

Mini Projektarbeit EN-LAB

Pelton turbine

Der Posten wurde durchgeführt von:

Kohorte:

Gruppennummer:

Datum:



Wasserturbinen sind Bestandteil eines Wasserkraftwerkes. Ihre Aufgabe ist die Umwandlung der in Stauseen, Flüssen, Gezeiten enthaltenen potentiellen Energie des Wassers in mechanische Leistung, meist zum Antrieb elektrischer Generatoren. Eine Turbine wandelt also hydraulische Leistung in mechanische Leistung um. Es gibt verschieden Arten von Wasserturbinen (hydraulische Turbinen). Zu den bekanntesten Turbinen zählen Pelton-, Francis- und die Kaplan turbine.

Die Pelton turbine (werden auch Freistrahlturbinen genannt) zählen zu den wichtigsten und wohl am meisten verbreiteten Turbinen. Die erste funktionierende Pelton turbine wurde von Lester Allan Pelton im Jahr 1879 erfunden und erfolgreich getestet. Die Turbine wird hauptsächlich in Berggebieten eingesetzt, wo der Wasserbestand, z.B. in Form eines Stausees, einige hundert Meter bis zu 1800m über den Maschinen liegt. Die Leistungen reichen von einigen kW bis hin zu 400MW pro Turbine. In der Schweiz sind Pelton turbine zum Teil schon über 100 Jahre im Einsatz. Pelton turbine bestehen im Wesentlichen aus einem Laufrad mit becherförmigen Schaufeln und einer oder mehreren Düsen, die einen Freistrahle erzeugen. Die Energieübertragung vom Wasserstrahl auf das Peltonlaufrad geschieht durch Interaktion zwischen dem energetischen Strahl und den rotierenden Peltonschaufeln.

In dieser Projektarbeit ist es das Ziel die Funktionsweise der Pelton turbine zu verstehen und den Einfluss verschiedener Parameter zu untersuchen. Dabei sollen Erfahrungen im Bereich der Planung, Durchführung und Auswertung von Experimenten gesammelt werden.

Inhaltsverzeichnis

1	Theorie	3
1.1	Geschwindigkeitsdreiecke Theorie	3
1.2	Funktion der Pelton turbine	4
1.3	Verständnisfragen zur Theorie	5
1.3.1	Relative Geschwindigkeiten	5
1.3.2	Geschwindigkeitsdreieck	5
1.3.3	Energieumwandlung	5
1.3.4	Verluste	5
1.3.5	Spezifische Umfangsgeschwindigkeit	6
1.3.6	Herleitung der vereinfachten Gleichung für die hydraulische Leistung	6
2	Laborversuch	7
2.1	Berechnungen zu Düse	7
2.1.1	Energiegleichung	7
2.1.2	Berechnen von $c_{Dü}$	8
2.1.3	Düsen Austrittsdurchmesser	8
2.1.4	Austausch der Düse	8
2.2	Berechnungen zum Peltonrad	8
2.2.1	Strahlkreisradius	8
2.3	Versuche am Prüfstand	9
2.3.1	Validation gewünschter Massenstrom	9
2.3.2	Erstellen der Messreihen	9
2.4	Hinweise zu den Messgrößen:	10
3	Diskussionsteil	11
4	Symbolverzeichnis und Formeln	15
4.1	Symbolverzeichnis	15
4.2	Formeln	16

Ziele der PA:

Das Ziel der Projektarbeit ist, die Grundprinzipien der Energieumsetzung in Turbinen kennen zu lernen. Konkret sollen folgende Ziele erreicht werden:

- Physikalische Grundlagen der Pelton turbine verstehen
- Begriffe: Leistungsformen, Turbinenkomponenten verstehen
- Versuchsstand selbständig anpassen und betreiben
- Umgang mit Messtechnik und Protokollierung üben
- Experimente systematisch planen, durchführen und auswerten
- Einfluss verschiedener Parameter auf den Wirkungsgrad bestimmen
- Teamarbeit (Koordinieren, Delegieren) und Präsentationen üben.

