



Hochschule für Technik
und Wirtschaft Berlin

University of Applied Sciences

Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin

Wilhelminenhofstraße 75A, 12459 Berlin

Fachbereich 1

Ingenieurwissenschaften - Energie und Information

Regenerative Energien (B)

Pelton Turbine vom 05.05.2023

Betreuerin: Laila Rezai

Gruppe: 5

Name	Matrikelnummer
Johannes Tadeus Ranisch	578182
Markus Jablonka	580234
Niels Feuerherdt	577669
Katharina Jacob	578522
Lukas Aust	574051

Inhaltsverzeichnis

1	Versuchsziele	1
2	Theoretischer Hintergrund	1
3	Versuchsbeschreibung	3
4	Vorbereitungsfragen	5
4.1	Wie ist die hydraulische Leistung definiert?	5
4.2	Skizzieren Sie den typischen Verlauf einer Rohrleitungskennlinie	5
4.3	Welche Proportionalität ergibt sich bei Strömungsmaschinen zwischen Leistung und Drehzahl?	5
4.4	Wie lässt sich der Betriebspunkt einer Pelton-Turbine einstellen?	5
4.5	Welcher hydraulische Parameter wird zur Regelung der Pelton-Turbine verändert? Durch welche Einstellung passiert das?	6
5	Versuchsdurchführung	6
6	Auswertung	7
6.1	Kennlinie der Pumpe	7
6.2	Betriebspunkte der Pelton-Turbine	8
6.2.1	Berechnen Sie die hydraulische Leistung, die mechanische Leistung und die elektrische Leistung in jedem Arbeitspunkt.	8
6.2.2	Bestimmen Sie den Turbinenwirkungsgrad und tragen diesen grafisch über der Drehzahl auf.	9
6.2.3	Vergleichen Sie den Arbeitspunkt mit dem bestem Wirkungsgrad und mit den theoretischen Betrachtungen	10
6.2.4	Interpretieren Sie evtl. auftretende Abweichungen des optimalen Arbeitspunkts.	11
6.3	Verlustbeiwert der Düse	12
7	Quellen	14

Abbildungsverzeichnis

1	Pelton turbine	1
2	Versuchsaufbau im Stillstand	3
3	Synchrongenerator	4
4	Schalttafel	4
5	Rohrleitungskennlinie bei vollständig geöffneter Düse	5
6	Pumpenkennlinie bei gemessenen Arbeitspunkten	8
7	Turbinenwirkungsgrade über die Drehzahl	10
8	Arbeitspunkte der Turbine	11

Tabellenverzeichnis

1	Drehzahlen, Leistungen und Wirkungsgrade der Pelton Turbine bei verschiedenen Arbeitspunkten	9
2	Volumenstrom und Fallhöhe der Düse	12

Abkürzungsverzeichnis

PV	Photovoltaik
MPP	Maximum Power Point

1 Versuchsziele

Für den Versuch “Wasserkraft – hydraulische Anlage und Pelton-Turbine“ müssen zu allererst die Charakteristika einer mehrstufigen radialen Kreispumpe aufgenommen werden. Diese können im nächsten Schritt mit den theoretischen Werten verglichen werden. Dann wird die Pelton-Turbine untersucht. Hier werden die Arbeitspunkte dieser vermessen um den Optimalen heraus zu suchen. Dieser wird dann mit dem theoretischen Optimum verglichen.

2 Theoretischer Hintergrund

Eine Pelton-Turbine, wie in Abbildung 1 zu sehen, gehört zu den Gleichdruckpumpen, d.h. direkt vor und hinter der Turbine herrscht der gleiche Druck.

Für den im Folgenden betrachteten Versuch handelt sich hierbei um Umgebungsdruck.



