

HANSER



Gernot Wilhelms

Übungsaufgaben Technische Thermodynamik

ISBN (Buch): 978-3-446-45121-6

ISBN (E-Book): 978-3-446-45193-3

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-45121-6>

sowie im Buchhandel.

Vorwort zur 6. Auflage

Um den Lehrstoff der Thermodynamik zu erfassen und zu festigen ist eine ausreichende Anzahl didaktisch gut aufbereiteter Aufgaben erforderlich. Dieses Übungsbuch stellt als Ergänzung des Lehrbuches *Cerbe/Wilhelms: Technische Thermodynamik* eine große Anzahl Aufgaben zur Verfügung, die für die Vorlesungen, das selbstständige Nacharbeiten der Vorlesungen und die Vorbereitung auf Prüfungen gedacht sind.

In einer Einleitung wird die grundsätzliche Arbeitsweise zum Lösen der Aufgaben erläutert. Im Hauptteil werden, gegliedert wie im Lehrbuch, ausführlich Beispiele vorgerechnet und Aufgaben gestellt. Im Anhang werden die Lösungsergebnisse der Aufgaben aufgeführt.

Mit den Beispielen soll die vorgeschlagene Arbeitsweise zum Lösen der Aufgaben aufgezeigt werden. Die angegebenen Bezüge auf Gleichungen, Tabellen usw. beziehen sich auf das Lehrbuch. Die Gleichungsnummern stehen am rechten Spaltenrand. Wird eine Gleichung umgeformt, wird die durchzuführende Rechenoperation rechts neben der Gleichung, abgetrennt durch einen senkrechten Strich, angegeben. Folgt eine umgeformte Gleichung nicht aus der unmittelbar vorher stehenden Gleichung, wird die Nummer der Gleichung, auf die Bezug genommen wird, am linken Spaltenrand angegeben. Neben der Gleichungsnummer kann auch hier die Rechenoperation angegeben werden. Nebenrechnungen sind unter der rechten Seite einer Gleichung aufgeführt und durch einen senkrechten Strich unter dem Gleichheitszeichen abgegrenzt. Durch die ausführliche Beschreibung der Lösungswege soll die Fragestellung von ihrem thermodynamischen Gehalt tief durchdrungen werden. Ein reines Nachlesen der Lösungswege liefert nicht den gewünschten Lerneffekt. Studierende sollten zunächst versuchen, die Beispiele selbstständig zu rechnen und erst dann den Lösungsweg nachlesen.

Mit dem aufgezeigten Formalismus sollten die Studierenden in der Lage sein, die aufgeführten Aufgaben selbstständig zu lösen. Durch alternative Lösungswege wie auch durch grafische Darstellungen können die Ergebnisse auf Richtigkeit überprüft werden. Die in Abschnitt 10 angegebenen Lösungsergebnisse geben hier eine zusätzliche Hilfestellung.

Mein herzlicher Dank gilt allen, die durch ihre Anregungen zur Fortentwicklung dieses Übungsbuches beigetragen haben insbesondere meinen Kollegen Prof. Dr.-Ing. Günter Cerbe und Prof. Dr.-Ing. Thomas Diehn, die mich bei der Auswahl und Formulierung der Aufgaben unterstützt und Aufgaben zu diesem Übungsbuch beigesteuert haben.

Die vorliegende Auflage wurde gründlich überarbeitet und um zusätzliche Beispiel-Aufgaben und Zwischenergebnisse erweitert. Diese finden sich als Zahlenwerte in Klammern oder eingetragen in die Diagramme. Die knappe Darstellung der Lösungsergebnisse wurde beibehalten, um zum selbstständigen Erarbeiten der Aufgaben zu motivieren.

Wolfenbüttel, im Frühjahr 2017

Gernot Wilhelms

Methodische Hinweise für das Lösen der Aufgaben

Zunächst muss der Aufgabentext gründlich durchgelesen werden. Dabei werden die in der Aufgabenstellung gegebenen Werte der Größen mit Formelzeichen entweder aufgelistet oder aber in grafische Darstellungen (z. B. in Fließbilder oder Diagramme) eingetragen.

Als nächstes wird das Formelzeichen der gesuchten physikalischen Größe/Größen bestimmt.

Nun wird eine zur Lösung geeignete Formel, in der die gesuchte physikalische Größe vorkommt, hergeleitet oder aus dem Lehrbuch genommen. Handelt es sich hierbei um eine Grundgleichung oder eine Definitionsgleichung, wird deren Benennung in der Zeile vor der Formel mit angeben! Beim handschriftlichen Schreiben der Formelzeichen sind deutlich Großbuchstaben von Kleinbuchstaben zu unterscheiden. Formeln sollen immer in der gleichen Form angeben und dann, je nach Bedarf, in die gewünschte Form umgestellt werden.

Diese Formel wird nun so lange umgeformt, bis auf der linken Seite nur noch die gesuchte Größe steht und sich auf der rechten Seite nur noch bekannte Größen befinden.

Alle Werte der Größen werden nun mit Zahlenwert und Einheit eingesetzt. In der Regel sollen nur SI-Basiseinheiten oder abgeleitete SI-Einheiten ohne Vorsätze für dezimale Vielfache oder Teile eingesetzt werden (Ausnahmen: kg und kmol). Abgeleitete Einheiten, die im Nenner stehen und als Bruch geschrieben sind, werden als Kehrwert gleich mit in den Zähler geschrieben.

Die Einheiten werden nun so weit gekürzt, bis nur noch die Einheit der gesuchten Größe übrigbleibt.

Erst jetzt werden die Zahlenwerte in den Rechner gegeben und der Zahlenwert der gesuchten Größe berechnet.