Endergebnisse der PA:

Funktionstüchtiges (möglichst effizientes) Modell
Ausgefüllter Schlussbericht

Bringen Sie einen Laptop und pro Person einen Taschenrechner mit

1 Theorie

1.1 Geschwindigkeitsdreiecke Theorie

Geschwindigkeitsdreiecke erlauben eine einfachere Betrachtung der von unterschiedlichen Koordinatensystemen wahrgenommenen Geschwindigkeiten.

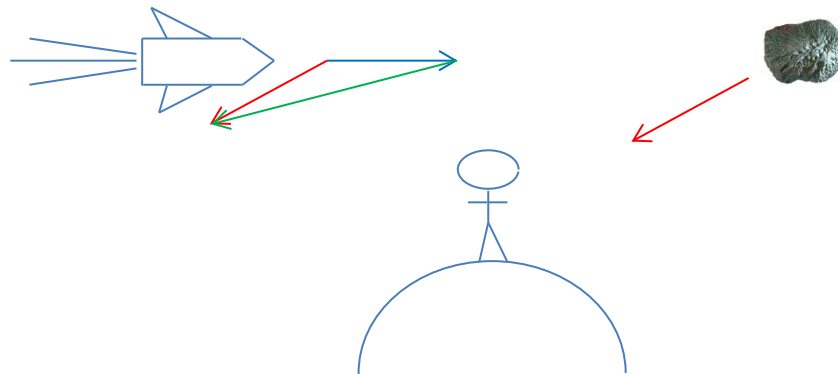


Figure 1: Absolute (rot) und relative (grün) Geschwindigkeit

Ein erdfester Beobachter sieht wie ein Meteorit auf ihn zurast während eine Rakete Kurs auf diesen Meteoriten genommen hat. Der Beobachter sieht aus seinem stationären Zustand die Geschwindigkeiten der beiden Objekte als absolut. Würden der Beobachter auf der Rakete sitzen würde er die Geschwindigkeit des Meteoriten anders wahrnehmen. Die Geschwindigkeit des Meteoriten besteht aus einer Komponente die sich von der Rakete seitwärts weg bewegt und einer, welche sich in Richtung der Rakete bewegt. Aus Sicht der Rakete rast also der Meteorit mit der Geschwindigkeit der Rakete plus der Geschwindigkeit des Meteoriten auf die Erde zu. Der Betrachter auf der Rakete sieht also die Bewegung des Meteoriten relativ zu seiner eigenen Geschwindigkeit.

Diese Addition der Geschwindigkeitsdreiecke ist in der Turbomaschinenindustrie weit verbreitet und wird zum Verständnis der herrschenden Strömungszuständen in diesen Maschinen immer wieder benutzt.

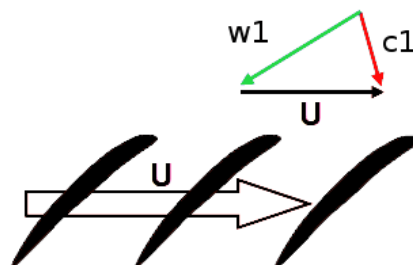


Figure 2: Absolute (rot) und relative (grün) Geschwindigkeit

Figure 2 zeigt drei Flügel des Rotors einer Turbine. Das Wasser strömt von vorne mit der absoluten Geschwindigkeit c_1 in die Turbine. Die Schaufeln selbst haben die Umfangsgeschwindigkeit U .

Würden wir auf den Schaufeln sitzen und das anströmende Wasser somit im relativen, mitdrehenden System sehen, so würde das Wasser mit der relativen Geschwindigkeit w_1 auf uns zukommen. Die relative Geschwindigkeit w_1 sollte schaufelkongruent auf die Rotorschaukel treffen und muss deshalb die gleiche Ausrichtung haben wie die Schaufel. Wäre dies nicht so könnte die Strömung der Geometrie der Schaufeln nicht folgen, was zu zusätzlichen Verlusten führen würde.

