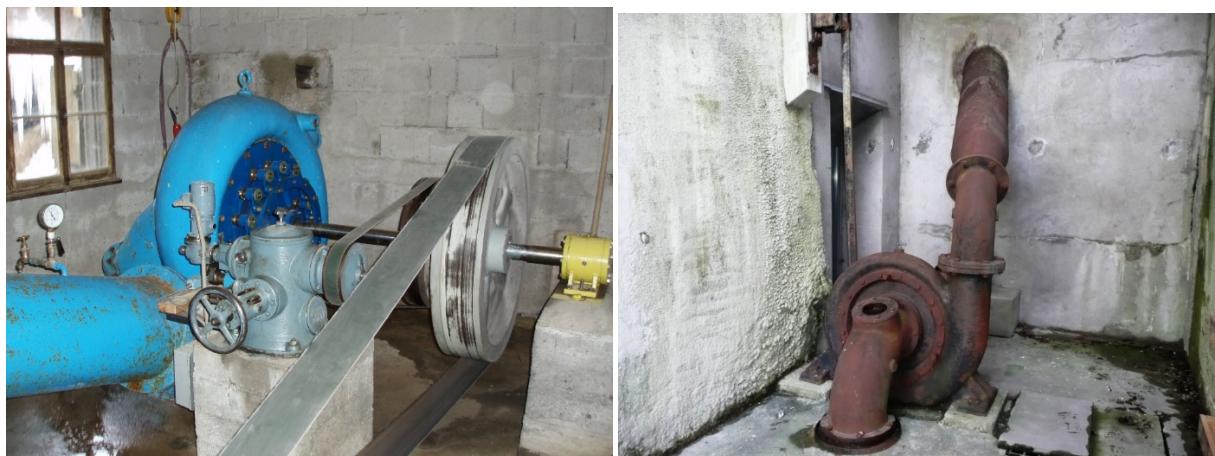


Abbildung 1: links - Francis-Spiralturbine mit ölhydraulischem Regler in einer Sägerei in Dietfurt/SG (24 kW); rechts - Francis-Spiralturbine (stillgelegt) in der Obermühle Andelfingen/ZH (5 kW). (Quelle: Hydro Engineering 2018)

Im Rahmen der *Sanierung Wasserkraft* (Art. 39a GSchG und Art. 10 BGF) werden an vielen bestehenden Wasserkraftanlagen die Fischwanderhilfen erstellt, erweitert oder optimiert. In vielen Fällen muss zusätzliches Lockwasser zum Fuss des Wanderhindernisses abgegeben werden, damit die Fische den Einstieg in die Fischaufstiegshilfe FAH besser auffinden können. Gemäss aktueller Projektierungspraxis wird dieses Lockwasser über Ventile und Energiedissipationseinrichtungen abgegeben, da geeignete resp. wirtschaftlich vertretbare Wasserkraftmaschinen (Turbinen-Generator-Einheiten) für die Energienutzung fehlen.

1.2 Motivation des Projektes

Die Francis-Turbine, 1849 erfunden, ist nach wie vor jene Wasserkraftmaschine, die die höchsten Wirkungsgrade aller Energieumwandlungstechnologien ermöglicht. Im Niederdruckbereich wurde sie ab den 1920er Jahren durch die Kaplan-Maschine abgelöst, die im Teillastbetrieb ihrerseits eine bessere Energieausbeute bietet. Francis und Kaplan-Turbinen sind massgefertigte, für einen



bestimmten Standort ausgelegte Maschinen, die nur ab 50 kW – 100 kW Nennleistung wirtschaftlich tragbar werden. Deswegen werden die oben erwähnten kleinen Wasserkraftpotentiale in Fischwanderhilfen und historischen Kanalanlagen bisher nicht oder nur selten genutzt.

Die Nutzung von rückwärtslaufenden Standard-Kreiselpumpen als Turbinen ist schon seit rund 30 Jahren bekannt. Solche als PAT bezeichneten Maschinen (Pumpe-als-Turbine) weisen ähnlich hohe Wirkungsgrade wie die Francis-Turbine auf, können aber nur in speziellen Fällen zur Anwendung kommen, da sie nur einen einzigen Betriebspunkt haben: das meist sehr variabel anfallende Wasserdargebot verlangt jedoch nach regelbaren Maschinen.

Verschiedene Entwicklungen im Fertigungsbereich, in der Gebäudetechnik, in der Leistungselektronik und der Steuerungstechnik eröffnen jedoch heute die Möglichkeit, die Nachteile der PAT zu eliminieren und ein kostengünstiges Kleinstwasserkraft-Gesamtpaket auf den Markt zu bringen. Dazu wird keine neue Maschine entwickelt, sondern bestehende Produkte werden zu einem neuartigen Ganzen kombiniert. Das reduziert die Entwicklungskosten, und das Risiko von Fehlschlägen oder Misserfolgen sinkt.

Für eine Kleinst-Anlage im Zürcher Weinland wurde deshalb eine Innovation von JMC, Baulmes (CH) aus dem Jahre 2007 aufgegriffen: die PaT-Francis (siehe dazu Ref. [1]). Diese besteht aus einer rückwärtslaufenden Pumpe, die mit dem Anbau eines Leitapparats zu einer Kleinst-Francis-Turbine aufgerüstet wird.

1.3 Projektziele

Das Ziel des vorliegenden Pilotprojekts ist es, die Eignung des PAT-Francis-Gesamtpakets zur wirtschaftlichen Nutzung kleiner Wasserkraftpotentiale im Niederdruckbereich an einer 1:1-Anwendung in realer Umgebung nachzuweisen. Dabei soll nicht nur die Wasserkraftmaschine als isolierter Bauteil, sondern auch das Umfeld und die Rahmenbedingungen, in welchen die Maschine betrieben wird, betrachtet werden. Dies wird auch etwa als water-to-wire-Ansatz bezeichnet, in dem sich der Turbinenanbieter auch um die folgenden Aspekte kümmert:

- Erforderliche Bau- und Wasserbauarbeiten, um die Maschine hydraulisch optimal, kavitationsfrei und hochwassersicher in gegebene Kanäle oder Schächte einzubauen, ohne dass die Wirtschaftlichkeit dabei leidet.
- Verschmutzungsanfälligkeit: Kleine Francis-Turbinen tendieren zu Verschmutzung durch Geschwemmsel an Leitschaufeln und Laufrad; insbesondere Gras, Algen und Laub kleben an den Maschinenteilen und verursachen einen Leistungsabfall bis hin zu Unwucht und Vibrationen. Diese Problematik soll durch konstruktive und/oder betriebliche Massnahmen reduziert werden.
- Lärm- und Körperschall-Immissionen, die eine Anwendung der PaT-Francis-Turbine in bewohnten Gebäuden (umgenutzten Mühlen) und in Quartiersituationen (bei historischen Kanälen) verhindern würden.



2 Anlagenbeschrieb

Als Standort für die Pilotanlage konnte die Obermühle in Andelfingen (ZH) gewonnen werden. An dieser Kleinstanlage in den historischen Kanälen dieses Weinländern Mühlendorfes soll die Wasserkraftnutzung reaktiviert werden.

Der Mülibach in Andelfingen (ZH) wurde bereits vor über 700 Jahren zum Antrieb von Mühlen und anderen gewerblichen Tätigkeiten intensiv genutzt. Die Obermühle als oberste von insgesamt sechs Mühlen im „Mühlendorf Andelfingen“ wurde seit den 1970er Jahren nicht mehr betrieben; das Wasser wurde ab 1977 mehrheitlich an eine Fischzucht direkt oberhalb der Mühle abgegeben. Mit der Aufgabe der Fischzucht 2010 steht das Wasser wieder grösstenteils der Wasserkraftnutzung an der Obermühle zur Verfügung.

Das ursprüngliche Konzept sah die Reaktivierung und den Umbau der alten Francis-Turbine aus dem Jahre 1941 vor (siehe Abbildung 1). Nach dem Ausbau der Maschine zeigte sich jedoch, dass diese Turbine wegen der enormen Korrosionsschäden nicht mehr zu retten war. Aus Mangel an geeigneten Turbinen wurde nach langem Suchen eine Durchströmturbine T16 ins Auge gefasst, die aufgrund ihrer Einfachheit relativ kostengünstig ist, aber eine enttäuschende Stromproduktion aufweisen würde. Dies deshalb, weil der Spitzenwirkungsgrad dieser Durchströmturbine unter 74% bleibt und wegen des Laufradüberhangs von 0.5 m weitere 10% an Energieproduktion verloren gehen.

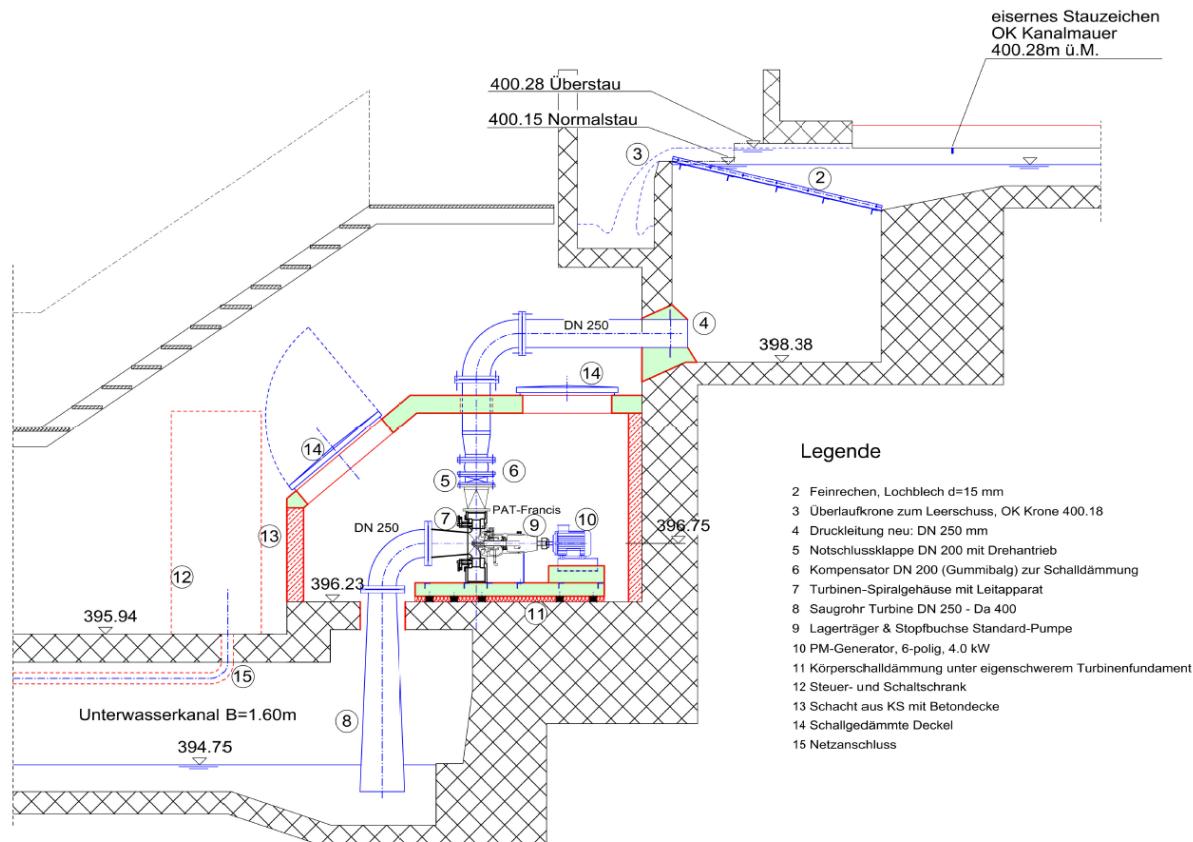


Abbildung 2: Längsschnitt durch die Pilotanlage «Kraftwerk Obermühle Andelfingen» (Quelle: Hydro Engineering 2018)

3 Vorgehen und Methode

3.1 Auswahl der Komponenten

Bei der Auswahl der Komponenten, aus denen die PaT-Francis-Pilotanlage aufgebaut werden soll, wurde ein besonderes Augenmerk auf die folgenden Eigenschaften gelegt:

- Hohe Ausfallsicherheit
- Langlebigkeit
- Hohe Effizienz, damit aus dem kleinen Wasserkraftpotential ein Maximum erzielt werden kann.
- Gute Verfügbarkeit der Komponenten, keine Spezialanfertigungen
- Preis

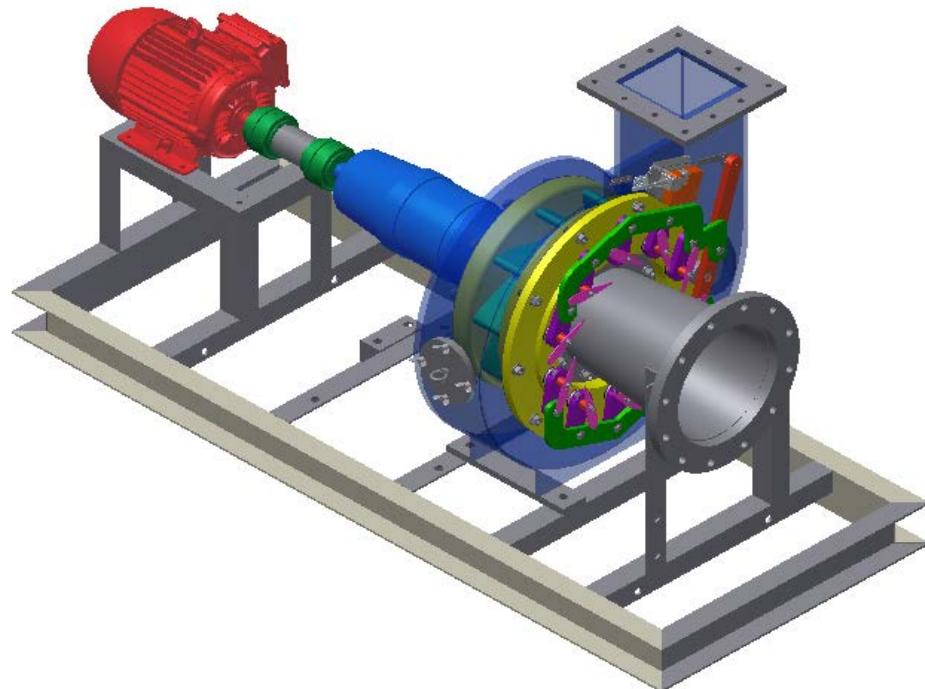


Abbildung 3: 3D-Ansicht des Maschinensatzes auf Grundrahmen, bestehend aus (von links nach rechts): Generator, Drehmomentmesswelle, Pumpenlagerblock, Spiralgehäuse mit Einlaufstutzen und Leitapparat sowie Saugrohr-Konus (Quelle: Revita Power 2018)

3.1.1 Pumpe als Turbine

Die als Basis gewählte Abwasserpumpe vom Typ EOA der Firma Emile Egger & Cie. SA, die als rückwärtslaufende Pumpe als Turbine (PaT) eingesetzt werden soll, besticht durch mehrere Vorteile:

- serienerprobte Pumpe und entsprechend kostengünstig,
- im Ölbad gelagerte Welle, was eine lange Lebensdauer der Lager verspricht,
- Wellenabdichtung mit Stopfbuchse: einfache Technik, geringe Betriebskosten,



- halboffenes, 2-flügeliges Laufrad: geringe Verstopfungsgefahr. Dieses Laufrad hat sich in der Förderung von Abwässern und feststoffhaltigen Flüssigkeiten mit hohen Faseranteilen bewährt.