Abbildung 1: Peltonturbine

Aufgrunddessen, dass die Pelton-Turbine bei großen Förder- bzw. Fallhöhen und geringen Volumenströmen sehr effizient arbeitet, eignet sich diese Art Turbine ideal für die Energiegewinnung durch Wasserkraft. Die physikalische Grundlage hierfür liegt in der Berechnung der kinetischen Energie des durchströmenden Wassers. Für die Berechnung der hydraulischen Leistung dient hierbei die Gleichung 1.

$$P_{Hyd.} = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \quad (1)$$

Des Weiteren sind allerdings auch die Verluste innerhalb der vorgeschalteten hydraulischen Anlage von Relevanz, hierfür ist die Berechnung der Druckhöhenverluste mittels Gleichung 2 notwendig. Hierbei werden sowohl die Rohreigenschaften als auch die Einflüsse aller Einbauten berücksichtigt.

$$H_V = \frac{\lambda \cdot l \cdot v_r^2}{2 \cdot g \cdot d} + \sum_{i=0}^i \frac{\zeta_i \cdot v^2}{2 \cdot g} \quad (2)$$

Darüber hinaus sind auch die mechanischen Eigenschaften der Pelton-Turbine von Bedeutung. Die hierfür zentrale mechanische Leistung berechnet sich entsprechend Gleichung 3.

$$P_{Mech.} = M \cdot 2 \cdot \pi \cdot n \quad (3)$$

Hierbei lassen sich über die Einstellung der Düse und weiterer Komponenten unter anderem die Strahlgeschwindigkeit und in Folge dessen auch die Umfangsgeschwindigkeit und Drehzahl ändern.

Die Zusammenhänge dieser Größen sind in Gleichung 4, Gleichung 5 und Gleichung 6 dargestellt.

$$c_0 = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D_D^2} \quad (4)$$

$$u_{opt} = \frac{c_0}{2} = \pi \cdot u_{opt} \cdot d_2 \quad (5)$$

$$n_{opt} = \frac{c_0}{2 \cdot \pi \cdot d_2} = \frac{2 \cdot Q}{d_2 \cdot \pi^2 \cdot D_D^2} \quad (6)$$

3 Versuchsbeschreibung

Der Prüfstand besteht aus einem Wasserkreislauf, angetrieben durch eine Pumpe wird Wasser durch ein Rohrsystem zur zu vermessenen Pelton-turbine geleitet.

Im Verlauf des Rohrsystems werden sowohl der Druck als auch der Volumenstrom gemessen. Hierfür werden Drucksensoren vom Typ *PA3526* der Firma *ifm electronic* genutzt, sowie eine Volumenstrommesseinheit. Diese werden mit je einem Multimeter verschaltet von denen man dann einen Wert in *mA* ablesen kann, welcher in den gesuchten Wert umgerechnet werden kann.

Eine Düse komprimiert dann den Wasserstrahl auf die Schaufeln der Pelton-turbine. Der Prüfstand im Stillstand ist ebenfalls in Abbildung 2 zu erkennen.

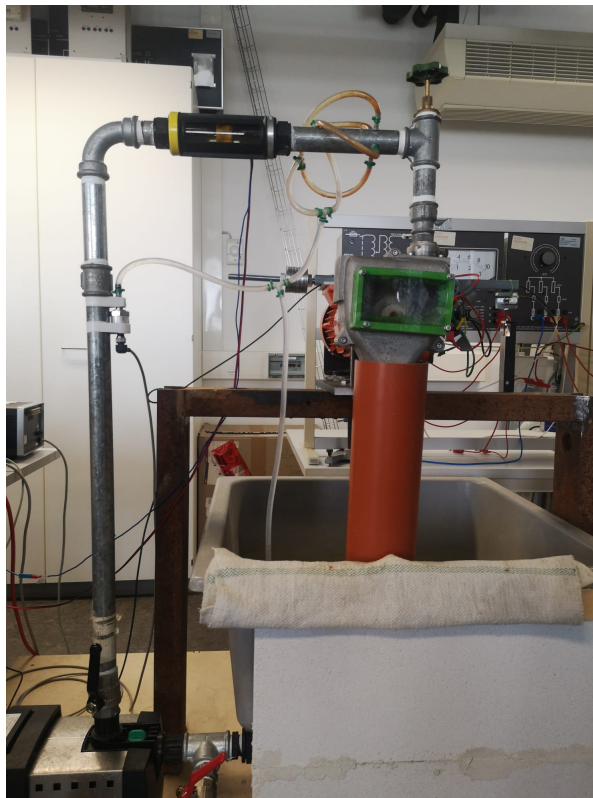


Abbildung 2: Versuchsaufbau im Stillstand

An die Achse der Pelton-turbine ist zusätzlich ein fremderregter Synchron-generator mit einstellbarer Last gekoppelt. An diesem werden die Drehzahl der Turbine mit einem Handmessgerät, sowie die mechanische Belastung

am Generator mittels eines Kraftsensors gemessen.