Die Zustandsgrößen erhalten bei einer Zustandsänderung im Ausgangszustand den Index 1 im Endzustand den Index 2. Falls sich eine Zustandsgröße nicht ändert, erhält sie keinen Index. Zustandsänderungen werden immer mit zwei Benennungen angeben (z. B. isotherme Expansion).

Inhaltsverzeichnis

1	Grundlagen der Thermodynamik	11
1.1	Aufgabe der Thermodynamik	11
1.2	Größen und Einheitensysteme	11
1.3	Thermische Zustandsgrößen	12
1.3.1	Volumen	12
1.3.2	Druck	13
1.3.3	Temperatur	15
1.4	Thermische Zustandsgleichung	16
1.4.1	Thermische Zustandsgleichung eines homogenen Systems	16
1.4.2	Thermische Zustandsgleichung des idealen Gases	16
1.5	Mengenmaße Kilomol und Normvolumen; molare Gaskonstante	17
1.6	Thermische Ausdehnung	19
2	Erster Hauptsatz der Thermodynamik	21
2.1	Energieerhaltung, Energiebilanz	21
2.2	Arbeit am geschlossenen System	21
2.3	Innere Energie	24
2.4	Wärme	25
2.5	Arbeit am offenen System und Enthalpie	25
2.6	Formulierungen des ersten Hauptsatzes der Thermodynamik	27
2.7	Kalorische Zustandsgleichungen	28
2.7.1	Kalorische Zustandsgleichungen eines homogenen Systems	28
2.7.2	Spezifische Wärmekapazitäten eines homogenen Systems	28
2.7.3	Kalorische Zustandsgleichungen des idealen Gases	31
2.7.4	Spezifische Wärmekapazitäten des idealen Gases	31
2.7.5	Molare Wärmekapazitäten des idealen Gases	36
3	Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik	37
3.1	Aussagen des zweiten Hauptsatzes	37

3.2 Entropie	37
3.2.1 Einführung der Entropie	37
3.2.2 Entropiebilanzen	38
3.2.3 T, S -Diagramm	38
3.3 Fundamentalgleichungen	38
3.4 Einfache Zustandsänderungen des idealen Gases	39
3.4.1 Isochore Zustandsänderung	39
3.4.2 Isobare Zustandsänderung	43
3.4.3 Isotherme Zustandsänderung	47
3.4.4 Isentrope Zustandsänderung	50
3.4.5 Polytrope Zustandsänderung	50
3.4.6 Zustandsänderungen in adiabaten Systemen	57
3.5 Kreisprozesse	61
3.6 Adiabate Drosselung	67
3.7 Instationäre Prozesse	68
3.7.1 Füllen eines Behälters	68
3.7.2 Temperaturausgleich	68
3.8 Wärmetransport	69
3.9 Exergie und Anergie	69
3.9.1 Begrenzte Umwandelbarkeit der inneren Energie und der Wärme ...	69
3.9.2 Exergie und Anergie eines strömenden Fluids	69
3.9.3 Exergie und Anergie eines geschlossenen Systems	71
3.9.4 Exergie und Anergie der Wärme	73
3.9.5 Exergieverlust	78
3.9.6 Exergetischer Wirkungsgrad	81
3.9.7 Energie- und Exergie-Flussbild	82
4 Das ideale Gas in Maschinen und Anlagen	91
4.1 Kreisprozesse für Wärme- und Verbrennungskraftanlagen	91
4.2 Kreisprozesse der Gasturbinenanlagen	91
4.2.1 Arbeitsprinzip der Gasturbinenanlagen	91
4.2.2 Joule-Prozess als Vergleichsprozess der Gasturbinenanlage	91

4.2.3	Ericsson-Prozess als Vergleichsprozess der Gasturbinenanlage	92
4.2.4	Der wirkliche Prozess in der Gasturbinenanlage	94
4.3	Kreisprozess des Heißgasmotors	102
4.4	Kreisprozesse der Verbrennungsmotoren	106
4.4.1	Übertragung des Arbeitsprinzips der Motoren in einen Kreisprozess	106
4.4.2	Otto-Prozess als Vergleichsprozess des Verbrennungsmotors	106
4.4.3	Diesel-Prozess als Vergleichsprozess des Verbrennungsmotors	106
4.4.4	Seiliger-Prozess als Vergleichsprozess des Verbrennungsmotors ..	110
4.4.5	Der wirkliche Prozess in den Verbrennungsmotoren	111
4.5	Kolbenverdichter	120
5	Der Dampf und seine Anwendung in Maschinen und Anlagen	125
5.1	Das reale Verhalten der Stoffe	125
5.2	Wasserdampf	127
5.3	Dampfkraftanlagen	144
5.4	Kombiniertes Gas-Dampf-Kraftwerk (GUD-Prozess)	152
5.5	Organische Rankine-Prozesse (ORC)	153
5.6	Linkslaufende Kreisprozesse mit Dämpfen	155
6	Gemische	161
6.1	Die Zusammensetzungen von Gemischen	161
6.2	Ideale Gemische	161
6.3	Gemisch idealer Gase	161
6.4	Gas-Dampf-Gemisch; Feuchte Luft	162
6.5	Reale Gemische	167
7	Strömungsvorgänge	172
7.1	Kontinuitätsgleichung	172
7.2	Der erste Hauptsatz der Thermodynamik für Strömungsvorgänge	172
7.2.1	Arbeitsprozesse	172
7.2.2	Strömungsprozesse	174

