n.ethz.ch/~juncfu

ETH zürich

Thermodynamik I
Übungsstunde 01

Juncheng Fu (Elias)

04. Oktober 2024

Übungsmaterial

- Die Übungsstunde wird von mir aufgezeichnet!

- Nicht offiziell
- (Screen recording) Lade ich später auf YT hoch
- Keine Garantie für Qualität, es ist nur in der Not zu nutzen (Falls Krank…)

Ablauf

- 1. Stunde
    - Allgemeine Information
    - Theorie und Tricks
    - Vorlösen der Vorrechenübungen

- 2. Stunde
    - Selbstständig Rest Teil der Serien lösen

Organisatorisches

• Study Center:	Mittwoch	18:00-20:00	ETF	C 1
• Übungsstunde:	Freitag	08:15-10:00	CHN	C 14

- Probe Prüfung: 15. Nov
  - Kein Einfluss auf Endnote
  - Freiwillig

- Übungsstundensmaterial auf n.ethz.ch/~juncfu/

Kurz zu Thermo I

W22

Prüfungsblock I — **MAVT** — **alle Studiengänge** — **davon Repetenten**

	# Stud.	Ø	std. dev.	# best.	# nicht best.	bestanden
Gesamt	354 25	4.55	0.65	296 18	58 7	83.6% 72.0%
Thermodynamik I	360	$\boxed{4.08}$ 4.07	0.87 0.87			66.4%

W23

Prüfungsblock I — MAVT — alle Studiengänge — davon Repetenten

	# Stud.	Ø	std. dev.	# best.	# nicht best.	bestanden
Gesamt	402 27	4.58	0.59	344 [illegible]	[illegible] 9	85.6% 66.7%
Thermodynamik I	360	$\boxed{4.3}$ 4.3	0.81 0.81			71.4

Niemals Einfach

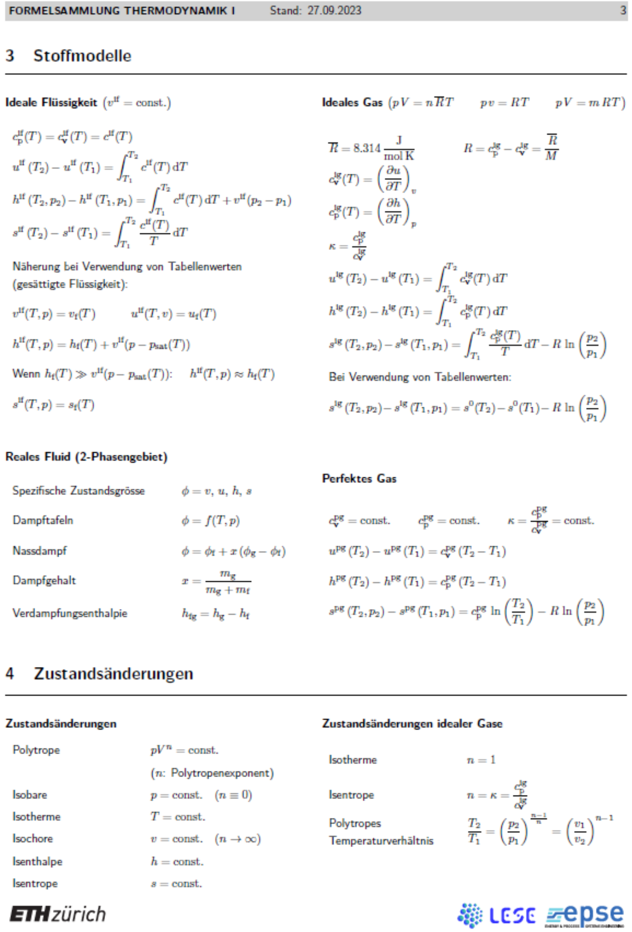
W24

Prüfungsblock I (neues Reglement) — MAVT — alle Studiengänge — davon Repetenten

	# Stud.	Ø	std. dev.	# best.	# nicht best.	bestanden
Gesamt	398	4.65	0.56	364	34	91.5%
Thermodynamik I	428	$\boxed{4.16}$ 4.15	0.81 0.80			67.8%

Kurz zu Thermo I

- Thermo I ZF und TAB ausdrucken
- Löst die Übung mit den



FORMELSAMMLUNG THERMODYNAMIK I Stand: 27.09.2023 3

3 Stoffmodelle

Ideale Flüssigkeit ($v^{\mathrm{lf}} = \mathrm{const.}$)

$$c_p^{\mathrm{lf}}(T) = c_v^{\mathrm{lf}}(T) = c^{\mathrm{lf}}(T)$$

$$u^{\mathrm{lf}}(T_2) - u^{\mathrm{lf}}(T_1) = \int_{T_1}^{T_2} c^{\mathrm{lf}}(T)\,\mathrm{d}T$$

$$h^{\mathrm{lf}}(T_2,p_2) - h^{\mathrm{lf}}(T_1,p_1) = \int_{T_1}^{T_2} c^{\mathrm{lf}}(T)\,\mathrm{d}T + v^{\mathrm{lf}}(p_2 - p_1)$$

$$s^{\mathrm{lf}}(T_2) - s^{\mathrm{lf}}(T_1) = \int_{T_1}^{T_2} \frac{c^{\mathrm{lf}}(T)}{T}\,\mathrm{d}T$$

Näherung bei Verwendung von Tabellenwerten (gesättigte Flüssigkeit):

$$v^{\mathrm{lf}}(T,p) = v_f(T) \qquad u^{\mathrm{lf}}(T,v) = u_f(T)$$

$$h^{\mathrm{lf}}(T,p) = h_f(T) + v^{\mathrm{lf}}(p - p_{\mathrm{sat}}(T))$$

Wenn $h_f(T) \gg v^{\mathrm{lf}}(p - p_{\mathrm{sat}}(T))$: $h^{\mathrm{lf}}(T,p) \approx h_f(T)$

$$s^{\mathrm{lf}}(T,p) = s_f(T)$$

Ideales Gas ($pV = n\overline{R}T \quad pv = RT \quad pV = m\,RT$)

$$\overline{R} = 8.314\,\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{mol\,K}} \qquad R = c_p^{\mathrm{ig}} - c_v^{\mathrm{ig}} = \frac{\overline{R}}{M}$$

$$c_v^{\mathrm{ig}}(T) = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v$$

$$c_p^{\mathrm{ig}}(T) = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p$$

$$\kappa = \frac{c_p^{\mathrm{ig}}}{c_v^{\mathrm{ig}}}$$

$$u^{\mathrm{ig}}(T_2) - u^{\mathrm{ig}}(T_1) = \int_{T_1}^{T_2} c_v^{\mathrm{ig}}(T)\,\mathrm{d}T$$

$$h^{\mathrm{ig}}(T_2) - h^{\mathrm{ig}}(T_1) = \int_{T_1}^{T_2} c_p^{\mathrm{ig}}(T)\,\mathrm{d}T$$

$$s^{\mathrm{ig}}(T_2,p_2) - s^{\mathrm{ig}}(T_1,p_1) = \int_{T_1}^{T_2} \frac{c_p^{\mathrm{ig}}(T)}{T}\,\mathrm{d}T - R\ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right)$$

Bei Verwendung von Tabellenwerten:

$$s^{\mathrm{ig}}(T_2,p_2) - s^{\mathrm{ig}}(T_1,p_1) = s^0(T_2) - s^0(T_1) - R\ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right)$$

Reales Fluid (2-Phasengebiet)

Spezifische Zustandsgrösse	$\phi = v,\ u,\ h,\ s$
Dampftafeln	$\phi = f(T,p)$
Nassdampf	$\phi = \phi_f + x\,(\phi_g - \phi_f)$
Dampfgehalt	$x = \dfrac{m_g}{m_g + m_f}$
Verdampfungsenthalpie	$h_{fg} = h_g - h_f$

Perfektes Gas

$$c_v^{\mathrm{pg}} = \mathrm{const.} \qquad c_p^{\mathrm{pg}} = \mathrm{const.} \qquad \kappa = \frac{c_p^{\mathrm{pg}}}{c_v^{\mathrm{pg}}} = \mathrm{const.}$$

$$u^{\mathrm{pg}}(T_2) - u^{\mathrm{pg}}(T_1) = c_v^{\mathrm{pg}}(T_2 - T_1)$$

$$h^{\mathrm{pg}}(T_2) - h^{\mathrm{pg}}(T_1) = c_p^{\mathrm{pg}}(T_2 - T_1)$$

$$s^{\mathrm{pg}}(T_2,p_2) - s^{\mathrm{pg}}(T_1,p_1) = c_p^{\mathrm{pg}}\ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) - R\ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right)$$

4 Zustandsänderungen

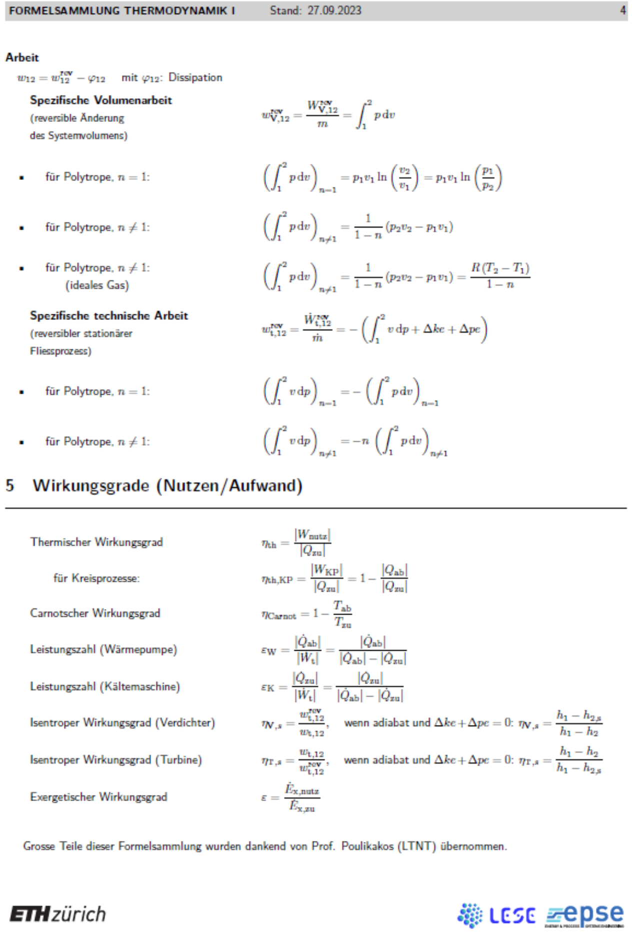
Zustandsänderungen

Polytrope	$pV^n = \mathrm{const.}$ (n: Polytropenexponent)
Isobare	$p = \mathrm{const.} \quad (n \equiv 0)$
Isotherme	$T = \mathrm{const.}$
Isochore	$v = \mathrm{const.} \quad (n \to \infty)$
Isenthalpe	$h = \mathrm{const.}$
Isentrope	$s = \mathrm{const.}$