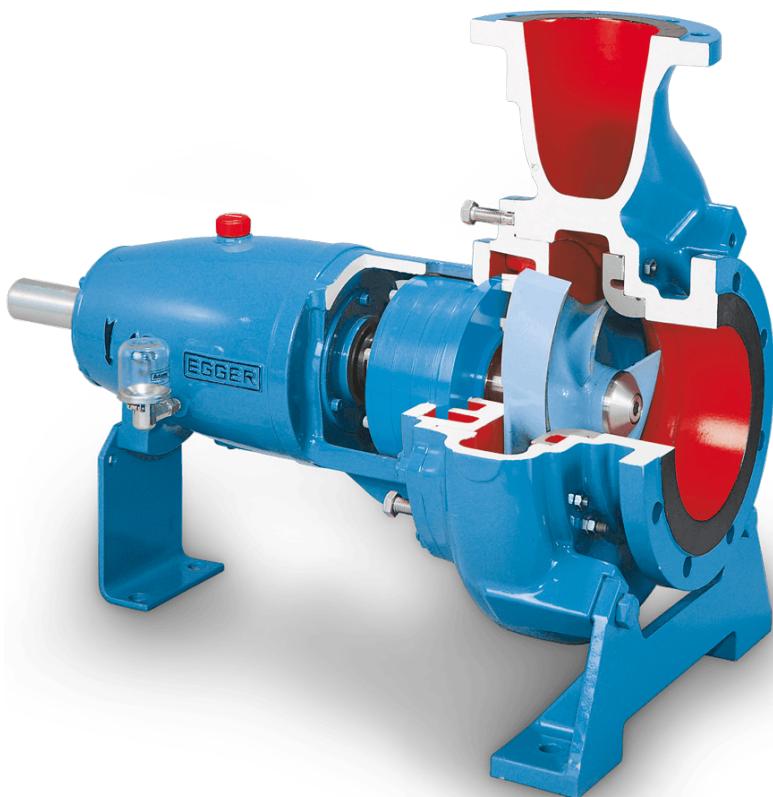


Abbildung 4: Spiralgehäuse-Pumpe von Egger, zur gewählten EOA ähnlich

Die gewählte Pumpe vom Typ EOA wurde im Werk bereits als Turbine getestet. Es wurde dabei ein Turbinenwirkungsgrad von max. 80% erreicht. Dieser Wert wurde für die Dimensionierung der übrigen Komponenten (Kupplung, Generator, Elektrotechnik) und für die Berechnung der Wirtschaftlichkeit der Anlage Obermühle verwendet.

Während der Projektumsetzung wurde von der Fa. Egger nur noch ein maximaler Wirkungsgrad 78% genannt, weil der Einsatz eines anderen Gehäuses mit Leitschaufeln zusätzliche hydraulische Verluste verursachen könnte, was sich dann auch bewahrheitete.

Die EOA Pumpen von Egger werden mit verschiedenen Wellenabdichtungen angeboten:

1. moderne Gleitringdichtungen,
2. verschleissfreie hydrodynamische Dichtungen oder
3. Stopfbuchspackungen.

Sowohl das Preis- Leistungsverhältnis der Stopfbuchspackung als auch deren einfacher Aufbau überzeugte. Zudem kann die Stopfbuchspackung ohne Demontage der Wellenlagerung bei eingebauter Turbine ersetzt werden. Das Ersatzmaterial (Stopfbuchsdecken) ist kostengünstig.



Aus diesen Gründen wurde dieses Abdichtungssystem für die PaT-Francis-Pilotanlage Obermühle gewählt. Es zeigte sich jedoch anlässlich der Inbetriebnahme, dass dieser Entscheid nicht ganz unproblematisch war (siehe Kapitel 4).

3.1.2 Generator

Drehstrommotoren eingesetzt als Generatoren sind zwar kostengünstig, im Betrieb sehr robust und einfach zu starten oder aufs Netz aufzuschalten. Sie haben jedoch, vor allem im sehr kleinen Leistungsbereich bis 5 kW, einen bescheidenen Wirkungsgrad. So hat zum Beispiel ein 8-poliger Asynchronmotor mit 3 kW Leistung und der besten Wirkungsgradklasse IE3 als Generator einen Bestwirkungsgrad von rund 82.5%. Der Wirkungsgrad nimmt im Teillast-Betrieb noch weiter ab.

Synchrongeneratoren sind bezüglich Wirkungsgrade den Asynchronmaschinen überlegen. Das Starten und die Netzaufschaltung sind jedoch schwieriger. Erschwerend kommt hinzu, dass im Kleinstbereich unter 5 kW nur permanent-magnetisch erregte Synchronmotoren resp. -generatoren, sogenannte PM-Generatoren erhältlich sind. Wegen seines hohen Wirkungsgrades wurde der Einsatz eines permanent-magnetisch erregten Synchrongenerators mit einer Leistung von 5 kW anvisiert.

Für die Pilotanlage wurde das ehrgeizige Ziel formuliert, nur im Teillastbetrieb drehzahlvariabel zu fahren, da hier ein nicht netzsynchroner Betrieb bezüglich Wirkungsgrad Vorteile bringt. In den Betriebsbereichen, in denen ein netzsynchroner Betrieb möglich ist, sollte der Frequenzumrichter überbrückt und der Generator direkt am Netz laufen. Für die Pilotanlage hiesse dies, dass ein 8-poliger Generator bei 750 min^{-1} , oder ein 6-poliger bei 1000 min^{-1} , direkt am Netz laufen können sollte. Moderne Wasserkraftanlagen ab ca. 30 kW sind mit ebensolchen «direct-online» PM-Generatoren ausgerüstet.

Zwar gibt es eine grosse Menge an Herstellern von kleinen permanent-magnetisch erregten Generatoren auf den Markt; diese sind jedoch nicht für einen Betrieb direkt am Netz (direct-online PM generator) einsetzbar; diese PM-Generatoren können nur über einen Frequenzumrichter ins öffentliche Netz einspeisen. In Europa gibt es nur wenige Hersteller, die das Know-How und die Erfahrung besitzen, um PM-Maschinen für den direkten Netzverbund berechnen und auch bauen können. Dazu gehören VUES (CZ), Danfoss Editron Oy (FI), Krebs & Aulich (D), Oswald Elektromotoren (D) und weitere. Keiner von diesen Herstellern bietet jedoch einen Generator im Kleinstbereich von 5 kW an, da der Berechnungsaufwand (inkl. Abgabe einer Garantie, dass die Auslegung passt oder nachgebessert wird) in jedem Fall > CHF 10'000.- ist und sich für solche Kleinstmaschinen im Pilotprojekt Obermühle Andelfingen nicht lohnt.

Für die Pilotanlage war also der Betrieb mit einem PM Generator direkt am Netz nicht realisierbar. Es muss deshalb in jedem Betriebspunkt über den Frequenzumrichter ins Netz eingespeist werden. Die zusätzlichen Verluste des Frequenzumrichters wirken sich damit auch negativ auf die Nennleistung der Anlage aus.

Für die Anlage wurde ein PM Generator von Arend Elektromaschinenbau gewählt. Der Generator hat 6 Pole, 5 kW Leistung und ist auf 440 VAC bei 50 Hz gewickelt. Der Wirkungsgrad beträgt laut Hersteller 92% über den ganzen Lastbereich.



3.1.3 Netzeinspeisung

Für den drehzahlvariablen Betrieb der Turbine und somit des Generators wurden 2 mögliche Systeme untersucht:

- Der Generator wird an einen Gleichrichter angeschlossen. Der Gleichrichter macht aus Wechselspannung Gleichspannung und speist den Gleichstrom in den sogenannten Zwischenkreis ein. Ein Netzwechselrichter macht aus der Gleichspannung im Zwischenkreis wiederum netzkonforme Wechselspannung und speist den Wechsel- oder Drehstrom ins Netz ein. Untenstehend ist ein Prinzipschema am Beispiel einer Windanwendung ersichtlich. Über die Höhe der gleichgerichteten Spannung im Zwischenkreis wird der Generator durch den Netzwechselrichter auf die entsprechende Drehzahl gebremst. Natürlich ist der Zusammenhang Spannung-Drehzahl von der Auslegung des Generators abhängig. Diese Anwendung ermöglicht keinen motorischen Betrieb des Generators. Auf dem Markt gibt es, vor allem im Solarbereich, eine Vielzahl von Herstellern von Netzwechselrichtern und dementsprechend auch von Modellen. Dieses System wird in den folgenden Anwendungen genutzt: Solar-PV, Kleinwindanlagen, Kleinwasserkraftanlagen, Mini-Blockheizkraftwerke.

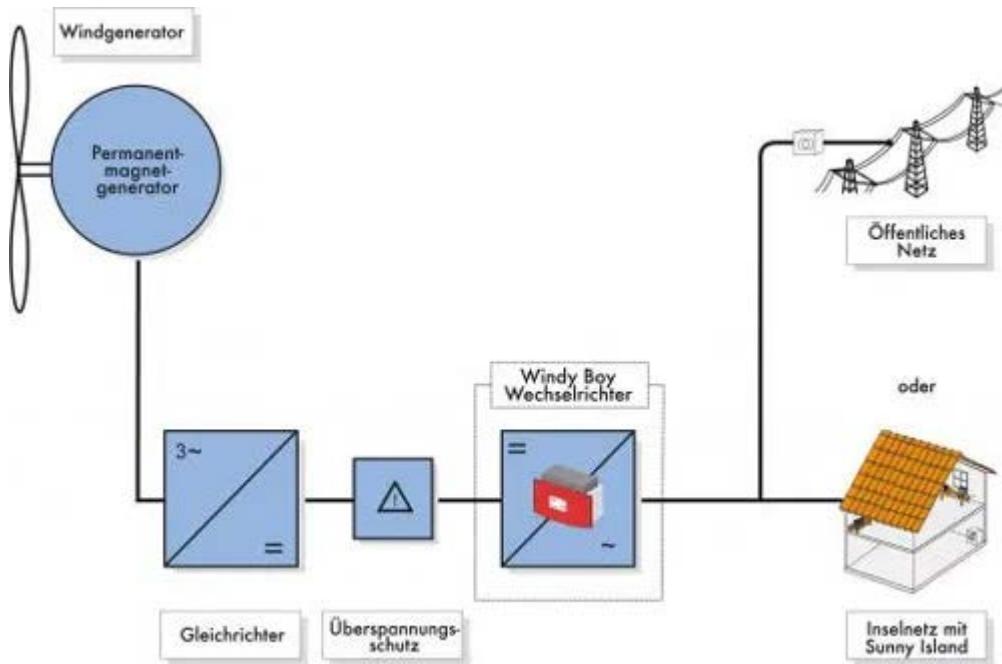


Abbildung 5: System mit Netzwechselrichter

- Das zweite System beinhaltet den Einsatz eines rückspeisefähigen Frequenzumrichters (Vierquadrantenbetrieb). Der Generator wird an einen dreiphasigen Frequenzumrichter angeschlossen. Der Frequenzumrichter regelt über Spannung und Frequenz die Drehzahl des Generators. Ein über den Zwischenkreis angeschlossener Wechselrichter (Rückspeiseeinheit) speist durch Wechselrichtung auf Netzfrequenz die Energie ins Netz. Diese Anwendung ermöglicht generatorischen und motorischen Betrieb des Generators, und dies bei



Ausgangsfrequenzen von unterhalb und oberhalb der Netzfrequenz. Das untenstehende Prinzipschema zeigt den entsprechenden Aufbau mit Netzdrosseln und -Filter. Dieses System ist in den letzten Jahren durch energiesparende Anwendungen bei Aufzügen, Kranen, Zentrifugen, Motorenprüfständen etc. bekannt geworden. Die Frequenzumrichter sind sehr umfassend parametrier- oder sogar programmierbar, sodass jegliche Anwendungen abgedeckt werden können.

