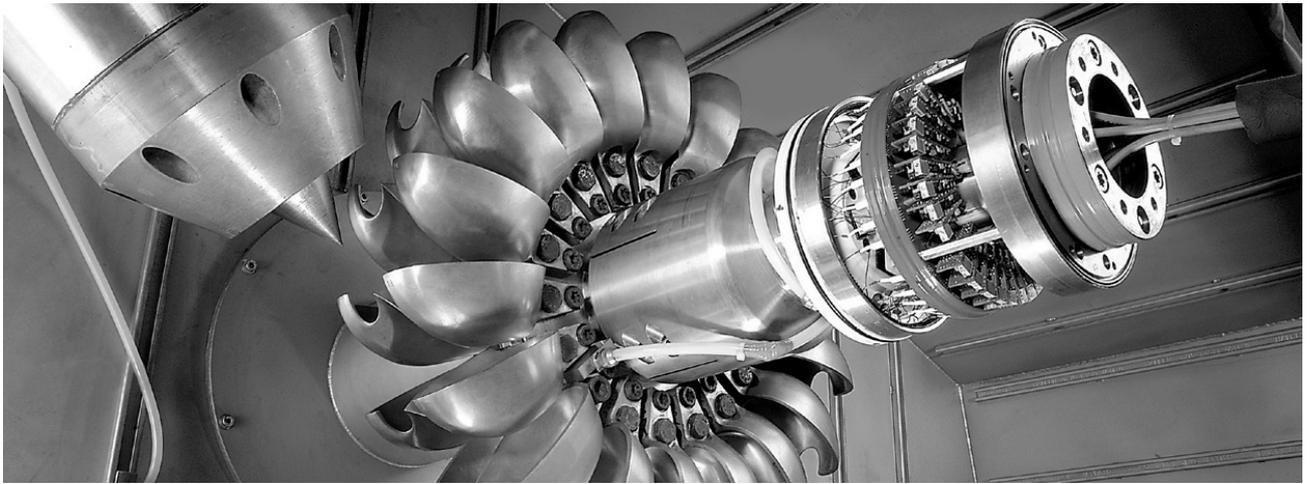




## Maschinenlabor: Versuch V2

# Untersuchung einer Pelton-turbine



Voith Hydro, Heidenheim, Germany

Bearbeiter:

Name: ..... Vorname: ..... Gruppe: .....

Matr. Nr.: .....

Laborversuch durchgeführt am: .....  
(Datum)

.....  
(Unterschrift Betreuer)

Korrekturhinweise:

Endtestat: .....  
(Datum)

.....  
(Unterschrift Betreuer)

