

# HANSER



## **Leseprobe**

zu

## **Aufgaben der Thermodynamik für den Maschinenbau**

von Horst-W. Grollius

Print-ISBN: 978-3-446-47030-9

E-Book-ISBN: 978-3-446-47556-4

Weitere Informationen und Bestellungen unter

<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446470309>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

# Vorwort

Studentinnen und Studenten des Maschinenbaus an Hoch- und Fachhochschulen kommen nicht umhin, in dem Grundlagenfach *Thermodynamik* eine Prüfung abzulegen.

Das vorliegende Buch bietet eine Vielzahl von Aufgaben zwecks Vertiefung des Stoffes an. Es soll helfen, die „Angst“ vor dem Fach Thermodynamik zu nehmen, um die Klausur zum Erfolg werden zu lassen. Zunächst wird die Aufgabe vorgestellt, danach wird erläutert, was gesucht ist.

Bei der darauf folgenden Lösung wird auf die Darstellung einer klaren und leicht nachvollziehbaren Abfolge der einzelnen Schritte Wert gelegt. Die bei der Vorstellung der Aufgabe nicht gegebenen, aber zur Lösung der Aufgabe unbedingt erforderlichen Größen, werden an geeigneter Stelle in Fettschrift hervorgehoben.

Grundsätzlich ist zu sagen, dass in den Ingenieurwissenschaften die phänomenologische Thermodynamik zur Anwendung gelangt, als deren Begründer S. CARNOT (1796 – 1832) gilt. Diese Art der Thermodynamik orientiert sich an den in der Natur auftretenden äußeren Erscheinungen (Phänomenen) und beschreibt die Sachverhalte von makroskopischen Zustands- und Prozessgrößen wie z.B. Temperatur, Druck, Volumen, Arbeit und Wärme. Die Stoffe werden als Kontinuum behandelt und nicht als Ansammlung von Atomen/Molekülen.

Im Gegensatz dazu geht die statistische Thermodynamik von den Atomen/Molekülen der Stoffe aus (mikroskopische Betrachtung) und wendet wegen der großen Anzahl von Teilchen statistische Methoden zu deren Beschreibung an.

Die hier vorgestellten Aufgaben hat der Verfasser aus den ihm zur Verfügung stehenden Unterlagen aufbereitet, die er während seines Studiums an der RWTH-Aachen zur Vorbereitung auf die Thermodynamik-Klausur benutzt hat. Die Lösungswege und begleitenden Abbildungen sind vom Autor entsprechend der didaktischen Anforderungen neu erstellt worden.

Der Verfasser dankt Frau *Natalia Silakova* vom Carl Hanser Verlag, München, für die vielen nützlichen Hinweise zu Gestaltung des Buches und die jederzeit gute Zusammenarbeit.

Weiterhin ist zu danken der Firma TECHNOBOX (Bochum), deren Software zur Erstellung der Bilder gedient hat.

Juli 2022, *Horst-W. Grollius*

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	<b>V</b>
<b>Aufgabe 1</b> .....	<b>1</b>
1. Hauptsatz für geschlossenes System, Temperatur eines Härtebades	
<b>Aufgabe 2</b> .....	<b>3</b>
1. Hauptsatz für offenes System, Massenstrom einer Wasserbremse	
<b>Aufgabe 3</b> .....	<b>5</b>
1. Hauptsatz für offenes System, Kondensator eines Kraftwerks, Wasser-Massenstrom	
<b>Aufgabe 4</b> .....	<b>7</b>
1. Hauptsatz für offenes System, Pumpspeicherwerk, Druck und Geschwindigkeit an unterschiedlichen Stellen der Anlage, Pumpen- und Turbinenleistung, Festlegung von Bilanzhüllen	
<b>Aufgabe 5</b> .....	<b>15</b>
Schaufelradprozess, Schmelzwärme, verrichtete Arbeit, unterschiedliche Bilanzhüllen	
<b>Aufgabe 6</b> .....	<b>18</b>
1. Hauptsatz für offenes System, geöffnete Tür eines Kühlschranks, Zeit für die Verdoppelung der inneren Energie	
<b>Aufgabe 7</b> .....	<b>20</b>
1. Hauptsatz für geschlossenes System, Volumenänderung beim Rührprozess, zugeführte Arbeit	
<b>Aufgabe 8</b> .....	<b>22</b>
1. Hauptsatz für geschlossenes System, Änderung der Energie des Zylinderinhaltes bei unterschiedlicher Lage der Bilanzhülle	

