

Gernot Wilhelms
Henning Zindler

Übungsaufgaben Technische Thermodynamik



7., überarbeitete Auflage

HANSER

Grundlagen der Thermodynamik

1

Erster Hauptsatz der Thermodynamik

2

Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik

3

Das ideale Gas in Maschinen und Anlagen

4

Der Dampf und seine Anwendung
in Maschinen und Anlagen

5

Gemische

6

Strömungsvorgänge

7

Wärmeübertragung

8

Energieumwandlung durch Verbrennung und
in Brennstoffzellen

9

Lösungsergebnisse der Aufgaben

10



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

Gernot Wilhelms/Henning Zindler

Übungsaufgaben Technische Thermodynamik

7., überarbeitete Auflage

Mit 53 vorgerechneten Beispielen und 188 Aufgaben

HANSER

Die Autoren:

Dr.-Ing. Gernot Wilhelms

Professor für Energietechnik, Kältetechnik und Technische Mechanik
an der Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften, Wolfenbüttel

Dr.-Ing. Henning Zindler

Professor für Energietechnik/Energiewirtschaft
an der Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften, Wolfenbüttel



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

Lektorat: Frank Katzenmayer

Herstellung: Frauke Schafft

Covergestaltung: Max Kostopoulos

Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München

Titelbild: Siemens-Pressbild

Satz: Prof. Dr.-Ing. Gernot Wilhelms, Wolfenbüttel

Druck und Bindung: CPI books GmbH, Leck

Printed in Germany

Print-ISBN 978-3-446-46781-1

E-Book-ISBN 978-3-446-47456-7

Vorwort zur 7. 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.

Unser 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 beigeleitet haben.

Die vorliegende Auflage wurde gründlich überarbeitet, an die 19. Auflage des Lehrbuches angepasst und durch Aufgaben zu Entropiebilanzen und zur Wärmeübertragung erweitert. Die knappe Darstellung der Lösungsergebnisse wurde beibehalten, um zum selbstständigen Erarbeiten der Aufgaben zu motivieren.

Wolfenbüttel, im Sommer 2022

Gernot Wilhelms
Henning Zindler

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 angegeben! Beim handschriftlichen Schreiben der Formelzeichen sind deutlich Großbuchstaben von Kleinbuchstaben zu unterscheiden. Formeln sollen immer in der gleichen Form angegeben 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 angegeben (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	39
3.3	Fundamentalgleichungen	39
3.4	Einfache Zustandsänderungen des idealen Gases	40
3.4.1	Isochore Zustandsänderung	40
3.4.2	Isobare Zustandsänderung	44
3.4.3	Isotherme Zustandsänderung	48
3.4.4	Isentrope Zustandsänderung	51
3.4.5	Polytrope Zustandsänderung	51
3.4.6	Zustandsänderungen in adiabaten Systemen	58
3.5	Kreisprozesse	62
3.6	Adiabate Drosselung	68
3.7	Instationäre Prozesse	69
3.7.1	Füllen eines Behälters	69
3.7.2	Temperaturausgleich	69
3.8	Wärmetransport	70
3.9	Exergie und Anergie	70
3.9.1	Begrenzte Umwandelbarkeit der inneren Energie und der Wärme ...	70
3.9.2	Exergie und Anergie eines strömenden Fluids	70
3.9.3	Exergie und Anergie eines geschlossenen Systems	72
3.9.4	Exergie und Anergie der Wärme	74
3.9.5	Exergieverlust	79
3.9.6	Exergetischer Wirkungsgrad	82
3.9.7	Energie- und Exergie-Flussbild	83
4	Das ideale Gas in Maschinen und Anlagen	92
4.1	Kreisprozesse für Wärme- und Verbrennungskraftanlagen	92
4.2	Kreisprozesse der Gasturbinenanlagen	92
4.2.1	Arbeitsprinzip der Gasturbinenanlagen	92
4.2.2	Joule-Prozess als Vergleichsprozess der Gasturbinenanlage	92

4.2.3	Ericsson-Prozess als Vergleichsprozess der Gasturbinenanlage	93
4.2.4	Der wirkliche Prozess in der Gasturbinenanlage	95
4.3	Kreisprozess des Heißgasmotors	103
4.4	Kreisprozesse der Verbrennungsmotoren	108
4.4.1	Übertragung des Arbeitsprinzips der Motoren in einen Kreisprozess	108
4.4.2	Otto-Prozess als Vergleichsprozess des Verbrennungsmotors	108
4.4.3	Diesel-Prozess als Vergleichsprozess des Verbrennungsmotors	108
4.4.4	Seiliger-Prozess als Vergleichsprozess des Verbrennungsmotors ..	112
4.4.5	Der wirkliche Prozess in den Verbrennungsmotoren	113
4.5	Kolbenverdichter	122
5	Der Dampf und seine Anwendung in Maschinen und Anlagen	127
5.1	Das reale Verhalten der Stoffe	127
5.2	Wasserdampf	129
5.3	Dampfkraftanlagen	146
5.4	Kombiniertes Gas-Dampf-Kraftwerk (GUD-Prozess)	154
5.5	Organische Rankine-Prozesse (ORC)	155
5.6	Linkslaufende Kreisprozesse mit Dämpfen	157
6	Gemische	163
6.1	Die Zusammensetzungen von Gemischen	163
6.2	Ideale Gemische	163
6.3	Gemisch idealer Gase	163
6.4	Gas-Dampf-Gemisch; Feuchte Luft	164
6.5	Reale Gemische	169
7	Strömungsvorgänge	174
7.1	Kontinuitätsgleichung	174
7.2	Der erste Hauptsatz der Thermodynamik für Strömungsvorgänge	174
7.2.1	Arbeitsprozesse	174
7.2.2	Strömungsprozesse	176