Hier werden als Drehzahlmessgerät der *VOLTCRAFT DT-10L* und als Kraftsensor der *ME-Meßsysteme KD40S* verwendet. Die Draufsicht auf die Kopplung und den Synchrongenerator ist in Abbildung 3 dargestellt.

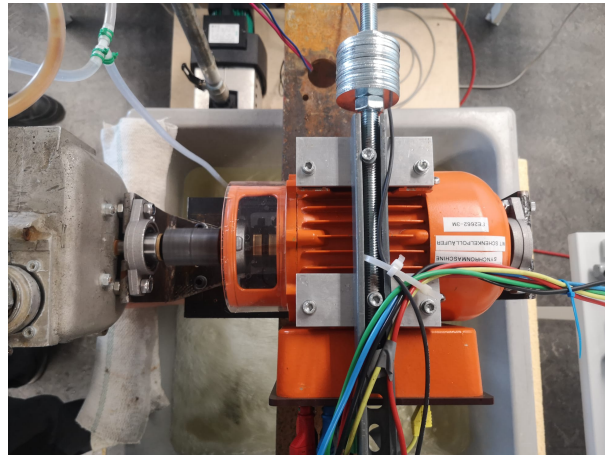


Abbildung 3: Synchrongenerator

Um den Erregerstrom des Synchrongenerators einstellen und anzeigen lassen zu können ist der Generator in einer Sternschaltung an eine Schalttafel angeschlossen. Des Weiteren kann an dieser Schalttafel auch der Lastwiderstand eingestellt werden.

Zusätzlich werden zwei Multimeter angeschlossen um den Phasenstrom, sowie die Leiterspannung messen zu können.

Der gesamte Aufbau der Schalttafel inklusive Multimeter ist in Abbildung 4 zu sehen.

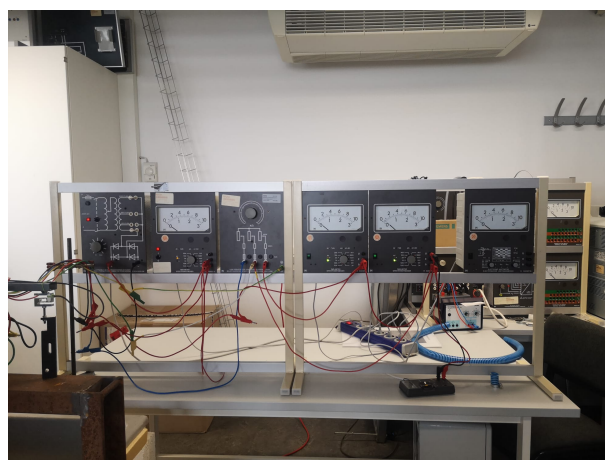


Abbildung 4: Schalttafel

4 Vorbereitungsfragen

4.1 Wie ist die hydraulische Leistung definiert?

$$P_{\text{Eigenverbrauch}} = U_{LR} \cdot I_{LR} \cdot \dot{Q} = \dot{m} \cdot g \cdot H \quad (7)$$

4.2 Skizzieren Sie den typischen Verlauf einer Rohrleitungskennlinie

Dies ist die typische Rohrleitungskennlinie.