Zustandsänderungen idealer Gase

Isotherme	$n = 1$
Isentrope	$n = \kappa = \dfrac{c_p^{\mathrm{ig}}}{c_v^{\mathrm{ig}}}$
Polytropes Temperaturverhältnis	$\dfrac{T_2}{T_1} = \left(\dfrac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} = \left(\dfrac{v_1}{v_2}\right)^{n-1}$

ETH zürich



FORMELSAMMLUNG THERMODYNAMIK I Stand: 27.09.2023 4

Arbeit

$w_{12} = w_{12}^{\mathrm{rev}} - \varphi_{12}$ mit φ_{12}: Dissipation

Spezifische Volumenarbeit (reversible Änderung des Systemvolumens)

$$w_{V,12}^{\mathrm{rev}} = \frac{W_{V,12}^{\mathrm{rev}}}{m} = \int_1^2 p\,\mathrm{d}v$$

- für Polytrope, $n = 1$: $\left(\int_1^2 p\,\mathrm{d}v\right)_{n=1} = p_1 v_1 \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right) = p_1 v_1 \ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right)$
- für Polytrope, $n \neq 1$: $\left(\int_1^2 p\,\mathrm{d}v\right)_{n\neq 1} = \frac{1}{1-n}(p_2 v_2 - p_1 v_1)$
- für Polytrope, $n \neq 1$: (ideales Gas) $\left(\int_1^2 p\,\mathrm{d}v\right)_{n\neq 1} = \frac{1}{1-n}(p_2 v_2 - p_1 v_1) = \frac{R(T_2 - T_1)}{1-n}$

Spezifische technische Arbeit (reversibler stationärer Fliessprozess)

$$w_{t,12}^{\mathrm{rev}} = \frac{\dot{W}_{t,12}^{\mathrm{rev}}}{\dot{m}} = -\left(\int_1^2 v\,\mathrm{d}p + \Delta ke + \Delta pe\right)$$

- für Polytrope, $n = 1$: $\left(\int_1^2 v\,\mathrm{d}p\right)_{n=1} = -\left(\int_1^2 p\,\mathrm{d}v\right)_{n=1}$
- für Polytrope, $n \neq 1$: $\left(\int_1^2 v\,\mathrm{d}p\right)_{n\neq 1} = -n\left(\int_1^2 p\,\mathrm{d}v\right)_{n\neq 1}$

5 Wirkungsgrade (Nutzen/Aufwand)

Thermischer Wirkungsgrad	$\eta_{th} = \dfrac{\lvert W_{\mathrm{nutz}}\rvert}{\lvert Q_{\mathrm{zu}}\rvert}$
für Kreisprozesse:	$\eta_{th,KP} = \dfrac{\lvert W_{KP}\rvert}{\lvert Q_{\mathrm{zu}}\rvert} = 1 - \dfrac{\lvert Q_{\mathrm{ab}}\rvert}{\lvert Q_{\mathrm{zu}}\rvert}$
Carnotscher Wirkungsgrad	$\eta_{\mathrm{Carnot}} = 1 - \dfrac{T_{\mathrm{ab}}}{T_{\mathrm{zu}}}$
Leistungszahl (Wärmepumpe)	$\varepsilon_W = \dfrac{\lvert\dot{Q}_{\mathrm{ab}}\rvert}{\lvert\dot{W}_t\rvert} = \dfrac{\lvert\dot{Q}_{\mathrm{ab}}\rvert}{\lvert\dot{Q}_{\mathrm{ab}}\rvert - \lvert\dot{Q}_{\mathrm{zu}}\rvert}$
Leistungszahl (Kältemaschine)	$\varepsilon_K = \dfrac{\lvert\dot{Q}_{\mathrm{zu}}\rvert}{\lvert\dot{W}_t\rvert} = \dfrac{\lvert\dot{Q}_{\mathrm{zu}}\rvert}{\lvert\dot{Q}_{\mathrm{ab}}\rvert - \lvert\dot{Q}_{\mathrm{zu}}\rvert}$
Isentroper Wirkungsgrad (Verdichter)	$\eta_{V,s} = \dfrac{w_{t,12}^{\mathrm{rev}}}{w_{t,12}}$, wenn adiabat und $\Delta ke + \Delta pe = 0$: $\eta_{V,s} = \dfrac{h_1 - h_{2,s}}{h_1 - h_2}$
Isentroper Wirkungsgrad (Turbine)	$\eta_{T,s} = \dfrac{w_{t,12}}{w_{t,12}^{\mathrm{rev}}}$, wenn adiabat und $\Delta ke + \Delta pe = 0$: $\eta_{T,s} = \dfrac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2,s}}$
Exergetischer Wirkungsgrad	$\varepsilon = \dfrac{\dot{E}_{x,\mathrm{nutz}}}{\dot{E}_{x,\mathrm{zu}}}$

Grosse Teile dieser Formelsammlung wurden dankend von Prof. Poulikakos (LTNT) übernommen.

ETH zürich

Trick

- In Belegung, HS2023 wählen
- „Lerneinheiten hinzufügen“

- Such nach den Fächern dann mit „Einschreiben“ hinzufügen

Belegungen

Studiengang:	Maschineningenieurwissenschaften BSc
Semester:	Herbstsemester 2022

Belegungen können Sie nur dann zum Löschen markieren, wenn die Lerneinheit

Lerneinheiten hinzufügen

Semester	Herbstsemester 2022
Stufe	Bachelorstudium
Departement	Maschinenbau und Verfahrenstechnik

Struktur

Studiengang	Maschineningenieurwissenschaften Bachelor
Bereich	Bachelor-Studium (Studienreglement 2010)
Unterbereich	3. Semester: Obligatorische Fächer

151-0591-00L **Control Systems I**
Note: The previous course title in German until HS21 "Regelungstechnik I".

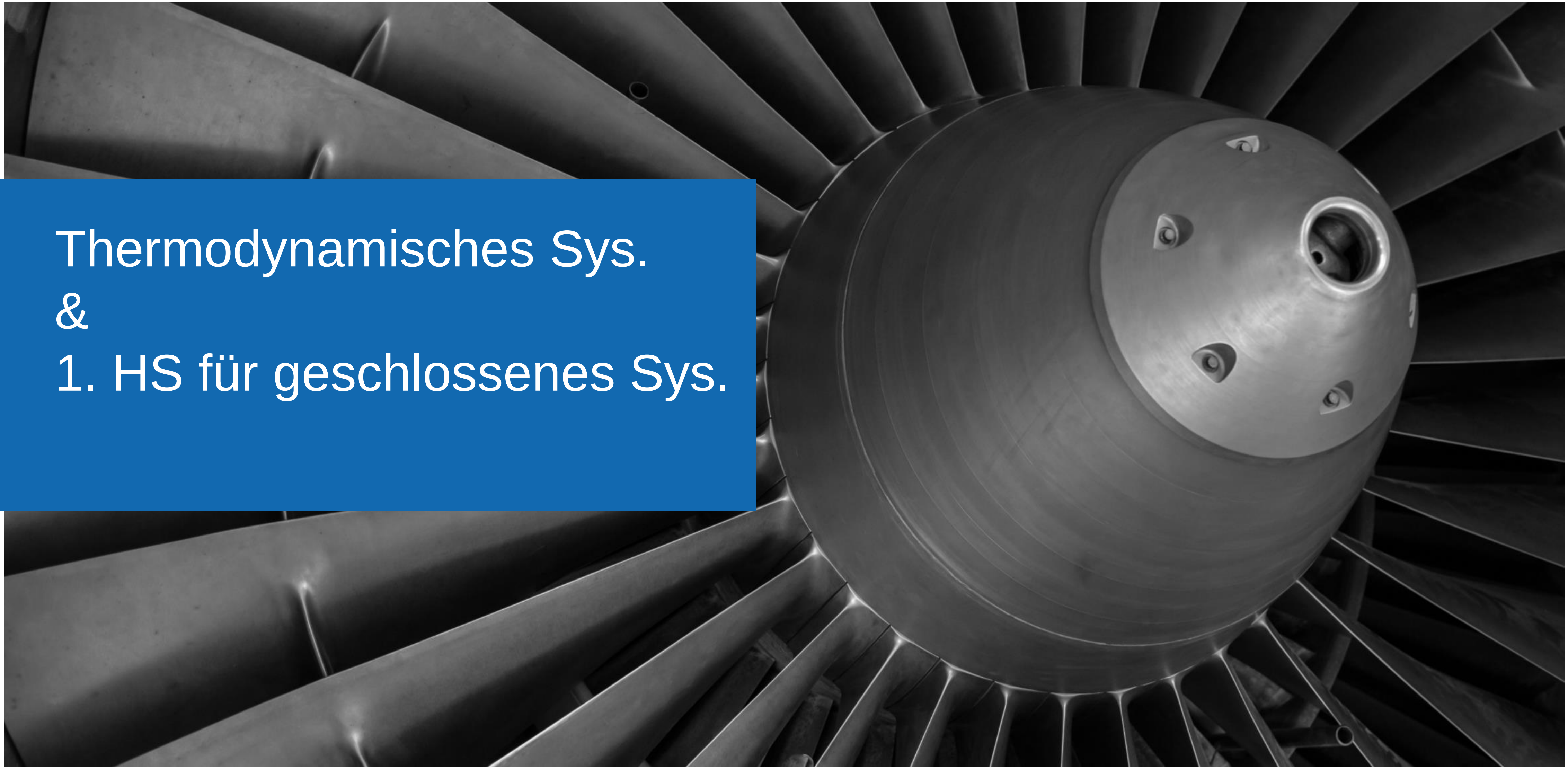
151-0591-00 V Control Systems I
The lectures will start in the 2nd week of the Semester.
The Wednesday lectures are held in ML D 28 with video transmission to ML E 12.