7.3	Kraftwirkung bei Strömungsvorgängen	176
7.4	Düsen- und Diffusorströmung	176
8	Wärmeübertragung	177
8.1	Arten der Wärmeübertragung	177
8.2	Wärmeleitung	177
8.2.1	Ebene Wand	177
8.2.2	Zylindrische Wand	178
8.2.3	Hohlkugelwand	180
8.3	Konvektiver Wärmeübergang	180
8.3.1	Wärmeübergangsbeziehungen	180
8.3.2	Ähnlichkeitstheorie des Wärmeübergangs	181
8.3.3	Wärmeübergang beim Kondensieren und Verdampfen	202
8.4	Temperaturstrahlung	202
8.5	Wärmedurchgang	205
8.6	Wärmeübertrager	211
9	Energieumwandlung durch Verbrennung und in Brennstoffzellen	220
9.1	Umwandlung der Brennstoffenergie durch Verbrennung	220
9.2	Verbrennungsrechnung	221
9.2.1	Feste und flüssige Brennstoffe	221
9.2.2	Gasförmige Brennstoffe	222
9.2.3	Näherungslösungen	225
9.3	Verbrennungskontrolle	226
9.4	Theoretische Verbrennungstemperatur	229
9.5	Abgasverlust und feuerungstechnischer Wirkungsgrad	230
9.6	Abgastaupunkt	234
9.7	Emissionen aus Verbrennungsanlagen	235
9.8	Chemische Reaktionen und Irreversibilität der Verbrennung	235
9.9	Brennstoffzellen	235
10	Lösungsergebnisse der Aufgaben	236

1 Grundlagen der Thermodynamik

1.1 Aufgabe der Thermodynamik

1.2 Größen und Einheitensysteme

Beispiel 1.1

Ein Gegenstand (Gewichtskraft: $F_G = 1000 \text{ N}$) wird in 20 Sekunden um 10 m im Erdschwerefeld angehoben.

- Welche Leistung ist hierfür erforderlich?
- Wie lautet die zugeschnittene Größengleichung, in die die Kraft in N, der Weg in cm und die Zeit in min eingesetzt werden kann und mit der die Leistung in kW ausgerechnet wird?
- Geben Sie die Zahlenwertgleichung an, in der die Zahlenwerte eingesetzt werden müssen bzw. als Ergebnis herauskommen, die man erhält, wenn der Wert der Kraft in N, der Wert des Weges in cm, der Wert der Zeit in min und der Wert der Leistung in kW angegeben werden.

Gegeben: $F_G = 1000 \text{ N}$, $\tau = 20 \text{ s}$, $h = 10 \text{ m}$

Zu a): Gesucht: P

$$\underline{\underline{P = \frac{W}{\tau} = \frac{F_G h}{\tau} = \frac{1000 \cancel{\text{N}} \cdot 10 \cancel{\text{m}}}{20 \cancel{\text{s}}} \frac{\cancel{\text{N}} \cancel{\text{m}}}{\cancel{\text{N}} \cancel{\text{m}}} \frac{\cancel{\text{W}} \cancel{\text{s}}}{\cancel{\text{N}} \cancel{\text{m}}} = 500 \text{ W}}} \quad (\text{T 1.3})$$

$$\left| \begin{array}{l} W = F s, \quad \text{N m} = \text{J}, \quad \frac{\text{J}}{\text{s}} = \text{W} \end{array} \right. \quad (\text{T 1.3})$$

Zu b):
$$\frac{P}{W} = \frac{\frac{F_G h}{\text{N m}}}{\frac{\tau}{\text{s}}}$$

$$\frac{P \cdot 1000 \cancel{\text{W}}}{\cancel{\text{W}} \text{ kW}} = \frac{\frac{F_G h}{\text{N m}} \frac{\cancel{\text{m}}}{100 \text{ cm}}}{\frac{\tau}{60 \cancel{\text{s}}} \frac{\cancel{\text{s}}}{\text{min}}} \quad \left| \cdot \frac{\text{kW}}{1000} \right.$$

$$P = \frac{1}{1000 \cdot 100 \cdot 60} \frac{\left(\frac{F_G}{\text{N}} \right) \left(\frac{h}{\text{cm}} \right)}{\left(\frac{\tau}{\text{min}} \right)} \text{ kW}$$

$$P = 1,667 \cdot 10^{-7} \frac{\left(\frac{F_G}{\text{N}}\right) \left(\frac{h}{\text{cm}}\right)}{\left(\frac{\tau}{\text{min}}\right)} \text{ kW}$$