1.2 Funktion der Pelton turbine

Das Wasser aus dem Stausee erzeugt vor der Düse einen Druck in Abhängigkeit der Fallhöhe:

$$p \approx \rho \cdot g \cdot H$$

Durch den grossen Druckunterschied vor und nach der Düse und dem Flächenverhältnis wird das Wasser in der Düse stark beschleunigt. Dabei wird die potentielle Energie in kinetische Energie umgewandelt. Die Düse formt das durchfliessende Wasser zu einem möglichst zylindrischen Strahl, welcher auf die schaufelförmigen Becher der Turbine auftrifft. Beim Auftreffen des Strahls auf den Becher wird die absolute Geschwindigkeit des Wassers möglichst komplett abgebaut. Durch den dabei entstehenden Impulsaustausch ergibt sich eine Kraft auf den Becher. Diese Kraft bewirkt ein Drehmoment auf die Welle, welches die mechanische Leistung auf den Generator erzeugt. Der Strahl, welcher aus der Düse austritt, ist ein sogenannter Freistrah. Wie bei einem Gartenschlauch. Da im Strahl selbst der gleiche Druck wie in der Umgebung herrscht entsteht ein zylindrischer Strahl, da Umlenkungen von Strömungen immer eine Druckdifferenz bedingen würden.

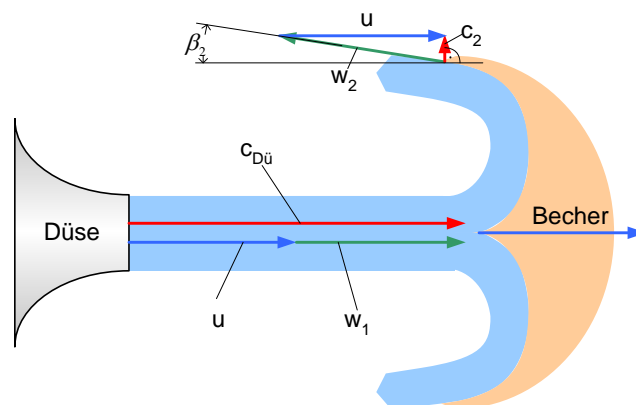


Figure 3: Becher einer Pelton turbine mit eingezeichneten Geschwindigkeitsdreiecken

Eine wichtige Grösse ist die spezifische Umfangsgeschwindigkeit ($k_u = u / c_{Dü}$). Dieses sollte möglichst nahe bei 0.5 sein. Weshalb dies so ist wird in den nachfolgenden Aufgaben hergeleitet.

1.3 Verständnisfragen zur Theorie

1.3.1 Relative Geschwindigkeiten

Wie gross ist das Verhältnis der beiden relativen Geschwindigkeiten w_1/w_2 in Figure 3. Begründen Sie Ihre Antwort.

1.3.2 Geschwindigkeitsdreieck

Die Umfangsgeschwindigkeit (U) des Bechers beträgt 20m/s die absolute Geschwindigkeit des Wassers beim Düsenaustritt $C_{Dü}$ beträgt 50m/s. Wie gross ist die relative Geschwindigkeit w_1 ? Wo müsste ein Beobachter sich befinden, damit er diese Geschwindigkeit sieht?

1.3.3 Energieumwandlung

Versuchen Sie ein einfaches Schema der verschiedenen Energiezustände vom Staudamm bis zur Stromleitung zu zeichnen.

1.3.4 Verluste

Weshalb ist die absolute Geschwindigkeit c_2 am Schaufelaustritt nicht 0?

