

Praktikum Francis-Turbinen Versuchsstand

1 Einführung

Wasserturbinen gehören zur Gruppe der Kraftmaschinen. Sie unterscheiden sich in zwei wesentlichen Grundprinzipien. Zum einen die Überdruckturbinen wie die Kaplan- oder Francis-Turbine, zum anderen die Gleichdruckturbine wie die Pelton- und Ossberger-Turbine. Im Folgenden soll die Francis-Turbine näher betrachtet werden.

Bei den heutigen Francis-Turbinen strömt das Fluid in eine Einlaufspirale. Zwischen dem Laufrad und dem Spiralgehäuse ist ein Traversenring verbaut mit feststehendem Leitgitter und beweglichen Leitschaufeln. Die Leitschaufeln ermöglichen die Veränderung des Anströmwinkels auf das Laufrad und regulieren damit den Durchfluss.

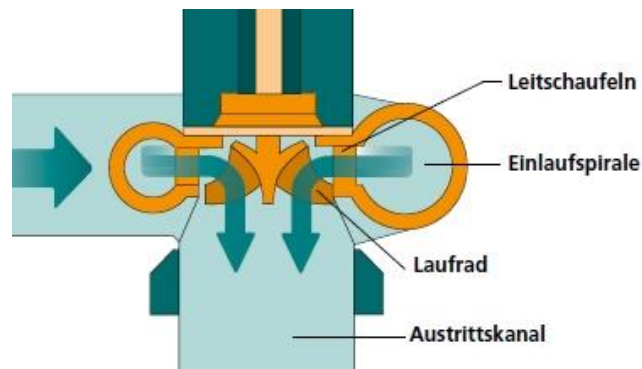


Abbildung 1 Aufbau einer Francis-Turbine [1]

1.1. Einsatzgebiete

Im Folgenden doppellogarithmisches H-Q-Diagramm Abbildung 2 sind die Einsatzgebiete von Pelton-, Kaplan- und Francis-Turbine über die Fallhöhe und den Volumenstrom dargestellt.

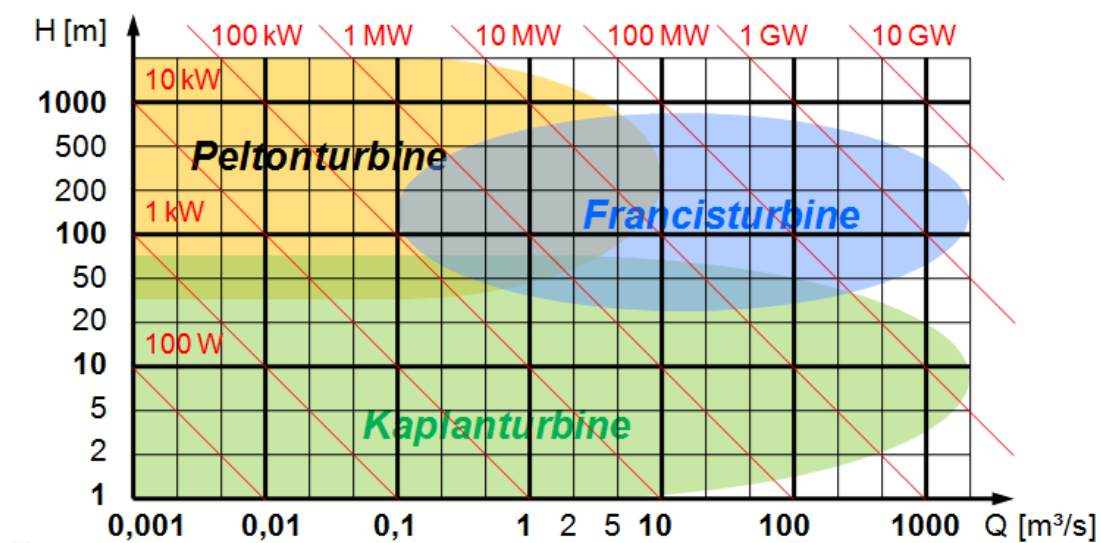


Abbildung 2 Einsatzgebiete von Pelton-, Kaplan- und Francis-Turbinen im H - Q - Diagramm [2]

Francis-Turbinen werden besonders häufig in Pumpspeicherkraftwerken eingesetzt, weil sie nicht nur als Kraftmaschine sondern auch als Arbeitsmaschine (Pumpe), mit relativ hohen Wirkungsgraden betrieben werden können.