Zu c):

$$\{P\} = 1,667 \cdot 10^{-7} \frac{\{F_G\} \{h\}}{\{\tau\}}$$

| F_G in N, h in cm, τ in min, P in kW

Aufgabe 1.1

Ein Fahrzeug fahre mit einer Geschwindigkeit von 10 km/h.

- Wie heißt die in der Aufgabenstellung gegebene Größe?
- Welches Formelzeichen wird für diese Größe verwendet?
- Welchen Wert hat diese Größe?
- Geben Sie die Größe sowie den Zahlenwert und die Einheit der Größe als Formeln an.
- Handelt es sich im SI-Einheitensystem um eine Basisgröße?
- Wie lautet die Definitionsgleichung dieser Größe?
- Geben Sie den Wert dieser Größe mithilfe der Basiseinheiten an.
- Geben Sie die Dimension der Größe an.

1.3 Thermische Zustandsgrößen

1.3.1 Volumen

Aufgabe 1.2

In einem Behälter A befinden sich 10 kg Luft bei einem Druck von 100 kPa. Das spezifische Volumen der Luft beträgt $0,84 \text{ m}^3/\text{kg}$. In einem zweiten Behälter B befinden sich ebenfalls 10 kg Luft, aber bei einem Druck von 200 kPa. Die Luft in diesem Behälter hat ein spezifisches Volumen von $0,42 \text{ m}^3/\text{kg}$.

- Berechnen Sie die Volumen der beiden Behälter.
- Die beiden Behälter sind mit einer dünnen Rohrleitung verbunden, in der sich ein Trennschieber befindet. Der Trennschieber wird geöffnet und die beiden Drücke in den Behältern gleichen sich durch Überströmen von Luft aus. Welches Gesamtvolumen nimmt die Luft nun ein (Das Volumen der Rohrleitung kann vernachlässigt werden)?
- Wie groß ist nun das spezifische Volumen der Luft?

1.3.2 Druck

Beispiel 1.2

In einer Druckkammer unter Wasser herrscht ein Überdruck von 150 kPa. Der Atmosphärendruck beträgt 98 kPa. Für Arbeiten in der Druckkammer wird Druckluft mit einem, gegenüber dem Druck in der Kammer, um 100 kPa höheren Druck benötigt. Die Druckluft wird aus einer Flasche außerhalb der Druckkammer von Land geliefert.

- Ermitteln Sie den erforderlichen Absolutdruck der Druckluft hinter dem Reduzierventil der Druckluftflasche und
- den Höhenunterschied der Quecksilberspiegel (Menisken), wenn die Druckmessung hinter dem Reduzierventil der Flasche mittels U-Rohr mit Quecksilberfüllung erfolgen würde ($\rho_{\text{Hg}} = 13\,550 \text{ kg/m}^3$).

Zu a): Gegeben:

$$p_{eK} = 150 \text{ kPa,}$$

$$p_{\text{amb}} = 98 \text{ kPa,}$$

$$p_{dP} = 100 \text{ kPa bezogen auf } p_K$$

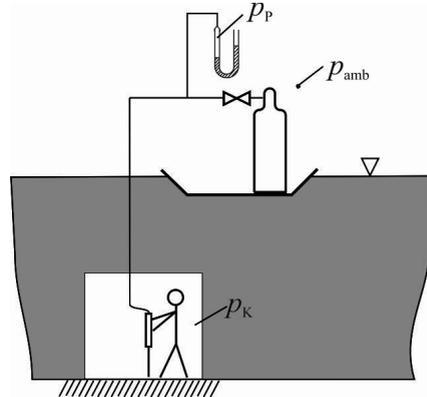
Gesucht: p_P

$$(Gl\ 1.6) \quad p_K = p_{eK} + p_{\text{amb}}$$

$$p_K = 150 \text{ kPa} + 98 \text{ kPa} = 248 \text{ kPa}$$

$$(Gl\ 1.5) \quad p_P = p_{dP} + p_K$$

$$\underline{p_P = 100 \text{ kPa} + 248 \text{ kPa} = 348 \text{ kPa}}$$



Zu b): Gesucht: h

$$(Gl\ 1.7) \quad p_P = p_{\text{amb}} + \rho g h$$

$$h = \frac{p_P - p_{\text{amb}}}{\rho g}$$

$$\left| \begin{array}{l} \rho_{\text{Hg}} = 13\,550 \text{ kg/m}^3 \\ g = 9,81 \text{ m/s}^2 \end{array} \right.$$