2 Laborversuch

Ein Energiekonzern hat nach langen Abklärungen einen Standort für ein neues Kraftwerk eruiert. Sie als Ingenieur sollen jetzt die für ihn optimale Turbine bauen. Folgende Rahmenbedingungen sind gegeben:

- Nettohöhe: 33 [m]
- Netz Frequenz: 60 [Hz]
- Pool Paare: 3 Paare
- Maximaler Massenstrom: 1.784 [kg/s]
- Gewünschtes k_v : 0.42
- Rohrquerschnitt Druckmessstelle 53 [mm]

2.1 Berechnungen zu Düse

Betrachten Sie nur die Düse. Zeichnen Sie eine vereinfachte Düse, ziehen Sie die Systemgrenzen und kennzeichnen Sie die Ein- und Ausgänge

2.1.1 Energiegleichung

Vereinfachen Sie die allgemeine Energie Erhaltungsgleichung für den oben gezeichneten Fall. Begründen Sie die Vereinfachungen.

$$\dot{Q} + P = \sum \dot{m}_{aus} \cdot \left(h + \frac{c^2}{2} + g \cdot z \right)_{aus} - \sum \dot{m}_{ein} \cdot \left(h + \frac{c^2}{2} + g \cdot z \right)_{ein}$$

2.1.2 Berechnen von $c_{Dü}$

Unter 2.1.1 haben Sie Bernoullis Formel hergeleitet. Diese zeigt Ihnen die Abhängigkeit von Druck- und kinetischer Energie. Berechnen Sie mit dieser Formel $c_{Dü}$ und zeigen Sie, dass die Geschwindigkeit bei der Druckmessstelle im Verhältnis zum Druck vernachlässigt werden kann.

2.1.3 Düsen Austrittsdurchmesser

Berechnen Sie beim geforderten Massenstrom und der berechneten Geschwindigkeit $c_{Dü}$ den Düsen Austrittsdurchmesser.

2.1.4 Austausch der Düse

Was passiert mit $c_{Dü}$ wenn sie den Austrittsdurchmesser vergrössern? Nur quantitative Aussage, keine Berechnung.

2.2 Berechnungen zum Peltonrad

2.2.1 Strahlkreisradius

Der Strahlkreisradius definiert das Zentrum des Auftreffpunktes des Wasserstrahls auf dem Laufradbecher. Die Geschwindigkeit in diesem Punkt ist die massgebende Grösse für die Umfangsgeschwindigkeit des Bechers. Berechnen Sie mit dem gewünschten k_u -Wert und der berechneten Geschwindigkeit $c_{Dü}$ bei gegebener Netzfrequenz und Polpaarzahl den Strahlkreisradius.

2.3 Versuche am Prüfstand

Der Druckunterschied auf Grund der Potentialdifferenz wird mit der Pumpe simuliert. Über die Drehzahl der Pumpe kann der gewünschte Druck eingestellt werden. Die Verbraucher der produzierten elektrischen Energie simulieren Widerstände. Elektrische Energie wird hier in Wärme umgewandelt.

Sicherheitshinweise:

- **Maximaler Druck: 6bar**
- **Achten Sie bei kleinen Widerständen auf die maximal zulässige Stromstärke des Multimeters**
- **Vermeiden Sie Spritzwasser auf elektrischen Geräten**
- **Nie während dem Betrieb am elektrischen Stromkreis arbeiten**
- **Maximale Strombelastung an den Widerständen beachten**

Sie werden zwei Messreihen durchführen mit unterschiedlichen Austrittsquerschnitten der Düse.

Vorgehen

- Erstellen Sie einen Messplan
- Erstellen Sie ein Excel-file mit den Messgrößen und den wichtigsten berechneten Größen
- Wählen Sie eine geeignete Düse aus (Austrittsdurchmesser, Geometrie)
Begründen Sie Ihre Wahl
- Systematisch Versuche durchführen
- Auswerten und interpretieren der Messergebnisse

Auswertung

- Diagramm η_{Anlage} vs. k_U
- Diagramm P_{El} vs. k_U

2.3.1 Validation gewünschter Massenstrom

Kontrollieren Sie kurz ob mit der gewählten Düse der gewünschte Massenstrom erreicht wird. Was könnten Gründe für Abweichungen sein?

2.3.2 Erstellen der Messreihen

2.4 Hinweise zu den Messgrößen:

Druck-Messung

Der Druck vor der Düse p_d wird am Bourdon-Manometer abgelesen.



DARF WÄHREND ALLEN MESSUNGEN NIE GRÖßER ALS 6 bar BETRAGEN!!!!