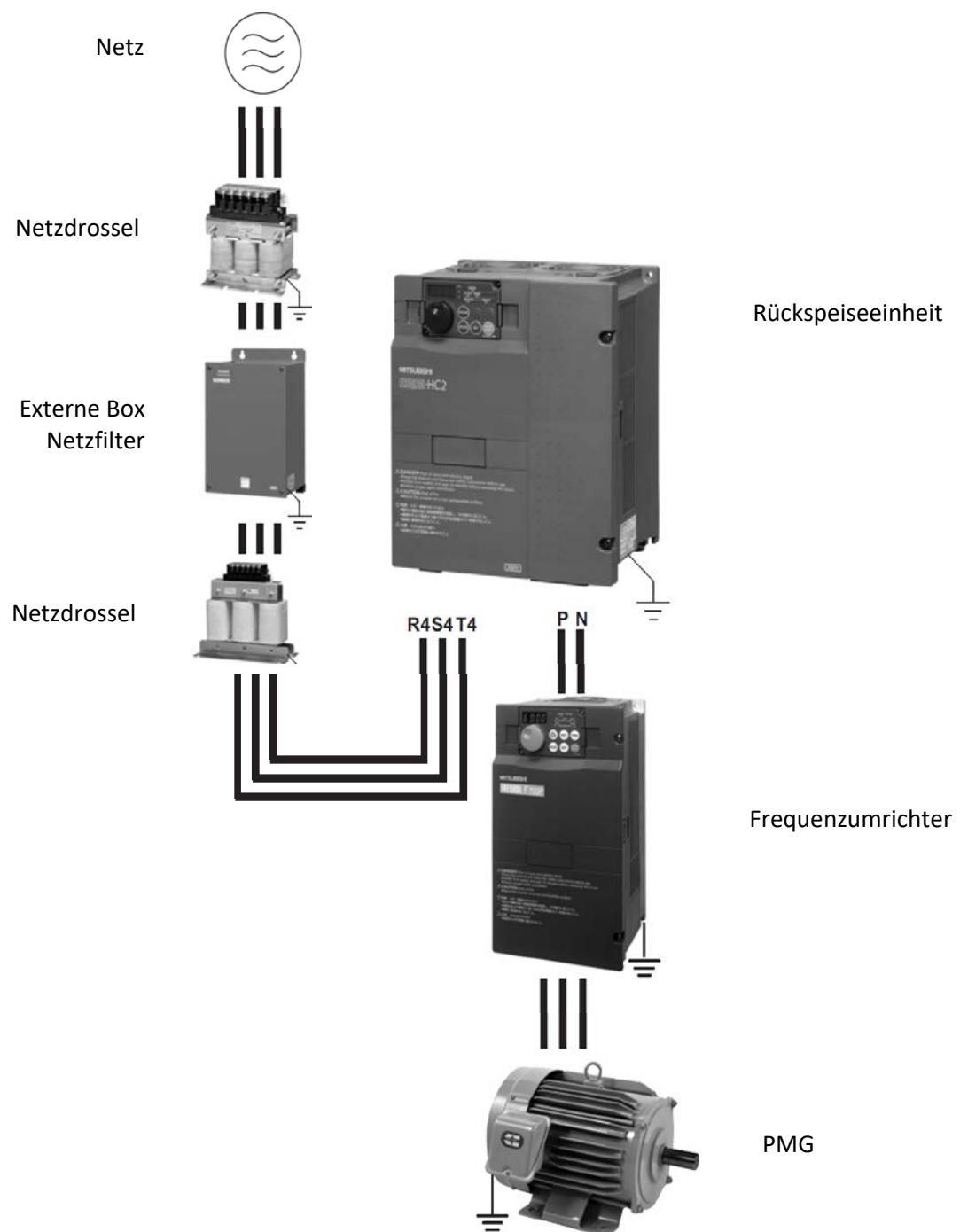


Abbildung 6: System mit Frequenzumrichter und Einspeiseeinheit



Die Suche nach geeigneten Produkten auf dem Markt hat die folgenden Probleme zu Tage geführt:

- Der Eingangsspannungsbereich bei Solarwechselrichtern ist für die Bandbreite des drehzahlvariablen Betriebes der PaT-Francis meistens zu klein.
- Gegenüber dem Solarwechselrichter ist ein Wechselrichter für Kleinwindanlagen vorzuziehen, weil letzterer für Dauerbetrieb ausgelegt und somit eine grössere Lebensdauer erwartet werden kann. Hingegen ist der Markt für Kleinwindanlagen in den letzten Jahren stark rückläufig, wodurch einige Produkte nicht mehr angeboten werden und nur noch wenige Hersteller-Optionen bestehen.
- Der Betrieb der Turbine fordert eine exakte Drehzahlvorgabe in Abhängigkeit der Leitschaufelöffnung. Diese Drehzahlvorgabe darf nicht an die Leistung gekoppelt sein, sondern muss von der Anlagensteuerung vorgegeben werden können. Das heisst, die fixe Spannungs-Leistungs-Kennlinie muss ausgeschaltet und durch einen externen Analogwert vorgegeben werden können. Es konnte auf dem Markt kein einfacher Wechselrichter aus der Sparte Solar und Wind gefunden werden, der dieses Features standardmässig anbietet.

Die erkannten Probleme haben das zweite System gemäss Abbildung 6 begünstigt. Es ist zwar aufwendiger, hat dafür aber deutlich mehr Freiheitsgrade und tangiert das Design des Turbinenbetriebes fast nicht. Es weist die folgenden wichtigen Eigenschaften auf:

- Frequenz- und somit Turbinendrehzahlvorgabe durch externes Strom- oder Spannungssignal.
- Generatorischer und motorischer Betrieb, was für einen effektiven Spülvorgang der Turbine entscheidend sein kann.
- Grosser Frequenzbereich von unter bis über Netzfrequenz von 50 Hz
- Grosser Eingangsspannungsbereich
- Geregelte Blindstromkomponente

Nach Evaluierung der Produkte von ABB, Emerson, Yaskawa ist die Wahl auf die folgenden Komponenten von Mitsubishi gefallen:

- Frequenzumrichter FR-A840 mit 7.5 kW Nennleistung
- Ein-/Rückspeiseeinheit FR-HC2-H7.5K KIT mit 7.5 kW Nennleistung

Die Ein-/Rückspeiseeinheit wird mit Netzdrosseln und Netzfilter geliefert, sodass der Hersteller eine Unterdrückung von Oberwellen mit einer gesamten Stromverzerrung von THDi (Total Harmonic Distortion of Current) von unter 4% garantiert. Die Einhaltung der Netzqualität nach EN 50160 'Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen' ist damit sichergestellt.

3.1.4 Leitschaufelverstellung mit Linearantrieb

Die Leitapparatverstellung wird mit einem Linearantrieb von Belimo ausgeführt. Dieser kompakte, aber leistungsstarke Antrieb ist sowohl mit Wechsel- als auch mit Gleichspannung speis- und ansteuerbar.

Der Notschluss der Turbine wird nicht beim Leitapparat, sondern bei der Einlaufklappe implementiert.

3.1.5 Notschlussklappe mit Drehantrieb

Als Notschlussklappe (Abbildung 7) wird eine Drosselklappe aus dem HLK Sektor in DN200 von Belimo eingesetzt. Sie ist mit Laschenaugen ausgeführt und somit in den Druckstufen PN6, PN10 und PN16



einsetzbar. Die Klappen aus dem HLK Sektor sind schnell verfügbar, platzsparend und einfach einzubauen sowie preislich attraktiv.

Als Antrieb kommt ein zur Klappe passender Drehantrieb von Belimo zum Einsatz. Der Antrieb ist in IP66/67 ausgeführt, ist mit einer Positionsanzeige und einer Handkurbel ausgerüstet, verfügt über Hilfsschalter zur Stellungsrückmeldung und ist mit Wechsel- wie auch Gleichspannung speis- und ansteuerbar. Der Antrieb deckt somit in kompakten Abmessungen alle notwendigen Anforderungen ab und ist darüber hinaus mit der Multispaltungseigenschaft sehr vielseitig einsetzbar.

Bei Netzausfall schliesst die Klappe automatisch, und zwar mit Hilfe der Notstellfunktion des Drehantriebs (integrierte Kondensator-Bank), so dass der Turbinendurchfluss ohne externe Energie (Batterie) oder teurem Fallgewichtsantrieb der Klappe unterbrochen wird.



Abbildung 7: Linearantrieb für den Leitapparat und Drehantrieb für die Notschluss-Klappe (im Vordergrund)

3.1.6 Feinrechen

Der Feinrechen, der zur Triebwasserreinigung und für den Fisch- und Personenschutz dient, besteht aus einem Lochblech mit 15 mm-Lochung. Er ist in einem sehr flachen Winkel von 13° gegenüber der Horizontalen eingebaut, ist direkt über dem Oberwasserbecken angebracht und liegt auf der Überlaufkrone auf. Durch die 15-mm Lochung werden die Anforderungen bezüglich Fischschutz erfüllt.



Abbildung 8: Lochblechrechen der Pilotanlage Obermühle

Der Feinrechen soll aus Kosten- und Lärmemissionsgründen ohne Rechenreinigungsmaschine RRM auskommen. Der flache Einbau und das hohe Stauziel sollen jedoch mit Hilfe eines Spülprogramms in der Turbinensteuerung ein Überströmen des Rechens und somit ein einfaches Abspülen desselben ermöglichen.

Die Vorteile des Lochblechs gegenüber einem Rechen aus Flachprofilen liegen sicherlich im Anschaffungspreis, in der effektiven Triebwasserreinigung (hohe Filterwirkung) und nicht zuletzt im sehr effektiven Fischschutz (geringe Anströmgeschwindigkeit; sehr kleine lichte Weiten des Rechen-Durchgangs). Der Nachteil des erhöhten Strömungsverlusts gegenüber strömungsoptimierten Profilen und des hohen Verbauungsgrades werden durch eine verhältnismässig grosse benetzte Fläche kompensiert. Die rechnerische Strömungsgeschwindigkeit über dem Rechen liegt bei der Ausbauwassermenge von 80 l/s bei 0.1 m/s.

3.2 Aspekte der Konstruktion

3.2.1 Verschmutzungsanfälligkeit der PaT-Francis

Die Kraftwerksanlage soll vor allem durch ihre Langlebigkeit, einem geringen Wartungsaufwand und einer geringen Verstopfungsanfälligkeit aufwarten. Vor allem die Verstopfungsanfälligkeit ist hervorzuheben, die bei Francis-Turbinen allgemein schon hoch ist und bei der Kleinstanlage Andelfingen noch zunehmen könnte. Kann die Anlage mit dem Geschwemmsel nicht umgehen, so verringert sich der Produktionsertrag durch abnehmenden Durchfluss und geringerem Wirkungsgrad, hervorgerufen durch verschmutzte Rechen und Turbine. In der Folge erhöht sich auch der Aufwand für den Unterhalt.

In Kapitel 3.1 wurde auf den Lochblechrechen, die Turbine mit halboffenem Laufrad und den möglichen motorischen Betrieb des Generators für die Turbinenspülungen bereits eingegangen. In diesem Zusammenhang sind noch die Leitschaufeln zu erwähnen. Mit lediglich 10 Schaufeln (Abbildung 9) wurde ein Kompromiss zwischen Verstopfungsanfälligkeit und Effizienz gesucht. Der Unterhalt der Kraftwerksanlage soll sich aus diesen Gesichtspunkten heraus auf das saisonal abhängige händische Grundreinigen des Lochblechrechens beschränken.



Abbildung 9: 10 St. Leitschaufeln der PaT-Francis

3.2.2 Wartungsaufwand

Die Leitschaufelverstellung ist mit Kunststoff-Gleitlagerbuchsen ausgeführt. Die Wellen der Leitschaufeln sind über selbstschmierende Faserverbund-Gleitbuchsen gelagert. Beide sind wartungsfrei. Der Generator ist, wie in dieser Leistungsklasse üblich, mit lebensdauergeschmierten Wälzlagern bestückt. Die Stopfbuchsenpackung, richtig eingestellt bei der Inbetriebsetzung, bedarf keines weiteren Unterhalts. Die Pleuel der Leitschaufelverstellung sind auf den Wellen der Leitschaufeln geklemmt, damit sich diese Verbindung verdrehen kann, wenn Geschwemmsel beim Schliessvorgang zwischen den Schaufeln eingeklemmt wird. Verdrehte Schaufeln sind an den Zeigern, die die gleiche Querschnittsfläche wie die Schaufeln haben und mit diesen starr verbunden sind (siehe Bild), bei abgestellter Maschine erkennbar. Durch Lösen der Klemmung und Zurückdrehen der Schaufeln an den Zeigern kann die originale Position einfach wiedereingestellt werden. Somit beschränkt sich der Wartungsaufwand der Turbinenanlage auf das sporadische Kontrollieren der Leitschaufelpositionen und den 2-jährlichen Ölwechsel der Turbine.



Das Turbinengehäuse mitsamt Leitschaufeln und Leitschaufelverstellung ist komplett aus rostfreiem Stahl hergestellt. Korrosion im herkömmlichen Sinn sollte keine auftreten. Im Auge müssen jedoch die Übergänge Druckrohr-Turbinengehäuse, Turbinengehäuse-Saugrohr sowie Pumpengehäuse-Turbinengehäuse bezüglich der Makro-Element-Bildung gehalten werden (galvanische Elemente – Edelstahl löst den nicht beschichteten Normalstahl auf, wenn ein geschlossener Stromkreis der sich berührenden Metalle über das Triebwasser besteht).



Abbildung 10: Turbinengehäuse der PaT-Francis komplett aus Edelstahl

3.2.3 Reparatur- und Revisionsaufwand

Das Turbinengehäuse, die Leitschaufeln und die Leitschaufelverstellung bestehen komplett aus CNC-bearbeiteten Teilen. Die Demontage und die Remontage können somit ohne Lehren erfolgen. Sogar der Linearantrieb der Leitschaufelverstellung kann ohne Parametrierung gegen einen neuen ausgetauscht werden. Einzig der Generator muss nach Demontage händisch auf die Turbinenwelle



ausgerichtet werden. Ebenso müssen die Endanschläge eines neuen Drehantriebes der Einlaufklappe nach Austausch eingestellt werden.

3.2.4 Luftschall, Be- und Entlüftung

Der Turbinenschacht wurde aus Kalksteinen gemauert und verfügt über schallgedämmte Deckel. Einzig die Decke wurde betoniert. Die Be- und Entlüftung des Schachtes erfolgt über die Triebwasserwege, d.h. es wurden hochwassersichere Öffnungen im Schacht sowohl in den Unterwasserkanal als auch in den Leerschuss-Kanal erstellt, die einen Luftaustausch ermöglichen, aber keine Schallausbreitung zur umgenutzten Mühle oder den Nachbargebäuden verursachen.

Bedienpanel und Schaltaschrank mit der Elektrotechnik wurden ausserhalb des Turbinenschachtes angeordnet, damit der Zugangsdeckel nicht bei jeder Kontrolle geöffnet werden muss.