$$h = \frac{(348 \cdot 10^3 - 98 \cdot 10^3) \text{ Pa} \cdot \text{m}^3}{13\,550 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m} \cdot \text{Pa} \cdot \text{m}^3} \cdot \frac{\text{s}^2}{\text{N}} \cdot \frac{\text{N}}{\text{kg} \cdot \text{m}} \cdot \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{N} \cdot \text{s}^2}$$

$$\underline{h = 1,88 \text{ m}}$$

Aufgabe 1.3

In einem U-Rohrmanometer befindet sich ein Stoff A mit einer Dichte von 1800 kg/m^3 . In beide Schenkel wird zusätzlich ein spezifisch leichterer Stoff B mit einer Flüssigkeitshöhe von 60 mm im linken Schenkel und 100 mm im rechten Schenkel gefüllt. Die beiden Stoffe sollen gegenseitig unlösbar und unmischbar sein und eine gut erkennbare Trennfläche bilden. Zwischen den beiden freien Menisken stellt sich ein Höhenunterschied von 20 mm ein.

Skizzieren Sie die Anordnung und berechnen Sie die Dichte des Stoffes B.

Aufgabe 1.4

Ein gut isoliertes Ausgleichsgefäß wird von warmem Wasser durchströmt. Die Temperatur des Wassers im Ausgleichsgefäß beträgt $60 \text{ }^\circ\text{C}$, der Druck über der Wasseroberfläche 102 kPa . Zur Wasserstandskontrolle ist ein U-Rohr angebracht, dessen Flüssigkeitsinhalt Umgebungstemperatur von $20 \text{ }^\circ\text{C}$ angenommen hat. Vereinfachend soll angenommen werden, dass sich die Wassertemperatur zwischen Gefäß und U-Rohr sprunghaft ändert.

- Wirkt auf den freien Schenkel des U-Rohres derselbe Druck wie auf die Wasseroberfläche im Gefäß, wird ein Wasserstand von 500 mm angezeigt. Wie groß ist die tatsächliche Höhe des Wasserstandes im Ausgleichsgefäß?
- Welcher Wasserstand wird im U-Rohr angezeigt, wenn bei dem nach a) ermittelten Wasserstand im Gefäß auf den freien Schenkel der Umgebungsdruck 101 kPa wirkt?

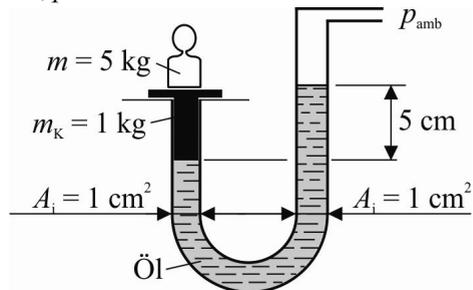
Aufgabe 1.5

Gegeben: $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, $\rho_{\text{Öl}} = 840 \text{ kg/m}^3$, $p_{\text{amb}} = 100 \text{ kPa}$

Mit einem Kolbenmanometer soll ein Druck ausgewogen werden. Im Ausgangszustand (siehe Skizze) liegt der Kolben auf. Nun wird auf dem freien Schenkel der zu messende Druck p aufgebracht. Dabei hebt sich der Kolben um $1,5 \text{ cm}$ an.

Wie groß ist der Druck p (Absolutdruck)?

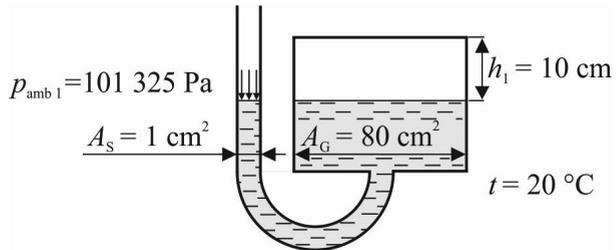
(Der Kolben wird bei der Messung in Drehung versetzt. Daher kann die Reibung zwischen Kolben und Zylinderwand vernachlässigt werden.)



Aufgabe 1.6

Ein „Goethe-Barometer“ besteht aus einem geschlossenen, bauchigen Gefäß und einem langen Ausgusschnabel ähnlich einer Teekanne. Es wird bei einem mittleren Atmosphärendruck $p_{\text{amb}1}$ so mit Wasser ($\rho = 998,2 \text{ kg/m}^3$) gefüllt, dass dieses im Gefäß und im Schnabel gleich hoch steht. Ändert sich der Atmosphärendruck, ändert sich die Höhe des Wasserspiegels im Schnabel und diese kann als Maß für den Atmosphärendruck verwendet werden.

Für den Befüllungszustand sollen die in der Abbildung gegebenen Werte gelten. Dabei wurden das Gefäß und der Schnabel als zylindrisch angenommen.