2 Aufbau des Versuchsstands

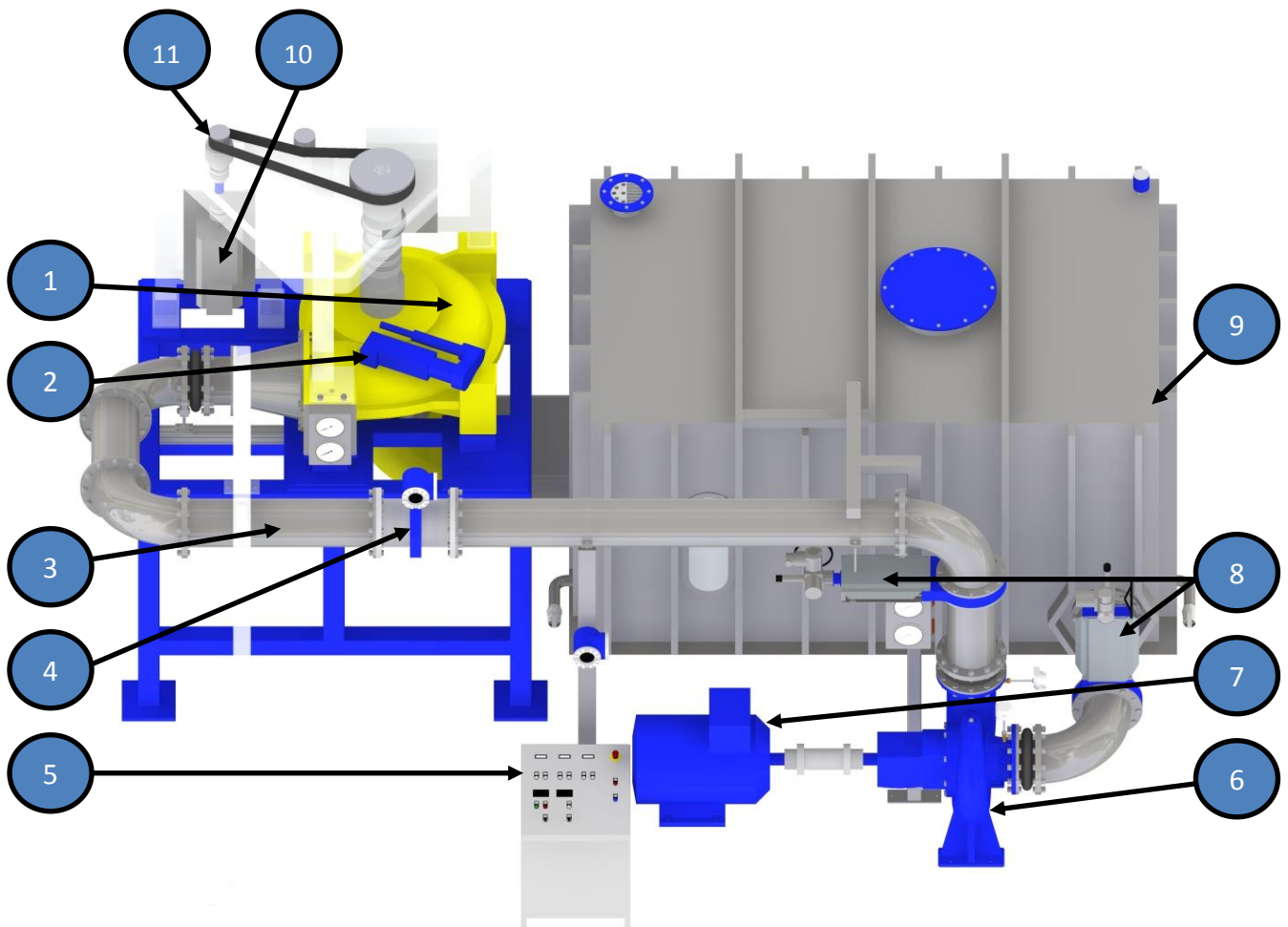


Abbildung 3 Francis - Turbinen - Versuchsstand mit Nummerierung der Bauteile

Der Versuchsstand besteht aus den folgenden Komponenten: 1 Francis Turbine; 2 Leitschaufelverstellung; 3 Rohrsystem; 4 Durchflussmessung; 5 Bedienpult; 6 Pumpe; 7 Elektromotor; 8 Plattenschieber; 9 Tank; 10 Generator; 11 Riementrieb

2.1 Technische Daten

- Wasserbehälter
Edelstahl 10 m³ Wasser, (Gesamtwassermenge der Anlage 11 m³)
- Pumpe KSB Etanorm EG 250-330
Fördermenge im Arbeitspunkt 920 m³/h, Nutzförderhöhe 16,73 m
Pumpendrehzahl 1485 min⁻¹ Saug- und Druckstutzen DN 250
- Elektromotor
Standartmotor Siemens 75 kW, 400V~, 50Hz, 1485min⁻¹
- Turbine, Modellmaschine Firma VOITH
Drehzahl 600 min⁻¹, Turbinenwirkungsgrad 92%, Leitschaufelverstellung 7° - 49°
- Generator
Synchrongenerator SIMOTICS M-1PH8 Luftgekühlt, 1750min⁻¹, 412V~; 35,6 kW; 58,3Hz.

2.2 Funktionsweise

Eine Pumpe wird über einen Elektromotor angetrieben und mit Energie versorgt. Das Wasser wird von der Pumpe aus dem Tank angesaugt und über das Rohrsystem zur Turbine gefördert. Vor und nach der Pumpe sind Plattenabsperrschieber eingebaut. Über einen Zahnriemen wird die Ankopplung an den Generator realisiert. Am Ausgang der Turbinenwelle ist eine elektrisch schaltbare Kupplung eingebaut welche Generator und Turbine trennen kann. Die Energieumwandlung erfolgt im Generator und die Anpassung bei Einspeisung in das Netz über eine elektronische Regelung.