<b>Aufgabe 9</b> .....	25
1. Hauptsatz für offenes System, Kalorimeter, Änderung der Enthalpie des Gasgemisches	
<b>Aufgabe 10</b> .....	28
Metallblock, isobarer Ausdehnungskoeffizient, isothermer Kompressibilitätskoeffizient, Druck und Temperatur	
<b>Aufgabe 11</b> .....	30
Druckbehälter, Befüllung von Flaschen	
<b>Aufgabe 12</b> .....	32
Gasometer, Auslegungsdruck des Verdichters, Massenstromverhältnis, Gegenkraft bei vorgeschriebenem Innendruck	
<b>Aufgabe 13</b> .....	36
1. Hauptsatz für geschlossenes System, Kammertemperaturen eines Zylinders	
<b>Aufgabe 14</b> .....	39
1. Hauptsatz für stationären Fließprozess, Kaltluftanlage, zu- und abgeführte Wärmen, höchste und niedrigste Temperatur	
<b>Aufgabe 15</b> .....	42
1. Hauptsatz für geschlossenes System, Zylinder mit zwei Kammern, Temperatur in den Kammern	
<b>Aufgabe 16</b> .....	46
1. Hauptsatz für stationären Fließprozess, gekühlter Verdichter, Leistung des Verdichters	
<b>Aufgabe 17</b> .....	49
Experiment zur Ermittlung des Isentropenexponenten	
<b>Aufgabe 18</b> .....	52
Energiebilanz an einem Druckbehälter, Temperatur nach dem Auffüllen, Druck nach anschließender Abkühlung, Zeitdauer für den Auffüllvorgang	
<b>Aufgabe 19</b> .....	57
1. Hauptsatz für stationären Fließprozess, Drücke und Temperaturen an den Zustandspunkten, verrichtete spezifische Arbeit des Kreisprozesses	
<b>Aufgabe 20</b> .....	61
Philips-Kältemaschine, abgeführte Wärmen, zu- und geführte Arbeit, Leistungsziffer	

<b>Aufgabe 21</b> .....	<b>66</b>
1. Hauptsatz für stationären Fließprozess, geschlossene Gasturbinenanlage	
<b>Aufgabe 22</b> .....	<b>70</b>
1. Hauptsatz für stationären Fließprozess, geschlossene Gasturbinenanlage mit Mantel- und Zwischenkühlung	
<b>Aufgabe 23</b> .....	<b>77</b>
1. Hauptsatz für stationären Fließprozess, geschlossene Gasturbinenanlage mit Vorwärmung	
<b>Aufgabe 24</b> .....	<b>81</b>
Entropieänderung eines Kupferblocks	
<b>Aufgabe 25</b> .....	<b>86</b>
Joulscher-Versuch, Rührwerk	
<b>Aufgabe 26</b> .....	<b>89</b>
Entropieänderung bei Drosselung	
<b>Aufgabe 27</b> .....	<b>92</b>
Entropieerzeugung beim Ausgleichsprozess	
<b>Aufgabe 28</b> .....	<b>96</b>
Kreisprozess mit Isentropen, Isobaren und Isochoren	
<b>Aufgabe 29</b> .....	<b>107</b>
Entropieänderung und Entropieerzeugung bei einer Turbine, Turbinenleistung	
<b>Aufgabe 30</b> .....	<b>110</b>
Mit Luft betriebener Kreisprozess, Isentropen und Isothermen	
<b>Aufgabe 31</b> .....	<b>117</b>
Kälteanlage, isotherme Verdichtung, polytrope Expansion, isobare Wärmezufuhr	
<b>Aufgabe 32</b> .....	<b>129</b>
Von Nassdampf durchströmter Kessel, Dampfgehalt, Entropiezunahme, Entropieerzeugung	
<b>Aufgabe 33</b> .....	<b>133</b>
Geschlossener Behälter, Dampfgehalt, kritischer Zustand, abzuführende Wärmemenge	