Für den Fall, dass bei gleich bleibender Temperatur der Atmosphärendruck einen geringeren Wert angenommen hat und der Wasserspiegel im Schnabel um 8 cm gestiegen ist, sollen berechnet werden:

- der Wert, um den der Badspiegel im Gefäß gefallen ist,
- der Luftdruck im Gefäß (Die Luft im Gefäß soll näherungsweise als ideales Gas angenommen werden.) und
- der Atmosphärendruck.

1.3.3 Temperatur**Aufgabe 1.7**

- Rechnen Sie die Celsius-Temperatur $t = 55 \text{ °C}$ in K, °F, °R,
- die Temperatur $t_F = 97 \text{ °F}$ in °C, K und °R und
- die Temperatur $T_R = 110 \text{ °R}$ in °C, K und °F um.

Aufgabe 1.8

Leiten Sie Zahlenwertgleichungen

- für die Umrechnung von T in t_F ,
- für die Umrechnung von T_R in t und
- zwischen der Temperaturdifferenz in Grad Celsius und der Temperaturdifferenz in Grad Rankine her.

1.4 Thermische Zustandsgleichung

1.4.1 Thermische Zustandsgleichung eines homogenen Systems

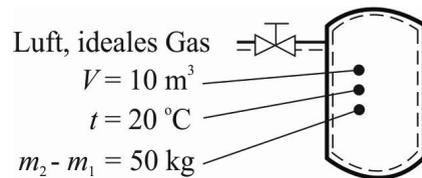
1.4.2 Thermische Zustandsgleichung des idealen Gases

Beispiel 1.3

Gegeben ist ein mit Luft gefüllter Behälter (Volumen 10 m^3). Bei einer konstant bleibenden Temperatur von $20 \text{ }^\circ\text{C}$ werden weitere 50 kg Luft in den Behälter gefüllt. Luft soll näherungsweise als ideales Gas angenommen werden.

Wie groß ist die dabei auftretende Druckänderung?

Gegeben:



Gesucht: $p_2 - p_1$

(Gl 1.16)

$$p_2 V = m_2 R_i T$$

(Gl 1.16)

$$p_1 V = m_1 R_i T$$

$$\frac{(p_2 - p_1) V = (m_2 - m_1) R_i T}{:V}$$

$$p_2 - p_1 = \frac{(m_2 - m_1) R_i T}{V}$$

$$\left| \begin{array}{l} R_i = 287,1 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \end{array} \right. \quad (\text{T 1.5})$$

$$p_2 - p_1 = \frac{50 \text{ kg}}{10 \text{ m}^3} \frac{287,1 \text{ J}}{\text{kg K}} \frac{293,15 \text{ K}}{\text{J}} \frac{\text{N m}}{\text{m}^2}$$

$$\underline{\underline{p_2 - p_1 = 420\,817 \text{ Pa} = 420,817 \text{ kPa}}}$$

Aufgabe 1.9

In einem Zylinder sind von einem Kolben 10 kg Luft eingeschlossen. Durch Zufuhr von Wärme, bei konstant bleibendem Druck von 2 MPa , vergrößert sich das Volumen der Luft um $0,1 \text{ m}^3$. Luft soll näherungsweise als trocken und als ideales Gas angenommen werden.

Um welchen Betrag ändert sich dabei die Temperatur der Luft?

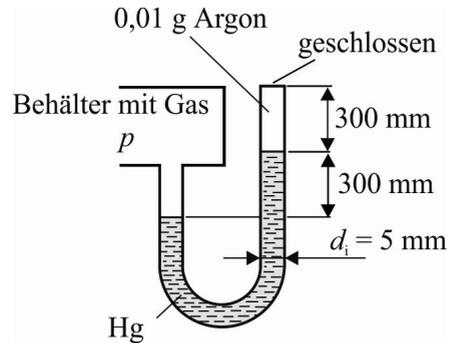
Aufgabe 1.10

Zur Druckmessung eines gasgefüllten Behälters wird ein oben geschlossenes, mit Argon gefülltes U-Rohr-Manometer verwendet. Die in dem Bild angegebenen Daten gelten bei 0 °C . Argon soll näherungsweise als ideales Gas angenommen werden.

- a) Welcher Absolutdruck herrscht im Behälter ($\rho_{\text{Hg}} = 13\,550\text{ kg/m}^3$)?

Durch Wärmezufuhr dehnt sich das Argon im rechten Schenkel des U-Rohrmanometers um 18 mm aus. Die Dichte- und Längenänderung des Quecksilbers und die Druckänderung im Behälter sind vernachlässigbar.

- b) Wie groß ist die Temperaturänderung des Argons?

**Aufgabe 1.11**

Ein Gasthermometer ist mit gasförmigen Helium gefüllt, das unabhängig von der Temperatur ein Volumen von 100 cm^3 einnimmt. Helium soll näherungsweise als ideales Gas angenommen werden. Bei einer Temperatur von 20 °C hat das Gas den gleichen Druck wie die Umgebung ($p_{\text{amb}} = 100\text{ kPa}$).

- a) Wie groß ist die Masse des Gases?