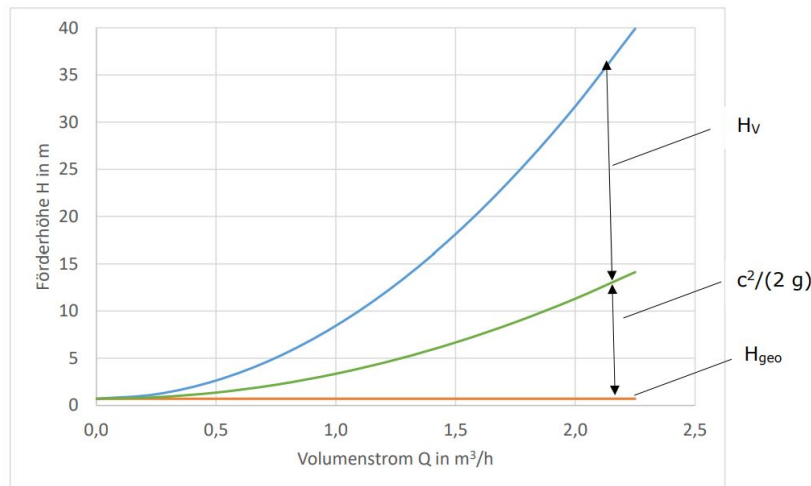


Abbildung 5: Rohrleitungskennlinie bei vollständig geöffneter Düse

4.3 Welche Proportionalität ergibt sich bei Strömungsmaschinen zwischen Leistung und Drehzahl?

Die mechanische Leistung $P_{\text{Mech.}}$ ist in Gleichung 8 definiert.

$$P_{\text{Mech.}} = M \cdot 2 \cdot \pi \cdot n \quad (8)$$

Dabei ist n die Drehzahl und M das Moment. Somit ist die mechanische Leistung proportional zu der Drehzahl.

4.4 Wie lässt sich der Betriebspunkt einer Pelton-Turbine einstellen?

Der Betriebspunkt ist mit dem Volumenstrom/Strahldurchmesser, durch eine angelegte Last am Generator oder den Erregerstrom I_{Err} steuerbar. Dabei ist der optimale Betriebspunkt über die optimale Drehzahl zu ermitteln. Dabei liegt die optimale Drehzahl bei der halben Austrittsgeschwindigkeit aus der Düse.

4.5 Welcher hydraulische Parameter wird zur Regelung der Pelton-Turbine verändert? Durch welche Einstellung passiert das?

Die Düsenadel kann so eingestellt werden, dass sich der Durchflussquerschnitt verändert. Mit dem Durchflussquerschnitt lässt sich dann der Volumenstrom Q steuern und somit die Drehzahl der Pelton-Turbine.

5 Versuchsdurchführung

Der Versuch wurde am in Abschnitt 3 beschriebenden Prüfstand entsprechend der Anweisungen aus der Versuchsanleitung [1, S.11-14] durchgeführt.

Zu Beginn des Versuches wird die Pumpe bei geschlossenem Kugelhahn gestartet und dieser anschließend geöffnet um dann die Druckmessleitung im Wasserbecken zu entlüften.

Anschließend beginnt die erste Messreihe bei welcher bei unterschiedlich weit geöffneter Düse der Druck und der Volumenstrom im System gemessen wird. Die Schrittweite der Messungen beträgt hier 0,25 Umdrehungen und geht von 0 bis 1,5 Umdrehungen, die Umdrehungen beziehen sich hierbei auf den drehbaren Hahn zur Einstellung der Düsenöffnung.

Die Messergebnisse wurden hierbei in der beigefügten Tabellenkalkulation “Pelton-Turbine.xlsx” im Tabellenblatt “5.1” dokumentiert.

Ziel dieser Messreihe ist die grafische Darstellung und grundlegende Ermittlung der Pumpenkennlinie.

Das Ziel der zweiten Messreihe ist die Aufnahme aller benötigten Werte um im Anschluss den Wirkungsgrad und den optimalen Betriebspunkt der Pelton-Turbine, sowie den Verlustbeiwert der Düse zu ermitteln.

Hierfür wird der Lastwiderstand des Synchrongenerators auf 5,0 k Ω eingestellt und der Erregerstrom beginnend von 0 mA in Schritten von 30 mA bis auf 300 mA erhöht.