2.3 Messtechnik

Die Anlage verfügt über eine große Anzahl von Messgeräten und Sensoren. Beispielsweise wird durch zwei verschiedene Verfahren der Volumenstrom gemessen. Das erste Verfahren ist das Ultraschallmessverfahren bei dem die Zeitdifferenz zwischen Sendern und Empfängern als Maß für die Geschwindigkeit genutzt wird. Beim zweiten Verfahren, dem magnetisch induktiven, lenken elektrisch leitfähige Teilchen im Fluid ein Magnetfeld ab, wodurch eine Spannung induziert wird. Diese Spannung ist proportional zum Volumenstrom. Zwischen E-Motor und Pumpe, Turbine und Zahnriemen sowie zwischen Zahnriemen und Generator befindet sich je eine Drehmomentmesswelle die gleichzeitig Drehmoment und Drehzahl erfasst. Mit diesen Messgrößen kann der Wirkungsgrad der Anlage bestimmt werden.

Alle Messwerte werden in einer Real Time Controller verarbeitet und am PC angezeigt.

Ausgewählte Hauptwerte, die die Anlage zur manuellen Bedienung benötigt, werden auch am Bedienschaltpult angezeigt.

2.4 Anlagenbedienung

Das Bedienen kann über die PC Software LabView oder über das Bedienschaltpult erfolgen. Im Praktikum wird die Anlage ausschließlich über den PC und die speziell dafür zur Verfügung gestellte LabView Anwendung betrieben. Begründet wird dies mit der Reproduzierbarkeit der Messwerte, der Datenerfassung und der anschließenden Auswertung. Weiterhin sind über die Anwendung Vereinfachungen getroffen, die ein schnelles Einarbeiten in die Problematik gewährleisten.