Das Thermometer taucht in eine Flüssigkeit unbekannter Temperatur. Sein Manometer zeigt einen Überdruck von 20 kPa an.

- b) Wie groß ist Temperatur der Flüssigkeit?

1.5 Mengenmaße Kilomol und Normvolumen; molare Gaskonstante

Aufgabe 1.12

Ein geschlossener Behälter mit einem Volumen von 5 m^3 ist mit Helium gefüllt. Das Helium hat eine Temperatur von 25 °C und einen Druck von 5 MPa . Helium soll näherungsweise als ideales Gas angenommen werden.

Welche Stoffmenge Helium befindet sich im Behälter?

Aufgabe 1.13

Welche Dichte hat Argon bei einer Temperatur von 60 °C und einem Druck von 200 kPa ? Argon soll näherungsweise als ideales Gas angenommen werden.

Aufgabe 1.14

Zwei Behälter, von denen der eine mit 220 mol Luft von 100 kPa, 20 °C, der andere mit 1600 mol Luft von 2 MPa, 20 °C gefüllt ist, sind durch eine Rohrleitung miteinander verbunden. Der Trennschieber wird geöffnet, sodass sich die Drücke durch Überströmen ausgleichen. Luft soll näherungsweise als ideales Gas angenommen werden. Die beiden Behälter sind gegenüber der Umgebung wärmedicht isoliert. Nach genügend langer Zeit stellt sich in beiden Behältern wieder eine Temperatur von 20 °C ein.

- Berechnen Sie den Druck, der dann im System (in beiden miteinander verbundenen Behältern) vorhanden ist.
- Welche Massen befinden sich nun in den Behältern?

Aufgabe 1.15

In einem Behälter befinden sich 10 kmol Erdgas (Zusammensetzung: 85 Vol.-% CH₄ und 15 Vol.-% N₂) bei 15 °C und 500 kPa. Erdgas soll näherungsweise als ideales Gas angenommen werden. Berechnen Sie:

- das Volumen des Gases,
- die molare Masse,
- die spezielle Gaskonstante,
- die Normdichte,
- die Masse und das Normvolumen.

Aufgabe 1.16

Ein Behälter ist mit 1 kmol Synthesegas (Gemisch aus 1 kmol Kohlenstoffmonoxid und 2 kmol Wasserstoff) gefüllt. Mit einer chemischen Reaktion wird hieraus Methanol CH₃OH hergestellt. Alle genannten Stoffe sollen näherungsweise als ideale Gase angenommen werden. Die molaren Massen sollen näherungsweise mithilfe der Ordnungszahlen bestimmt werden.

Bestimmen Sie für das Gasgemisch im Behälter

- die molare Masse,
- die spezifische Gaskonstante,
- die Normdichte,
- die Masse und
- das Normvolumen.
- Welches Volumen nimmt das Gasgemisch bei einem Druck von 20 MPa und einer Temperatur von 400 °C ein?

1.6 Thermische Ausdehnung

Beispiel 1.4

Wie groß ist die Längenänderung einer 50 cm langen Aluminiumstange bei einer Temperaturänderung von 400 °C auf 600 °C?

Gegeben: $l_1 = 50 \text{ cm}$, $t_1 = 400 \text{ °C}$, $t_2 = 600 \text{ °C}$, Aluminium

Gesucht: $l_2 - l_1$

$$l_2 - l_1 \approx l_1 \alpha_m \Big|_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1) \quad (\text{Gl 1.40})$$

$$\alpha_m \Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{1}{t_2 - t_1} \left[a(t_2 - t_1) + \frac{b}{2}(t_2^2 - t_1^2) + \frac{c}{3}(t_2^3 - t_1^3) + \frac{d}{4}(t_2^4 - t_1^4) \right] \frac{1}{\text{K}} \quad (\text{Gl 1.42})$$

$$a = 22,69 \cdot 10^{-6}, \quad b = 39,02 \cdot 10^{-9} \frac{1}{\text{°C}}, \quad (\text{T 1.8})$$

$$c = -118,56 \cdot 10^{-12} \frac{1}{(\text{°C})^2}, \quad d = 154,84 \cdot 10^{-15} \frac{1}{(\text{°C})^3} \quad (\text{T 1.8})$$

$$\begin{aligned} \alpha_m \Big|_{400 \text{ °C}}^{600 \text{ °C}} &= \frac{1}{(600 \text{ °C} - 400 \text{ °C})} \left[22,69 \cdot 10^{-6} (600 \text{ °C} - 400 \text{ °C}) \right. \\ &\quad + \frac{39,02 \cdot 10^{-9}}{2} \frac{1}{\text{°C}} \left((600 \text{ °C})^2 - (400 \text{ °C})^2 \right) \\ &\quad + \frac{-118,56 \cdot 10^{-12}}{3} \frac{1}{(\text{°C})^2} \left((600 \text{ °C})^3 - (400 \text{ °C})^3 \right) \\ &\quad \left. + \frac{154,84 \cdot 10^{-15}}{4} \frac{1}{(\text{°C})^3} \left((600 \text{ °C})^4 - (400 \text{ °C})^4 \right) \right] \frac{1}{\text{K}} \end{aligned}$$