<b>Aufgabe 34</b> .....	<b>137</b>
Beheiztes Ventil, Zustandsänderungen, Entropieerzeugung, Exergieverlust	
<b>Aufgabe 35</b> .....	<b>143</b>
Reversibler rechtsläufiger CARNOT-Prozess, Isentrope und Isotherme	
<b>Aufgabe 36</b> .....	<b>147</b>
Behälter mit Wasser und Eis, Volumenänderungsarbeit, Exergieverlust	
<b>Aufgabe 37</b> .....	<b>152</b>
Adiabate Mischkammer, Partialdrücke, Entropieproduktion	
<b>Aufgabe 38</b> .....	<b>161</b>
Instationärer Prozess, Temperatur des Gemisches, Partialdrücke, Gesamtdruck, Exergieverlust	
<b>Aufgabe 39</b> .....	<b>169</b>
Wärmedichter Behälter, Temperatur und Molmasse des Gemisches, Entropieproduktion, Partialdrücke und Gesamtdruck	
<b>Aufgabe 40</b> .....	<b>176</b>
Mollier-Diagramm, Wassergehalte	
<b>Aufgabe 41</b> .....	<b>180</b>
Zylinder mit gesättigter Luft, Masse des Wassers und der trockenen Luft, aufzubringende Arbeit	
<b>Aufgabe 42</b> .....	<b>186</b>
Klimatisierte Halle, Wassergehalte, Mollier-Diagramm, relative Luftfeuchtigkeit	
<b>Aufgabe 43</b> .....	<b>199</b>
Adiabater Strömungskanal, relative Luftfeuchtigkeit, Enthalpien der feuchten Luft	
<b>Aufgabe 44</b> .....	<b>204</b>
Beheizung eines Winderhitzers eines Hüttenwerks mit Gichtgas, Molenströme, Abgaszusammensetzung	
<b>Aufgabe 45</b> .....	<b>210</b>
Vollkommene Verbrennung von Kohlenmonoxid, Verbrennungstemperatur	
<b>Aufgabe 46</b> .....	<b>216</b>
Verbrennung von Kohlenmonoxid mit Luftüberschuss, Oxidationsverhältnis, Abgaszusammensetzung, Exergieverlust	

Aufgabe 47 .....	227
Dampfstrahlpumpe, Massenströme	
Aufgabe 48 .....	234
Adiabater Verdichter einer Wärmepumpe, Reibleistung des Verdichters, Exergieverlust	
Aufgabe 49 .....	238
Lavaldüse, erster Hauptsatz, Austrittsgeschwindigkeit, spezifischer Exergieverlust	
Aufgabe 50 .....	242
Lavaldüse, erster Hauptsatz, Zustandsgrößen im Lavalquerschnitt, Schallgeschwindigkeit im Lavalquerschnitt	





# Aufgabe 1

## 1. Hauptsatz für geschlossenes System, Temperatur eines Härtebades

### Vorstellung:

In einem Härtebad, das adiabatisch zu betrachten ist, werden 200 kg Stahl mit einer Temperatur von 1173 K in 1000 kg Wasser mit einer Temperatur von 288 K abgeschreckt (Bild 1.1).

### Gesucht:

Temperatur  $T_m$  des Härtebades, wenn dieses das thermische Gleichgewicht (Zustand 2) erreicht hat.

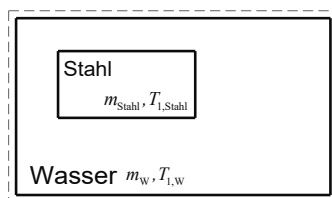
### Lösung:

1. Hauptsatz für geschlossenes System (Bild 1.1):

$$Q_{12} + W_{12} = U_2 - U_1 \quad Q_{12} = 0 \quad W_{12} = 0$$

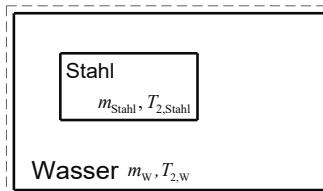
$$U_2 = U_1$$

Zustand 1



$$\begin{aligned} m_{\text{Stahl}} &= 200 \text{ kg} \\ m_W &= 1000 \text{ kg} \\ T_{1,\text{Stahl}} &= 1173 \text{ K} \\ T_{1,W} &= 288 \text{ K} \end{aligned}$$