7.3	Kraftwirkung bei Strömungsvorgängen	174
7.4	Düsen- und Diffusorströmung	174
8	Wärmeübertragung	175
8.1	Arten der Wärmeübertragung	175
8.2	Wärmeleitung	175
8.2.1	Ebene Wand	175
8.2.2	Zylindrische Wand	176
8.2.3	Hohlkugelwand	178
8.3	Konvektiver Wärmeübergang	178
8.3.1	Wärmeübergang bei erzwungener Strömung	178
8.3.2	Wärmeübergang bei freier Strömung	181
8.3.3	Wärmeübergang beim Kondensieren und Verdampfen	185
8.4	Temperaturstrahlung	185
8.5	Wärmedurchgang	188
8.6	Wärmeübertrager	193
9	Energieumwandlung durch Verbrennung und in Brennstoffzellen	199
9.1	Umwandlung der Brennstoffenergie durch Verbrennung	199
9.2	Verbrennungsrechnung	200
9.2.1	Feste und flüssige Brennstoffe	200
9.2.2	Gasförmige Brennstoffe	201
9.2.3	Näherungslösungen	204
9.3	Verbrennungskontrolle	205
9.4	Theoretische Verbrennungstemperatur	208
9.5	Abgasverlust und feuerungstechnischer Wirkungsgrad	209
9.6	Abgastaupunkt	213
9.7	Emissionen aus Verbrennungsanlagen	214
9.8	Chemische Reaktionen und Irreversibilität der Verbrennung	214
9.9	Brennstoffzellen	214
10	Lösungsergebnisse der Aufgaben	215

2 Erster Hauptsatz der Thermodynamik

2.1 Energieerhaltung, Energiebilanz

2.2 Arbeit am geschlossenen System

Beispiel 2.1

Eine Glaskapillare mit einer inneren Querschnittsfläche von 5 mm^2 ist auf der einen Seite zugeschmolzen und auf der anderen Seite durch einen 10 cm langen Quecksilberfaden ($\rho_{\text{Hg}} = 13\,590 \text{ kg/m}^3$) verschlossen. Der von der Glaskapillaren und dem Quecksilber begrenzte Raum ist mit Stickstoff gefüllt. Stickstoff soll näherungsweise als ideales Gas angenommen werden. Der Umgebungsdruck beträgt 98 kPa , die Umgebungstemperatur 22°C .

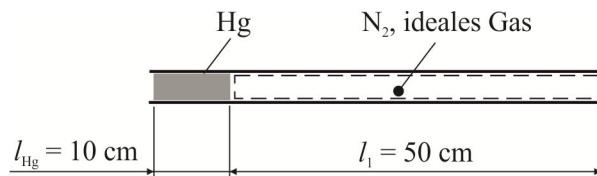
- Liegt die Kapillare waagerecht, beträgt die Länge des eingeschlossenen Gasvolumens 50 cm . Berechnen Sie für diese Lage die Dichte des Gases ($t_{\text{Gas}} = t_{\text{amb}}$).
- Die Glaskapillare wird nun senkrecht gestellt mit der zugeschmolzenen Seite nach unten. Welche Länge hat nun das eingeschlossene Gasvolumen ($t_{\text{Gas}} = t_{\text{amb}}$)?

In der senkrechten Lage wird nun die Temperatur des Gases um 78 K erhöht.

- Welche Länge hat nun das eingeschlossene Gasvolumen?
- Wie groß ist die verrichtete Volumenänderungsarbeit?
- Welche Arbeit wird am Quecksilber verrichtet?

Gegeben:

$$\begin{aligned} A &= 5 \text{ mm}^2 \\ p_{\text{amb}} &= 98 \text{ kPa} \\ t_{\text{amb}} &= t_1 = 22^\circ\text{C} \\ \rho_{\text{Hg}} &= 13\,590 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$



Zu a): Gesucht: ρ_1

Thermische Zustandsgleichung des idealen Gases:

$$\begin{aligned} (\text{Gl 1.16}) \quad p_1 V_1 &= m R_i T_1 & | : m \\ \left| v = \frac{V}{m} \rightarrow \frac{V_1}{m} = v_1 \right. & & \text{(Gl 1.1)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p_1 v_1 &= R_i T_1 & | \cdot \rho : (R_i T_1) \\ \left| \rho = \frac{1}{v} \rightarrow v_1 = \frac{1}{\rho_1} \right. & & \text{(Gl 1.2)} \end{aligned}$$

$$\rho_1 = \frac{p_1}{R_i T_1} \quad | \quad R_i = 296,8 \text{ J/(kg K)} \quad (\text{T 1.5})$$

Kräftegleichgewicht am Quecksilberfaden
(Haftungskräfte werden vernachlässigt):

$$\sum F_{ix} = 0 : p_{\text{amb}} A - p_1 A = 0 \rightarrow p_1 = p_{\text{amb}}$$

$$\rho_1 = \frac{98 \cdot 10^3 \text{ Pa}}{296,8 \text{ J} \cdot 295,15 \text{ K}} \frac{\text{N}}{\text{Pa m}^2} \frac{\text{J}}{\text{Nm}}$$

$$\underline{\underline{\rho_1 = 1,1187 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}}$$