151-0591-00 U Control Systems I
The exercises will start in the 2nd week of the Semester: Fri 10-12 or Fri 12-14
Zusätzlich wird das Study Center angeboten: Mittwochs 18-20 ab der 3. Semesterwo
Studierende Vorlesungsstoff vor- oder nachbereiten und Übungen lösen.

Trick

151-0103-00L Fluiddynamik II HS2022
Autumn Semester 2022

★ 151-0103-00L Fluiddynamik II HS2023
Autumn Semester 2023

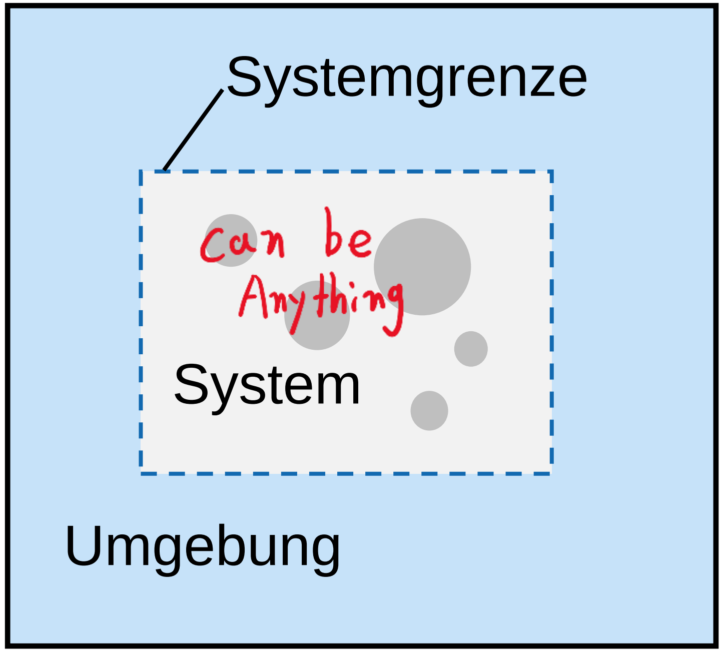


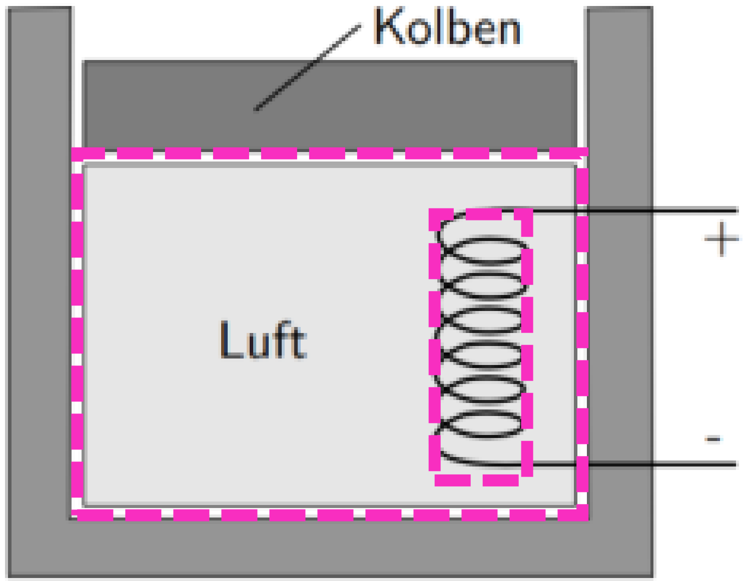
Thermodynamisches Sys.
&
1. HS für geschlossenes Sys.

Thermodynamisches Sys.

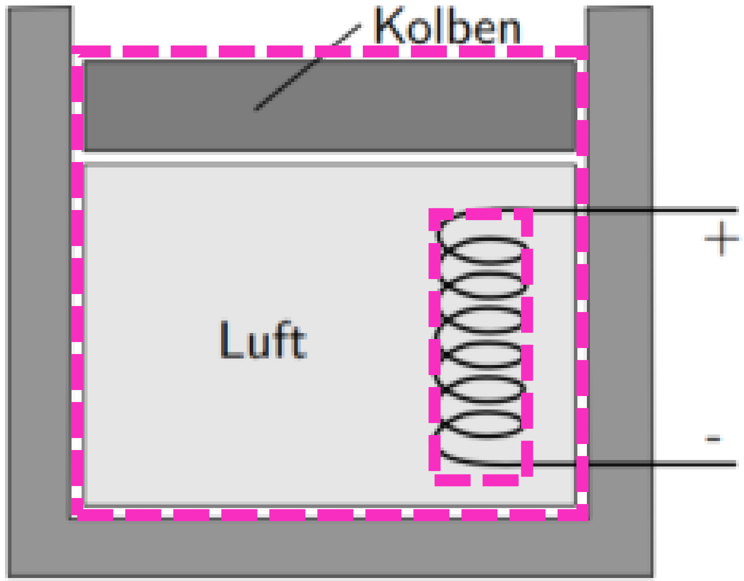
Systemgrenze: eine virtuale Fläche, die System und Umgebung trennt.

Je nach Problem definieren (Wichtig! Man braucht üben, um Intuition zu entwickeln)





Systeminhalt: Luft



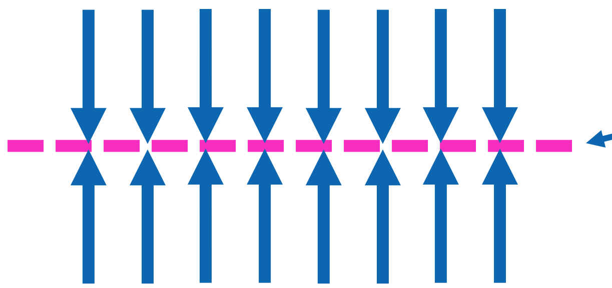
Systeminhalt: Luft + Kolben

Thermodynamisches Sys.

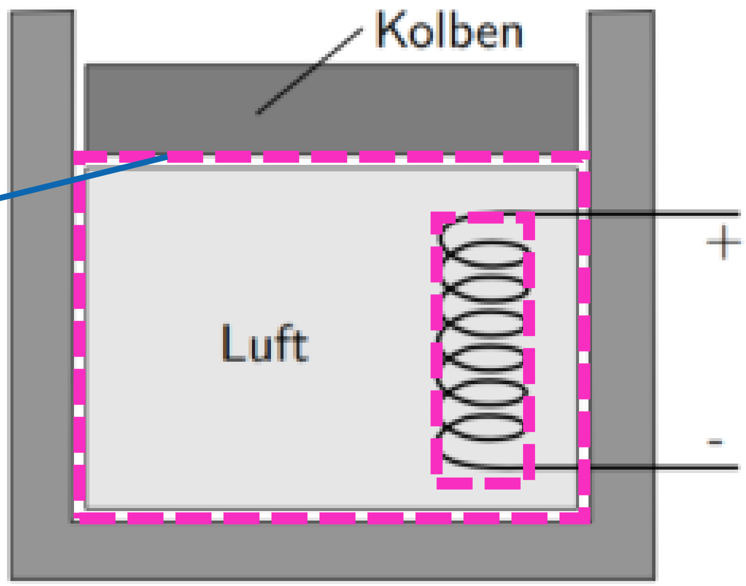
Systemgrenze: eine virtuale Fläche, die System und Umgebung trennt.

Je nach Problem definieren (Wichtig! Man braucht üben, um Intuition zu entwickeln)

Druck am Systemgrenze: Immer GGW



Luft Druck von Innen = Druck von Außen



Systeminhalt: Luft

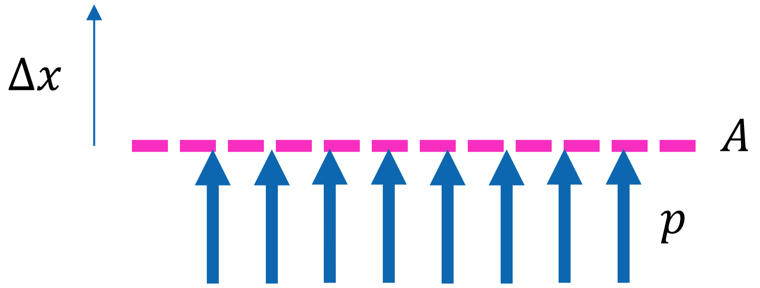
Thermodynamisches Sys.

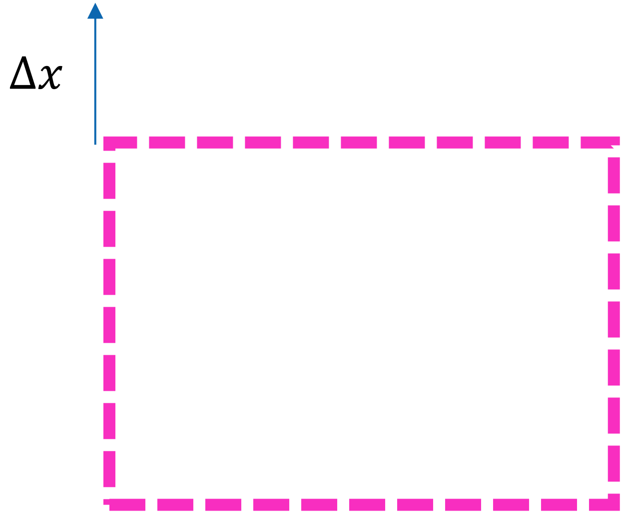
Volumenarbeit

Aber erstmal, wie berechnet man die Arbeit?

$$F \cdot \Delta x = W$$

Druck am Systemgrenze: Immer GGW





Luft Druck von Innen = Druck von Außen

$$p \cdot A = F$$

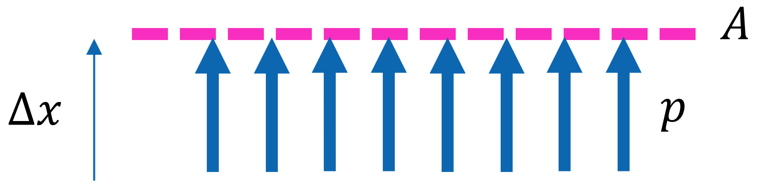
Thermodynamisches Sys.