Abbildung 11: Turbinenschacht aus Kalksandstein mit Edelstahldeckel; Bedienpanel und Schalschrank ausserhalb des Schachts.

3.2.5 Körperschalldämmung

Die Turbinenanlage erzeugt Vibrationen, die sich auf das umgenutzte Mühlengebäude übertragen und die Bewohner stören könnten. Mit Hilfe einer elastischen Entkoppelung des Maschinensatzes vom Gebäude soll dieses Risiko ausgeschlossen werden:



- Der Maschinensatz (inkl. dem frei ins Unterwasser hängenden Saugrohr) wird auf ein eigenschweres Fundament gestellt. Das Fundament besteht aus einem mit Beton ausgegossenen Rahmen aus rostfreiem Stahl, der elastisch gelagert wird. Die elastische Lagerung besteht aus 16 St. Kautschuk-Lager vom Typ MAFUND (62.5 x 62.5 x 50 mm zweilagig verklebt), die speziell für die Erregerfrequenz von 20 Hz ausgelegt wurden. Dabei wurde die «Flügeldrehzahl» der Turbine als massgebende Erregungsdrehzahl angenommen; bei der 2-flügligen Turbine ergibt dies $2 \times 600 \text{ min}^{-1} / 60 = 20 \text{ Hz}$.
- Zwischen Druckrohr und Turbinengehäuse wurde ein Gummi-Kompensator eingebaut, um auch eine Übertragung der Vibrationen über das Druckrohr auf die Oberwasserbeckenwand zu unterbinden.



Abbildung 12: elastische Lagerung des Grundrahmens kurz vor dem Betonieren; die Hohlräume zwischen den MAFUND-Lagern wurden mit Glaswollmatten aufgefüllt, damit nur der Grundrahmen mit Beton verfüllt wird und die Lager ungehindert einfedern können und die Isolierwirkung erzeugen.

3.2.6 Steuerungsanlage

Die Steuerungsanlage für Netzparallelbetrieb wurde in einem abschliessbaren Polyesterschrank in IP43 aufgebaut. Die Bedienung erfolgt über einen separaten Polyesterschrank in IP44 mit Fenster. Auch dieser Schrank ist abschliessbar. Die Steuerung der Anlage ist auf einer SPS von ABB programmiert. Die Anlage verfügt über eine Fernbedienung über das Internet mit Datenlogging. Die Alarne werden als Volltextnachrichten per SMS und E-Mail abgesetzt.



4 Ergebnisse und Diskussion

Die Evaluation der Komponenten und die Auslegung der Kraftwerksanlage erfolgte im Frühjahr/Sommer 2018. Im Sommer 2018 wurde die Bauweise definiert und die Konstruktion mittels 3D-CAD durchgeführt. Anschliessend folgte die Herstellung der Dreh- und Frästeile. Im Herbst 2018 wurde die Turbinen-Generatoren-Gruppe und die Steuerungsanlage montiert. Die Inbetriebnahme erfolgte im Dezember 2018.

4.1 Kostenstruktur

Die Aufwendungen für Bau, Fertigung, Montage und Inbetriebnahme der 2.5 kW Pilotanlage Obermühle Andelfingen mit PaT-Francis-Turbine können wie folgt zusammengefasst werden:

Tabelle 1: Kostenstruktur der PaT-Francis-Pilotanlage, Obermühle Andelfingen (2.5 kW)

Nr.	Beschrieb	Lieferant	Preise exkl. MWSt.	Summen [CHF]
	Elektromechanik			35'572
1	Pumpenblock mit Laufrad	E. Egger	7'000	
2	Spiralgehäuse mit Leitschaufeln & Leitapparat, Konstruktion komplett aus Inox	Revita Power	23'700	
3	Schaufelverstellung per Linearantrieb; Notschlussklappe mit Drehantrieb	Belimo	3'100	
4	PM Generator, Nennleistung 4 kW , 6 polig, Baugröße 112 M-K	Arend	1'600	
5	Wellenkupplung Flender N-Eupex B95	Revita Power	172	
	Elektrotechnik und Steuerungsanlage			20'316
6	Frequenzumrichter FR-A840-00170-E2-60, Nennleistung 7.5 kW	Mitsubishi	1'536	
7	Rückspeiseeinheit mit Netzdrosseln und -Filter, Nennleistung 7.5 kW	Mitsubishi	4'636	
8	SPS mit Netzparallelschaltanlage und Niveauregelung sowie Fernüberwachung, komplett mit Notstromversorgung in Schaltschrank inkl. Bedienpanel	ABB	14'144	
	Stahlwasserbau			6'457
9	Lochblechrechen inkl. Auflager / Rahmen	Bernhard Maschinenbau	1'104	
10	Druckleitung DN 250 mit Bogen 90° und Reduktion, Stahl verzinkt	"	3'421	
11	Saugrohr konisch mit Bogen 90°	"	1'932	
	Baumeisterarbeiten			14'700
12	Turbenschacht mit Abdeckungen; Vergussarbeiten Druckleitung	Brandenberger Bau AG	14'700	
	Montage und Inbetriebnahme			2'955
13	Montage der gesamten Anlage; Inbetriebnahme	Revita Power	2'955	
	Total exkl. MWSt., gerundet [CHF]			80'000



Nicht enthalten in obiger Zusammenstellung sind:

- Konzept und Konstruktion des PaT-Francis-Gesamtpakets; Materialwahl und Evaluation der Komponenten

Diese Arbeiten wurden von den Initianten des Projekts PaT-Francis, den beiden Firmen JMC, Baulmes (VD) und Revita Power, Laupersdorf (SO) in Eigenregie (im Rahmen ihrer Produktenwicklung) und mit Unterstützung durch das P+D-Programm Kleinwasserkraft des BfE getragen.

- Körperschallmassnahmen / elastische Entkopplung bestehend aus MAFUND-Lager und Gummikompensator in der Druckleitung

Diese Arbeiten sind nicht Teil der Standard-Ausrüstung einer PaT-Francis.

Die Kostenzusammensetzung der PaT-Francis Obermühle Andelfingen gemäss nachfolgender Grafik ist mit ziemlicher Wahrscheinlichkeit allgemein gültig für eine PaT-Francis bis ca. 10 kW Output. Wie aus Tabelle 1 hervorgeht, mussten einzelne Komponenten (in Tabelle in roter Schrift) für die 2.5 kW Pilotanlage Andelfingen grösser gewählt werden, um den Standard-Programmen der Lieferanten zu entsprechen. Deshalb muss der Gesamtpreis von CHF 80'000.- eher als Referenz für eine Anlage von 5 kW bis 10 kW Nennleistung betrachtet werden.

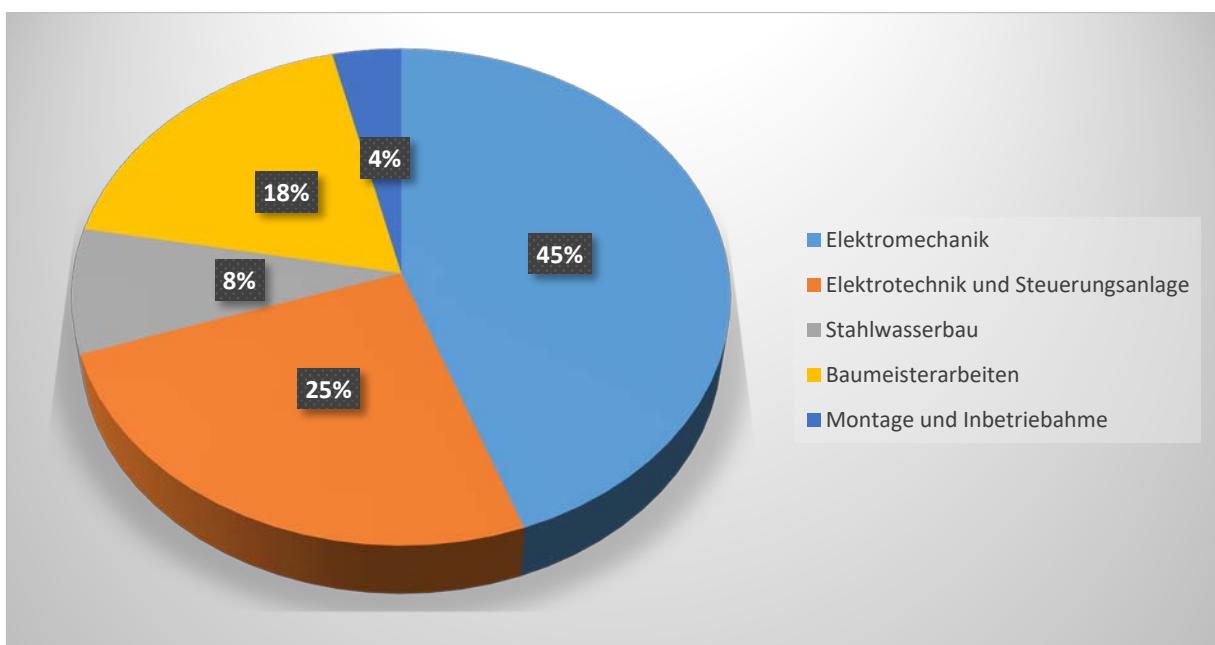


Abbildung 13: Zusammensetzung der Kosten des Pilotprojekts PaT-Francis Obermühle.

4.2 Durchgeführte Tests und Modifikationen

In den Monaten Januar bis Mai 2019 wurden die folgenden Arbeiten durchgeführt:

- Optimierung Stopfbuchsenpackung
- Erste Messreihe, Feldtest
- Modifikation Laufrad



- EMV und Massnahmen
- Zweite und dritte Messreihe, Feldtest
- Umgang mit Geschwemmsel

Auf diese Arbeiten wird in den folgenden Abschnitten näher eingegangen.

4.3 Optimierung Stopfbuchsenpackung

Bei der Inbetriebsetzung der Turbine wurde festgestellt, dass die Stopfbuchsenpackung, die die Turbinenwelle abdichtet, trotz loser Brille eine zu grosse Reibung auf der Welle verursachte, wodurch diese warm wurde. Die 5 eingebauten Ringe lösten ein Gleitreibungsmoment von 2.5 Nm auf der Turbinenwelle aus. Durch den Ausbau von 3 Ringen verringerte sich das Gleitreibungsmoment auf 1.7 Nm. Das heisst die Verlustleistung durch Reibung verringerte sich von anfänglich 160 W auf 105 W (in Bezug auf eine Drehzahl von 600 min^{-1} gerechnet). Es tropfte jedoch auch mit nur zwei Stopfbuchsenringen praktisch kein Wasser aus der Wellenabdichtung aus.

Da im Turbinenbetrieb andere Druckverhältnisse an der Wellenabdichtung herrschen als im Pumpbetrieb, also möglicherweise auch ein Unterdruck herrscht, wurde zuerst befürchtet, dass die gewählte kostengünstige Wellenabdichtung mit Stopfbuchse ein Fehler sei und besser die teurere Gleitringdichtung hätte gewählt werden sollen. Im weiteren Verlauf der Inbetriebnahme wurde jedoch festgestellt, dass ein wenig Druckwasser aus der auf einen einzigen Ring reduzierten Packung zu tropfen vermochte und die Wellenabdichtung nun schmierte und kühlte.

Es konnte Entwarnung gegeben werden: die einfache und kostengünstige Stopfbuchse scheint nach wie vor die beste Wahl einer Wellenabdichtung für die PaT-Francis zu sein, zumindest im Niederdruckbereich.

4.4 Erste Messreihe – Zusammenhang Drehzahl zu Leitradöffnung

Für die erste Messreihe wurde zwischen Turbine und Generator eine Drehmomentmesswelle von Transmetra eingebaut. Die Drehmomentmesswelle hat einen Messbereich von +/- 50 Nm. Das analoge Ausgangssignal wird von der SPS eingelesen. Darüber hinaus wurden die folgenden Messwerte aufgezeichnet:

- Drehzahl in min^{-1} induktiver Sensor auf Generator, ablesbar über Display (SPS)
- Drehmoment in Nm Messwelle, ablesbar über das Display (SPS)
- Wirkleistung el. in W Energiezähler iEM 3155 von Schneider Electric im Steuerschrank
- Pos. Leitapparat in % Potentiometer in Linearantrieb, ablesbar über Display (SPS)
- Wasserstand OW in % Pegelsonde IFM 250 mbar, Ablesbar über Display (SPS)

Der Energiezähler von iEM 3155 von Schneider Electric misst die Ströme bis 63 A ohne Stromwandler. Die Messstelle befindet sich an den Klemmen der letzten Netzdrossel. Das heisst, der Eigenverbrauch von Frequenzumrichter, Einspeiseeinheit, Netzdrossel und -Filter wird mitgemessen. Der Eigenverbrauch der Steuerungsanlage hingegen nicht.

Das Ziel der Messungen war das Herausfahren des Gesetzes von Leitapparat zu Drehzahl. Dazu wurden bei Drehzahlen ab 400 min^{-1} und Leitradöffnungen ab 10 % systematisch alle Betriebspunkte



angefahren. Das Leitrad wurde pro Drehzahlstufe in 5%-Schritten geöffnet. Nach jedem Durchlauf der Leitvorrichtung wurde die Drehzahl in Schritten von 50 min^{-1} erhöht.

Beim Betrieb mit höheren Drehzahlen und höheren Öffnungen des Leitapparates konnte ein Kieselgeräusch in der Turbine festgestellt werden, das umso stärker wurde, je grösser die Öffnung oder die Drehzahl war. So konnte zum Beispiel bei 600 min^{-1} nur noch eine Öffnung des Leitapparates von 30 % ohne starke Kieselgeräusche angefahren werden. Die Wellenleistung der Turbine betrug in diesem Betriebspunkt 1465 W. Bei Drehzahlen ab 600 min^{-1} waren keine 30 % Öffnung mehr erreichbar. Das nachstehende Diagramm zeigt die maximalen Leitradöffnungen bei verschiedenen Drehzahlen, ohne dass sich ein störendes Kieselgeräusch einstellte.