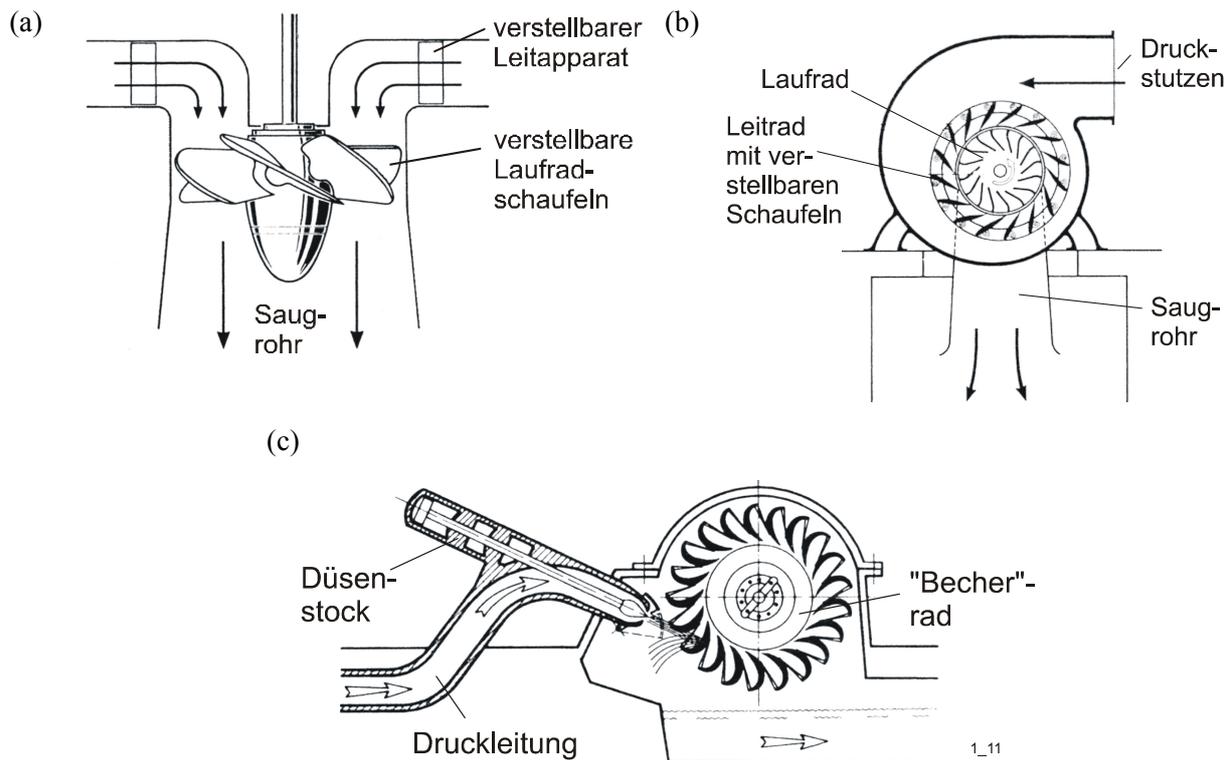
## 1. Ziel des Laborversuchs

In dem Laborversuch werden die Laborteilnehmer mit der Funktionsweise einer Wasserturbine der PELTON-Bauart vertraut gemacht. Sie erlernen den grundlegenden Aufbau eines Turbinenprüfstands und die Methodik, durch Messung von Druck, Volumenstrom, Drehmoment und Drehzahl die Leistungs- und Wirkungsgradkennlinie zu ermitteln.

## 2. Grundlagen

**Bauarten von Wasserturbinen.** Wasserturbinen werden in axialer und radialer/diagonaler Bauform gebaut (Kaplan- bzw. Francisturbine, Bild 1 (a) bzw. (b)). Eine weitverbreitete Bauform ist auch die Pelton-turbine (Bild 1 (c)). Die Einsatzgebiete sind unterschiedlich. Die Kaplan-turbine ist für große Durchsätze in Niederdruckanlagen, z.B. Laufwasserkraftwerken geeignet, die Pelton-turbine für Hochdruckanlagen z.B. im Gebirge. Die Francisturbine deckt den Bereich dazwischen mit mittleren Drücken und Durchsätzen ab. Wasserturbinen werden auch umgekehrt als Pumpen in Pumpspeicherkraftwerke zur „Stromspeicherung“ und zur schnellen Bereitstellung von sog. Regelenergie (zum Ausgleich z.B. von Schwankungen in der Windenergieproduktion) betrieben.

In Deutschland gibt es ca. 670 Wasserkraftanlagen der Elektrizitätsversorgungsunternehmen mit insgesamt 4000 MW installierter Leistung. Das Wasserkraftwerk Itaipu zwischen Brasilien und Paraguay hat mit 20 Maschinensätzen dagegen eine installierte Leistung von 14 000 MW. Das Dreischluchtenwasserkraftwerk am Jangtsekiang in China leistet in der Endausbaustufe etwa 18 000 MW.



**Bild 1** Bauformen von Wasserturbinen: (a) Kaplan-turbine, (b) Francisturbine, (c) Pelton-turbine

**Energieumsatz.** Bei jeder Turbine wird über ihre Stutzen mit dem Wasser sog. Stutzenarbeit  $Y_t$  zugeführt und zu einem großen Teil in die gewünschte, abzuführende Wellenarbeit  $Y_w$  umgewandelt, **Bild 2**. Ein kleinerer Teil wird zur Deckung der Verluste  $Y_v$  benötigt. Nach dem Energiesatz gilt

$$Y_w = Y_t - Y_v \quad (1)$$

mit

- der spezifischen<sup>1</sup> Wellenarbeit  $Y_w = P_w / \dot{m}$  (2)