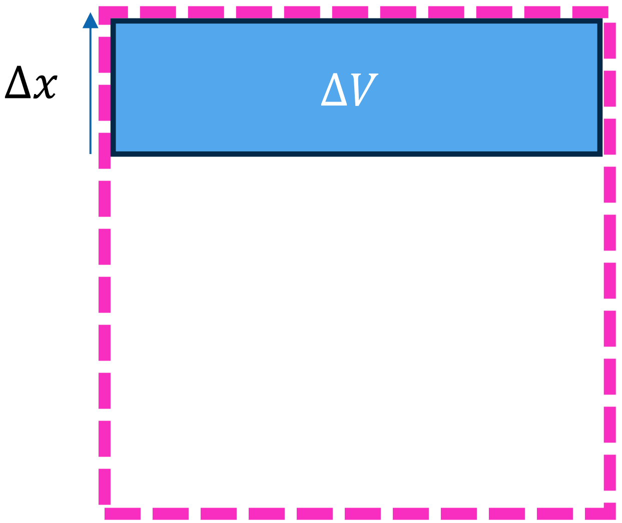
Volumenarbeit

Aber erstmal, wie berechnet man die Arbeit?

$$F \cdot \Delta x = W$$

Druck am Systemgrenze: Immer GGW





Luft Druck von Innen = Druck von Außen

$$p \cdot A = F$$

$$p \cdot A \cdot \Delta x = F \cdot \Delta x = W_V$$

$$p \cdot \Delta V = F \cdot \Delta x = W_V$$

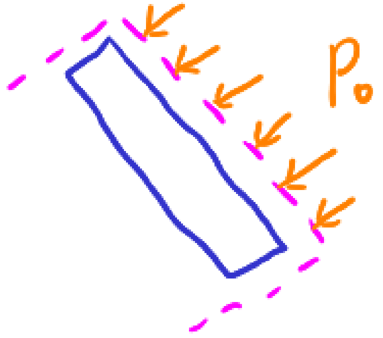
Thermodynamisches Sys.

Volumenarbeit

Volumenarbeit

$$W_V = \int_{V_1}^{V_2} P\,dV$$ ← Der Ausdehnung, die an dieser spezifische Grenze passiert.

↑ der Druck, der an sys. Grenze wirkt



Vgl. auf ZF.

Spezifische Volumenarbeit

(reversible Änderung

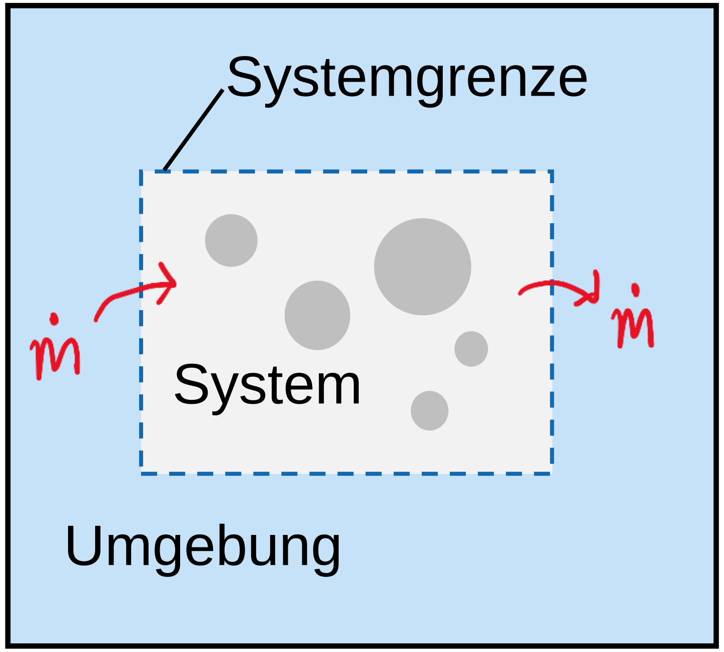
des Systemvolumens)

$$w_{V,12}^{\text{rev}} = \frac{W_{V,12}^{\text{rev}}}{m} = \int_1^2 p\,\mathrm{d}v$$

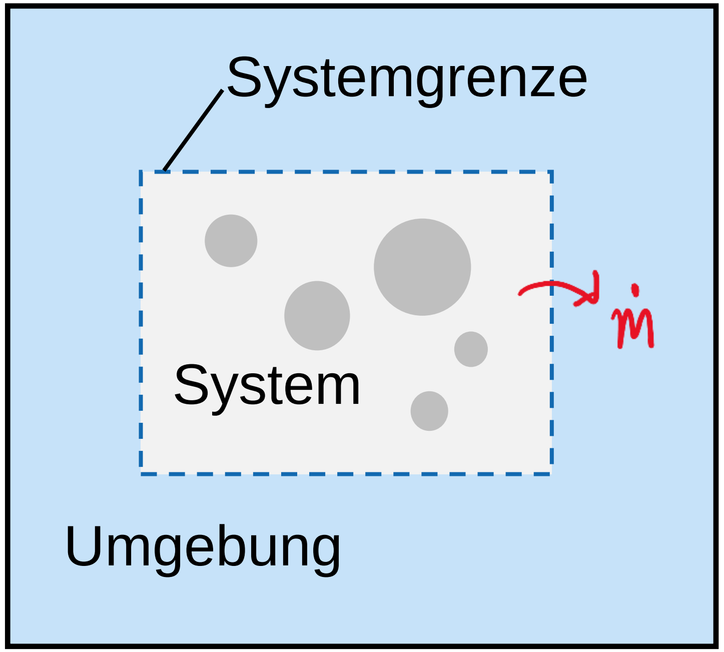
Thermodynamisches Sys.

Systemgrenze zu Klassifizierung (um richtige Formel auszuwählen)

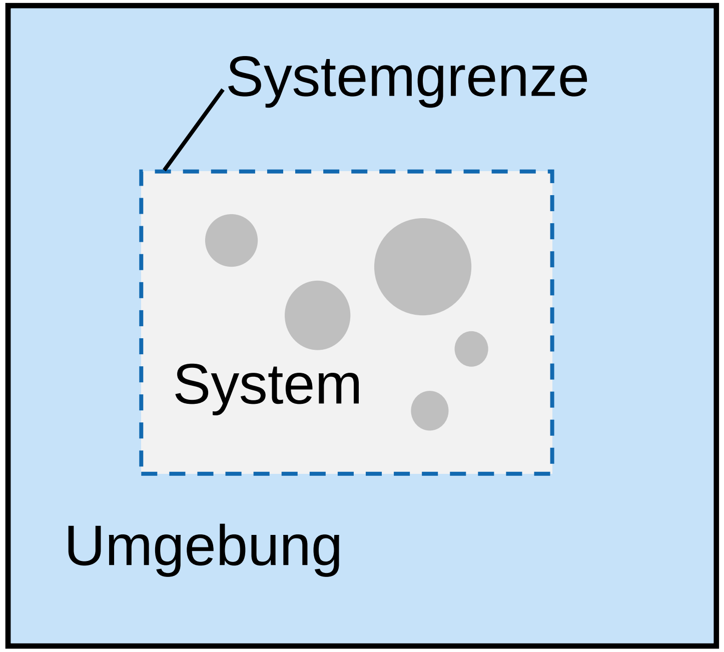
Massenfluss: $\dot{m}$



Offenes Sys.



Halb-offenes Sys.



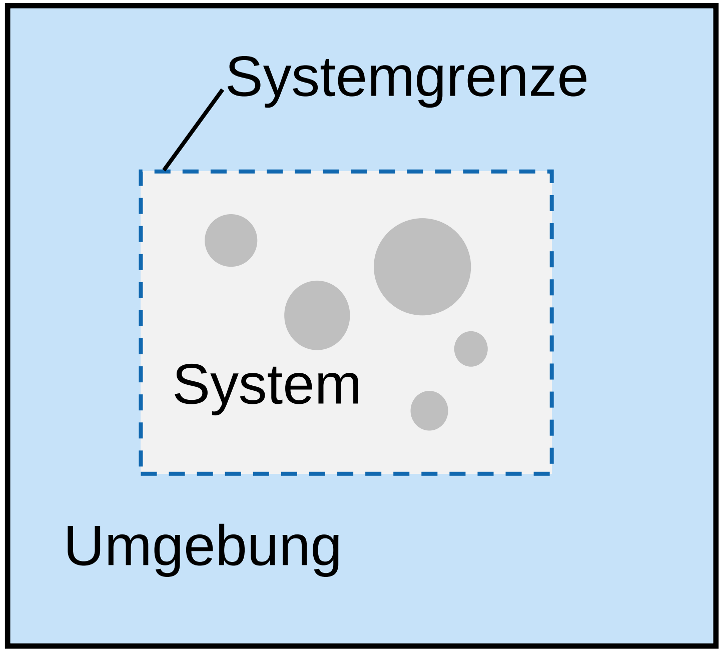
Geschlossenes Sys.

Thermodynamisches Sys.

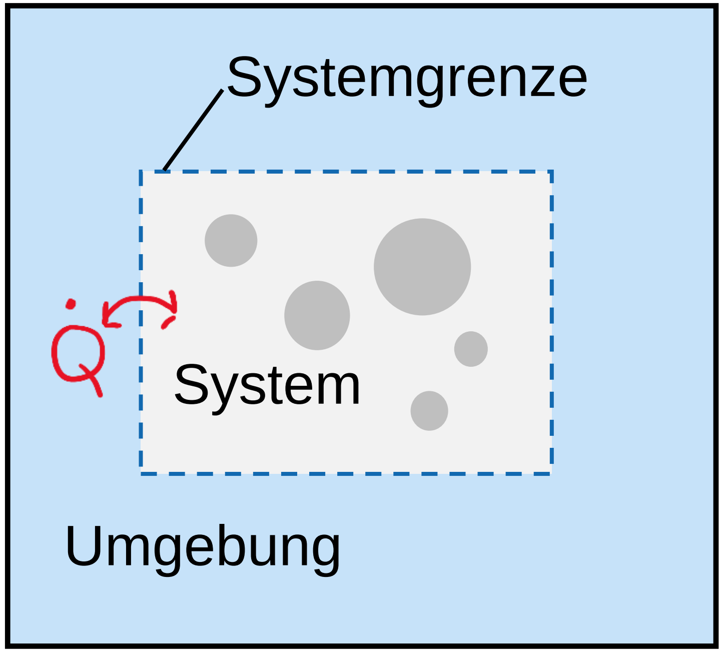
Systemgrenze zu Klassifizierung (um richtige Formel auszuwählen)

Massenfluss: $\dot{m}$

Wärmefluss: $\dot{Q}$



Adiabat (thermisch isoliert)



Diatherm

Thermodynamisches Sys.