Zu b): Gegeben: $t_2 = t_{\text{amb}} = 22 \text{ }^{\circ}\text{C}$ Gesucht: l_2

$$(\text{Gl 1.7}) \quad p_2 = p_{\text{amb}} + \rho_{\text{Hg}} g h$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Die Längenänderung des Quecksilberfadens} \\ \text{hat keine Auswirkung auf den Druck.} \\ \rho_{\text{Hg}} = 13\,590 \text{ kg/m}^3 \\ h = l_{\text{Hg}} = 10 \text{ cm} \\ g = 9,81 \text{ m/s}^2 \end{array} \right| \quad (\text{T 1.6})$$

$$p_2 = 98 \cdot 10^3 \text{ Pa} + 13\,590 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,1 \text{ m} \frac{\text{Ns}^2}{\text{kg m}} \frac{\text{Pa m}^2}{\text{N}}$$

$$p_2 = 111\,332 \text{ Pa}$$

Kompression bei konstanter Temperatur 1 \rightarrow 2:

$$(\text{Gl 1.17}) \quad p_2 V_2 = p_1 V_1$$

$$\left. \begin{array}{l} p_2 l_2 \cancel{\text{A}} = p_1 l_1 \cancel{\text{A}} \\ l_2 = \frac{p_1}{p_2} l_1 = \frac{98 \cdot 10^3 \text{ Pa}}{111\,332 \text{ Pa}} \cdot 50 \text{ cm} = 44,01 \text{ cm} \end{array} \right| : p_2$$

Zu c): Gegeben: $t_3 - t_2 = 78 \text{ K}$ Gesucht: l_3

Temperaturerhöhung bei konstantem Druck 2 \rightarrow 3:

$$(\text{Gl 1.18}) \quad \frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

$$\frac{V_3}{V_2} = \frac{T_3}{T_2}$$

$$\frac{l_3}{l_2} = \frac{T_3}{T_2} \quad |l_2$$

$$\underline{\underline{l_3}} = \frac{T_3}{T_2} l_2 = \frac{373,15 \text{ K}}{295,15 \text{ K}} 44,01 \text{ cm} = 55,64 \text{ cm}$$

2

Zu d): Gesucht: W_{v23}

Temperaturerhöhung bei konstantem Druck 2 → 3:

$$(\text{Gl 2.1}) \quad W_{v23} = - \int_2^3 p \, dV$$

$$| p = \text{const}$$

$$W_{v23} = p (V_2 - V_3) = p (l_2 - l_3) A$$

$$W_{v23} = 111\,332 \text{ Pa} (0,4401 - 0,5564) \text{ m} 5 \frac{\text{m}^2}{10^6 \text{ Pa m}^2} \frac{\text{N}}{\text{Nm}} \frac{\text{J}}{\text{Nm}}$$

$$\underline{\underline{W_{v23} = -0,0647 \text{ J}}}$$

Zu e): Gesucht: W_{Hg}

$$W_{\text{Hg}} = m_{\text{Hg}} g \Delta h$$

$$\left| \rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{l A} \rightarrow m_{\text{Hg}} = \rho_{\text{Hg}} l_{\text{Hg}} A \right. \quad (\text{Gl 1.2})$$

$$W_{\text{Hg}} = \rho_{\text{Hg}} l_{\text{Hg}} A g (l_3 - l_2)$$

$$\begin{aligned} W_{\text{Hg}} &= 13\,590 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} 0,1 \text{ m} 5 \frac{\text{m}^2}{10^6} 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \\ &\cdot (0,5564 - 0,4401) \text{ m} \frac{\text{Ns}^2}{\text{kg m N}} \frac{\text{J}}{\text{Nm}} \end{aligned}$$

$$\underline{\underline{W_{\text{Hg}} = 0,007752 \text{ J}}}$$

alternativ:

$$W_{\text{n12}} = - \int_1^2 (p - p_b) \, dV \quad (\text{Gl 2.6})$$

$$\begin{aligned}
 & \left. \begin{aligned} p &= p_2 = \text{const} \\ \text{Die thermische Ausdehnung des Quecksilberfadens} \\ \text{hat keine Auswirkung auf den Druck.} \end{aligned} \right. \\
 & p_b = p_{\text{amb}} \\
 & W_{n23} = (p_2 - p_{\text{amb}}) (V_2 - V_3) \\
 & W_{n23} = (p_2 - p_{\text{amb}}) (l_2 - l_3) A \\
 & W_{n23} = (111\,332 - 98\,000) \text{Pa} (0,4401 - 0,5561) \text{m} 5 \frac{\text{m}^2}{10^6} \\
 & W_{n23} = -13\,332 \frac{\text{Pa}}{10^6} \frac{0,58 \frac{\text{m}^3}{\text{N}}}{\text{Pa m}^2} \frac{\text{N}}{\text{N m}} \\
 & \underline{W_{n23} = -0,007752 \text{ J}}
 \end{aligned}$$

Aufgabe 2.1

Ein Niederdruckspeicher besteht aus einem zylindrischen Behälter und einer Scheibe, die wie ein Kolben das Gas (ideales Gas) im Zylinder von der Atmosphäre oberhalb der Scheibe trennt. Die Scheibe wird gegenüber dem Zylinder durch eine Rollmembran abgedichtet. Sie wirkt mit einer Gewichtskraft von 750 kN auf das Gas. Die Querschnittsfläche des Zylinders beträgt 250 m² und der Umgebungsdruck 101 kPa.

a) Welcher Druck herrscht im Gas?

Das Gas erwärmt sich infolge Sonneneinstrahlung. Dabei wird die Scheibe reibungsfrei um 10 cm angehoben.

b) Wie groß ist die verrichtete Volumenänderungsarbeit?

c) Welche Nutzarbeit wird bei dieser Erwärmung vom Gas abgegeben?

2.3 Innere Energie

Aufgabe 2.2

In einem adiabaten Zylinder sind von einem Kolben 10 kg Stickstoff bei 200 kPa und 20 °C eingeschlossen. Stickstoff soll näherungsweise als ideales Gas angenommen werden. Durch Zufuhr von 50 kJ Dissipationsenergie, bei konstant bleibendem Druck, erhöht sich die Temperatur um 40 K.

a) Wie groß ist die abgegebene Volumenänderungsarbeit?

b) Um welchen Wert ändert sich die innere Energie des Gases?

c) Skizzieren Sie die Zustandsänderung in einem p, V -Diagramm und tragen Sie die Volumenänderungsarbeit als Fläche ein.