3 Kennfeld einer Wasserturbine

Typisches Kennfeld einer Wasserturbine

Die Kennfelder von Wasserturbinen werden meist in einem \dot{V} - n -Diagramm mit konstanter Fallhöhe dargestellt. Im Unterschied zu den Pumpenkennlinien entfällt hier dementsprechend die Variable H [m]. Anstelle der Fallhöhe kommt die Variable relative Leitradöffnung „ a “ hinzu. Diese Variable wird durch das Flächenverhältnis zwischen dem aktuellen Durchflussquerschnitt, zwischen zwei Leitschaufeln, und dem maximalen Durchflussquerschnitt bestimmt. In der Praxis ist es wichtig eine konstante Drehzahl zu halten die der Polpaarzahl des Generators und der Netzfrequenz von 50Hz angepasst ist. Mit Hilfe der Leitradverstellung kann die Wasserturbine zwischen Leerlauf (Abbildung 10 „L“) und

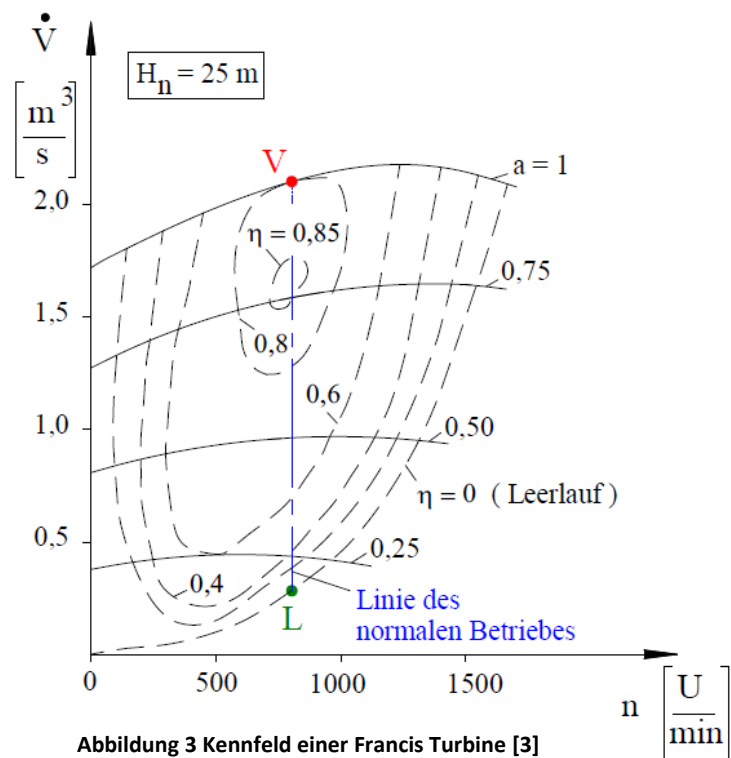


Abbildung 3 Kennfeld einer Francis Turbine [3]

Volllast („V“) geregelt werden. Dabei entsteht eine Linie des normalen Betriebes die durch den Punkt des höchsten Wirkungsgrades verläuft. Bei maximaler Öffnung des Leitrades erreicht die Turbine den Volllastbereich. Die Muschelkurven beschreiben den Zusammenhang von Durchfluss und Fallhöhe gekoppelt mit verschiedenen Wirkungsgraden. Daraus lässt sich ermitteln, in welchem Bereich des Durchflusses und der Fallhöhe der optimale Wirkungsgrad und somit die maximale Energieausschöpfung erzielt werden kann.

Kennfeld des Versuchsstands

Im Unterschied zu den typischen Kennfeldern einer Wasserturbine wird bei diesem Versuchsstand das Kennfeld mithilfe des tatsächlichen Leitschaufelwinkels „ α “ dargestellt. Eine weitere Besonderheit besteht darin, dass mit dem Versuchsstand nicht nur eine einzelne konstante Nutzfallhöhe betrieben werden kann. Sie kann mit Hilfe der Pumpe zwischen 0,1m und 25m variiert werden.