Klassifizierung (um richtige Formel auszuwählen)

Massenfluss:

$\dot{m} \neq 0$ **Offenes (halb-offenes) System**

$\dot{m} = 0$ **Geschlossenes System**

Wärmefluss:

$\dot{Q} \neq 0$ **Diatherm**

$\dot{Q} = 0$ **Adiabat**

Gesamte Energie eines Systems

Massenspezifische Größe [J/kg] oder [kJ/kg]

Energie

Gesamte Energie: $E = U + KE + PE$

$$\frac{E}{m} = e = u + ke + pe$$

mit kinetischer Energie: $ke = \frac{KE}{m} = \frac{w^2}{2}$ und potentieller Energie: $pe = \frac{PE}{m} = g\,z$

Geschwindigkeit [m/s]

Innere Energie

- Kinetische Energie auf atomarer Ebene
- Chemische Energie (reaktionsfähiges Gemisch)
- Elektrochemische Energie (Batterieladung)

Energiebilanz am geschlossenen System

- Geschlossenes System an einem Kolben: $\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}t} = \sum_j \dot{Q}_j - \sum_n \dot{W}_{\mathrm{V},n}$ $\Delta E = \boxed{E_2} - \boxed{E_1} = \sum_j Q_j - \sum_n W_{\mathrm{V},n}$

Änderung der Gesammtenergie = Energie Zustand 2 – Energie Zustand 1

Zustandsgröße: (A moment fronzen in Time)
z.B. $u_1, u_2, u_3, v_1, T_3, V_1, U_1 \ldots$

= mit Umgebung ausgetauschte Wärme – an Umgebung geleistet Arbeit

Prozesssgröße: (What happend between these two moments)
z.B. $q_{12}, W_{23}, Q_{34} \ldots$

Energiebilanz am geschlossenen System

- Geschlossenes System an einem Kolben: $\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}t} = \sum_j \dot{Q}_j - \sum_n \dot{W}_{\mathrm{V},n}$ $\Delta E = \boxed{E_2} - \boxed{E_1} = \sum_j Q_j - \sum_n W_{\mathrm{V},n}$

Änderung der Gesammtenergie = Energie Zustand 2 – Energie Zustand 1

= mit Umgebung ausgetauschte Wärme – an Umgebung geleistet Arbeit

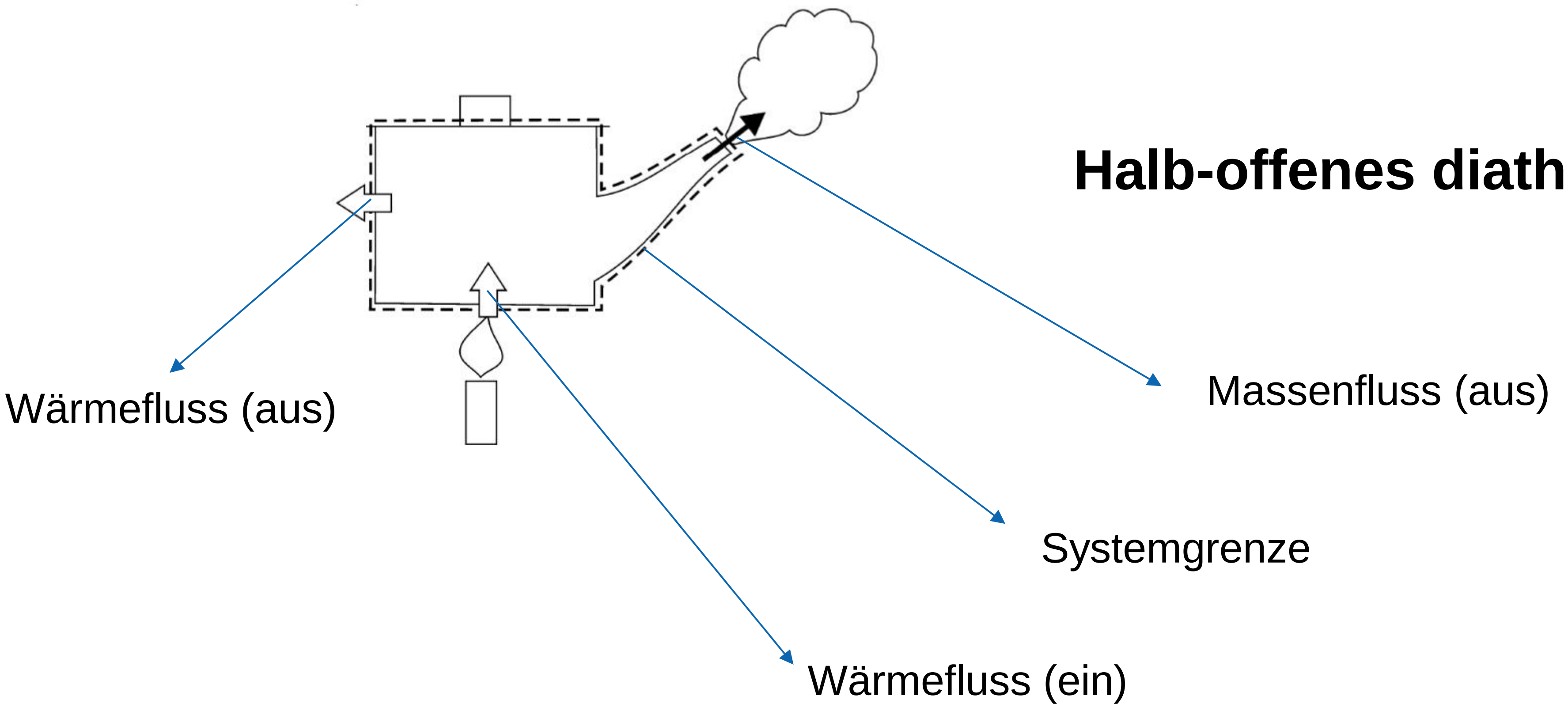
Gesamte Energie: $E = U + KE + PE$

$$\Delta E = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE = Q - W$$

Oft für Gas KE und PE vernachlässigbar

$$\Delta U = Q - W$$

Bsp.



Halb-offenes diatherme Sys.

Bsp.

Offenes Sys.

Halb-offenes Sys.

Bsp.

Geschlossenes Sys.

Vorzeichen Konvention

Vorzeichenkonvention

Zugeführte Massen- und Wärmeströme sind positiv, abgeführte negativ einzusetzen.

Zugeführte Arbeitsströme sind negativ, abgeführte positiv einzusetzen (vgl. Abbildung ~~rechts~~).

Vgl.

$$\Delta E = E_2 - E_1 = \sum_j Q_j - \sum_n W_{\mathrm{V},n}$$

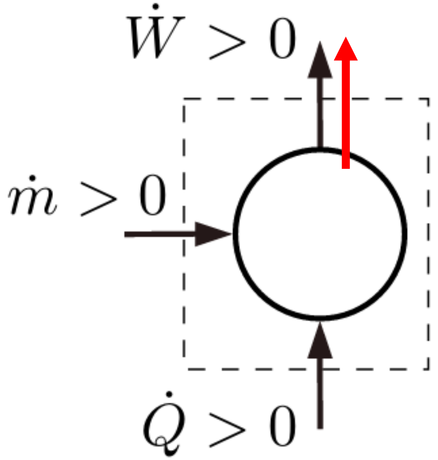
Arbeit leisten

$$W = +10J > 0$$

$$\Delta E = -W$$

$$\Delta E = -(+10J)$$

$$\Delta E = -10J$$



Vorzeichen Konvention

Vorzeichenkonvention

Zugeführte Massen- und Wärmeströme sind positiv, abgeführte negativ einzusetzen.

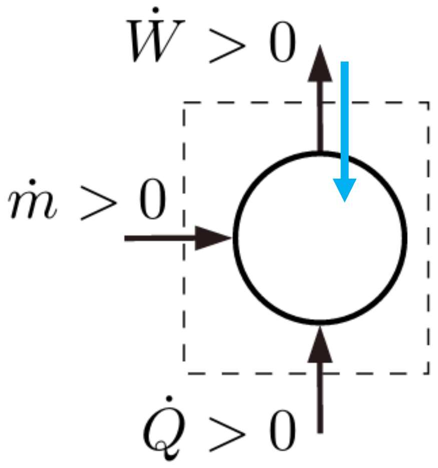
Zugeführte Arbeitsströme sind negativ, abgeführte positiv einzusetzen (vgl. Abbildung ~~rechts~~).

Vgl. $$\Delta E = E_2 - E_1 = \sum_j Q_j - \sum_n W_{V,n}$$

Arbeit aufnehmen

$$W = -100J < 0$$

$$\Delta E = -W$$
$$\Delta E = -(-100J)$$
$$\Delta E = 100J$$

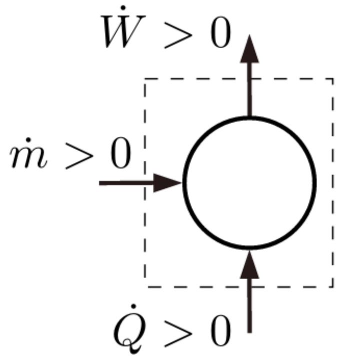


Vorzeichen Konvention

Identifizieren ob
Arbeit raus gehen — W positive
oder
Arbeit aufnehmen — W negative

$$W = \pm 10J$$

$$\Delta E = -W$$
$$\Delta E = -(\pm 10J)$$
$$\Delta E = \mp 10J$$



Dann einfach **W als ein Paket** in Formel einsetzen.