2.4 Wärme

Aufgabe 2.3

In einem Zylinder befindet sich Luft, die durch einen konstant belasteten Zylinder auf einen Druck von 200 kPa gehalten wird. Durch Zufuhr von 200 kJ Wärme vergrößert sich das Volumen der Luft reversibel um 100 l.

Wie groß ist die Änderung der inneren Energie?

2.5 Arbeit am offenen System und Enthalpie

Beispiel 2.2

In einem gekühlten Verdichter werden pro Sekunde 2 kg Luft komprimiert. Luft soll näherungsweise als ideales Gas angenommen werden. Die Luft tritt mit 100 kPa und 20 °C in den Verdichter ein und verlässt ihn mit 500 kPa und 191,52 °C. Dabei wird der Luft eine technische Leistung von 386,16 kW zugeführt. 41,82 kW werden dissipiert. Durch die Kühlung wird der Luft ein Wärmestrom von 41,82 kW entzogen. Die Änderung der kinetischen und der potenziellen Energie soll vernachlässigt werden.

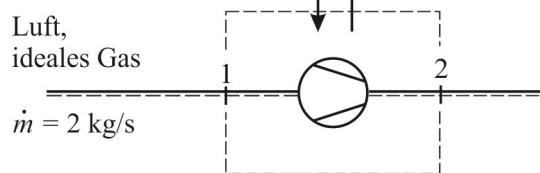
- Wie groß ist der reversible Anteil der technischen Leistung?
- Wie ändert sich der Enthalpiestrom der Luft während des Durchströmens?
- Wie groß ist die Änderung des inneren Energiestroms?

Gegeben:

$$\dot{W}_{\text{diss12}} = 41,82 \text{ kW}$$

$$c_2 \approx c_1, \quad z_2 = z_1$$

$$\dot{W}_{\text{t12}} = 386,16 \text{ kW} \quad \dot{Q}_{12} = -41,82 \text{ kW}$$



$$p_1 = 100 \text{ kPa} \quad p_2 = 500 \text{ kPa} \\ t_1 = 20^\circ\text{C} \quad t_2 = 191,52^\circ\text{C}$$

Zu a): Gesucht: $\dot{W}_{\text{t12}}^{\text{rev}}$

$$\dot{W}_{\text{t12}} = \dot{W}_{\text{t12}}^{\text{rev}} + \dot{W}_{\text{diss12}} \quad \left| \frac{d}{d\tau} \right. \quad (\text{Gl 2.11})$$

$$\dot{W}_{\text{t12}} = \dot{W}_{\text{t12}}^{\text{rev}} + \dot{W}_{\text{diss12}} \quad \left| -\dot{W}_{\text{diss12}} \right.$$

$$\dot{W}_{\text{t12}}^{\text{rev}} = \dot{W}_{\text{t12}} - \dot{W}_{\text{diss12}} = (386,16 - 41,82) \text{ kW}$$

$$\underline{\underline{\dot{W}_{\text{t12}}^{\text{rev}} = 344,34 \text{ kW}}}$$

Zu b): Gesucht: $\dot{H}_2 - \dot{H}_1$

1. HS der Thermodynamik für offene Systeme:

$$W_{t12} + Q_{12} = H_2 - H_1 + \frac{m}{2} (c_2^2 - c_1^2) - mg (z_2 - z_1) \quad (\text{Gl 2.17})$$

 | Vernachlässigung der Änderung der kinetischen und der potenziellen Energie.

$$W_{t12} + Q_{12} = H_2 - H_1 \quad \left| \frac{d}{d\tau} () \right.$$

$$\dot{W}_{t12} + \dot{Q}_{12} = \dot{H}_2 - \dot{H}_1$$

$$\underline{\underline{\dot{H}_2 - \dot{H}_1}} = (386,16 - 41,82) \text{ kW} = \underline{\underline{344,34 \text{ kW}}}$$

Zu c): Gesucht: $\dot{U}_2 - \dot{U}_1$

Definition der Enthalpie:

$$H = U + pV \quad \left| \frac{d}{d\tau} () \right. \quad (\text{Gl 2.12})$$

$$\dot{H} = \dot{U} + p\dot{V}$$

$$\dot{H}_2 - \dot{H}_1 = \dot{U}_2 + p_2\dot{V}_2 - (\dot{U}_1 + p_1\dot{V}_1)$$

$$\dot{H}_2 - \dot{H}_1 = \dot{U}_2 - \dot{U}_1 + p_2\dot{V}_2 - p_1\dot{V}_1 \quad \left| -p_2\dot{V}_2 + p_1\dot{V}_1 \right.$$

$$\dot{U}_2 - \dot{U}_1 = \dot{H}_2 - \dot{H}_1 - p_2\dot{V}_2 + p_1\dot{V}_1$$

 | Thermische Zustandsgleichung des idealen Gases:

$$pV = mR_iT \quad \left| \frac{d}{d\tau} () \right. \quad (\text{Gl 1.16})$$

$$p\dot{V} = \dot{m}R_iT \quad \left| : p \right.$$

$$\dot{V}_1 = \frac{\dot{m}R_iT_1}{p_1}$$

$$\left| R_i = 287,1 \text{ J/(kg K)} \right. \quad (\text{T 1.5})$$

$$\dot{V}_1 = \frac{2 \text{ kg} \ 287,1 \text{ J} \ 293,15 \text{ K}}{\text{s} \ \text{kg K} \ 100 \cdot 10^3 \text{ Pa}} \frac{\text{Nm}}{\text{J}} \frac{\text{Pa m}^2}{\text{N}}$$