- der spezifischen Stutzenarbeit  $Y_t = \frac{1}{\rho} \cdot (p_E - p_A) + \frac{1}{2} \cdot (c_E^2 - c_A^2)$  (3)

- der spezifischen Verlustenergie  $Y_v = \text{Verluste in der Turbine} / \dot{m}$  (4)

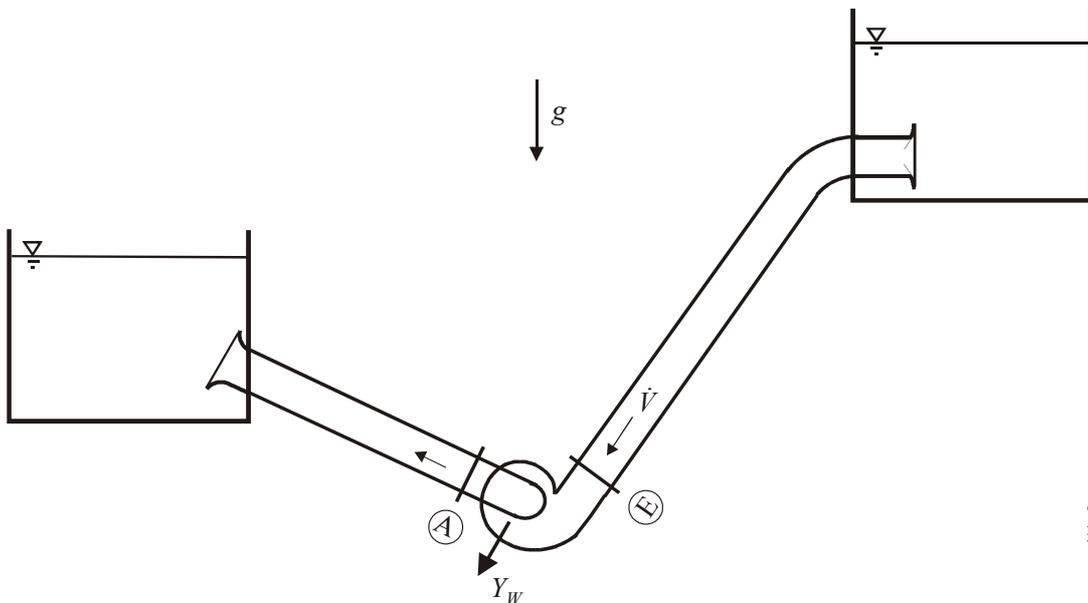
Die Verluste werden üblicherweise nicht durch  $Y_v$ , sondern vielmehr durch den Wirkungsgrad

$$\eta = P_w / \dot{m} Y_t \quad (5)$$

quantifiziert.

Die tatsächliche Wellenleistung an der Turbine kann aus Drehmoment und Drehzahl bestimmt werden zu

$$P_w = M_w \cdot 2\pi n \quad (6)$$



**Bild 2** Wasserkraftanlage mit allgemeiner Turbine

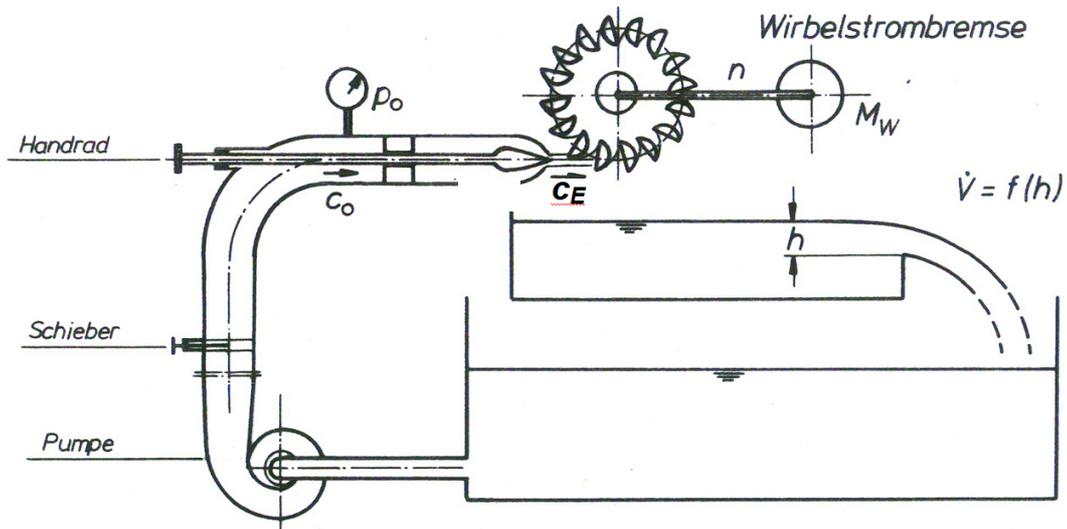
### 3. Pelton-turbinenprüfstand und das Kennlinienmessverfahren