$$\alpha_m \Big|_{400 \text{ °C}}^{600 \text{ °C}} = \frac{1}{200} [0,004\,538 + 0,003\,902 - 0,006\,007 + 0,004\,026] \frac{1}{\text{K}}$$

$$\alpha_m \Big|_{400 \text{ °C}}^{600 \text{ °C}} = 32,3 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{K}}$$

$$l_2 - l_1 \approx 500 \text{ mm} \cdot 32,3 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{K}} (600 - 400) \text{ K}$$

$$\underline{\underline{l_2 - l_1 \approx 3,23 \text{ mm}}}$$

Beispiel 1.5

Wie groß ist die Längenänderung einer 30 cm langen Schubstange aus Quarzglas in einem Schubstangendilatometer bei einer Temperaturänderung von 100 °C auf 200 °C ?

Gegeben: $l_1 = 30 \text{ cm}$, $t_1 = 100 \text{ °C}$, $t_2 = 200 \text{ °C}$, Quarzglas

Gesucht: $l_2 - l_1$

$$l_2 - l_1 \approx l_1 \alpha_m \Big|_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1) \quad (\text{Gl 1.40})$$

$$\alpha_m \Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{\alpha_m \Big|_{0 \text{ °C}}^{t_2} \cdot t_2 - \alpha_m \Big|_{0 \text{ °C}}^{t_1} \cdot t_1}{t_2 - t_1} \quad (\text{Gl 1.38})$$

$$\alpha_m \Big|_{0 \text{ °C}}^{200 \text{ °C}} = 0,6 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{K}} \quad (\text{T 1.7})$$

$$\alpha_m \Big|_{0 \text{ °C}}^{100 \text{ °C}} = 0,5 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{K}} \quad (\text{T 1.7})$$

$$\alpha_m \Big|_{100 \text{ °C}}^{200 \text{ °C}} = \frac{0,6 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{K}} \cdot 200 \text{ °C} - 0,5 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{K}} \cdot 100 \text{ °C}}{100 \text{ K}}$$

$$\alpha_m \Big|_{100 \text{ °C}}^{200 \text{ °C}} = 0,7 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{K}}$$

$$\underline{l_2 - l_1} \approx 300 \text{ mm} \cdot 0,7 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{K}} \cdot (200 - 100) \text{ K} = \underline{0,021 \text{ mm}}$$

Aufgabe 1.17

Die Temperatur einer Flüssigkeit wird mit einem ganz eintauchend justierten Quecksilberthermometer ($\gamma_{\text{mHg}} \Big|_{20 \text{ °C}}^{t_f} = 182 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$) gemessen. Der Flüssigkeitsspiegel liegt in Höhe der 25-°C-Markierung des Thermometers. Das Thermometer zeigt eine Temperatur von 55 °C an. Die Umgebungstemperatur sei 20 °C.

Welche Temperatur hat die Flüssigkeit?

(Vereinfachend soll angenommen werden, dass der eintauchende Teil des Quecksilberfadens die Temperatur der Flüssigkeit und der herausragende Teil des Quecksilberfadens die Temperatur der Umgebung hat, dass also in Höhe des Flüssigkeitsspiegels ein Temperatursprung vorhanden ist.)

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 $22 \text{ }^\circ\text{C}$.

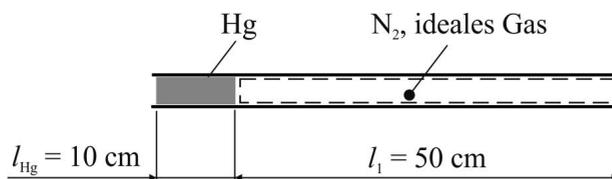
- Liegt die Kapillare waagrecht, beträgt die Länge des eingeschlossenen Gasvolumens 50 cm . Berechnen Sie für diese Lage die Dichte des Gases ($t_{\text{Gas}} = t_{\text{amb}}$).
- Die Glaskapillare wird nun senkrecht gestellt mit der zugeschmolzenen Seite nach unten. Welche Länge hat nun das eingeschlossene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

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



Zu a): Gesucht: ρ_1

Thermische Zustandsgleichung des idealen Gases:

$$(Gl\ 1.16) \quad p_1 V_1 = m R_i T_1 \quad \left| : m \right.$$

$$\left| v = \frac{V}{m} \rightarrow \frac{V_1}{m} = v_1 \right. \quad (Gl\ 1.1)$$

$$p_1 v_1 = R_i T_1 \quad \left| \cdot \rho : (R_i T_1) \right.$$

$$\left| \rho = \frac{1}{v} \rightarrow v_1 = \frac{1}{\rho_1} \right. \quad (Gl\ 1.2)$$

$$\rho_1 = \frac{p_1}{R_i T_1}$$

$$R_i = 296,8 \text{ J/(kg K)} \quad (\text{T 1.5})$$

Kräftegleichgewicht am Quecksilberfaden
(Haftungskräfte werden vernachlässigt):