Figure 4: Manometer

Volumenstrom-Messungen

Der Volumenstrom wird mit einem magnetisch-induktiven Durchflussmesser, kurz MID gemessen.

Der Durchfluss \dot{V} in l/s wird direkt an der Anzeige abgelesen.



Figure 5: MID E+H Proline Promag

Drehzahl-Messung

Die Drehzahl n [U/min] wird am Asynchronengenerator mit einem Drehzahlmesser gemessen.



Figure 6: Drehzahlmesser

3 Diskussionsteil

Bearbeiten in der Gruppe:

Versuchen Sie die nachfolgenden Aufgaben zu lösen und vervollständigen Sie diesen bis zum Ende des Miniprojektes mit ihrem Assistenten:

Skizzieren Sie den kompletten Messaufbau und beschriften Sie alle wichtigen Komponenten:

*Was ist der Strahlkreisdurchmesser bei einer Pelton turbine? Was wird damit beeinflusst?
Skizze mit Begründung:*

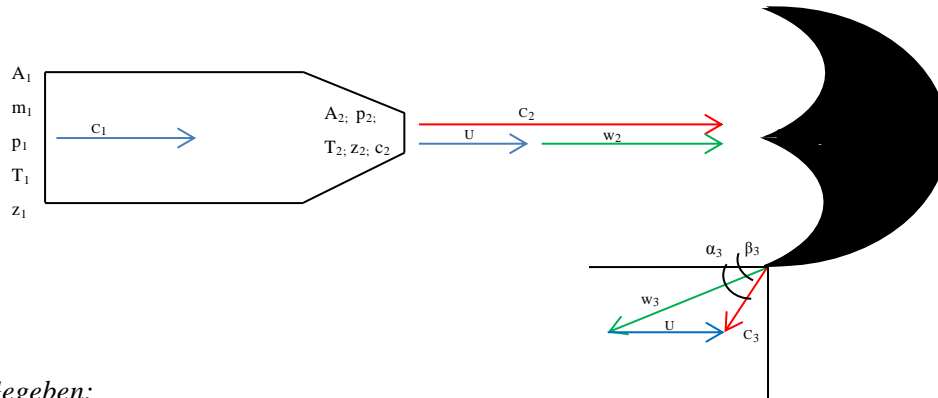
Welcher Einfluss hat die Anzahl Schaufeln auf den Wirkungsgrad? Wie ist die minimale Schaufelanzahl begründet?

Welcher Einfluss hat die Düse (Durchmesser, Form, ...) auf den Wirkungsgrad? Was beeinflusst die Strahlqualität? Skizze mit Begründung:

Was ist ein Strahlablenker und welche Aufgabe hat dieser in grösseren Turbinen?

Durch was wird die Lebensdauer von Peltonrädern begrenzt?

Verständnisfrage zu Geschwindigkeitsdreieck und allgemeiner Energiegleichung



Gegeben:

Messgrösse	Wert	SI-Einheit
A_1	0.003848	[m ²]
m_1	4.608	[kg/s]
A_2	0.00014	[m ²]
p_2	10^5	[Pa]
n	1744.74	[rpm]
$R(\text{Strahlkreis Radius})$	0.0875	[m]
ρ	998	[kg/m ³]
β_3	20	[°]

Berechnen Sie die Eintrittsgeschwindigkeit (c_1) und die Austrittsgeschwindigkeit (c_2) sowie den Einlassdruck

Berechnen Sie die Umfangsgeschwindigkeit (u), sowie die relativ Geschwindigkeit (w) bei gegebener Winkelgeschwindigkeit des Schaufelrads (ω), Strahlkreisdurchmesser (R) und relativem Austrittswinkel (β_3) und zeichnen Sie das Geschwindigkeitsdreieck am Schaufelaustritt massstäblich. Aus der Skizze können Sie die Austrittsgeschwindigkeit (c_3) herauslesen. Betrachten Sie ausserdem den Austrittswinkel (α_3), was beobachten Sie? Wie gross ist der Ku-Wert?