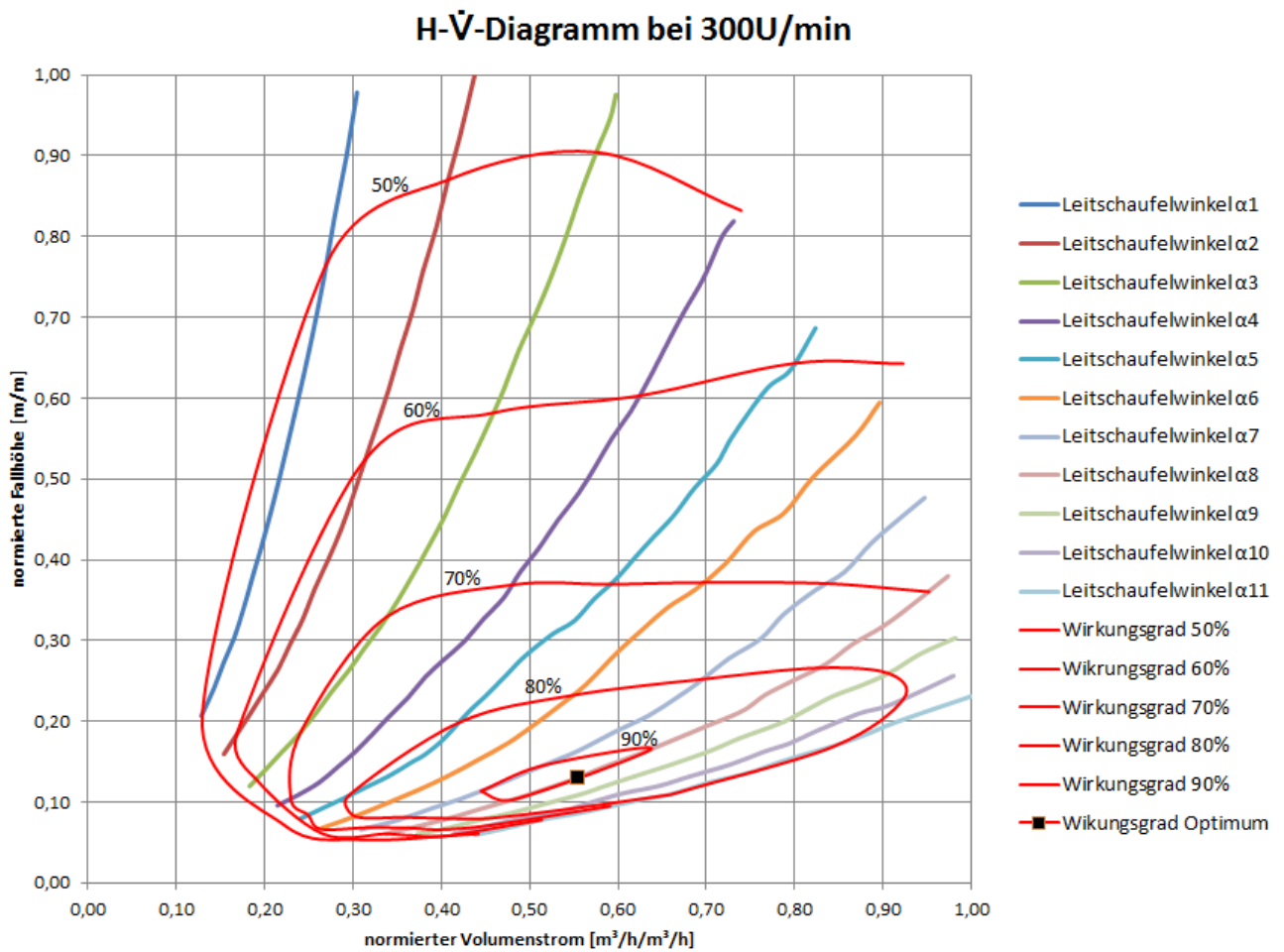


Abbildung 4 normiertes Kennfeld des Francis Turbinen Versuchsstands

3 Versuchsdurchführung Turbinenkennfeld

Die Anlage ist mit der LabView Anwendung zu bedienen und ist zum Praktikumsbeginn gestartet. In der Anwendung ist genau der beschriebene Ablauf einzuhalten!