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

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

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

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

Gesucht: l_2

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

Die Längenänderung des Quecksilberfadens
hat keine Auswirkung auf den Druck.

$$\rho_{\text{Hg}} = 13\,590 \text{ kg/m}^3$$

$$h = l_{\text{Hg}} = 10 \text{ cm}$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2 \quad (\text{T 1.6})$$

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

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

Kompression bei konstanter Temperatur 1 \rightarrow 2:

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

$$p_2 l_2 A = p_1 l_1 A \quad | : p_2$$

$$\underline{\underline{l_2 = \frac{p_1}{p_2} l_1 = \frac{98 \cdot 10^3 \text{ Pa}}{111\,332 \text{ Pa}} \cdot 50 \text{ cm} = 44,01 \text{ cm}}}$$

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

Gesucht: l_3

Temperaturerhöhung bei konstantem Druck 2 \rightarrow 3:

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

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

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

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

Zu d): Gesucht: W_{v23}

Temperaturerhöhung bei konstantem Druck 2 \rightarrow 3:

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

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

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

$$W_{v23} = 111 \, 332 \text{ Pa} (0,440 \, 1 - 0,556 \, 4) \text{ m} \cdot 5 \frac{\text{m}^2}{10^6 \text{ Pa m}^2 \text{ N m}}$$

$$\underline{\underline{W_{v23} = - 0,064 \, 7 \text{ J}}}$$

Zu e): Gesucht: W_{Hg}

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

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

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

$$W_{\text{Hg}} = 13 \, 590 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,1 \text{ m} \cdot 5 \frac{\text{m}^2}{10^6} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot (0,556 \, 4 - 0,440 \, 1) \text{ m} \frac{\text{N s}^2}{\text{kg m N m}}$$

$$\underline{\underline{W_{\text{Hg}} = 0,007 \, 75 \text{ J}}}$$

alternativ:

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

$$p = p_2 = \text{const}$$

Die thermische Ausdehnung des Quecksilberfadens hat keine Auswirkung auf den Druck.

$$p_b = p_{\text{amb}}$$

$$W_{n23} = (p_2 - p_{\text{amb}}) (V_2 - V_3)$$

$$W_{n23} = (p_2 - p_{\text{amb}}) (l_2 - l_3) A$$

$$W_{n23} = (111\,332 - 98\,000) \text{ Pa} (0,440\,1 - 0,556\,4) \text{ m} \cdot 5 \frac{\text{m}^2}{10^6}$$

$$W_{n23} = -13\,332 \text{ Pa} \frac{0,581\,5 \text{ m}^3}{10^6} \frac{\cancel{\text{N}}}{\text{Pa m}^2} \frac{\text{J}}{\cancel{\text{N m}}}$$

$$\underline{\underline{W_{n23} = -0,007\,75 \text{ J}}}$$

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 4,804 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

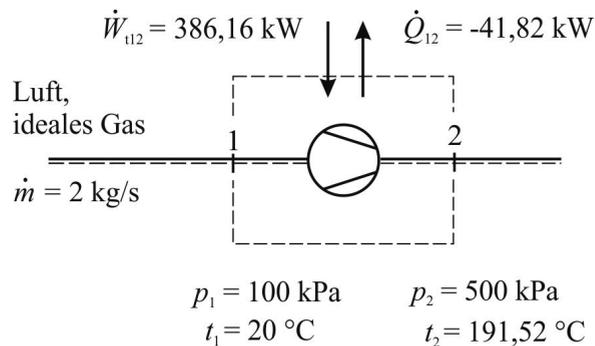
In einem gekühlten Verdichter werden pro Sekunde 2 kg Luft komprimiert. Luft soll näherungsweise als ideales Gas angenommen werden. Die Luft tritt mit 100 kPa und 20 °C in den Verdichter ein und verlässt ihn mit 500 kPa und 191,52 °C. Dabei wird der Luft eine technische Leistung von 386,16 kW zugeführt. 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:

$$\dot{W}_{\text{diss}12} = 41,82 \text{ kW}$$

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



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

$$\dot{W}_{t12} = \dot{W}_{t12}^{\text{rev}} + \dot{W}_{\text{diss}12}$$

$$\dot{W}_{t12} = \dot{W}_{t12}^{\text{rev}} + \dot{W}_{\text{diss}12}$$

$$\dot{W}_{t12}^{\text{rev}} = \dot{W}_{t12} - \dot{W}_{\text{diss}12} = (386,16 - 41,82) \text{ kW}$$

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

$$\left| \frac{d}{d\tau} \right. \quad (\text{Gl 2.11})$$

$$\left| -\dot{W}_{\text{diss}12} \right.$$