Zustand 2



**Bild 1.1** System mit Bilanzhülle – Zustände 1 und 2

Die innere Energie des gesamten Systems im Zustand 1 ergibt sich additiv aus der inneren Energie der Stahls und der des Wassers bei den Temperaturen  $T_{1,\text{Stahl}}$  und  $T_{1,\text{W}}$ :

$$U_1 = U_{1,\text{Stahl}} + U_{1,\text{W}} = m_{1,\text{Stahl}} \cdot u_{1,\text{Stahl}} + m_{1,\text{W}} \cdot u_{1,\text{W}}$$

$$U_1 = m_{\text{Stahl}} \cdot c_{\text{Stahl}} \cdot T_{1,\text{Stahl}} + m_{\text{W}} \cdot c_{\text{W}} \cdot T_{1,\text{W}}$$

Die innere Energie des gesamten Systems im Zustand 2 ergibt sich additiv aus der inneren Energie der Stahls und der des Wassers bei der Temperatur  $T_{\text{m}} = T_{2,\text{Stahl}} = T_{2,\text{W}}$ :

$$U_2 = U_{2,\text{Stahl}} + U_{2,\text{W}} = m_{\text{Stahl}} \cdot u_{2,\text{Stahl}} + m_{\text{W}} \cdot u_{2,\text{W}}$$

$$U_2 = m_{\text{Stahl}} \cdot c_{\text{Stahl}} \cdot T_{2,\text{Stahl}} + m_{\text{W}} \cdot c_{\text{W}} \cdot T_{2,\text{W}}$$

$$U_2 = U_1 \quad T_{\text{m}} = T_{2,\text{Stahl}} = T_{2,\text{W}}$$

$$m_{\text{Stahl}} \cdot c_{\text{Stahl}} \cdot T_{\text{m}} + m_{\text{W}} \cdot c_{\text{W}} \cdot T_{\text{m}} = m_{\text{Stahl}} \cdot c_{\text{Stahl}} \cdot T_{1,\text{Stahl}} + m_{\text{W}} \cdot c_{\text{W}} \cdot T_{1,\text{W}}$$

$$T_{\text{m}} (m_{\text{Stahl}} \cdot c_{\text{Stahl}} + m_{\text{W}} \cdot c_{\text{W}}) = m_{\text{Stahl}} \cdot c_{\text{Stahl}} \cdot T_{1,\text{Stahl}} + m_{\text{W}} \cdot c_{\text{W}} \cdot T_{1,\text{W}}$$

$$T_{\text{m}} = \frac{m_{\text{Stahl}} \cdot c_{\text{Stahl}} \cdot T_{1,\text{Stahl}} + m_{\text{W}} \cdot c_{\text{W}} \cdot T_{1,\text{W}}}{m_{\text{Stahl}} \cdot c_{\text{Stahl}} + m_{\text{W}} \cdot c_{\text{W}}}$$

$$c_{\text{W}} = 4,18 \text{ kJ} / (\text{kg} \cdot \text{K})$$

$$c_{\text{Stahl}} = 0,46 \text{ kJ} / (\text{kg} \cdot \text{K})$$

$$T_{\text{m}} = \frac{200 \text{ kg} \cdot 0,46 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} 1173 \text{ K} + 1000 \text{ kg} \cdot 4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} 288 \text{ K}}{200 \text{ kg} \cdot 0,46 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} + 1000 \text{ kg} \cdot 4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}} = \frac{1311756}{4,272} \text{ K}$$