Je nach Situation

unabhängig

Vordefiniert nach ZF

$$W = -100J < 0$$

$$\Delta E = -W$$
$$\Delta E = -(-100J)$$
$$\Delta E = 100J$$

Ideales Gas

- Ideales Gas = keine Wechselwirkung zwischen Molekülen

Wenn man die Moleküle unendlich weit voneinander machen, dann keine Wechselwirkung mehr. Oder wenn man sie sehr heiß machen.

3 Stoffmodelle

Ideales Gas $\left(pV = n\overline{R}T \qquad pv = RT \qquad pV = mRT\right)$

$\bar{R}$: const.

$$\overline{R} = 8.314\,\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{mol\,K}}$$

$$R = c_\mathrm{p}^\mathrm{ig} - c_\mathrm{v}^\mathrm{ig} = \frac{\overline{R}}{M}$$

M: molare Masse

R: Gas abhängig

$m = nM$

Molspezifisch

$[m^3/mol]$

Massenspezifisch

$[m^3/kg]$

$$v = \frac{\bar{v}}{M}$$

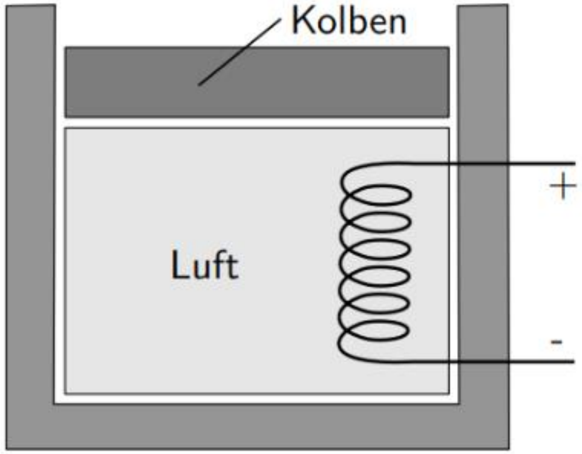
$[kg/mol]$

Vorrechenübung

Vorrechenübung

Aufgabe 1.1 ●●○ Bilanzgrenzen

In einem Zylinder ist $0.272\,\mathrm{kg}$ Luft von oben mit einem Kolben eingeschlossen. Der Kolben hat eine Grundfläche von $0.0929\,\mathrm{m}^2$ und ein Gewicht von $45.36\,\mathrm{kg}$. Der Kolben kann sich reibungsfrei an der Zylinderwand vertikal nach oben und unten bewegen um den Druck der Luft im Zylinder konstant zu halten. Von oben wirkt auf den Kolben der Druck der Atmosphäre mit $101\,400\,\mathrm{Pa}$. Für Zylinder und Kolben wird angenommen, dass keine Wärme durch sie hindurch oder in sie hinein fliesst. Die lokale Erdbeschleunigung ist $9.81\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$. Durch einen elektrischen Strom, der durch einen Widerstand im Zylinder fliesst, wird Wärme auf die Luft übertragen. Dabei erhöht sich das Volumen der Luft im Zylinder langsam um $0.0453\,\mathrm{m}^3$ und die spezifische innere Energie steigt um $41.868\,\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg}}$. Der Druck bleibt dabei konstant und der Kolben ist am Anfang und Ende des Vorgangs in Ruhe.



$$p_{aussen} = 101\,400\,\mathrm{Pa}$$
$$m_{Kolben} = 45.36\,\mathrm{kg}$$
$$A_{Kolben} = 0.0929\,\mathrm{m}^2$$

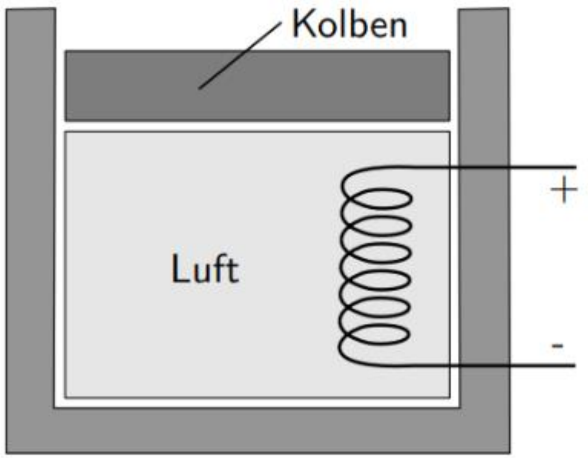
$$m_{Luft} = 0.272\,\mathrm{kg}$$
$$V_2 - V_1 = 0.0453\,\mathrm{m}^3$$
$$\Delta u_{Luft} = 41.868\,\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg}}$$

Abbildung 1: Luft-Kolben-System mit Heizwendel.

Vorrechenübung

Aufgabe 1.1 ●●○ Bilanzgrenzen

In einem Zylinder ist $0.272\,\mathrm{kg}$ Luft von oben mit einem Kolben eingeschlossen. Der Kolben hat eine Grundfläche von $0.0929\,\mathrm{m}^2$ und ein Gewicht von $45.36\,\mathrm{kg}$. Der Kolben kann sich reibungsfrei an der Zylinderwand vertikal nach oben und unten bewegen um den Druck der Luft im Zylinder konstant zu halten. Von oben wirkt auf den Kolben der Druck der Atmosphäre mit $101\,400\,\mathrm{Pa}$. Für Zylinder und Kolben wird angenommen, dass keine Wärme durch sie hindurch oder in sie hinein fliesst. Die lokale Erdbeschleunigung ist $9.81\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$. Durch einen elektrischen Strom, der durch einen Widerstand im Zylinder fliesst, wird Wärme auf die Luft übertragen. Dabei erhöht sich das Volumen der Luft im Zylinder langsam um $0.0453\,\mathrm{m}^3$ und die spezifische innere Energie steigt um $41.868\,\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg}}$. Der Druck bleibt dabei konstant und der Kolben ist am Anfang und Ende des Vorgangs in Ruhe.



$$p_{aussen} = 101\,400\,\mathrm{Pa}$$
$$m_{Kolben} = 45.36\,\mathrm{kg}$$
$$A_{Kolben} = 0.0929\,\mathrm{m}^2$$

$$m_{Luft} = 0.272\,\mathrm{kg}$$
$$V_2 - V_1 = 0.0453\,\mathrm{m}^3$$
$$\Delta u_{Luft} = 41.868\,\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg}}$$

Abbildung 1: Luft-Kolben-System mit Heizwendel.

Bestimme die Wärme, die in das System fliesst. Verwenden Sie dafür folgende zwei Lösungswege:

a) Energieerhaltung für ein System, das aus der eingeschlossenen Luft besteht

⓪ Was / wie ist gefragt

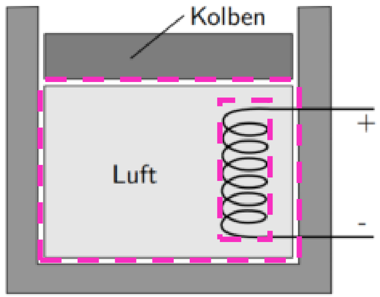
ges: Q über spezifikation/Lösungsweg: ein. gesl. Luft

Bestimme die Wärme, die in das System fliesst. Verwenden Sie dafür folgende zwei Lösungswege:

a) Energieerhaltung für ein System, das aus der eingeschlossenen Luft besteht

ges: Q   über spezifikation/Lösungsweg: ein, gesl. Luft

① System und seine Grenze identifizieren



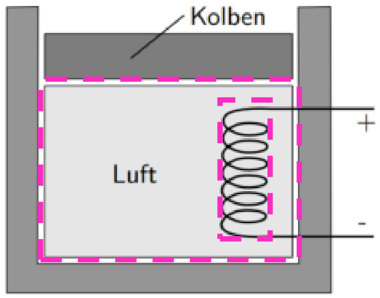
Keine Masse Fluss $\dot{m} = 0$

$\Rightarrow$ Geschlossenes Sys.

Adiabat (isoliert)

Bestimme die Wärme, die in das System fliesst. Verwenden Sie dafür folgende zwei Lösungswege:

a) Energieerhaltung für ein System, das aus der eingeschlossenen Luft besteht



ges: Q   über Spezifikation/Lösungsweg: ein. gesl. Luft

Keine Masse Fluss $\dot{m} = 0$

$\Rightarrow$ Geschlossenes Sys.
Adiabat (isoliert)

② Energiebilanz-Gleichung für Gesch. Sys. aufstellen

Aus ZF

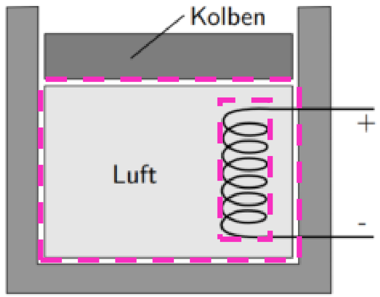
Energie

Gesamte Energie: $E = U + KE + PE$

- Geschlossenes System an einem Kolben: $\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}t} = \sum_j \dot{Q}_j - \sum_n \dot{W}_{V,n}$ $\Delta E = E_2 - E_1 = \sum_j Q_j - \sum_n W_{V,n}$

Bestimme die Wärme, die in das System fliesst. Verwenden Sie dafür folgende zwei Lösungswege:

a) Energieerhaltung für ein System, das aus der eingeschlossenen Luft besteht



ges: Q   über Spezifikation/Lösungsweg: ein. gesl. Luft

Keine Masse Fluss $\dot{m} = 0$

$\Rightarrow$ Geschlossenes Sys.
Adiabat (isoliert)

Aus ZF

Energie

Gesamte Energie: $E = U + KE + PE$

- Geschlossenes System an einem Kolben:

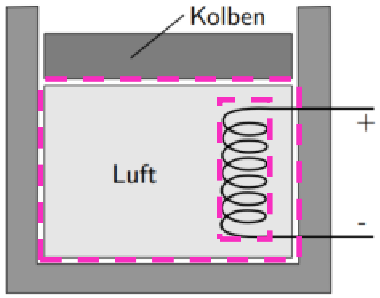
$$\frac{dE}{dt} = \sum_j \dot{Q}_j - \sum_n \dot{W}_{V,n}$$

$$\Delta E = E_2 - E_1 = \sum_j Q_j - \sum_n W_{V,n}$$

$$\Delta E = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE = Q - W_V$$

Bestimme die Wärme, die in das System fliesst. Verwenden Sie dafür folgende zwei Lösungswege:

a) Energieerhaltung für ein System, das aus der eingeschlossenen Luft besteht



ges: Q über spezifikation/Lösungsweg: ein. gesl. Luft

Keine Masse Fluss $\dot{m} = 0$

$\Rightarrow$ Geschlossenes Sys.
Adiabat (isoliert)