Sobald der Erregerstrom den Wert von 300 mA erreicht hat wird dann der Lastwiderstand in unregelmäßigen Schritten entsprechend der Vorgaben aus der Versuchsanleitung [1, S.12] gesenkt.

Während dieses Ablaufes wird am Laborcomputer die Kraft am Hebelarm des Generators gemessen.

Mit einem Handmessgerät wird die Drehzahl der Achse der Turbine gemessen.

Und mittels der vier Multimeter werden die Mesströme für Druck und Volumenstrom, sowie die Leiterspannung und der Phasenstrom gemessen.

Die Ergebnisse dieser Messungen wurden in im Tabellenblatt “5.2“ der bereits genannten und beigefügten Tabellenkalkulation notiert.

6 Auswertung

6.1 Kennlinie der Pumpe

Damit die Pumpenkennlinie dargestellt werden kann, müssen die gemessenen Ströme für den Volumenstrom und den Druck erst in verwendbare Einheiten umgewandelt werden. Hierzu werden Proportionalitätsfaktoren und Kalibrierungsoffsets benötigt. Die Offsets wurden gemessen und betragen $I_{off,Q} = 4,05mA$ und $I_{off,p} = 5,868mA$. Die Proportionalitätsfaktoren wurden in der Versuchsanleitung gegeben und betragen $K_Q = 6,3 \frac{l}{min \cdot mA}$ und $K_p = 0,6 \frac{bar}{mA}$. Die Volumenströme in $\frac{m^3}{h}$ lassen sich mittels Gleichung 9 berechnen und die Drücke in *bar* mittels Gleichung 10 berechnen.

$$Q = (I_{mess} - I_{off,Q}) \cdot K_Q \cdot \frac{60 \frac{min}{h}}{1000 \frac{l}{m^3}} \quad (9)$$

$$p = (I_{mess} - I_{off,p}) \cdot K_p \quad (10)$$

Des Weiteren müssen die Drücke in Förderhöhen umgewandelt werden. Hierzu wird die Gravitationskonstante $g = 9,81 \frac{m}{s^2}$ und die Dichte des Wassers $\rho = 998 \frac{kg}{m^3}$ benötigt. Dies erfolgt mit Gleichung 11, wobei der Druck in *Pascal* und nicht in *bar* angegeben werden muss.

$$H = \frac{p}{\rho \cdot g} \quad (11)$$

Aus den im Anhang gegebenen Messtabellen ergibt sich die Abbildung 6.

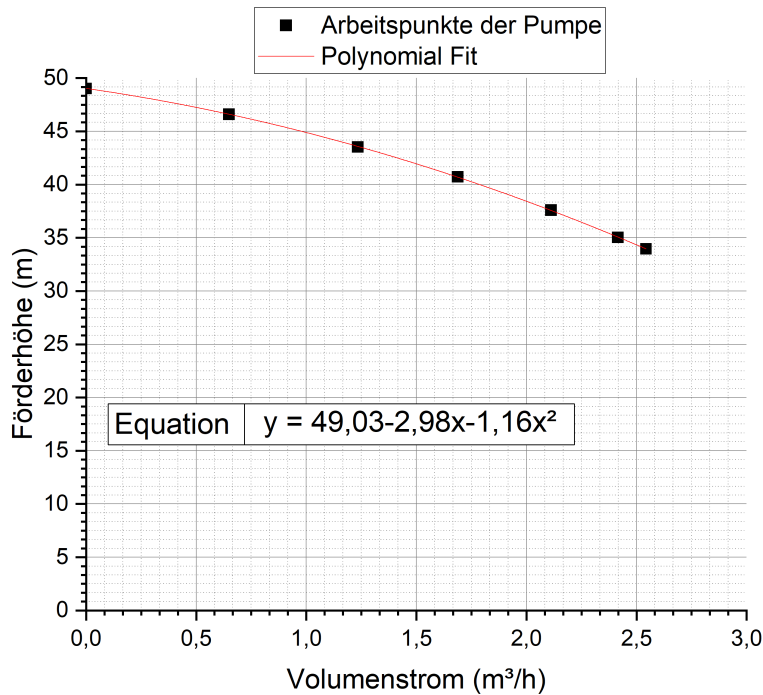


Abbildung 6: Pumpenkennlinie bei gemessenen Arbeitspunkten

6.2 Betriebspunkte der Pelton-Turbine

6.2.1 Berechnen Sie die hydraulische Leistung, die mechanische Leistung und die elektrische Leistung in jedem Arbeitspunkt.