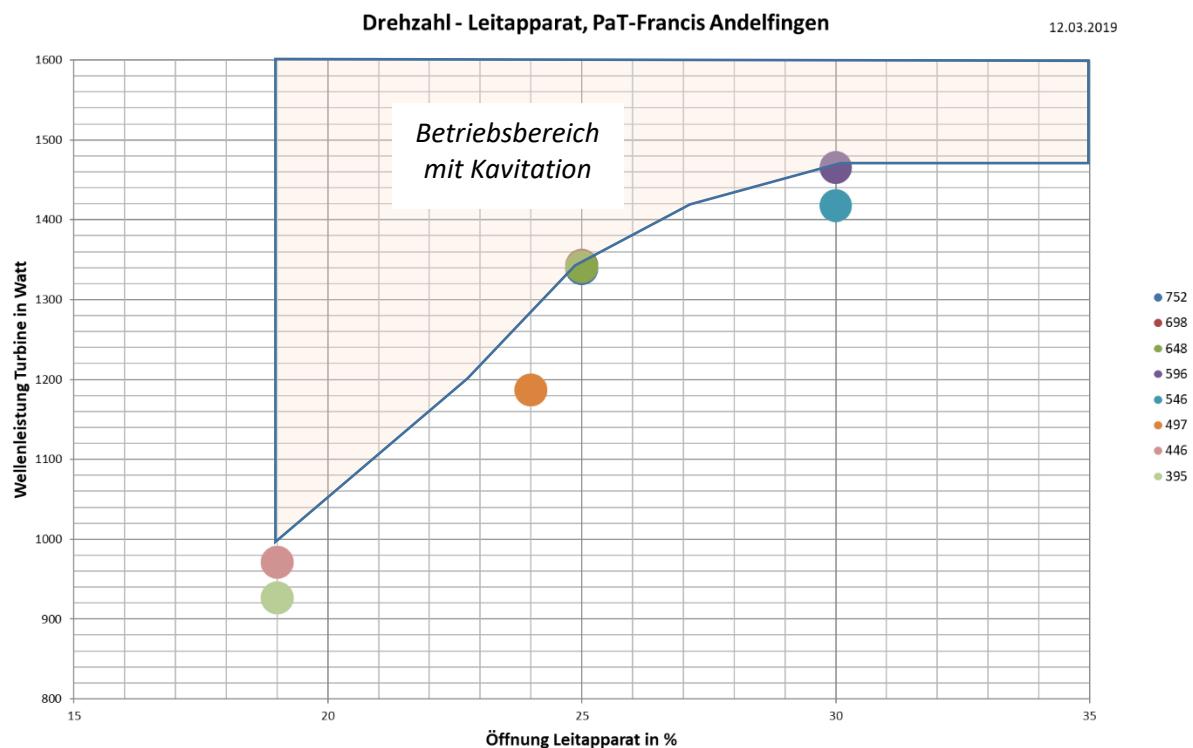


Abbildung 14: maximale Leitradöffnung bei verschiedenen Drehzahlen ohne Kieselgeräusche.

Da in den Monaten Januar bis März 2019 geringe Abflüsse herrschten, konnte die Anlage trotzdem kavitationsfrei betrieben werden, weil der Betrieb unterhalb der Kavitationsgrenze gemäss o.g. Abbildung blieb.

4.5 Kavitation, Modifikation Laufrad

Als Ursache für die Kieselgeräusche wurde Kavitation an der Eintrittskante des Laufrades vermutet, und zwar an der unteren Fläche. Das heisst, wegen des nicht optimalen Wasseranströmwinkels auf die spitze Lauradeintrittskante entstand Kavitation.



Abbildung 15: Geschwindigkeitsdreieck im Turbinenbetrieb (schematisch):

u_2 : Umfangsgeschwindigkeit Laufrad

c_2 : Wassergeschwindigkeit absolut

w_2 resultierende Geschwindigkeit relativ zum rotierenden Laufrad mit dem bei gewissen Drehzahlen und Leitradöffnungen ungünstigen Anströmwinkel auf die spitze Laufradeintrittskante, wo in der Folge Kavitation entstand.

Mit der Firma Egger SA wurde ein Lösungsansatz ausgearbeitet. Und zwar wird die zylindrisch bearbeitete und spitz zulaufende Laufradkante abgetrennt und abgerundet. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen den Vergleich des Laufrades der ersten Messreihe (Originallaufraum der Pumpe) mit der bearbeiteten Variante. Die eingekürzte Laufradschaufel ist klar vom Original unterscheidbar.

Die Laufräder wurden getauscht. Alle weiteren Messungen wurden mit dem modifizierten Laufrad durchgeführt.



Abbildung 16: Original-Pumpenlaufraď mit bearbeiteter, spitz zulaufender Schaufelkante.

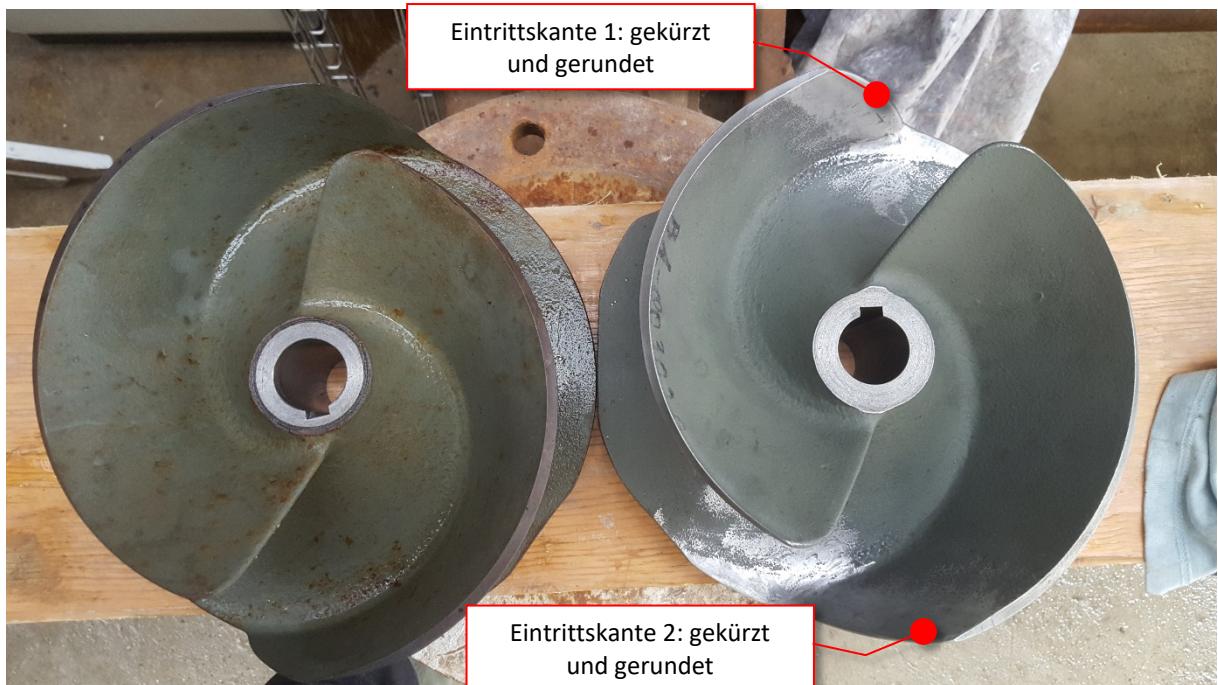


Abbildung 17: Vergleich Original-Pumpenlaufraď links zu modifiziertem Laufraď rechts.

4.6 Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)

Die erste Messreihe hat neben der Kavitation eine Tatsache zu Tage geführt, der im Laufe der Entwicklungsarbeit zu wenig Bedeutung beigemessen wurde. Und zwar wurde dem Störungspotenzial



des Frequenzumrichters nicht genügend Rechnung getragen. Dies zeigte sich, indem zum Beispiel das analoge Spannungssignal der Drehmomentmessnabe zur Unbrauchbarkeit verzogen wurde. Provisorische Massnahmen wie zusätzliche Erdungen, separate Spannungsversorgung, Umverlegen der Messleitungen haben wenig bis nichts gebracht. Erst eine vertiefte Herangehensweise zeitigte die erhoffte Wirkung. So wurde das Speisekabel des Generators mit einem geschirmten ersetzt; die Schirmung dieses Kabels grossflächig geerdet und das Kabel ohne Umwege direkt zum Frequenzumrichter geführt, sowie ohne Kabelringel («Pigtails») angeschlossen. Auch bei den Signalkabeln wurden die Ringel weggelassen. Ausserdem wurden, wo dies möglich war, die Signalkabel nicht parallel zur Speiseleitung des Generators verlegt, sondern kreuzten diese im rechten Winkel. Die darauffolgenden Messungen zeigten eine deutlich bessere Signalqualität.

4.7 Zweite und dritte Messreihe

4.7.1 Messeinrichtung

Die zweite und dritte Messreihe wurde an zwei Tagen kurz nacheinander durchgeführt. Das Ziel der Messreihen war das Herausfahren der charakteristischen Größen dieser Pilotanlage. Im Vergleich zur ersten Messreihe wurde jedoch der Umfang der Messeinrichtung gesteigert und ein eigentliches «Feldlabor» eingerichtet. Zusätzlich zur ersten Messreihe wurden aufgebaut:

- Durchfluss in l/s Fluxus ADM 6725, Ultraschallmessgerät mit internem Speicher, installiert aussen an der Druckleitung
- Leistungsmessung el Fluke 3-Phasen Energiemesser und -Logger mit internem Speicher
- Wasserstand UW in V Pegelsonde IFM 250 mbar, gemessen Messkarte am PC

Ausserdem wurde das Messsignal der Drehmomentmesswelle ebenfalls über die Messkarte erfasst. Alle Messdaten wurden im Sekundenraster gemessen. Pro Messpunkt wurden die Messdaten über eine Messdauer von 30 s gemittelt.

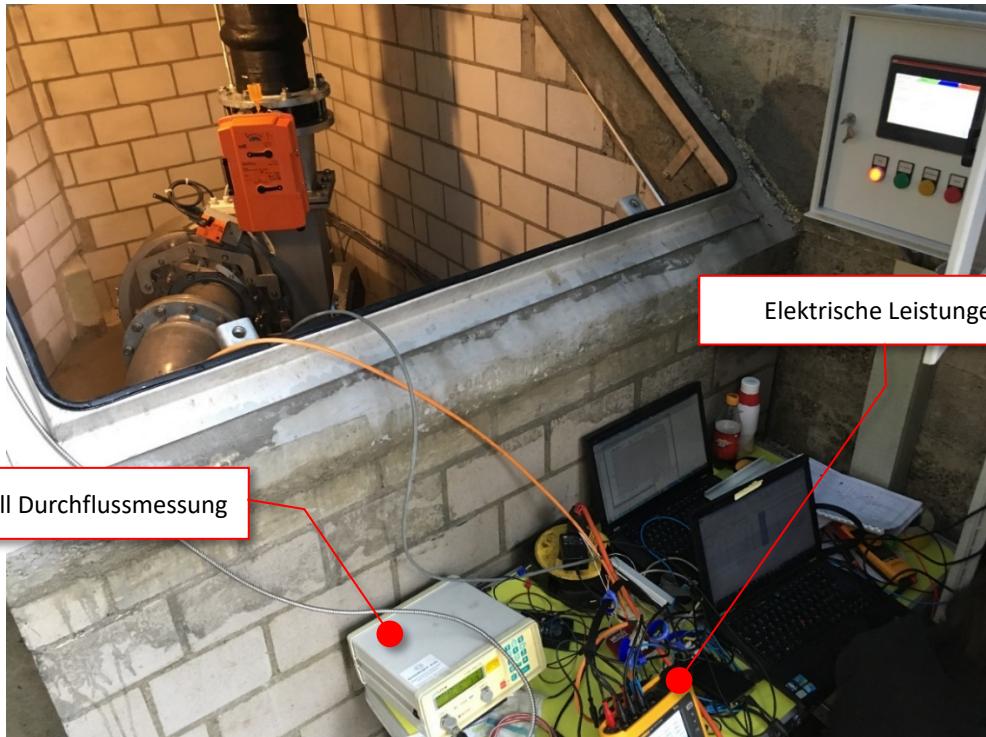


Abbildung 18: Aufbau der Messeinrichtung («Feldlabor»)

Mit Hilfe der Durchflussmessung und der Pegelsonde im Unterwasser konnte die hydraulische Leistung (als Input-Leistung der PaT-Francis: $P_{hydr} = g * \rho * Q * H_{net}$) genügend genau bestimmt werden. In der Berechnung der Nettofallhöhe wurden die Verluste der Druckleitung (Rohrreibung und lokale Verluste am Einlauf, Bogen und Ventil) berücksichtigt. Von der Bruttofallhöhe bei Stillstand von 8.45 m reduziert sich die Nettofallhöhe bei Vollast von 85 l/s wegen steigendem Unterwasserspiegel und Verluste in der Rohrleitung auf 5.17 m.

4.7.2 Optimaler Zusammenhang Leitapparatöffnung und Drehzahl

Abbildung 19 zeigt graphisch das Gesetz von Drehzahl zu Leitradöffnung. Die Hüllkurve über die Messkurven ergibt die Stützstellen der Drehzahl-Sollvorgabe in Abhängigkeit der Leitradöffnung.