$$T_{\text{m}} = 307 \text{ K}$$

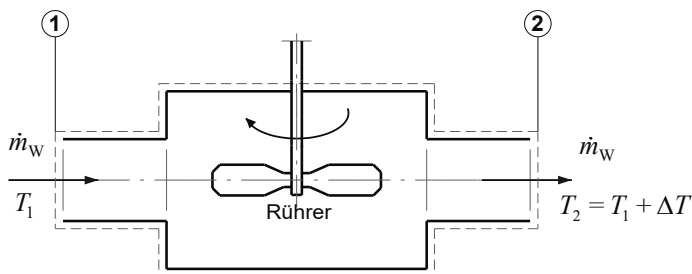
# Aufgabe 2

## 1. Hauptsatz für offenes System, Massenstrom einer Wasserbremse

### Vorstellung:

Ein Verbrennungsmotor wird mit einer Wasserbremse (adiabat) in einem stationären Betriebszustand gehalten, bei dem er eine Leistung von  $3500 \cdot 10^3 \text{ kJ/h}$  hat. Die vom Motor abgegebene Leistung erhöht in der Bremse durch Reibleistung die innere Energie des Wassers (Bild 2.1).

Die äußeren Energien sind zu vernachlässigen.



**Bild 2.1** Wasserbremse mit Bilanzhülle

### Gesucht:

Wassermassenstrom  $\dot{m}_W$ , wenn am Austritt aus der Bremse die Temperaturänderung  $\Delta T = 35 \text{ K}$  beträgt.

### Lösung:

1. Hauptsatz für offenes System:

$$\dot{Q}_{12} + P_{12} = \dot{m}_W \left[ h_2 - h_1 + \frac{1}{2} (c_2^2 - c_1^2) + g(z_2 - z_1) \right] \quad \dot{Q}_{12} = 0$$

$$P_{12} = \dot{m}_W (h_2 - h_1) \quad c_1 = c_2 \quad z_1 = z_2$$

$$P_{12} = \dot{m}_W (u_2 + p_2 \cdot v_2 - u_1 - p_1 \cdot v_1) \quad p_1 \cdot v_1 = p_2 \cdot v_2 \quad \rho_W = \text{konst.}$$

$$P_{12} = \dot{m}_W (u_2 - u_1) = \dot{m}_W \int_1^2 c_W(T) dT$$

$$\int_1^2 c_W(T) dT = c_{W,m} (T_2 - T_1)$$

Da die spezifische Wärme von Wasser nur geringfügig von der Temperatur abhängt, kann mit dem Mittelwert  $c_{W,m}$  gerechnet werden.

$$P_{12} = \dot{m}_W \cdot c_{W,m} (T_2 - T_1) = \dot{m}_W \cdot c_{W,m} \cdot \Delta T$$

$$c_{W,m} = 4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$\dot{m}_W = \frac{P_{12}}{c_{W,m} \cdot \Delta T} = \frac{3500 \cdot 10^3 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}}{4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} 35 \text{ K}} = \frac{3500 \cdot 10^3 \frac{\text{kJ}}{3,6 \cdot 10^3 \text{ s}}}{4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} 35 \text{ K}}$$

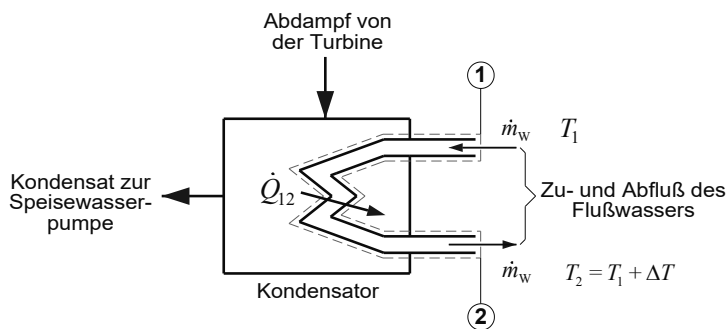
$$\dot{m}_W = 6,645 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

# Aufgabe 3

## 1. Hauptsatz für offenes System, Kondensator eines Kraftwerks, Wasser-Massenstrom

### Vorstellung:

Im Kondensator eines Kraftwerkes muss dem zu kondensierenden Dampf ein Wärmestrom von  $273 \cdot 10^6 \text{ kJ/h}$  entzogen werden. Als Kühlstrom steht das Wasser eines Flusses zur Verfügung (Bild 3.1).



**Bild 3.1** System mit Bilanzhülle

### Gesucht:

Wie groß ist der Wasser-Massenstrom  $\dot{m}_w$ , der dem Fluss entnommen werden muss, wenn eine Temperaturerhöhung von  $\Delta T = 20 \text{ K}$  zugelassen wird.

