

Horst-W. Grollius

# Aufgaben der Thermodynamik für den Maschinenbau



HANSER



Grollius

## Aufgaben der Thermodynamik für den Maschinenbau



### **Blieben Sie auf dem Laufenden!**

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

**[www.hanser-fachbuch.de/newsletter](http://www.hanser-fachbuch.de/newsletter)**



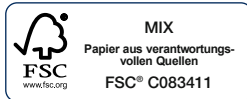
Horst-W. Grollius

# Aufgaben der Thermodynamik für den Maschinenbau

HANSER

**Der Autor:**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Horst-W. Grollius  
Bergische Universität Wuppertal



Alle in diesem Buch enthaltenen Informationen wurden nach bestem Wissen zusammengestellt und mit Sorgfalt geprüft und getestet. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Buch enthaltenen Informationen mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor(en, Herausgeber) und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht.

Ebenso wenig übernehmen Autor(en, Herausgeber) und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches, oder Teilen daraus, sind vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) – auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2022 Carl Hanser Verlag München

Internet: [www.hanser-fachbuch.de](http://www.hanser-fachbuch.de)

Lektorat: Dipl.-Ing. Natalia Silakova-Herzberg

Herstellung: Frauke Schafft

Covergestaltung: Max Kostopoulos

Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, [www.rebranding.de](http://www.rebranding.de), München

Titelbild: © [gettyimages.de](http://gettyimages.de)/Nicolas Balcazar / EyeEm

Satz: Eberl & Koesel Studio, Altusried-Krugzell

Druck und Bindung: CPI books GmbH, Leck

Printed in Germany

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

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

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

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

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



# Formelzeichen

Während der Durcharbeitung der Aufgaben werden die hier nicht aufgeführten Formelzeichen verständlich.

## Lateinische Formelzeichen

$A$	Fläche
$c$	Geschwindigkeit
$c_W$	spezifische Wärmekapazität von Wasser
$c_{WD}$	spezifische Wärmekapazität von Wasserdampf
$c_{\text{Stahl}}$	spezifische Wärmekapazität von Stahl
$c_p$	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck
$c_v$	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen
$c_{mp}$	molare spez. Wärmekapazität bei konstantem Druck
$c_{mv}$	molare spez. Wärmekapazität bei konstantem Volumen
$d$	Durchmesser
$E$	Energie
$e_v$	spezifischer Exergieverlust
$E_v$	Exergieverlust
$\dot{E}_v$	Exergieverluststrom
$F$	Kraft
$g$	Erdbeschleunigung
$h$	spezifische Enthalpie
$H$	Enthalpie
$\dot{H}$	Enthalpiestrom
$g$	Erdbeschleunigung
$j$	spezifische Dissipation

$J$	Dissipation
$\bar{k}$	mittlerer Isentropenexponent
$m$	Masse
$\dot{m}$	Massenstrom
$\dot{m}_W$	Wasser-Massenstrom von Wasser
$M$	Molekulargewicht
$n$	Drehzahl
$\dot{n}$	Molenstrom
$\bar{n}$	mittlerer Polytropenexponent
$N$	Anzahl
$p$	Druck, Partialdruck
$p_0$	Normdruck (= $p_N$ )
$p_i$	Partialdruck der Komponente
$P$	Leistung
$P_{el}$	elektrische Leistung
$q$	spezifische Wärmeenergie, spezifische Wärme,
$Q$	Wärmeenergie, Wärme
$\dot{Q}$	Wärmestrom
$R$	Gaskonstante
$R_m$	allgemeine Gaskonstante
$r$	Verdampfungswärme
$r_S$	Schmelzwärme
$s$	spezifische Entropie
$S$	Entropie
$\dot{S}$	Entropiestrom
$t$	Zeit, Temperatur
$T$	Temperatur
$u$	spezifische innere Energie
$U$	innere Energie, elektrische Spannung
$v$	spezifisches Volumen
$v_E$	spezifisches Volumen von Eis
$v_W$	spezifisches Volumen von Wasser
$V$	Volumen



$\dot{V}$	Volumenstrom
$\dot{V}_W$	Volumenstrom von Wasser
$W_t$	spezifische technische Arbeit
$w_V$	spezifische Volumenänderungsarbeit
$W$	Arbeit
$W_a$	äußere Arbeit (Bewegung und Lage)
$W_t$	technische Arbeit
$W_V$	Volumenänderungsarbeit
$x$	Dampfgehalt
$X$	Wassergehalt der feuchten Luft
$X_S$	Wassergehalt der feuchten Luft bei Sättigung
$z$	geodätische Höhe

### Griechische Formelzeichen

$\alpha$	isobarer Ausdehnungskoeffizient
$\gamma$	isothermer Kompressibilitätskoeffizient
$\varepsilon$	Leistungsziffer-Kälteprozess
$\eta$	Wirkungsgrad
$\bar{\kappa}$	Isentropenexponent
$\lambda$	Oxidationsverhältnis
$\rho$	Dichte
$\tau$	Zeit
$\varphi$	relative Luftfeuchtigkeit
$\Psi_i$	Molanteil
$\chi$	Verbrennungsgasverhältnis
$\xi$	Massenanteil
$\xi_m$	molarer Massenanteil
$\omega$	Winkelgeschwindigkeit
$\nu$	Polytropenverhältnis