Die Anlage ist nur im Notfall durch das Betätigen des Bedienknopfes „Anlage STOP“ und am Bedienschaltpult „Not-Aus“ Stop abzuschalten.

Im Normalbetrieb wird die Anlage so herunter gefahren wie sie mit den 9 Schaltanweisungen hochgefahren wurde, aber in umgekehrter Reihenfolge. Alles was zuvor aktiviert oder eingeschaltet wurde muss nun deaktiviert oder ausgeschaltet werden.

1. HMI Steuerung aktiv schalten und am Bedienpult blauen Resetknopf betätigen
2. Betriebswahl Rückspeisung einschalten
3. Nullabgleich der Messgeräte durchführen
4. Regelung der Turbinendrehzahl auf den Wert 300 setzen und aktivieren
5. Pumpe einschalten
6. Kontrolle ob Leitschaufelwinkel auf 49° steht

Steuerung

HMI Steuerung HMI Steuerung aktiv
 Pult Steuerung aktiv

ein aus

Betriebswahl

Rückspeisebetrieb Rückspeisung
 Lampenfeld

EIN EIN

Anlage STOP

STOP

Null-Abgleich

Null-Abgleich der Messgeräte

ACHTUNG, nur betätigen wenn die Anlage in Ruhestellung ist. (Messfehler)

Regelungswahl

n-Regelung-Turbine **p-Regelung-Turbine**

300 n_{ST} [U/min] 0,05 p_{TSG} [bar]

n-Regler-Turbine MUSS aktiv sein p-Regler-Turbine KANN aktiv sein

Pumpenschalter

Pumpe ein/aus

ein aus

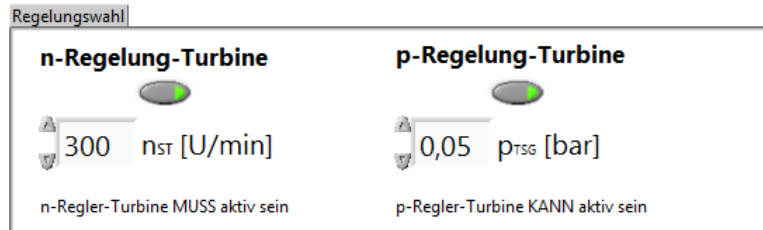
Leitschaufelverstellung

Leitschaufel

auf zu

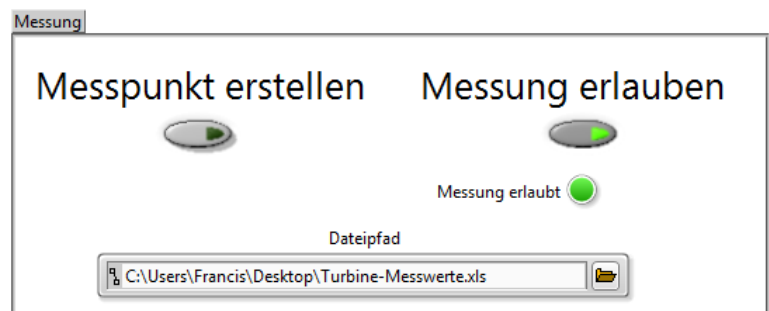
48,8 °

7. Kontrolle ob Anfangswert vom p-Regler der Turbine auf 0,05 bar steht und aktivieren



8. Einstellen der auf dem Messblatt vorgegebenen Größen Druck p_{TSG} und Leitschaufelwinkel α .

9. Wenn sich die Messwerte eingepegelt haben und konstant sind, kann die Messung erlaubt werden. Das Erlauben gibt das optische Zeichen für das Ablesen der Messwerte und Messpunkt Erstellung am PC. Sobald der Wirkungsgrad mehr als $\pm 1\%$ abweicht, sollte der Anlagenbediener die Erlaubnis entziehen. Somit werden zu große Messfehler verhindert.