### Lösung:

1. Hauptsatz für offenes System:

$$\dot{Q}_{12} + P_{12} = \dot{m}_w \left[ h_2 - h_1 + \frac{1}{2} (c_2^2 - c_1^2) + g(z_2 - z_1) \right] \quad P_{12} = 0$$

$$\dot{Q}_{12} = \dot{m}_w \left[ h_2 - h_1 + \frac{1}{2} (c_2^2 - c_1^2) + g(z_2 - z_1) \right] \quad c_1 = c_2 \quad z_1 = z_2$$

$$\dot{Q}_{12} = \dot{m}_w (h_2 - h_1)$$

$$\dot{Q}_{12} = \dot{m}_W (u_2 + p_2 \cdot v_2 - u_1 - p_1 \cdot v_1) \quad p_1 \cdot v_1 = p_2 \cdot v_2$$

$$\dot{Q}_{12} = \dot{m}_W (u_2 - u_1) = \dot{m}_{W,Kond.} \int_1^2 c_W(T) dT$$

$$\int_1^2 c_W(T) dT = c_{W,m} (T_2 - T_1)$$

Da die spezifische Wärme von Wasser nur geringfügig von der Temperatur abhängt, kann mit dem Mittelwert  $c_{W,m}$  gerechnet werden.

$$\dot{Q}_{12} = \dot{m}_W \cdot c_{W,m} (T_2 - T_1)$$

$$c_{W,m} = 4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$\dot{m}_W = \frac{\dot{Q}_{12}}{c_{W,m} (T_2 - T_1)} = \frac{\dot{Q}_{12}}{c_{W,m} \cdot \Delta T} = \frac{273 \cdot 10^6 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}}{4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} 20 \text{ K}} = \frac{273 \cdot 10^6 \frac{\text{kJ}}{3,6 \cdot 10^3 \text{ s}}}{4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} 20 \text{ K}}$$

$$\dot{m}_W = 907,1 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 907,1 \frac{10^{-3} \text{ t}}{\frac{1}{3,6 \cdot 10^3} \text{ h}} = 907,1 \frac{10^{-3} \text{ t} \cdot 3,6 \cdot 10^3}{\text{h}}$$

$$\dot{m}_W = 907,1 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 907,1 \frac{10^{-3} \text{ t}}{\frac{1}{3,6 \cdot 10^3} \text{ h}} = 907,1 \frac{10^{-3} \text{ t} \cdot 3,6 \cdot 10^3}{\text{h}}$$

$$\dot{m}_W = 3265,6 \frac{\text{t}}{\text{h}}$$

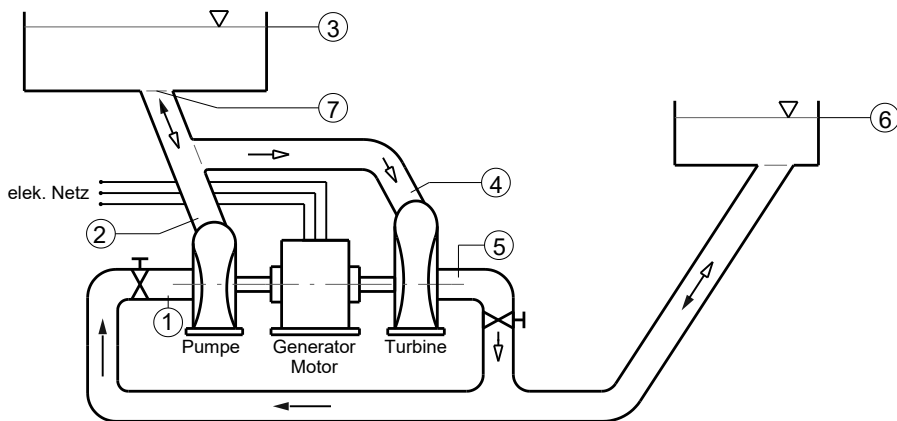
# Aufgabe 4

*1. Hauptsatz für offenes System, Pumpspeicherwerk, Druck und Geschwindigkeit an unterschiedlichen Stellen der Anlage, Pumpen- und Turbinenleistung, Festlegung von Bilanzhüllen*

## Vorstellung:

In einem Pumpspeicherwerk besteht ein Maschinensatz aus einer Pumpe, einer Turbine und einer elektrischen Maschine. Während der Nacht arbeitet die elektrische Maschine als Motor und treibt die Pumpe an, die Wasser aus einem Fluss in ein Speicherbecken pumpt, dessen Wasserspiegel 280 m über dem Fluss liegt.