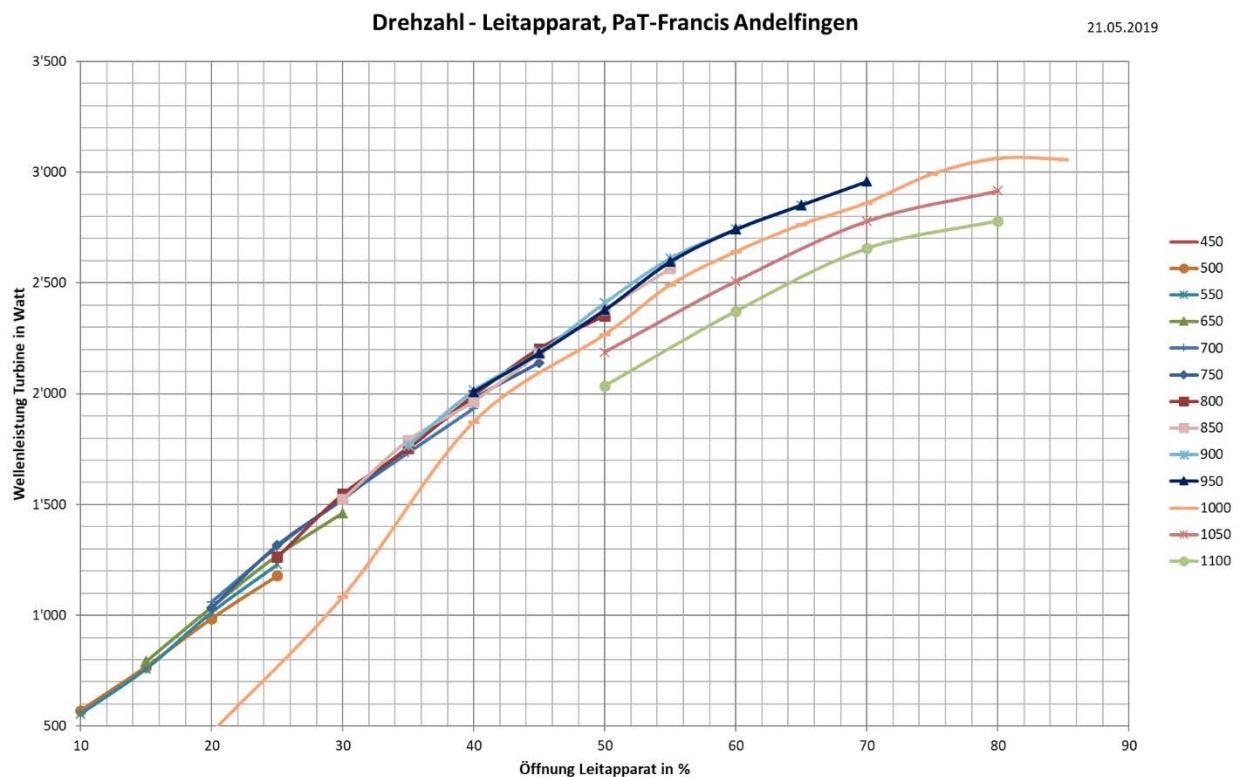


Abbildung 19: Zusammenhang Leitradöffnung zu Drehzahl: die Umhüllende ergibt die optimale Einstellung (Stützstellen), d.h. die maximale Wellenleistung bei gegebenem Durchfluss

Tabelle 2: Stützstellen (gewählter Zusammenhang Leitradöffnung zu Drehzahl)

Leitradöffnung in %	Drehzahl in rpm
10	500
20	650
30	750
40	800
50	900
60	900
70	950
80	1000

Weiter ist ersichtlich, dass die maximale Wellenleistung bei einer Leitradöffnung von 80% und einer Drehzahl von 1000 min^{-1} erreicht werden kann. Da die Messkurven mit Drehzahlen von 1050 min^{-1} und 1100 min^{-1} weit unterhalb der Umhüllenden liegen, ist der Turbinenbetrieb mit einer Drehzahl über 1000 min^{-1} , also über die Nenndrehzahl des 6-poligen PM-Generators hinaus, nicht erforderlich.



Mit dem modifizierten Laufrad waren Kieselgeräusche nur noch bei grossen Leitradöffnungen und zu tiefen Drehzahlen stark wahrnehmbar. So zum Beispiel bei 55 % Öffnung und 850 min^{-1} , bei 50% Öffnung und 800 min^{-1} , bei 45 % Öffnung und 750 min^{-1} , bei 40% Öffnung und 700 min^{-1} . In Abbildung 19 sind diese Messpunkte jeweils leicht abfallend; das heisst, sie liegen unterhalb der theoretischen Hüllkurve. Da die Hüllkurve auch zwangsläufig die Punkte mit den besten Wirkungsgraden abfährt, müssen die Turbinenwirkungsgrade bei diesen Messpunkten zwangsläufig schlechter sein. Mit dem Einsatz des modifizierten Laufrades gilt, dass für jede Leitradöffnung eine Drehzahl eingestellt werden kann, bei der höchstens leichte Kieselgeräusche wahrgenommen werden können. Die Massnahmen am Laufrad waren also erfolgreich.

4.7.3 Turbinenwirkungsgrad

Abbildung 20 zeigt die Turbinenwirkungsgrade bei verschiedenen Drehzahlen. Der **beste Turbinenwirkungsgrad von 74.5 % konnte bei einer Drehzahl von 950 min^{-1} gemessen werden**. Aus dem Diagramm sieht man weiter, dass die drehzahlvariable PaT-Francis einen **breiten Betriebsbereich von knapp 90 l/s im Maximum bis hinunter auf 20 l/s Minimaldurchfluss hat**.

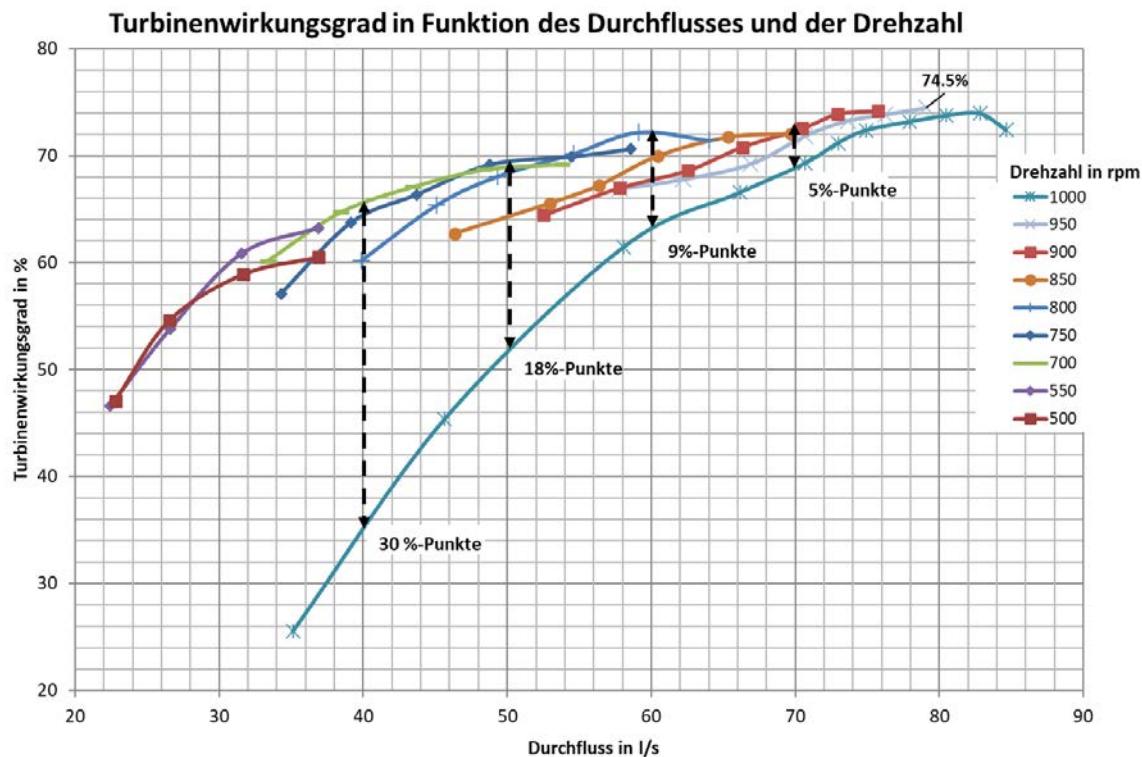


Abbildung 20: gemessene Turbinenwirkungsgrade und Vergleich zur Ausführung ohne Drehzahlregelung.

Der erwartete Wirkungsgrad der PaT-Francis von 78% konnte nicht ganz erreicht werden; als Gründe dafür werden vermutet:

- Wellenabdichtung: für diese Kleinstturbine fallen die Reibungsverluste von bis zu 100 W, die die einfache Wellenabdichtung mit Stopfbuchse verursacht, bereits ins Gewicht und kosten über 2%-Punkten an Turbinen-Wirkungsgrad.



- Anbau Leitapparat in neuem Spiralgehäuse: die im Werk gemessenen 80% Wirkungsgrad einer Abwasserpumpe als Turbine vom Typ EOA waren ohne Anbau eines Leitapparats zustande gekommen. Der vom Werk geschätzte Wirkungsgradabfall von ca. 2%, der wegen der hydraulischen Verluste durch die 10 Leitschaufeln der PaT-Francis entsteht, könnte auch etwas höher liegen.

Die Differenz von 4.5% zwischen dem erwarteten max. Turbinen-Wirkungsgrad von 78% zum gemessenen von 74.5% ist zu einem wesentlichen Teil der geringen Grösse der Pilotanlage geschuldet. Für eine Anlage mit grösserer Leistung und Laufraddurchmesser sollte ein Turbinen-Wirkungsgrad von 78% problemlos erreicht werden können.

Um den nicht-drehzahlvariablen Betrieb zu simulieren, wurde die Maschine bei konstanter Nenndrehzahl von 1000 min^{-1} über den gesamten Betriebsbereich gefahren. Der Wirkungsgradabfall gemäss Abbildung 20 zeigt eindrücklich, dass sich der drehzahlvariable Betrieb zumindest für die PaT-Francis lohnt. Selbst bei einem Durchfluss von 60 l/s (entspricht 70% des Nenndurchflusses) liegt der Wirkungsgrad mit Nenndrehzahl im Vergleich zur optimalen Drehzahl von 800 min^{-1} um 9%-Punkte tiefer.

4.7.4 Elektrischer Wirkungsgrad

Unabhängig vom Turbinenwirkungsgrad wurde auch der elektrische Wirkungsgrad gemessen; dieser umfasst den Wirkungsgrad:

- des Generators
- des Frequenzumrichters
- der Einspeiseeinheit
- der Netzdrosseln und des -Filters.

Im Diagramm ist der elektrische Wirkungsgrad in Funktion der Turbinen-Wellenleistung und der Drehzahl aufgetragen. Im Bestpunkt wird ein Wirkungsgrad von nur 83.8 % erreicht, was unerwartet tief ist. Auch fällt der Wirkungsgrad unterhalb von 1 kW an der Welle stark ab. Gründe dazu liegen im zusätzlichen Energieverbrauch der Einspeiseeinheit, Netzdrosseln und -filter, die bei Kleinstanlagen < 5 kW stärker ins Gewicht fallen als bei grösseren, sowie die Tatsache, dass Frequenzumrichter und Rückspeiseeinheit für 7.5 kW ausgelegt sind und damit für das Kraftwerk Obermühle um Faktor 3 zu gross sind. Es gab kein Modell mit kleinerer Leistung.

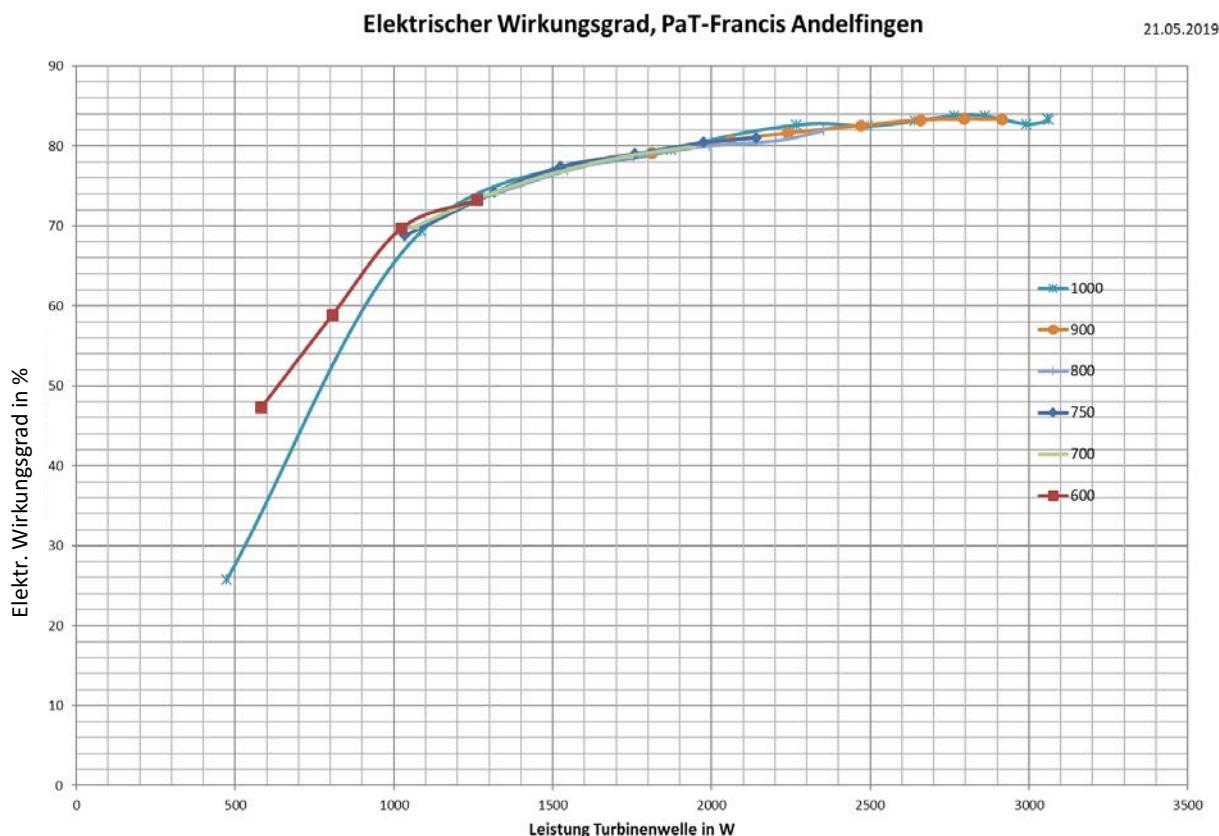


Abbildung 21: elektrischer Wirkungsgrad in Funktion der Wellenleistung und der Drehzahl.