Zur Berechnung der hydraulischen Leistung werden erneut die Volumenströme und Förderhöhen benötigt, welche Analog zu dem Vorgehen in Unterabschnitt 6.1 berechnet wurden. Die hydraulische Leistung wird mittels Gleichung 12 berechnet:

$$P_{Hyd.} = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \quad (12)$$

Die mechanische Leistung lässt sich mittels der Gleichung 8 aus Unterabschnitt 4.3 berechnen. Jedoch mussten zuerst die Messwerte des Kraftsensors ausgewertet und in ein Moment umgerechnet werden. Dieser hat Zeitreihen der ausgeübten Kraft aufgezeichnet, von welchen die Mittelwerte gebildet wurden. Anschließend wurden diese Kräfte mit der Länge des Hebelarms $l = 290\text{mm}$ verrechnet, um ein Moment heraus zu bekommen. Die elektrische Leistung lässt sich durch die gemessenen Phasenströme und -spannungen mittels Gleichung 13 berechnen:

$$P_{El.} = U \cdot I \quad (13)$$

Die Leistungen bei den verschiedenen Arbeitspunkten lassen sich in Tabelle 1 finden.

Tabelle 1: Drehzahlen, Leistungen und Wirkungsgrade der Pelton Turbine bei verschiedenen Arbeitspunkten

Drehzahl in min^{-1}	$P_{hyd.}$ in W	$P_{Mech.}$ in W	$P_{El.}$ in W	$\eta_{Turbine}$
3180	298,927	-2,014	0,533	-0,67%
3130	297,214	1,325	42,990	0,45%
2970	296,785	23,337	142,288	7,86%
2800	296,785	40,993	258,249	13,81%
2600	296,785	50,566	363,731	17,04%
2430	296,357	59,603	438,209	20,11%
2230	295,929	60,693	473,889	20,51%
2050	295,029	62,358	482,203	21,14%
1930	294,579	58,116	482,203	19,73%
1820	294,130	57,654	473,889	19,60%
1750	294,130	57,198	473,889	19,45%
1640	292,830	53,868	491,036	18,40%
1360	292,830	51,171	461,418	17,47%
1220	293,727	46,710	423,573	15,90%
1100	293,727	43,527	389,711	14,82%
970	292,427	38,550	346,757	13,18%
875	292,852	35,740	321,555	12,20%
795	292,427	33,160	305,361	11,34%
705	292,405	30,200	276,435	10,33%
610	292,874	26,396	241,101	9,01%
535	292,427	23,772	218,238	8,13%

6.2.2 Bestimmen Sie den Turbinenwirkungsgrad und tragen diesen grafisch über der Drehzahl auf.

Die Turbinenwirkungsgrade können durch Gleichung 14 berechnet und werden in Tabelle 1 numerisch und in Abbildung 7 grafisch über die Drehzahl abgebildet.