Bei der speziellen Bauform einer Pelton-turbine nach **Bild 1** liegen nun folgende Sachverhalte vor:

- Im Düsenstock wird die gesamte Strömungsenergie in der Druckleitung in kinetische Energie  $\frac{\rho}{2} c_E^2$  umgewandelt.
- Die kinetische Energie des Wassers unmittelbar "hinter" der Turbine (d.h. dem Turbinenlaufrad) ist idealweise  $\frac{\rho}{2} c_A^2 = 0$ .
- Der Druck "vor" und "hinter" der Turbine (d.h. dem Turbinenlaufrad) ist gleich, es ist der Umgebungsdruck der freien Atmosphäre (die Pelton-turbine ist eine sog. "Freistrahlturbine").

<sup>1</sup> spezifisch = Arbeit, Energie oder Leistung auf die Masse  $m$  bzw. den Massenstrom  $\dot{m}$  bezogen

Der Versuchsstand am Institut für Fluid- und Thermodynamik ist in **Bild 3** dargestellt. Die zu testende Turbine ist in einen offenen Wasserkreislauf eingebaut, der durch eine Pumpe aufrechterhalten wird. (Hinweis: Die Pumpe "ersetzt" ein höhergelegenes Staubecken.)



**Bild 3** Peltonturbinenprüfstand

$Y_t$  wird letztlich mittels des Handrades eingestellt. Zur Ermittlung von  $Y_t$  wird die Düsendgeschwindigkeit  $c_A$  benötigt. Sie lässt sich mittels der Bernoulligleichung aus dem gemessenen Druck  $p_0$  und der Strömungsgeschwindigkeit  $c_0$  am bzw. im Messrohr berechnen:

$$c_E = \sqrt{\frac{2p_0}{\rho} + c_0^2} \quad (7)$$

Die Geschwindigkeit im Messrohr beträgt

$$c_0 = \frac{\dot{V}}{A_0} \quad (8)$$

Der Volumenstrom wird als Funktion der Spiegelhöhe  $h$  an einem Dreieckswehr abgelesen.

Die Turbine wird mit der Wirbelstrombremse schrittweise von Maximaldrehzahl bis zur Blockade des Turbinenlaufrads eingebremst, Drehzahl und Drehmoment an der Welle werden jeweils gemessen.

Damit lassen sich letztendlich die gesuchten Kennlinien der Turbine

- $Y_W = f(u/c_E)$  und
- $\eta = f(u/c_E)$

ermitteln.

Die Umfangsgeschwindigkeit des Turbinenlaufrads an seinem Außendurchmesser  $D$  berechnet sich dabei zu

$$u = \pi D n \quad (9)$$

Wichtige Daten sind:

- durchströmte Fläche im Messrohr  $A_0 = 0,0016 \text{ m}^2$
- Turbinenlaufraddurchmesser  $D = 0,102 \text{ m}$

## 4. Aufgabenstellung

### 4.1 Aufgaben zur Versuchsvorbereitung

Bitte arbeiten Sie *vorab* die Versuchsanleitung sorgfältig durch und klären Sie für das Prüfungsgespräch mit dem Versuchsbetreuer am Anfang des Laborversuchs folgende Fragen:

- Welche Hauptbauformen von Wasserturbinen gibt es?
- Erkundigen Sie sich, was man unter der Durchgangsdrehzahl versteht. Wie ermitteln Sie diese in Ihrem Versuch?
- Wie berechnen Sie  $Y_t$  in Ihrem Versuch? Formel!
- Wie groß ist die Dichte von Wasser und wo geht sie in die Kennlinienermittlung ein?