③ Vereinfachung der Gleichung mit Anahmen / Info

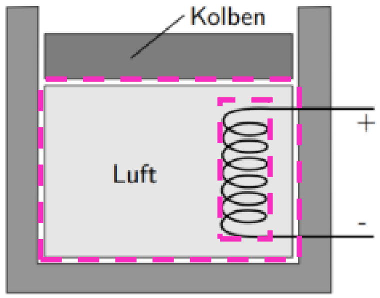
$$\Delta E = \Delta U + \cancel{\Delta KE}^{\,0} + \cancel{\Delta PE}^{\,0} = Q - W_v$$

Ruhe bei Anfang, Ende

Aus Vorlesung PE der Luft/Gase vernachlässigen

Bestimme die Wärme, die in das System fliesst. Verwenden Sie dafür folgende zwei Lösungswege:

a) Energieerhaltung für ein System, das aus der eingeschlossenen Luft besteht



ges: Q über spezifikation/Lösungsweg: ein, gesl. Luft

Keine Masse Fluss $\dot{m} = 0$

$\Rightarrow$ Geschlossenes Sys.
Adiabat (isoliert)

③ Vereinfachung der Gleichung mit Anahmen / Info

$$\Delta U = Q - W_v$$

④ Diese Gleichung mit geg. Info Lösen.

④ Diese Gleichung mit geg. Info Lösen. $\Delta U = Q - W_v$

Trick: Dimension (Einheiten) Analysis

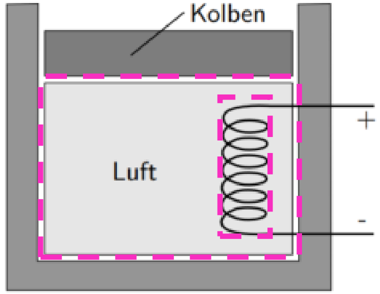
$\Delta U : [kJ]$ $m_{Luft} : [kg]$ $\Delta u_{Luft} : \left[\frac{kJ}{kg}\right]$

Um [kJ] zu bekommen, müssen $[\cancel{kg}] \cdot \left[\frac{kJ}{\cancel{kg}}\right] = [kJ]$

Somit ist $\Delta U = m_{Luft} \cdot \Delta u_{Luft}$

$$\Delta U = m_{Luft} \cdot \Delta u_{Luft} = 11{,}388096 \text{ kJ}$$

Bestimme die Wärme, die in das System fliesst. Verwenden Sie dafür folgende zwei Lösungswege:



a) Energieerhaltung für ein System, das aus der eingeschlossenen Luft besteht

ges: Q   über spezifikation/Lösungsweg: ein, gesl. Luft

Keine Masse Fluss $\dot{m} = 0$

$\Rightarrow$ Geschlossenes Sys.
Adiabat (isoliert)

$$\Delta U = Q - \boxed{W_V}$$

$$\Delta U = m_{Luft} \cdot \Delta u_{Luft} = 11{,}388096 \text{ kJ}$$

Spezifische Volumenarbeit
(reversible Änderung
des Systemvolumens)

$$w_{V,12}^{\mathrm{rev}} = \frac{W_{V,12}^{\mathrm{rev}}}{m} = \int_1^2 p \, dv$$

Spezifische Volumenarbeit
(reversible Änderung
des Systemvolumens)

$$w_{V,12}^{rev} = \frac{W_{V,12}^{rev}}{m} = \int_1^2 p\,dv$$

v : spezifische Volume $\left[\frac{m^3}{kg}\right]$ V : Volume $[m^3]$

m : $[kg]$

$$\Rightarrow \left[\frac{m^3}{kg}\right] \cdot [kg] = [m^3]$$

$$\Rightarrow v \cdot m = V$$

Herleitung von Formel aus ZF zu anwendbare Formel

Spezifische Volumenarbeit
(reversible Änderung
des Systemvolumens)

$$w_{\mathrm{V},12}^{\mathrm{rev}} = \frac{W_{\mathrm{V},12}^{\mathrm{rev}}}{m} = \int_1^2 p\,\mathrm{d}v$$

rev: reversibel

Kolben reibungsfrei ⇒ reversibele Arbeit

$$\frac{W_V}{m} = \int_1^2 p\,dv \qquad \Big|\cdot m$$

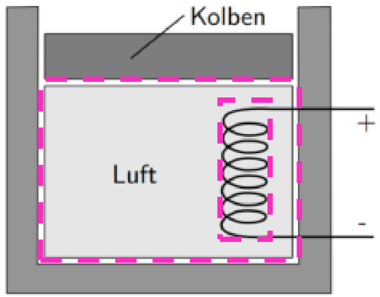
$p = const$

$dv \cdot m = dV$

$$W_V = p \int_1^2 dV$$

Bestimme die Wärme, die in das System fliesst. Verwenden Sie dafür folgende zwei Lösungswege:

a) Energieerhaltung für ein System, das aus der eingeschlossenen Luft besteht



ges: Q über Spezifikation/Lösungsweg: ein, gesl. Luft

$\Delta U = Q - \boxed{W_V}$

$\Delta U = m_{Luft} \cdot \Delta u_{Luft} = 11{,}388096 \text{ kJ}$

$W_V = \int_1^2 p \, dV$

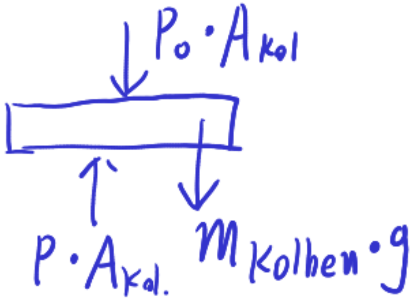
$= p \int_1^2 dV = p [V]_{V_1}^{V_2}$

$= p(V_2 - V_1)$

p, $(V_2 - V_1)$ geg. einsetzen

$W_V = 4.81 \text{ kJ}$

GGW für Kolben



$P_0 \cdot A_{Kolben} + m_{Kolben} \cdot g = P \cdot A_{Kolben}$

P_{aussen}

alle werte geg. einset.

$P = 106190 \text{ Pa}$

alle zurück einsetzen $Q = \Delta U + W_V = \underline{\underline{16{,}198 \text{ kJ}}}$

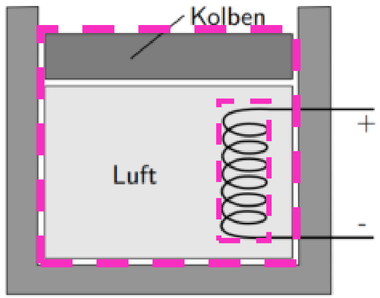
16,2 kJ : ML. ✓

b) Energieerhaltung für ein System, das aus der eingeschlossenen Luft und dem Kolben besteht

⓪ Was / wie ist gefragt

ges: Q   spezifikation/Lösungsweg: Luft u. Kolben

① System und seine Grenze identifizieren



Keine Masse Fluss $\dot{m} = 0$

$\Rightarrow$ Geschlossenes Sys.

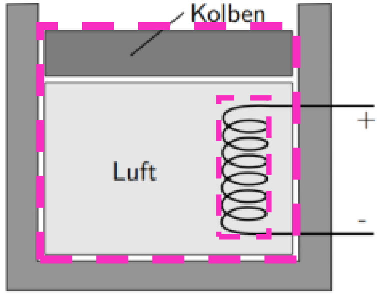
Adiabat (isoliert)

Nicht mehr homogen $\Rightarrow$ $\boxed{\text{Sys.}}$

$\boxed{\text{Sub. sys}}$ Luft $\boxed{\text{Sub. sys.}}$ Kolben

b) Energieerhaltung für ein System, das aus der eingeschlossenen Luft und dem Kolben besteht

ges: Q   Spezifikation/Lösungsweg: Luft u. Kolben



Keine Masse Fluss $\dot{m} = 0$

$\Rightarrow$ Geschlossenes Sys.
Adiabat (isoliert)

② Energiebilanz - Gleichung aufstellen

Nicht mehr homogen $\Rightarrow$ $\boxed{\text{Sys.}}$

$\boxed{\text{Sub. Sys}}$ Luft

$\boxed{\text{Sub. Sys.}}$ Kolben

Vgl. aus ZF.

Energie

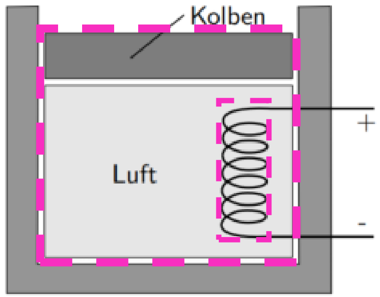
Gesamte Energie: $E = U + KE + PE$

$$\Delta E = \Delta E_{Luft} + \Delta E_{Kolben} = Q - W_v$$

$$\Delta E_{Kolben} = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE$$

$$\Delta E_{Luft} = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE$$

b) Energieerhaltung für ein System, das aus der eingeschlossenen Luft und dem Kolben besteht



ges: Q   Spezifikation/Lösungsweg: Luft u. Kolben

Keine Masse Fluss $\dot{m} = 0$

⇒ Geschlossenes Sys.
Adiabat (isoliert)

$$\Delta E = \Delta E_{Luft} + \Delta E_{Kolben} = Q - W_v$$

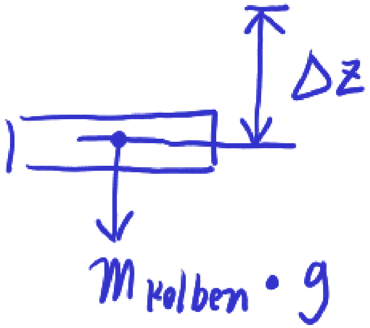
$$\Delta E_{Kolben} = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE$$

③ Vereinfachung der Gleichung mit Annahmen / Info

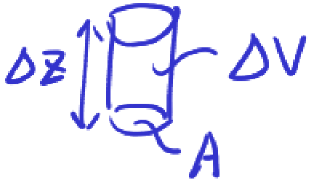
$$\Delta E_{Kolben} = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE = \Delta PE = m_{Kolben} \cdot g \cdot \Delta z = 0{,}217\,kJ$$