$$\eta_{Turbine} = \frac{P_{Hyd.}}{P_{Mech.}} \quad (14)$$

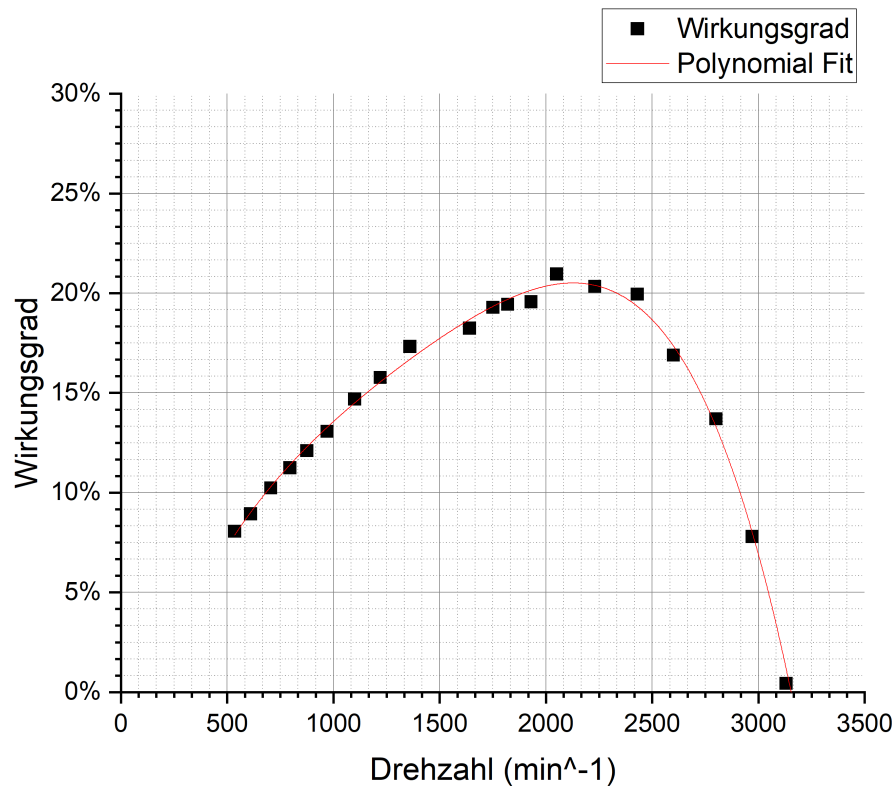


Abbildung 7: Turbinenwirkungsgrade über die Drehzahl

6.2.3 Vergleichen Sie den Arbeitspunkt mit dem bestem Wirkungsgrad und mit den theoretischen Betrachtungen

Um den Arbeitspunkt zu bestimmen wird die Gleichung der Umlaufgeschwindigkeit (Gleichung 15) mit Hilfe der Gleichung 16 nach der optimalen Drehzahl umgestellt.

$$u_{opt} = \frac{c_0}{2} = \pi \cdot u_{opt} \cdot d_2 \quad (15)$$

$$c_0 = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D_D^2} \quad (16)$$

Zum Bestimmen der Drehzahl wird der gemessene Wert Q zum Zeitpunkt des besten Wirkungsgrads ($\eta = 21,14\%$), der Stahlkreis-Durchmesser $d_2 = 96\text{mm}$ und der Durchmesser der Düse $D_D = 7\text{mm}$ eingesetzt.

$$n_{opt} = \frac{c_0}{2 \cdot \pi \cdot d_2} = \frac{2 \cdot Q}{d_2 \cdot \pi^2 \cdot D_D^2} = 1766,23\text{min}^{-1} \quad (17)$$

Die optimale Drehzahl ergibt sich nach Gleichung 17 als 1766,23 Umdrehungen pro Minute.

Die gemessene Drehzahl zum Zeitpunkt des besten Wirkungsgrads ($\eta = 21,14\%$) beträgt 2050 min^{-1} und liegt somit über der berechneten optimalen Drehzahl.

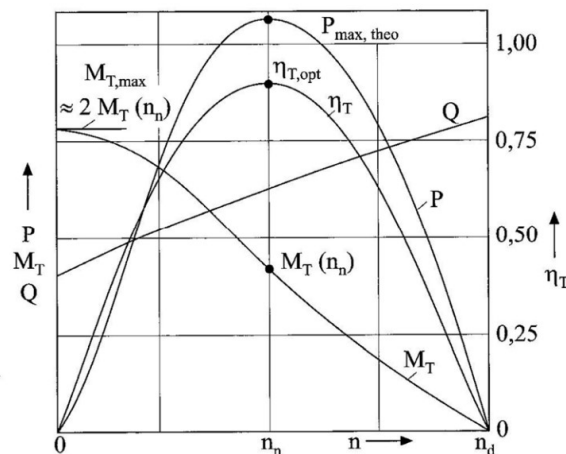


Abbildung 8: Arbeitspunkte der Turbine

Wie in Abbildung 8 aus der Versuchsanleitung zu erkennen ist liegt die optimale Drehzahl theoretisch am gleichen Punkt wie der optimale Wirkungsgrad, was in dieser Messung nicht der Fall ist und auch nicht zu erwarten war.