Die Analyse dieses eher enttäuschenden elektrischen Wirkungsgrads zeigt folgendes:

- Geht man von einem Wirkungsgrad des Generators im gemessenen Anlagenbestpunkt gemäss Angaben des Herstellers von 92% aus, so muss der Wirkungsgrad der restlichen Komponenten bei gesamthaft bei 91.1 % ($0.838/0.92=0.911$) liegen.
- Mitsubishi beziffert einen Wirkungsgrad des Frequenzumrichters von > 96%. Wird für den Frequenzumrichter und die Einspeiseeinheit beim betrachteten Punkt ein Wirkungsgrad von je 97 % angenommen und der Wirkungsgrad der Netzdrosseln und -filter von je 98.5%, dann kommt der Wirkungsgrad der gesamten Rückspeisung ohne Generator zu 91.3 % zu liegen. Das bestätigt die obige Annahme eines hohen Wirkungsgrads des PM-Generators von 92%.
- Es zeigt sich, dass bei Kleinstanlagen < 5kW wie der vorliegenden Pilotanlage zu hohe Verluste mit dem Frequenzumrichter, der Einspeiseeinheit und den Netzdrosseln eingefahren werden.

Für weitere Anlagen in diesem Leistungsbereich von <5kW muss die Option eines polumschaltbaren Asynchrongenerators anstelle des PM-Generators mit Frequenzumrichter ins Auge gefasst werden. Ein Asynchrongenerator kleiner Leistung besitzt zwar einen um 4% bis 5% tieferen Wirkungsgrad als der PM-Generator, doch entfallen die Verluste des Frequenzumrichters und der Einspeiseeinheit. Um im Teillastbereich den enormen Wirkungsgradabfall der PaT-Francis von über 30% gegenüber dem drehzahlvariablen Betrieb etwas kompensieren zu können, kann eine polumschaltbare Ausführung der Asynchrongeneratoren eingesetzt werden. Auch wenn diese Option andere Nachteile hat (tiefer cos-phi



erfordert Blindleistungskompensation) als die gewählte Ausführung mit drehzahlvariablen PM-Generator haben wird, so liegen die Vorteile bei der einfacheren und kostengünstigeren Ausführung.

4.8 Umgang mit Geschwemmsel

Der Umgang mit Geschwemmsel wurde an der Pilotanlage Obermühle wie folgt gelöst:

- Das meiste Geschwemmsel wird am Lochblech aufgehalten. Durch kurzes Abstellen der Turbine (6 Minuten) fliesst das Wasser über die Streichwehrkante in den Leerschuss¹ und nimmt dabei das auf dem Lochblech liegende Geschwemmsel mit.
- Kleine Geschwemmselteile gehen durch das Lochblech (mit ø 15 mm Bohrungen) hindurch und können an den Leitschaufeln hängen bleiben (siehe nachfolgende Abbildung). Durch das Abstellen der Turbine inkl. Schliessen des Notschlussventils sowie beim Wiederanfahren wird das Geschwemmsel auf den Leitschaufeln durch Wasserverwirbelungen gelöst und abgespült. Durch die beiden Öffnungen im Spiralgehäuse konnte die Wirksamkeit dieser Spülungen überprüft werden.



Abbildung 22: Geschwemmsel an den Leitschaufeln, welches sich jedoch durch Abstellen und Wiederanfahren der Turbine abschwemmen lässt (Quelle: Hydro Engineering 2019).

Das Abschwemmen des Geschwemmsels vom Lochblech gelingt jedoch nur bei höheren Mülibach-Abflüssen. Bei Niederwasser und viel Laub im Herbst funktioniert die Spülung schlecht, weil das über das Streichwehrkante überströmende Wasser keine genügende Schleppkraft mehr aufbaut, um das Geschwemmsel vom Lochblech zu lösen und mitzureissen. Im Herbst muss deshalb regelmässig von Hand nachgereinigt werden.

¹ Es wird dabei kein Sunk ausgelöst, weil das Stauziel nur 2 cm unter der Überfallkante liegt und der Oberwasserkanal praktisch kein Speichervolumen besitzt, so dass noch während des Schliessens der Turbine bereits ein Teil des Abflusses über den Leerschuss fliesst und damit im Unterwasserkanal praktisch keine Abflussänderung eintritt.



Abbildung 23: ungenügende Spülwirkung mit dem rampenförmig ausgeführten Lochblechrechen bei geringen Mülibach-Abflüssen (Quelle: Hydro Engineering 2020)

Der Umbau des bestehenden Oberwasserbeckens zu einer klassischen selbstreinigenden Sohlenentnahme (mit Neigung des Lochbleches in Fliessrichtung gemäss nachfolgender Abbildung) wurde während der Planung ausgiebig diskutiert, aber schliesslich aus den folgenden Gründen verworfen:

- Wie die nachfolgende Abbildung zeigt, hätte die klassische Sohlenentnahme einen permanenten Fallhöhenverlust von 0.50 m verursacht, was rund 10% der Leistung entspricht.
- Der Mülibach wird zu einem wesentlichen Teil von einer grossen Quelle 500 m oberhalb der Obermühle gespeist; das Geschwemmselaufkommen ist deshalb verhältnismässig gering und auf die Herbstmonate Oktober und November beschränkt. Eine Handreinigung während dieser zwei Monate ist deshalb zumutbar.

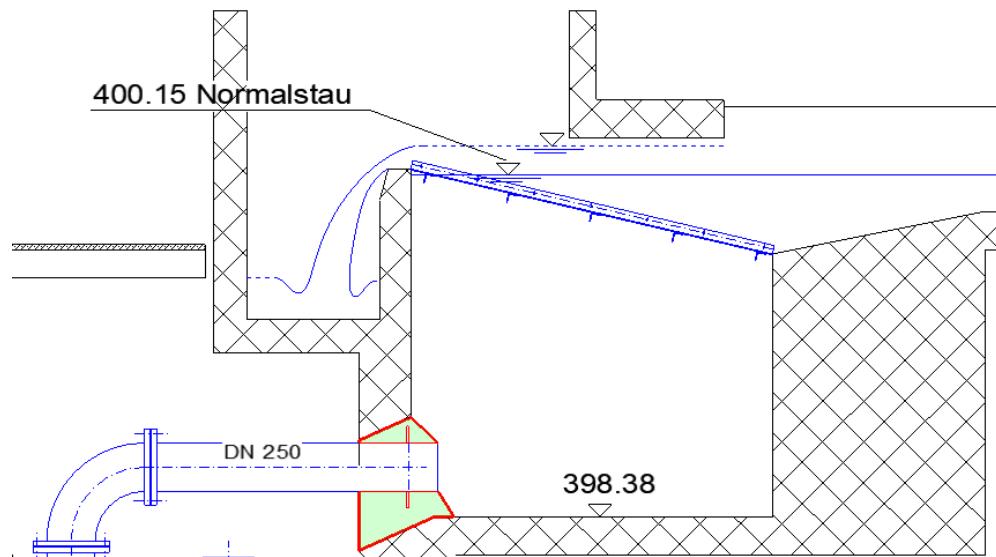


Abbildung 24: Anordnung des Lochblechrechens wie ausgeführt.

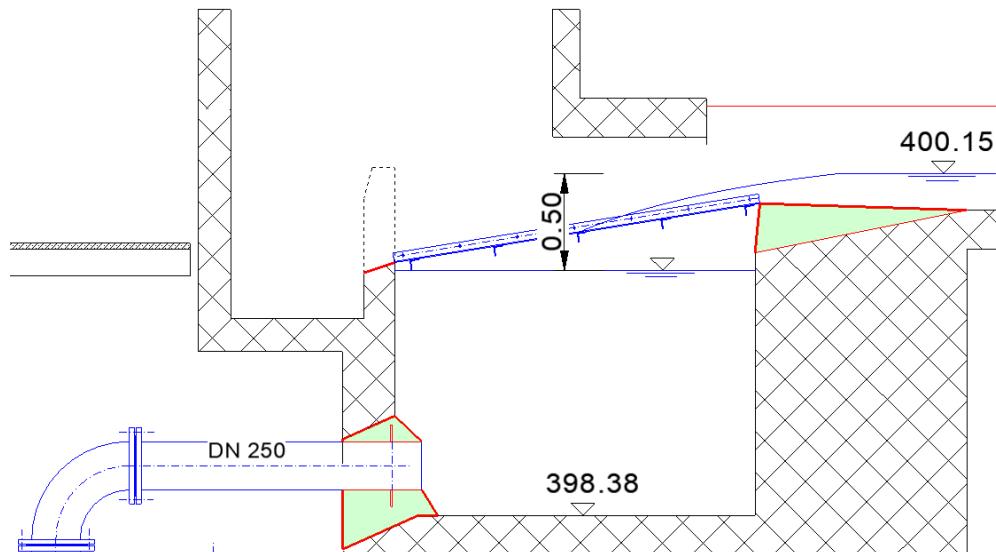


Abbildung 25: klassische selbstreinigende Sohlenentnahme mit 0.5 m permanentem Fallhöhenverlust.

4.9 Luftschall

Die PaT-Francis produziert dank Einsatz eines sehr laufruhigen PM-Generators und der Ausführung des Turbinenschachts aus Kalksandsteinmauern kaum Schallimmissionen. Hingegen ist der ausserhalb des Turbinenschachts aufgestellte Schaltschrank mit Frequenzumrichter und Einspeiseeinheit mit 2 Lüftern aussergewöhnlich laut; es wurden die folgenden A-bewerteten Mittelungsspegel L_{Aeq} gemessen:

- a) Bei minimaler Leistung $P_{el} = 0.50 \text{ kW}$
 - in 1 m Abstand vom Schaltschrank resp. vom Turbinenschacht 46 dB(A)
 - vor dem nächstgelegenen Fenster der umgenutzten Obermühle 39 dB(A)



b) Bei einer typischen Dauerleistung $P_{el} = 2.10 \text{ kW}$

- in 1 m Abstand vom Schaltschrank resp. vom Turbinenschacht 50 dB(A)
- vor dem nächstgelegenen Fenster der umgenutzten Obermühle 46 dB(A)

Es werden die folgenden Pegelkorrekturen addiert:

- für schwach hörbarem Tongehalt +2dB(A)
- für schwach hörbarem Impulsgehalt +2dB(A)

Der massgebenden Beurteilungspegel vor dem nächstgelegenen Fenster der Obermühle liegt damit bei rund $46+2+2=50 \text{ dB(A)}$.

Die Obermühle liegt in der Kernzone I, in der für den Lärmschutz die Empfindlichkeitsstufe III gilt. Es ist gemäss Lärmschutzverordnung LSV Anhang 6 ein Immissionsgrenzwert der Wasserkraftanlage (mit Turbine bestehend seit 1945) von $L_r = 55 \text{ dB(A)}$ nachts einzuhalten. Auch der strengere Planungswert von $L_r=50 \text{ dB(A)}$ wird nicht überschritten.

Falls sich die Anwohner durch die Schallimmissionen trotz Einhaltung der gesetzlichen Werte gestört fühlen, kann der Schaltschrank mit dem ungewöhnlich lauten Frequenzumrichter mit Einspeiseeinheit nachträglich in den Turbinenschacht verlegt werden.

4.10 Körperschall

Um die Wirksamkeit der elastischen Lagerung der PaT-Francis zu überprüfen, wurde die ZC Ziegler Consultants AG, Zürich beauftragt, Messungen vor Ort durchzuführen und die entsprechenden Nachweise zu erbringen. Schwingungssensoren wurden sowohl auf dem elastisch gelagerten Turbinenrahmen als auch am umgenutzten Mühlengebäude (Büros und Wohnungen) installiert.

Es wurde folgendes festgestellt:

- Während die Turbinen-Generator-Einheit mit Schwinggeschwindigkeiten bei Vollast von bis zu 4 mm/s vibriert, wurden am Mühlengebäude nur noch maximal 0.06 mm/s gemessen, welche der «typische» Mensch nicht mehr als Erschütterungen wahrnimmt (Schwelle bei 0.2 mm/s).
- Die gemessene Eigenfrequenz der Lagerung liegt bei 25 Hz (in z-Richtung) und damit deutlich über der berechneten von 11 Hz. Die Dämpfung durch die elastische Lagerung («Entkoppelung») beginnt erst bei Frequenzen ab 35 Hz ($25 * \sqrt{2}$).
- Da die Hörschwelle im Bereich des durch die PaT-Francis generierten Lärms bei ca. 63 Hz liegt, ist es nicht von praktischer Bedeutung, wenn die Entkoppelung erst «ab Frequenzen klar über 35» wirksam wird.

Die Tatsache, dass die gemessene Eigenfrequenz der Lagerung mit 25 Hz deutlich über der erwarteten von 11 Hz gemäss Lagerauslegung liegt, wurde damit erklärt, dass die Hohlräume zwischen den 16 MAFUND-Lagern mit Trittschalldämmmatte (gekreppte Glaswolle vom Typ LURO 814) ausgefüllt wurden. Damit wurde die Lagerung steifer. Besser wäre, die Hohlräume nicht auszufüllen und den Turbinenrahmen vor dem Ausbetonieren zuerst auf eine verlorene Schalung (vorfabrizierte Deckenplatte) zu stellen.

Der Bericht der ZC Ziegler Consultants AG ist in Beilage 1 zu finden.



4.11 Betriebserfahrungen

Ursprünglich wurde in der Obermühle eine Jahresenergieproduktion der PaT-Francis von 12 MWh erwartet, was dem Bedarf von ca. 3 Einfamilienhäusern entspricht. Obwohl die PaT-Francis im ersten Betriebsjahr 2019 praktisch störungsfrei lief, wurde die erwartete Produktion nur zu 2/3 erreicht, weil die Abflüsse des Mülibaches aufgrund der ausgedehnten Trockenheit im 2018 extrem tief waren: der Grundwassersee oberhalb von Andelfingen, der den Mülibach speist, erholt sich nicht vor Dezember 2019, so dass die Soll-Produktion erst im zweiten Betriebsjahr 2020 erreicht werden dürfte.