$$\dot{V}_1 = 1,683 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$\dot{V}_2 = \frac{2 \text{ kg} \ 287,1 \text{ J} \ 464,67 \text{ K}}{\text{s} \ \text{kg K} \ 500 \cdot 10^3 \text{ Pa}} \frac{\text{Nm}}{\text{J}} \frac{\text{Pa m}^2}{\text{N}} = 0,534 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$\dot{U}_2 - \dot{U}_1 = 344\,340 \text{ W} + (-500 \cdot 10^3 \cdot 0,534 + 100 \cdot 10^3 \cdot 1,683) \text{ Pa} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$\dot{U}_2 - \dot{U}_1 = 344\,340 \text{ W} - 98\,487 \text{ Pa} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \frac{\text{Pa}}{\text{m}^2} \frac{\text{m}}{\text{m}^2} \frac{\text{W}}{\text{J}} \frac{\text{J}}{\text{W}}$$

$$\dot{U}_2 - \dot{U}_1 = 245\,853 \text{ W} \frac{\text{kW}}{\text{W} 1000} = 245,853 \text{ kW}$$

Aufgabe 2.4

In einer Turbine werden stündlich 10 000 kg Helium von 3,5 MPa, 950 °C adiabat auf 500 kPa, 480 °C irreversibel expandiert. Helium soll näherungsweise als ideales Gas angenommen werden. Dabei wird eine Leistung von 6779,75 kW abgegeben und eine Leistung von 4104,61 kW dissipiert. Die Änderung der kinetischen und der potenziellen Energie soll vernachlässigt werden.

- Wie groß ist die Änderung des Enthalpiestromes?
- Wie groß ist die reversible technische Leistung?

2.6 Formulierungen des ersten Hauptsatzes der Thermodynamik

Aufgabe 2.5

In einem Druckbehälter befindet sich 1 kmol eines idealen Gases bei einer Temperatur von 20 °C. Das Manometer zeigt einen Druck von 400 kPa an. Der Umgebungsdruck beträgt 101,3 kPa. $R_i = 4122 \text{ J/(kg K)}$.

- Wie groß ist das Behältervolumen?
 - Wie groß ist das spezifische Volumen des Gases?
- Durch Zufuhr von 623,6 kJ Wärme steigt der Druck im Behälter. Das Manometer zeigt nun einen Druck von 485,5 kPa an.
- Wie groß ist die Änderung der inneren Energie des Gases?
 - Wie groß ist die Änderung der Enthalpie?

Aufgabe 2.6

In einem offenen System werden pro Sekunde 10 kg Luft von 100 kPa, 20 °C reibungsbehaftet, adiabat auf 500 kPa, 300 °C verdichtet. Luft soll näherungsweise als ideales Gas angenommen werden. Dabei wird eine Leistung von 2814,56 kW zugeführt und eine Leistung von 884,13 kW dissipiert. Die Änderung der kinetischen und der potenziellen Energie soll vernachlässigt werden.

- Wie groß ist die reversible technische Leistung?
- Wie groß ist die Änderung des Enthalpiestromes und
- die Änderung des Stromes der inneren Energie?

6.5 Reale Gemische

Beispiel 6.2

In einem adiabaten Zylinder, der durch einen Kolben verschlossen ist, befindet sich ein NH₃-H₂O-Nassdampf bei 4 bar und 90 °C. Der Dampfgehalt des Nassdampfes beträgt 61 %, die Masse des Nassdampfes beträgt 1 kg.

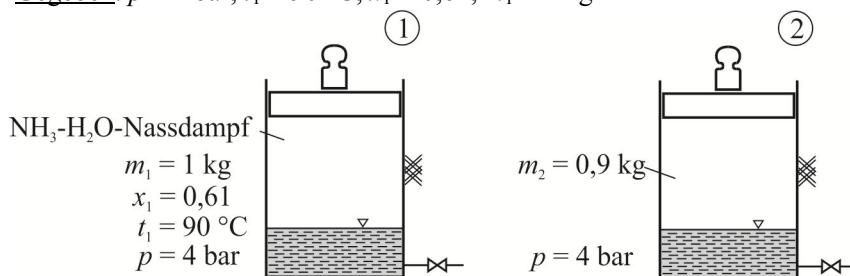
Bestimmen Sie mit dem h, μ_{NH_3} -Diagramm für NH₃-H₂O-Gemische

- die Massen der siedenden Flüssigkeit und des gesättigten Dampfes,
- die NH₃-Massenanteile der siedenden Flüssigkeit, des gesättigten Dampfes und des Nassdampfes und
- die spezifischen Enthalpien der siedenden Flüssigkeit, des gesättigten Dampfes und des Nassdampfes.

Dem Nassdampf werden isobar 0,1 kg der siedenden Flüssigkeit entnommen. Bestimmen Sie

- die spezifische Enthalpie des Nassdampfes nach der Entnahme der siedenden Flüssigkeit,
- den NH₃-Massenanteil des Nassdampfes nach der Entnahme der siedenden Flüssigkeit und den sich einstellenden Dampfgehalt.