### 4.2 Versuchsdurchführung und Auswertung

a) Messen Sie wie oben beschrieben für einen festen Wert von  $Y_t$  die Turbinenkennlinie  $P_W = f(n)$  und berechnen sie die beiden daraus *abgeleiteten* Kennlinien

- $Y_W = f(u/c_E)$  und
- $\eta = f(u/c_E)$

Plotten Sie die erste Kennlinie in ein Diagramm und die beiden *abgeleiteten* Kennlinien gemeinsam in ein zweites.

b) Bei welchem Wert  $u/c_E$  ist der Wirkungsgrad maximal, wo liegt die Durchgangsdrehzahl? Wie groß ist das Verhältnis der Drehzahl bei Turbinendurchgang zur Drehzahl des Optimalpunkts?

c) Führen Sie für den **Optimalpunkt** (= Betriebspunkt mit maximalem Wirkungsgrad) eine Fehlerbetrachtung durch. Ermitteln Sie für den Volumenstrom, die spezifische Stutzenarbeit, die Wellenleistung und den Wirkungsgrad die maximale Unsicherheit. Erfragen Sie dazu beim Betreuer die geschätzte Fehlergrenze  $G_j$  der verwendeten Messgeräte.

Zeichnen Sie die maximalen Unsicherheiten in Form eines Fehlerbalkens in die Kennliniendiagramme ein.

Hinweis: Ist ein Messergebnis  $y$  eine Funktion mehrerer Einflussgrößen, gilt also  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_k)$ , so ist die maximale Unsicherheit  $\Delta y_{\max}$  gegeben durch:

$$\Delta y_{\max} = \pm \sum_{j=1}^k \left| \frac{\partial f}{\partial x_j} \Delta x_j \right|$$

Dabei ist der maximale Fehler jeder Einflussgröße  $\Delta x_j = G_j \cdot x_{j,\max}$  mit dem zugehörigen Messbereichsendwert des Messgerätes zu multiplizieren.

Beispiel:

$$y = RI^2, \quad R = \text{const.}, \quad G_I = 0.1\%, \quad I_{\max} = 10A \quad \Rightarrow \quad \Delta I = G_I \cdot I_{\max} = 0.01A$$

$$\Rightarrow \quad \Delta y_{\max} = \pm \left| \frac{\partial f}{\partial I} \Delta I \right| = \pm |2RI \cdot \Delta I|$$

## 5. Versuchsbericht

Der abzugebende Versuchsbericht ist wie folgt zu gliedern:

### 1. Versuchsbeschreibung

1.1 Beschreibung des Versuchsstands und der Messgeräte

1.2 Beantwortung der unter 4.1 gestellten Fragen

### 1.3 Versuchsdurchführung

## 2. Messprotokoll

## 3. Auswertung

### 3.1 Zusammenstellung der für die Auswertung entscheidenden Beziehungen

### 3.2 Exemplarische Berechnung eines Kennlinienpunktes für alle Kennlinien

### 3.3 Kennliniendiagramme

### 3.4 Fehlerbetrachtung

## 4. Diskussion der Ergebnisse (Diskussion der Kennliniendiagramme, Vergleich der gemessenen und abgeleiteten Kennlinien, Fehlerbetrachtung, usw.)

Der Versuchsbericht muss **handschriftlich** und **selbständig** angefertigt werden. Den fertigen Bericht in den hölzernen Kasten an der Wand vor dem Labor D-0102 (Gebäudeteil mit den Laboren) einwerfen. Der Stand über die Anerkennung des Berichts wird ausgehangen.

## 6. Literatur

- Zhang, Zh.: Freistrahlturbinen - Hydromechanik und Auslegung. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009
- Carolus, Th.: Turbomaschinen und Turboantriebe. Skript zur gleichnamigen Vorlesung an der Universität Siegen, 2016