6.2.4 Interpretieren Sie evtl. auftretende Abweichungen des optimalen Arbeitspunkts.

Wie zu erwarten war, entspricht der gemessene optimale Arbeitspunkt nicht dem Berechneten. Das lässt sich vor allem auf Messungenauigkeiten und Fehler als auch auf die Leckagen am Versuchsaufbau zurückführen.

Auffällig ist außerdem, dass der aus den Messungen bestimmte Wirkungsgrad sehr viel kleiner ($21,14\%$) ist, als der real mögliche Wirkungsgrad einer Pelton-Turbinen ($\approx 90\%$). Das lässt sich durch einen Vergleich der Dimensionen des Versuchsaufbaus und Pelton-Turbinen in der tatsächlichen Nutzung erklären.

6.3 Verlustbeiwert der Düse

Die Werte der Düse sind in Tabelle Tabelle 2 festgehalten.

Tabelle 2: Volumenstrom und Fallhöhe der Düse

Düse	Volumenstrom Q	Fallhöhe H_T
Einstellung	Volumenstrom in m^3/h	in m
Offen	2,5425	33,604

Der Verlust der Düseaustrittsgeschwindigkeit wird mithilfe von Gleichung Gleichung 18 ermittelt:

$$\Delta c = c_{0,H} - c_{0,Q} = (2 \cdot g \cdot H_T)^{0,5} - \left(\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D_D^2} \right) \quad (18)$$

Werte eingesetzt in Gleichung 18:

$$\begin{aligned}
 \Delta c &= \left[(2 \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 33,60\text{m})^{0,5} \right] - \left[4 \cdot \frac{2,5425 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}{3600 \cdot \pi \cdot (0,007\text{m})^2} \right] \\
 &= 7,32 \frac{\text{m}}{\text{s}}
 \end{aligned}$$

Im Folgeschritt wird der Druckhöhenverlust mittels Gleichung Gleichung 19 bestimmt:

$$H_{V,D} = \frac{\Delta c^2}{2 \cdot g} \quad (19)$$

Werte eingesetzt in Gleichung 19:

$$\begin{aligned}
 H_{V,D} &= \frac{2,81754125}{2 \cdot 9,81} \\
 H_{V,D} &= 0,273\text{m}
 \end{aligned}$$

Für die Berechnung des Verlustbeiwerts gibt es zwei Möglichkeiten wie in Gleichung Gleichung 20 aufgeführt.

$$\zeta_D = 1 - \frac{H_{V,D} \cdot 2 \cdot g}{c_{o,Q}^2} = 1 - \frac{\Delta c^2}{c_{p,Q}^2} \quad (20)$$

Werte eingesetzt in Gleichung 20:

$$\zeta_D = 1 - \frac{(7,32 \frac{m}{s})^2}{(18,35)^2}$$

$$\zeta_D = 1 - 0,159 \approx 0,841 \approx 84\%$$

Mittels Δc ergibt sich ein Verlustbeiwert von $0,841 \approx 84\%$. Bei großen Anlagen liegt der Verlustbeiwert bei $0,96 - 99$ [2, S.32]. In Anbetracht der Skalierung auf einen kleineren Versuchsaufbau und im Hinblick auf den für Pelton-Turbinen geringen Wirkungsgrad ist dieser Wert plausibel.

7 Quellen

Literatur

- [1] Versuchsanleitung: "wasserkraft – hydraulische anlage und pelton-turbine". https://moodle.htw-berlin.de/pluginfile.php/1749661/mod_resource/content/1/Lab2_Versuch%202_1_Pelton_2020_10_20.pdf. Accesed 18.05.2023-11:29.
- [2] Sven Riemann. Dissertation: "untersuchung der instationären strömung in einer pelton-turbine". <https://mediatum.ub.tum.de/doc/679212/679212.pdf>. Accesed 18.05.2023-11:29.