Zu a): Gegeben: $p = 4 \text{ bar}$, $t_1 = 90 \text{ }^\circ\text{C}$, $x_1 = 0,61$, $m_1 = 1 \text{ kg}$



Gesucht: m_1' , m_1''

$$x = \frac{m''}{m' + m''} = \frac{m''}{m} \quad (\text{Gl 5.4})$$

$$\underline{\underline{m_1''}} = x_1 \cdot m_1 = 0,61 \cdot 1 \text{ kg} = \underline{\underline{0,61 \text{ kg}}}$$

$$\underline{\underline{m_1'}} = (1 - x_1) \cdot m_1 = (1 - 0,61) \cdot 1 \text{ kg} = \underline{\underline{0,39 \text{ kg}}}$$

alternativ:

$$m_1' = m_1 - m_1'' = 1 \text{ kg} - 0,61 \text{ kg} = 0,39 \text{ kg}$$

Zu b): Gesucht: $\mu_{\text{NH}_3}^{'}, \mu_{\text{NH}_3}^{''}, \mu_{\text{NH}_3}^1$

Im h, μ_{NH_3} -Diagramm für $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ -Gemische wird für einen Druck von 4 bar und eine Temperatur von 90 °C die Nassdampf-Isotherme konstruiert (siehe übernächste Seite). Auf der Siede- bzw. der Kondensationslinie können die NH_3 -Massenanteile der siedenden Flüssigkeit bzw. des gesättigten Dampfes abgelesen werden:

$$\underline{\underline{\mu_{\text{NH}_3}^1 = 0,2, \mu_{\text{NH}_3}^{''} = 0,85}}$$

NH_3 -Massenbilanz:

$$\mu_{\text{NH}_3}^1 \cdot m_1 = \mu_{\text{NH}_3}^1 \cdot m_1' + \mu_{\text{NH}_3}^{''} \cdot m_1''$$

$$\mu_{\text{NH}_3}^1 = \frac{\mu_{\text{NH}_3}^1 \cdot m_1' + \mu_{\text{NH}_3}^{''} \cdot m_1''}{m_1}$$

$$\underline{\underline{\mu_{\text{NH}_3}^1 = \frac{0,2 \cdot 0,39 \text{ kg} + 0,85 \cdot 0,61 \text{ kg}}{1 \text{ kg}} = 0,5965}}$$

alternativ:

Die Nassdampf-Isotherme wird im Verhältnis der Massen 0,61 kg und 0,39 kg geteilt. Für den so bestimmten Zustandspunkt 1 kann der NH_3 -Massenanteil abgelesen werden.

Zu c): Gesucht: $h_1^{'}, h_1^{''}, h_1^1$

Die spezifischen Enthalpien können aus dem h, μ_{NH_3} -Diagramm abgelesen werden:

$$\underline{\underline{h_1^1 = 300 \text{ kJ/kg}, h_1^{''} = 1930 \text{ kJ/kg}, h_1^1 = 1294,30 \text{ kJ/kg}}}$$

alternativ:

$$m_1 \cdot h_1 = m_1^1 \cdot h_1^1 + m_1^{''} \cdot h_1^{''}$$

$$h_1 = \frac{m_1^1 \cdot h_1^1 + m_1^{''} \cdot h_1^{''}}{m_1}$$

$$h_1 = \frac{0,39 \text{ kg} \cdot 300 \text{ kJ/kg} + 0,61 \text{ kg} \cdot 1930 \text{ kJ/kg}}{1 \text{ kg}}$$

$$h_1 = 1294,30 \text{ kJ/kg}$$

Zu d): Gegeben: $\Delta m' = -0,1 \text{ kg}$, $p_2 = p_1 = 4 \text{ bar}$ Gesucht: h_2

Massenbilanz:

$$m_2 = m_1 - |\Delta m'| = 1 \text{ kg} - 0,1 \text{ kg} = 0,9 \text{ kg}$$

Energiebilanz:

$$m_2 \cdot h_2 = m_1 \cdot h_1 - |\Delta m'| \cdot h_1'$$

$$h_2 = \frac{m_1 \cdot h_1 - |\Delta m'| \cdot h_1'}{m_2}$$

$$h_2 = \frac{1 \text{ kg} \cdot 1294,30 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 0,1 \text{ kg} \cdot 300 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{0,9 \text{ kg}} = \underline{\underline{1404,78 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}}$$

Zu e): Gesucht: $\mu_{\text{NH}_3 2}$, x_2

NH_3 -Massenbilanz:

$$m_{\text{NH}_3 2} = \mu_{\text{NH}_3 1} \cdot m_1 - \mu_{\text{NH}_3 1}' \cdot |\Delta m'|$$