Tagsüber wird mit dem Wasser des Speicherbeckens die Turbine angetrieben. Diese treibt die elektrische Maschine an, die nun als Generator arbeitet und elektrische Energie in das Netz einspeist (Bild 4.1).



**Bild 4.1** Pumpspeicherwerk mit Maschinensatz

Die Strömung durch Pumpe und Turbine sowie alle Wasserleitungen sollen als reibungsfrei betrachtet werden. Das Wasser kann als inkompressible Flüssigkeit behandelt werden. Die elektrische Maschine soll elektrische Energie vollständig in mechanische Energie umwandeln.

Der Umgebungsdruck beträgt  $p_u = 1 \text{ bar}$ .

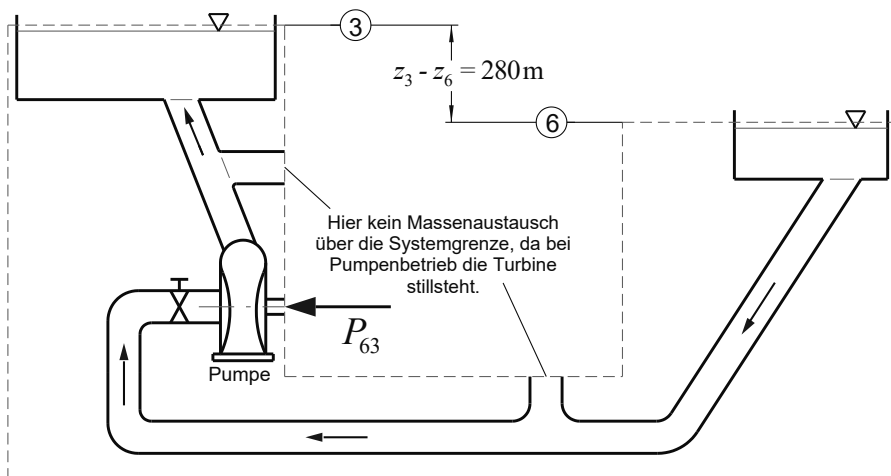


**Gesucht:**

1. Pumpenleistung  $P_{63}$
2. Geschwindigkeit am Eintritt der Pumpe  $c_1$
3. Druck am Austritt der Pumpe  $p_2$
4. Geschwindigkeit  $c_7$  und Druck  $p_7$  an der Mündung des Druckstollens in das Speicherbecken
5. Massenstrom durch die Turbine  $\dot{m}_T$
6. Turbinenleistung  $P_{45}$

**Lösung:**

1. Pumpenleistung  $P_{63}$

**Bild 4.2** Bilanzhülle zur Berechnung der Pumpenleistung

1. Hauptsatz für offenes System (Bild 4.2):

$$\dot{Q}_{63} + P_{63} = \dot{m}_p \left[ h_3 - h_6 + \frac{1}{2} (c_3^2 - c_6^2) + g(z_3 - z_6) \right] \quad \dot{Q}_{63} = 0$$

$$P_{63} = \dot{V}_p \cdot \rho_w \left[ h_3 - h_6 + \frac{1}{2} (c_3^2 - c_6^2) + g(z_3 - z_6) \right]$$

$$P_{63} = \dot{V}_p \cdot \rho_w \left[ u_3 + p_3 \cdot v_3 - u_6 - p_6 \cdot v_6 + \frac{1}{2} (c_3^2 - c_6^2) + g(z_3 - z_6) \right]$$

$$u_3 = u_6 \quad T_3 = T_6, \text{ reibungsfrei}$$

$$p_3 = p_6 = p_u \quad v_3 = v_6, \text{ inkompressibel} \quad c_3 = 0 \quad c_6 = 0$$

$$P_{63} = \dot{V}_p \cdot \rho_w \cdot g (z_3 - z_6) \quad z_3 - z_6 = 280 \text{ m}$$