# 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.

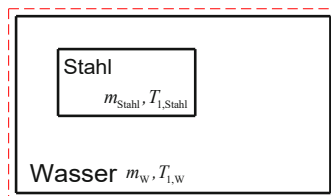
### Lösung:

1. Hauptsatz für geschlossenes System (Bild 1.1):

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

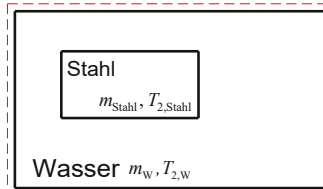
$$U_2 = U_1$$

### 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  $T_m = T_{2,\text{Stahl}} = T_{2,\text{W}}$ :

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$T_m = 307 \text{ K}$$

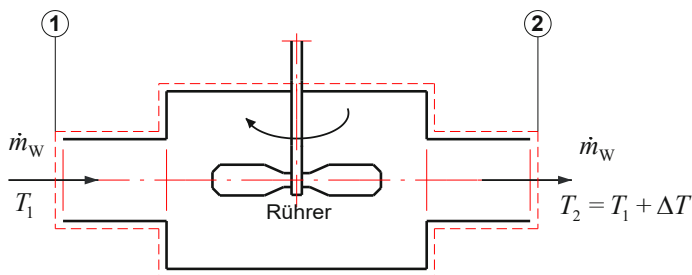
# Aufgabe 2

## 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).

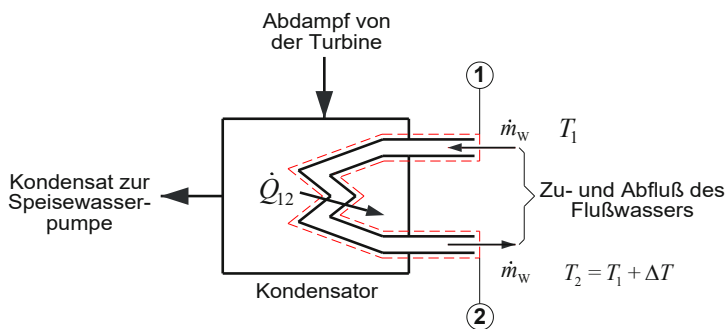


Bild 3.1 System mit Bilanzhülle

## 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:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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



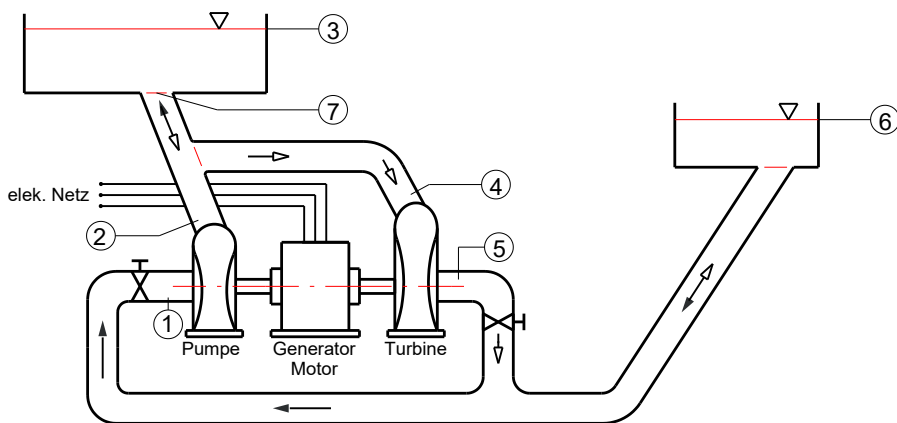
# Aufgabe 4

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.

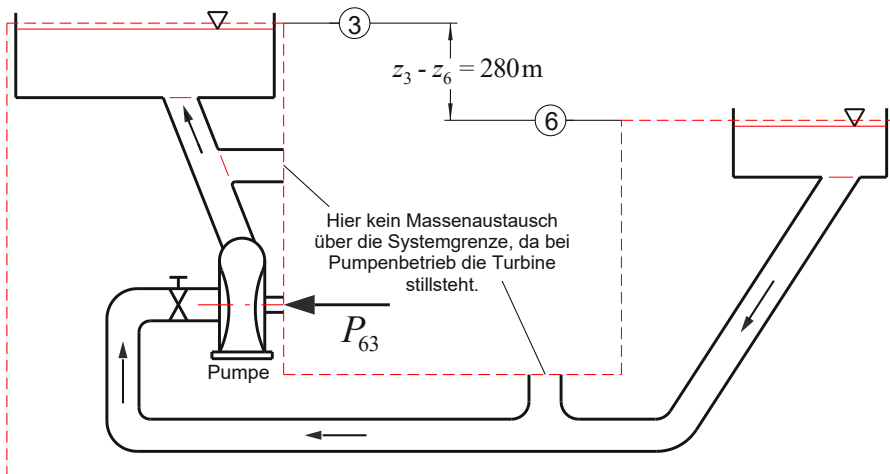
Der Umgebungsdruck beträgt  $p_u = 1 \text{ bar}$ .

**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):

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

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

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

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