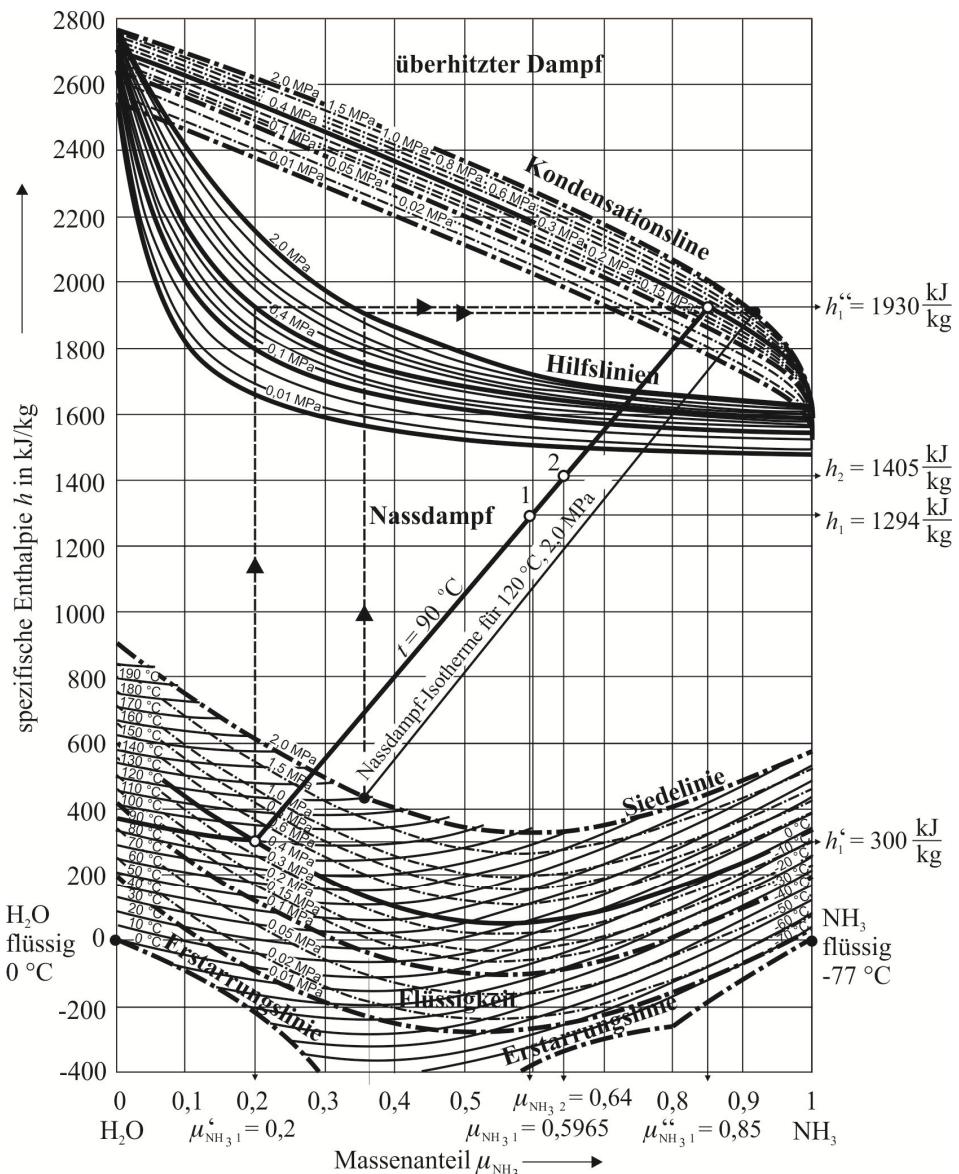
$$m_{\text{NH}_3 2} = 0,5965 \cdot 1 \text{ kg} - 0,2 \cdot 0,1 \text{ kg} = 0,5765 \text{ kg}$$

$$\mu_{\text{NH}_3 2} = \frac{m_{\text{NH}_3 2}}{m_2} = \frac{0,5765 \text{ kg}}{0,9 \text{ kg}} = \underline{\underline{0,6406}}$$

Mit der spezifischen Enthalpie und der Konzentration kann man den Zustand 2 in das Diagramm eintragen. Konstruiert man die Nassdampf-Isotherme durch den Zustandspunkt 2 kann man über die Hebelarme den Dampfgehalt bestimmen.

$$\underline{\underline{x_2 = 67,8 \%}}$$

Die siedende Flüssigkeit und der gesättigte Dampf stehen im Gleichgewicht. Mischt man sie, ändern sich weder die Temperatur noch die Zusammensetzung der Flüssigkeit oder des Dampfes. Der Mischpunkt liegt im h, μ_{NH_3} -Diagramm nach der Mischungsregel auf der Verbindungsgeraden der Zustandspunkte von siedender Flüssigkeit und gesättigtem Dampf. Seine Lage auf der Geraden hängt von den Massen der siedenden Flüssigkeit und des gesättigten Dampfes ab. Der Mischpunkt teilt die Strecke zwischen den Zustandspunkten von siedender Flüssigkeit und gesättigtem Dampf im umgekehrten Verhältnis der Massen.



Aufgabe 6.12

Ein H_2O -Sattdampfmassenstrom ($\dot{m}_1 = 0,01 \text{ kg/s}$, Temperatur: $t_1 = 7 \text{ }^\circ\text{C}$) und ein H_2O -LiBr-Lösungsmassenstrom ($\dot{m}_2 = 0,2 \text{ kg/s}$, Temperatur: $t_2 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$, H_2O -Massenanteil: $\mu_{\text{H}_2\text{O}} = 0,4$) werden isobar und adiabat gemischt. Das entstehende Gemisch soll im thermodynamischen Gleichgewicht sein. Zur Lösung soll das $h, \mu_{\text{H}_2\text{O}}$ -Diagramm von H_2O -LiBr-Lösungen verwendet werden.

Bestimmen Sie

- den Druck des Sattdampfstromes,
- den H_2O -Massenanteil des Gemisches und
- die spezifischen Enthalpien der beiden zu mischenden Stoffströme.
- Berechnen Sie die spezifische Enthalpie des Gemisches.
- Bestimmen Sie für den Mischzustand den Massenstrom der siedenden Lösung und den Massenstrom des gesättigten Wasserdampfes.
- Geben Sie die Temperatur des Gemisches an.

Aufgabe 6.13

Zu einer Ammoniak-Wasser-Lösung ($m_1 = 1 \text{ kg}$, $t_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $\mu_{\text{NH}_3,1} = 0,6$) wird isobar Wasser ($m_2 = 1 \text{ kg}$, $t_2 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$) zugegeben.

- Wie groß ist der sich einstellende NH_3 -Massenanteil?
- Bestimmen Sie mit dem h, μ_{NH_3} -Diagramm die Mischungsenthalpie.

Aufgabe 6.14

Bei $20 \text{ }^\circ\text{C}$ werden in 10 l Wasser 6 kg LiBr gelöst.

Wie groß ist die Siedetemperatur des Gemisches bei 1 bar?