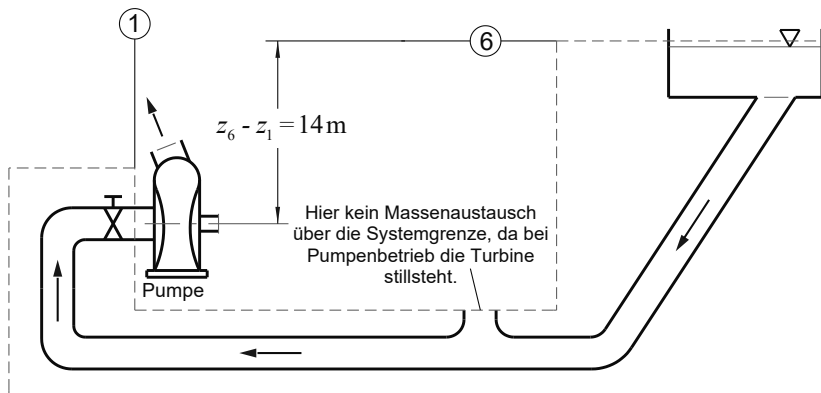
$$\dot{V}_p = 21,1 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$\rho_w = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$P_{63} = 21,1 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 280 \text{ m} = 21,1 \cdot 1000 \cdot 9,81 \cdot 280 \frac{\text{Nm}}{\text{s}}$$

$$P_{63} = 58000 \cdot 10^3 \frac{\text{Nm}}{\text{s}} = 58000 \text{ kW} = 58 \text{ MW}$$

## 2. Geschwindigkeit am Eintritt der Pumpe $c_1$



**Bild 4.3** Bilanzhülle zur Berechnung der Geschwindigkeit am Eintritt der Pumpe

### 1. Hauptsatz für offenes System (Bild 4.3):

$$\dot{Q}_{61} + P_{61} = \dot{m}_p \left[ h_1 - h_6 + \frac{1}{2} (c_1^2 - c_6^2) + g (z_1 - z_6) \right] \quad \dot{Q}_{61} + P_{61} = 0$$

$$0 = h_1 - h_6 + \frac{1}{2} (c_1^2 - c_6^2) + g (z_1 - z_6)$$

$$0 = \left[ u_1 + p_1 \cdot v_1 - u_6 - p_6 \cdot v_6 + \frac{1}{2} (c_1^2 - c_6^2) + g (z_1 - z_6) \right]$$

$$u_1 = u_6 \quad T_1 = T_6, \text{ reibungsfrei} \quad c_6 = 0 \quad z_1 - z_6 = -14 \text{ m}$$

$$0 = p_1 \cdot v_1 - p_6 \cdot v_6 + \frac{1}{2} c_1^2 + g(z_1 - z_6)$$

$$-\frac{1}{2} c_1^2 = p_1 \cdot v_1 - p_6 \cdot v_6 + g(z_1 - z_6)$$

$$\frac{1}{2} c_1^2 = -p_1 \cdot v_1 + p_6 \cdot v_6 - g(z_1 - z_6)$$

Aus Konstruktionsgründen muss an der Stelle 1 ein Druck von

$$p_1 = 12 \text{ mWS} = 1,176766 \text{ bar}$$

herrschen.

$$c_1^2 = 2 \left[ -p_1 \cdot v_1 + p_6 \cdot v_6 - g(z_1 - z_6) \right] = 2 \left[ \frac{1}{\rho_w} (-p_1 + p_6) - g(z_1 - z_6) \right]$$

$$p_6 = p_u = 1 \text{ bar} = 1 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$-p_1 + p_u = -1,176766 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} + 1 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = -0,176766 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$c_1^2 = 2 \left[ \frac{1}{10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \left( -0,176766 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right) - g(-14 \text{ m}) \right]$$

$$c_1^2 = 2 \left[ \frac{1}{10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \left( -0,176766 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right) + 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} 14 \text{ m} \right]$$

$$c_1^2 = 2 \left[ -17,6766 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \frac{\text{N}}{\text{m}^2} + 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} 14 \text{ m} \right] = 239,3268 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$c_1 = 15,47 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$