Ruhe Anfang, Ende

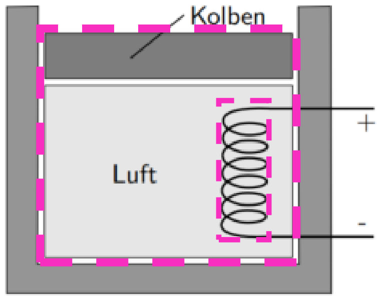
Temp. → const.
Keine Wärmefluss



$$\Delta z = \frac{(V_2 - V_1)}{A_{Kolben}} = 0{,}4876\,m$$



b) Energieerhaltung für ein System, das aus der eingeschlossenen Luft und dem Kolben besteht



ges: Q spezifikation/Lösungsweg: Luft u. Kolben

Keine Masse Fluss $\dot{m} = 0$

$\Rightarrow$ Geschlossenes Sys.
Adiabat (isoliert)

$$\Delta E = \Delta E_{Luft} + \Delta E_{Kolben} = Q - W_v$$

$$\Delta E_{Kolben} = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE$$

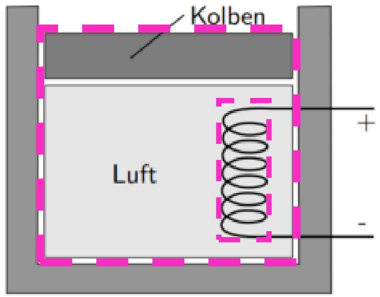
$$\Delta E_{Luft} = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE$$

$$\Delta E_{Kolben} = \Delta PE = m_{Kolben} \cdot g \cdot \Delta z = 0{,}217\ kJ$$

$$\Delta E_{Luft} = \Delta U + \cancelto{0}{\Delta KE} + \cancelto{0}{\Delta PE}$$

$$= \Delta U = 11{,}388096\ kJ \quad \text{aus a)}$$

b) Energieerhaltung für ein System, das aus der eingeschlossenen Luft und dem Kolben besteht



Keine Masse Fluss $\dot{m} = 0$

$\Rightarrow$ Geschlossenes Sys.

Adiabat (isoliert)

ges: Q   Spezifikation/Lösungsweg: Luft u. Kolben

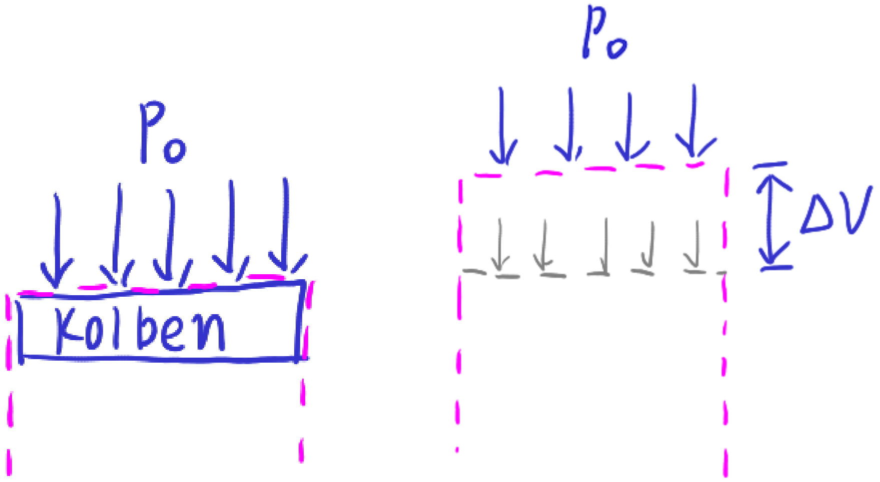
$$\Delta E = \Delta E_{Luft} + \Delta E_{Kolben} = Q - \boxed{W_v} \; ? \qquad P\,?$$

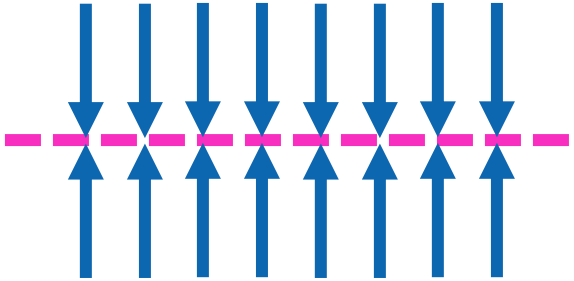
$$\Delta E_{Kolben} = \Delta PE = m_{Kolben} \cdot g \cdot \Delta z = 0{,}217 \text{ kJ}$$

$$\Delta E_{Luft} = \Delta U + \cancel{\Delta KE}^{\,0} + \cancel{\Delta PE}^{\,0}$$

$$= \Delta U = 11{,}388096 \text{ kJ} \quad \text{aus a)}$$

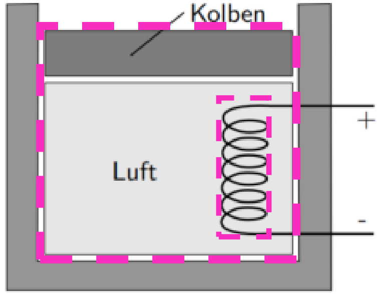
Druck am Systemgrenze: Immer GGW





Luft Druck von Innen = Druck von Außen

b) Energieerhaltung für ein System, das aus der eingeschlossenen Luft und dem Kolben besteht



ges: Q   Spezifikation/Lösungsweg: Luft u. Kolben

Keine Masse Fluss $\dot{m} = 0$

⇒ Geschlossenes Sys.
Adiabat (isoliert)

$$\Delta E = \Delta E_{Luft} + \Delta E_{Kolben} = Q - \boxed{W_V} \quad ? \qquad P\,?$$

$$\Delta E_{Kolben} = \Delta PE = m_{Kolben} \cdot g \cdot \Delta z = 0{,}217 \text{ kJ}$$

$$\Delta E_{Luft} = \Delta U + \cancel{\Delta KE}_{\,0} + \cancel{\Delta PE}_{\,0}$$

$$= \Delta U = 11{,}388096 \text{ kJ} \quad \text{aus a)}$$

Herleitung von Formel aus ZF zu anwendbare Formel

Spezifische Volumenarbeit
(reversible Änderung des Systemvolumens)

$$w^{\mathrm{rev}}_{V,12} = \frac{W^{\mathrm{rev}}_{V,12}}{m} = \int_1^2 p\,\mathrm{d}v$$

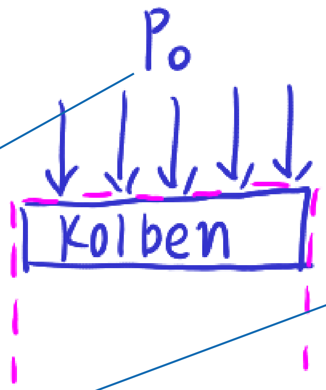
rev: reversibel

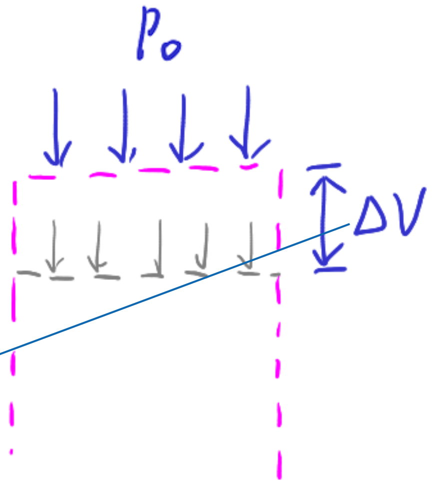
Kolben reibungsfrei ⇒ reversibele Arbeit

$$\frac{W_V}{m} = \int_1^2 p\,dv \quad \Big| \cdot m$$

$p = \text{const}$
$dv \cdot m = dV$

$$W_V = p \int_1^2 dV$$

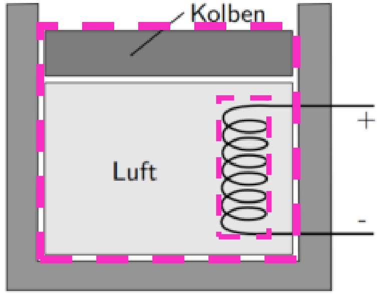




$$W_V = P_0(V_2 - V_1)$$

$$= 4{,}593 \text{ kJ}$$

b) Energieerhaltung für ein System, das aus der eingeschlossenen Luft und dem Kolben besteht



ges: Q   spezifikation/Lösungsweg: Luft u. Kolben

Keine Masse Fluss $\dot{m} = 0$

⇒ Geschlossenes Sys.
Adiabat (isoliert)

$$\Delta E = \Delta E_{Luft} + \Delta E_{Kolben} = Q - \boxed{W_v} \;?\quad P\,?$$

$$\Delta E_{Kolben} = \Delta PE = m_{Kolben} \cdot g \cdot \Delta z = 0{,}217\ \text{kJ}$$

$$\Delta E_{Luft} = \Delta U + \cancel{\Delta KE}^{\,0} + \cancel{\Delta PE}^{\,0}$$

$$= \Delta U = 11{,}388096\ \text{kJ} \quad \text{aus a)}$$

$$W_v = P_0 (V_2 - V_1)$$

$$= 4{,}593\ \text{kJ}$$

④ Alle einsetzen und lösen.

$$\Delta E = \Delta E_{Luft} + \Delta E_{Kolben} = Q - W_v$$

$$Q = \Delta E_{Luft} + \Delta E_{Kolben} + W_v$$

$$= 11{,}388096\ \text{kJ} + 0{,}217\ \text{kJ} + 4{,}593\ \text{kJ}$$

$$= 16{,}1981\ \text{kJ}$$

ML.= 16,2 kJ ✓

Resultat aus a) u. b) das Gleiche

Lösungsweg a), b) beide geht

$\Rightarrow$ In der Zukunft auch, manchmal mehrere Lösungsweg möglich. Man muss für sich selbst das Beste finden.

Gute Systemgrenze zu setzen ist sehr wichtig!
Man muss üben, um Gefühle zu entwickeln.

Danke für die Aufmerksamkeit!

Selbstrechenübung

Feedback