10. Arbeiten Sie die Liste der Drücke p_{TSG} ab und Leitschaufelwinkel α ab. Wiederholen Sie dabei Punkt 8 und 9.

11. Nach dem Erfassung aller Werte, fahren Sie die Anlage wie folgt herunter
- p_{TSG} auf 0,05bar setzen und WARTEN bis dieser erreicht wurde
 - p-Regelung deaktivieren (nun fährt die Pumpe auf Grundbetrieb)
 - wenn die Pumpe 200U/min erreicht hat, schalten Sie die Pumpe aus
 - deaktivieren Sie die n-Regelung
 - Klicken Sie auf „Anlage STOP“

12. Kopieren Sie sich die Excel Datei zur Auswertung auf einen USB-Stick

Hinweise: Während der Messungen am PC muss die Datei „Turbine-Messwerte.xls“ geschlossen bleiben, sonst kommt es zu einem doppelten Datenzugriff und die LabView Anwendung wird gestoppt!

Einzustellende Größen

70% Wirkungsgrad

Leitschaufelwinkel α	Druck im Turbinengehäuseeingang p-Regler
49,0°	0,16 bar
41,0°	0,14 bar
35,0°	0,13 bar
30,0°	0,12 bar
25,0°	0,13 bar
20,0°	0,13 bar
16,6°	0,16 bar
13,3°	0,19 bar
10,0°	0,33 bar
10,0°	0,49 bar
13,3°	0,56 bar
16,6°	0,57 bar
20,0°	0,55 bar
25,0°	0,56 bar

80% Wirkungsgrad

Leitschaufelwinkel α	Druck im Turbinengehäuseeingang p-Regler
49,0°	0,20 bar
41,0°	0,16 bar
35,0°	0,15 bar
30,0°	0,14 bar
25,0°	0,14 bar
20,0°	0,16 bar
16,6°	0,19 bar
16,6°	0,32 bar
20,0°	0,37 bar
25,0°	0,40 bar
30,0°	0,41 bar
35,0°	0,38 bar
41,0°	0,32 bar
49,0°	0,24 bar

Messwerte vom Turbineneingangsdruck p_1

Messreihe 70%				
Leitschaufelwinkel	Messung 1	Messung 2	Messung 3	Mittelwert
49,0				
41,0				
35,0				
30,0				
25,0				
20,0				
16,6				
13,3				
10,0				
10,0				
13,3				
16,6				
20,0				
25,0				

Messreihe 80%				
Leitschaufelwinkel	Messung 1	Messung 2	Messung 3	Mittelwert
49,0				
41,0				
35,0				
30,0				
25,0				
20,0				
16,6				
16,6				
20,0				
25,0				
30,0				
35,0				
41,0				
49,0				

Messwerte vom Frequenzumrichter

Messreihe 70%				
Leitschaufelwinkel	Messung 1	Messung 2	Messung 3	Mittelwert
49,0				
41,0				
35,0				
30,0				
25,0				
20,0				
16,6				
13,3				
10,0				
10,0				
13,3				
16,6				
20,0				
25,0				

Messreihe 80%				
Leitschaufelwinkel	Messung 1	Messung 2	Messung 3	Mittelwert
49,0				
41,0				
35,0				
30,0				
25,0				
20,0				
16,6				
16,6				
20,0				
25,0				
30,0				
35,0				
41,0				
49,0				

4 Versuchsauswertung

4.1 Muschel-Kurven-Diagramm

Stellen Sie die Punkte konstanter Wirkungsgrade 70% und 80% in einem H- \dot{V} -Diagramm dar. H [m] soll hierbei die Nutzfallhöhe sein, die zwischen Turbinensaug und -druckseite entsteht. Diese Größe muss zuvor errechnet werden.

$$\Delta H = \frac{\Delta p}{\rho \cdot g} \quad \text{mit} \quad \rho = 997,77 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

4.2 Turbinenkennlinie

Tragen Sie die Turbinenkennlinien für die jeweils erfassten Leitschaufelwinkel in das H- \dot{V} -Diagramm ein. Dabei soll jeder Leitschaufelwinkel eine Turbinenkennlinie darstellen. Achten sie darauf, dass es Werte für 70% und 80% Wirkungsgrad gibt, die in einer bestimmten Reihenfolge zur Turbinenkennlinie führen.