Ein Lager Ihres Generators klemmt und die Drehzahl nimmt aufgrund der höheren Bremswirkung um 30% ab. Zeichnen Sie das Geschwindigkeitsdreieck in das zuvor Gezeichnete und kommentieren Sie das Resultat.

Der Mechaniker repariert das Lager. Mit dem neuen Lager läuft alles besser und die Drehzahl nimmt um 20% zu. Zeichnen Sie das Geschwindigkeitsdreieck in das zuvor Gezeichnete und kommentieren Sie das Resultat.

4 Symbolverzeichnis und Formeln

4.1 Symbolverzeichnis

Bezeichnung	Symbol	Einheiten
Hydraulische Leistung	P_{hyd}	[W=J/s]
Mechanische Leistung Laufrad	P_{m}	[W=Nm/s]
Mechanische Leistung Generatorwelle	P_{Tu}	[W]
Elektrische Leistung	P_{el}	[W]
Kraft	F	[N]
Drehmoment	M	[Nm]
Drehzahl	n	[1/min]
Strahlkreisradius	R	[m]
Dichte von Wasser	ρ	[kg/m ³]
Fallbeschleunigung	g	[m/s ²]
Rohrdurchmesser Eintritt Turbine	d	[m]
Fläche	A	[m ²]
Geschwindigkeit absolut	c	[m/s]
Strahlaustrittsgeschwindigkeit	$c_{\text{Dü}}$	[m/s]
Geschwindigkeit relativ (in Bezug zur Schaufel)	w	[m/s]
Umfangsgeschwindigkeit	u	[m/s]
Spezifische Umfangsgeschwindigkeit	k_u	[-]
Volumenstrom	$Q = \dot{V}$	[m ³ /s]
Relativdruck Eintritt Turbine (relativ zur Umgebung)	$p_{\text{d_rel}}$	[N/m ² =Pa]
Umgebungsdruck	p_{umg}	[Pa]
Anlagenwirkungsgrad	η_{Anlage}	[-]
Masse	m	[kg]
Fallhöhe	H	[m]

4.2 Formeln

Gl.	Bezeichnung	Formel	Einheit
1	Elektrische Leistung	$P_{el} = P1 + P2 + P3$	[W]
2	Hydraulische Leistung (vereinfachte Gleichung)	$P_{hyd} \cong p_{d_rel} \cdot Q$	[W]
3	Geschwindigkeit bei der Druckmessstelle Eintritt Turbine	$c_d = \frac{Q}{A_d}$	[m/s]
4	Geschwindigkeit am Austritt der Düse	$c_{Dü} = \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot p_{d_rel} + c_d^2}$	[m/s]
5	Umfangsgeschwindigkeit der Becher	$u = 2 \cdot \pi \cdot \frac{n}{60} \cdot R$	[m/s]
6	Spezifische Umfangsgeschwindigkeit	$k_u = \frac{u}{c_{Dü}}$	[-]
7	Relative Austrittsgeschwindigkeit aus Becher	$w_2 = c_{Dü} - u$	[m/s]
8	Anlagenwirkungsgrad *	$\eta_{Anlage} = \frac{P_{el}}{P_{hyd}}$	[-]

* Eine Wandlung der Leistung erfordert stets eine Leistungseinbusse der Nutzleistung. Diese so genannten Verluste werden durch Wirkungsgrade ausgedrückt.

Gegebene Grössen für die Berechnungen

Nr.	Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit	Bemerkung
1	Fallbeschleunigung	g	9.81	[m/s ²]	gerundet
2	Dichte	ρ	998	[kg/m ³]	Dichte von Wasser bei 20° C, gerundet

Einheiten

Bitte rechnen Sie mit den im Symbolverzeichnis angegebenen Einheiten (Basiseinheiten). Wird eine Grösse in einer anderen Einheit erfasst, muss sie umgerechnet werden.

Gebräuchliche Druckeinheiten:

$$100'000 \text{ N/m}^2 = 100'000 \text{ Pa} = 1'000 \text{ mbar} = 1 \text{ bar}$$

$$\text{N/m}^2 = \text{Pa}$$