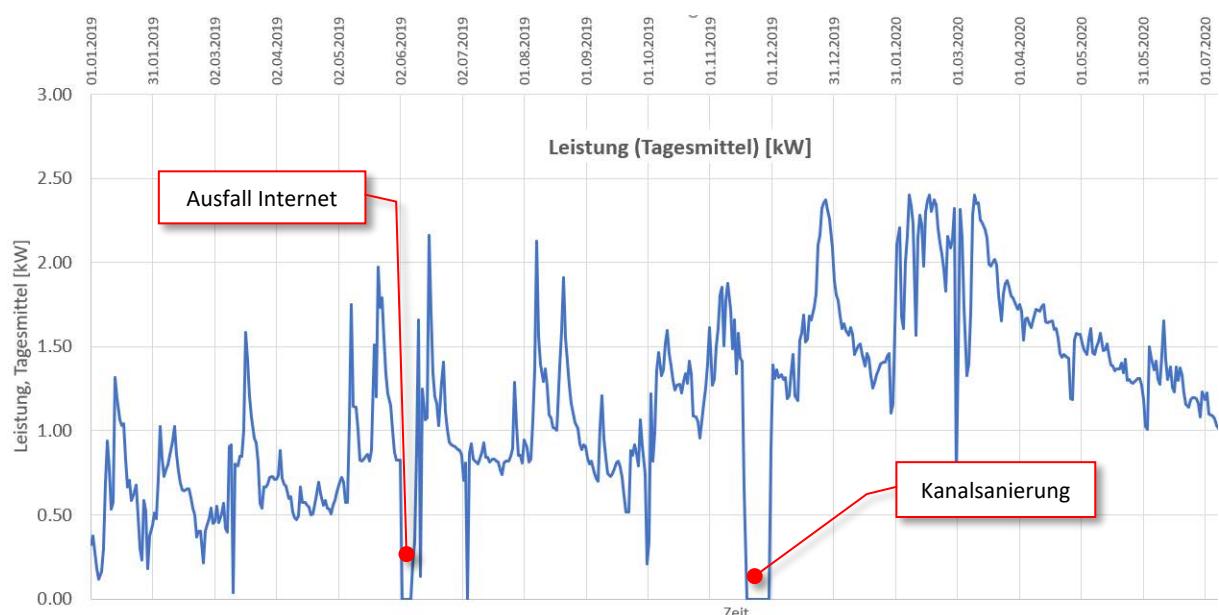


Abbildung 26: Diagramm der Einspeiseleistung in kW von Januar 2019 bis Juli 2020

Wichtig für den Nachweis der Zuverlässigkeit der PaT-Francis ist die Tatsache, dass die Anlage während den ersten 20 Betriebsmonaten praktisch störungsfrei durchlief. Betriebsunterbrüche gab es nur folgende:

- 03. bis 07. Juni 2019: Fernzugriff auf die Steuerung wegen eines Server-Problems unterbrochen; keine Datenaufzeichnung während dieser Zeit; Anlage produziert jedoch weiter.
- 19. bis 30. November 2020: Ausserbetriebnahme der Anlage, um eine Kanalabdichtung (wegen Feuchtigkeit im Nachbargebäude) durchzuführen.

Reparaturen oder Beschaffungen von Ersatzteilen gab es keine; das modifizierte Laufrad (wegen Kavitation an der Laufradeintrittskante) wurde vom Pumpenlieferant nicht verrechnet (Garantiearbeit).

5 Schlussfolgerungen und Fazit

Mit dem Pilotprojekt Obermühle Andelfingen konnten folgende Erkenntnisse gewonnen werden:



- Das PaT-Francis Gesamtpaket bietet die Möglichkeit, kleine Wasserkraftpotentiale bis ca. 50 kW im Nieder- und Mitteldruckbereich bis ca. 50 m Fallhöhe effizient zu nutzen.
- Durch die Nutzung von Standard-Kreiselpumpen als Basis und einer skalierbaren Konstruktion des anzuflanschenden Leitapparats in neuem Spiralgehäuse kann der Planungsaufwand für eine PaT-Francis auf ein Minimum reduziert werden.
- Mit den Leitschaufeln kann ein variables Wasserdargebot abgefahren werden, was die PaT zu einer vollwertigen Francis-Turbine aufwertet.
- Der Nachteil von stark abfallenden Teillastwirkungsgraden bei Francis-Turbinen wird im vorliegenden Pat-Francis-Konzept durch einen drehzahlvariablen Betrieb eliminiert.
- Mit dem water-to-wire-Ansatz (Gesamtpaket) werden dem Anwender oder Investor auch praktische Lösungen zum Umgang mit Geschwemmel (die Verstopfungsanfälligkeit von kleinen Francis-Turbinen ist legendär), zur Schall- und Körperschalldämmung, zu kostengünstigen Notschlusslösungen (Klappe mit Antrieb und integrierter Notstellfunktion) und einer situativ anpassbaren Generator-Option (PM-Generator oder polumschaltbarem Asynchrongenerator) geliefert.
- Es werden dabei Serienprodukte aus anderen Industriebereichen (HLK und Gebäudetechnik, Kleinwind- sowie smart-home-Technologien) genutzt, was sowohl zu einer Vereinfachung des Planungsprozesses und der Unterhaltsarbeiten als auch zu geringeren Investitionskosten führt.
- Die gemessenen Wirkungsgrade der PaT-Francis-Pilotanlage in der Obermühle Andelfingen liegen etwas unterhalb der Erwartung ($\eta_T=74.5\%$ anstelle 78%), was jedoch nicht dem Konzept der PaT-Francis als solche, sondern der geringen Grösse dieser Pilotanlage von nur $P_{el\ max}$ von 2.5 KW geschuldet ist.
- Während den ersten 20 Monaten des kommerziellen Betriebs der PaT-Francis kam es zu keinen Ausfällen oder Schäden. Zu Beginn wurde Kavitation an der Laufradeintrittskante festgestellt, die jedoch durch eine Modifikation am Laufrad eliminiert werden konnte.

Fazit. Das PaT-Francis-Konzept kann ohne Einschränkung für weitere Projekte in der Kleinstwasserkraft empfohlen werden.

6 Ausblick und zukünftige Umsetzung

Neue Entwicklungen oder weiterführende Untersuchungen zur PaT-Francis sind aktuell keine vorgesehen; das Produkt hat seine Marktreife bewiesen und kann weiter verbreitet werden. Bereits sind zwei Projekt – eines Toggenburg und eines an der Birs – in der Planung, wobei eine PaT-Francis als Zweit-Turbine neben einer 120-kW Turbine resp. als Lockströmungsturbine in der Sanierung der Fischgängigkeit zum Einsatz kommen sollen.

Der Verbreitung des PaT-Francis-Gesamtpakets stellen sich aktuell verschiedene Hindernisse in den Weg:

- Historische Mühlenanlagen und Gewerbebetriebe mit alten oder ungenutzten Turbinen besitzen oft ehehafte oder unbefristete Wasserrechte. Mit dem Bundesgerichtsentscheid zum Kraftwerk Hammer in Cham (1C_631/2017 vom 29. März 2019) können die althergebrachten



Rechte bei erster Gelegenheit befristet werden. Baugesuche zur Installation einer PaT-Francis könnten eine solche Gelegenheit für die Behörden sein und in ein Neukonzessionierungsverfahren münden. Viele Investoren von Kleinstwasserkraftprojekten wagen sich nicht an dieses Bewilligungsverfahren und exponieren ihre Wasserrechte lieber nicht dem «Stresstest» einer Neukonzessionierung.

- Im aktuellen Förderprogramm des Bundes zu den erneuerbaren Energien werden weder Neu- noch erheblich erweiterte oder erneuerte Kleinstwasserkraftanlagen unterstützt. Da mit der Stromvermarktung via direkter Netzeinspeisung (meist zu Marktpreisen um 5 Rp./kWh) keinerlei Amortisation einer Investition möglich und die lokale Nutzung über einen Zusammenschluss zum Eigenverbrauch (ZEV) meist keine gesicherte Langzeitperspektive über 20 Jahre ermöglicht, sind Kleinstwasserkraftprojekte in höchstem Masse auf A-Fonds-Perdu-Beiträge angewiesen. Entsprechend rar sind die baureifen Projekte, die das PaT-Francis-Gesamtpaket einsetzen könnten.

So sind in der Schweiz aktuell – bis zur Änderung der Förderpolitik – die möglichen Anwendungen des PaT-Francis-Gesamtpakets auf die folgenden Potentiale beschränkt:

- Lockströmungsturbinen bei der Sanierung von Fischwanderhilfen
- Trinkwassersysteme, in welchen ein Gegendruck vorhanden ist und Gleichdruck-Turbinen wie Pelton nur mit zusätzlichen Massnahmen einsetzbar sind.
- Abwassersysteme
- Energie-Rückgewinnungsturbinen in der Industrie

Aufgrund des einfachen, wartungsarmen Aufbaus und der Langlebigkeit der PaT-Francis (mit Serien-Pumpe als Basis) sind Anwendungen auch in entlegenen Regionen des Südens möglich:

- In der ländlichen Dorfelektrifizierung.
- An einem Absturz in Bewässerungssystemen, um mit dem produzierten Strom Wasser mit einer elektrischen Pumpe in höhergelegene Felder zu bringen und so die Anbaufläche auszuweiten.

7 Kommunikation

Die Ergebnisse des Pilotprojekts PaT-Francis Obermühle Andelfingen konnten bisher wie folgt präsentiert werden:

1. **Mühlentag Andelfingen, 1. Juni 2019:** Im Rahmen des Schweizer Mühlentags organisierte der Verkehrsverein Andelfingen ein Fest, an welchem Führungen durch alle 6 Mühlen des Dorfes und das Mülibach-System angeboten wurden. Auch für die PaT-Francis an der Obermühle wurden Führungen mit technischen Erläuterungen durch die Autoren des vorliegenden Schlussberichts durchgeführt. Für diesen Anlass wurde eine grosse Plakattafel zur Wasserkraftnutzung an der Obermühle sowie ein Flyer speziell zur PaT-Francis-Technologie hergestellt (siehe Beilagen 2 und 3). Der Anlass war gut besucht. Mühlenbesitzer und andere potenziellen Anwender des PaT-Francis-Gesamtpakets wurden durch die Autoren dieses Schlussberichts namentlich eingeladen.



2. **Anwenderforum Kleinwasserkraft 2019, Rorschach (26.-27. September 2019):** Leider konnte der Vortrag wegen Krankheit des Autors nicht gehalten werden. Nur das Abstract zum PaT-Francis-Gesamtpaket fand eine gewisse Verbreitung.
3. **Anwenderforum Kleinwasserkraft 2020, Kufstein – Online Anwenderforum (24.-25. September 2020):** Anstelle des geplanten Vortrags in Kufstein konnte – corona-bedingt – nur eine 15-minütige, vertonte Online-Präsentation mit anschliessender Fragerunde durchgeführt werden. Die Präsentation ist in Beilage 4 enthalten.

8 Publikationen

Die folgenden Publikationen zum Pilotprojekt PaT-Francis Obermühle konnten bisher platziert werden:

1. **Baublatt Nr. 22, Freitag, 30. Oktober 2020: Hydroenergie aus dem Dorfbach.** Dieser Artikel wurde durch Journalist Benedict Vogel im Rahmen seines BfE-Mandats verfasst. Der Beitrag entstand aufgrund eines Vorort-Besuchs der Anlage Obermühle mit Interview sowie diversen Inputs (technische Erläuterungen, Diagramme, Photos, Korrekturlesen) der Autoren des vorliegenden Schlussberichts. Ursprünglich als Beitrag für die breite Öffentlichkeit vorgesehen, enthält der Artikel viele technische Details zu Konstruktion und erreichten Wirkungsgraden der PaT-Francis, so dass damit auch das Fachpublikum bedient wird. Dieses wird mit der grossen Auflage der Fachzeitschrift «Baublatt» (23'000) sicher erreicht, da diese Zeitschrift in der Baubranche inkl. Immobilienbesitzer, Planungsbüros und Unternehmer mit Bezug zur Wasserkraft weit verbreitet ist. Der Artikel ist in Beilage 5 enthalten.
2. **Swiss Small Hydro Verbandsschrift: Petite Hydro – Kleinwasserkraft Nr. 101 1/2021: Pilotprojekt PaT-Francis im Zürcher Weinland – Leistungsnachweise und Betriebserfahrungen einer neuartigen Kleininsturbine.** In der 100. Ausgabe vom Dezember 2020 dieser Fachzeitschrift fand sich kein Platz mehr für den verfassten Artikel, da der Fokus der Jubiläumsausgabe eher auf nicht-technischen Themen lag. Es liegt jedoch eine schriftliche Bekundung der Publikationsabsicht der Redaktion vor, den Artikel im Heft 1/2021 abzudrucken. Ein Vorabzug des Artikels ist in Beilage 6 zu finden.

9 Literaturverzeichnis

- [1] *Chappalaz, Jean-Marc: Pompe fonctionnant en turbine avec réglage du débit (PaT-Francis);* Forschungs- und Entwicklungsprojekt BfE, Projektnummer 101867; Februar 2007. ARAMIS
- [2] *Chapallaz, Eichenberger, Fischer: Manual on Pumps as Turbines;* gate / gtz; Vieweg 1992
- [3] *Z H Liu et al 2019: Characteristics and internal flow of a low specific speed pump used as a turbine,* 29th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems ; IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 240 042007



10 Anhang

Beilage 1: ZC Ziegler Consultants AG: Erschütterungen – Kleinwasserkraftwerk Obermühle Andelfingen, Elastische Entkoppelung, Bericht Nr. 3037-01a, 20.10.2020

Beilage 2: Plakattafel zur Obermühle anlässlich des Mühlentags 2019 Andelfingen

Beilage 3: Flyer zur Pilotanlage Obermühle mit PaT-Francis

Beilage 4: Präsentation zum Anwenderforum Kleinwasserkraft Kufstein, September 2020

Beilage 5: Artikel: Hydroenergie aus dem Dorfbach, erschienen in Baublatt Nr. 22 vom 30.10.2020

Beilage 6: Vorabzug der Fachpublikation zur PaT-Francis in der Zeitschrift: Petite Hydro – Kleinwasserkraft Nr. 101 1/2021 des Verbands Swiss Small Hydro