4.3 Gesamtwirkungsgrad

Der Gesamtwirkungsgrad soll zuerst aus den abgelesenen und am PC erstellten Messwerten im Excel berechnet werden. Danach soll der Wirkungsgrad in ein η - α -Diagramm aufgetragen werden.

Messreihe 70% Wirkungsgrad α von 10,0° bis 25,0° für $P_{\text{el Generator}} > 1\text{kW}$

Messreihe 80% Wirkungsgrad α von 16,6° bis 49,0° für $P_{\text{el Generator}} > 1\text{kW}$

Diskutieren sie das Ergebnis.

4.4 Berechnung der kreisförmigen Erweiterung („Übergangsdiffusor“) vor der Turbine

Um zu verstehen wie der Druck p_{TSG} (p_{TSG} = Turbinenspiralgehäusedruck) entsteht soll von jedem Messwert p_{TSG} aus rückwärts zum Druck p_1 gerechnet werden. Der errechnete Druck p_1 soll dann mit dem abgelesenen Wert p_1 verglichen werden.

Dazu soll die zugeschnittene Näherungsformel für kreisförmige Erweiterungen [4] genutzt werden.

Für $Re_d > 4000$

$$\zeta_d = \zeta_\lambda + \zeta'$$

$$\zeta_\lambda = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{1}{4} \cdot \frac{(1-m^2)}{\frac{1}{\beta}-1} \quad \text{mit} \quad \beta = \frac{d}{D} \quad \text{und} \quad m = \beta^2$$

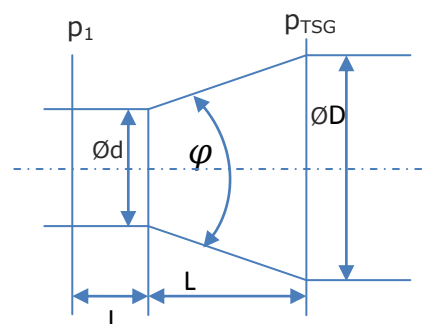
$$\zeta' = \tanh\left(1,41 \cdot \frac{\varphi}{100}\right) + 522 \cdot \left(\frac{\alpha}{100}\right)^{4,365} \cdot e^{\left(-8 \cdot \frac{\varphi}{100}\right)}$$

$$\Delta p = \zeta_d \cdot \frac{\rho}{2} \cdot c_d^2$$

Geometrie der Erweiterung:

$d=266\text{mm}$ $D=396\text{mm}$ $L=357\text{mm}$ $\varphi = 20,64^\circ$

$l=100\text{mm}$



Quellen

- [1] Stadtwerke München (Website): <http://www.swm.de/dms/swm/bilder/unternehmen/energieerzeugung/erzeugungsanlagen/erneuerbare-energien/wasserkraft/francisturbine.jpg> (Stand: 17.06.2014)

- [2] mittleremuehle (Website): http://www.mittleremuehle.ch/Lexikon/_O-Z_Pictures/_wasserturbinen.gif (Stand 05.06.2014)

- [3] Prof. Dr.-Ing. habil. Heller, Winfried: „Vorlesungsskript Strömungsmaschinen – Strömungsmechanische Grundlagen der Turbomaschinen“, Version Sommersemester 2010, 2. März 2010

- [4] Walter Wagner: „Strömung und Druckverlust – Mit Beispielsammlung“, 5. Auflage, Würzburg, Vogel Fachbuch, 2001, S. 180

