



Thermodynamik I – Übung 2

Ablauf

- Inkompressible Flüssigkeiten
- Prozesse
- Arbeit
- Wärme
- Erster Hauptsatz für geschlossene Systeme
- Ideale Gase
- Kreisprozesse

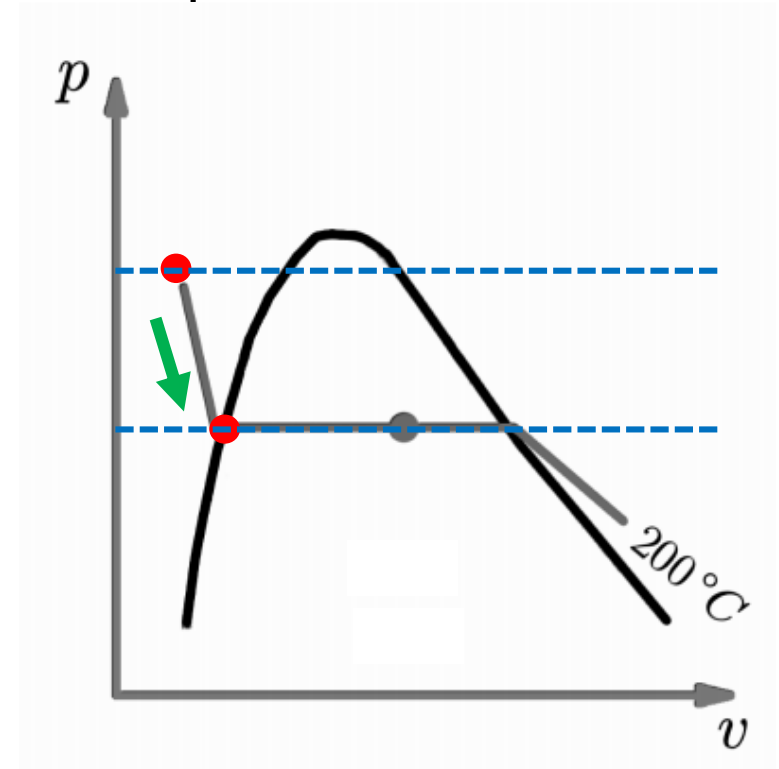
Inkompressible Flüssigkeiten

- Für inkompressible Flüssigkeiten gilt: Spezifisches Volumen und spezifische innere Energie sind praktisch nur Funktionen der Temperatur

$$v(T, p) \cong v_f(T)$$

$$u(T, p) \cong u_f(T)$$

- D.h. sind Zustandsgrößen für eine Flüssigkeit bei Temperatur T^* und Druck p^* gesucht, können diejenigen Größen der gesättigten Flüssigkeit bei Temperatur T^* aus den Tabellen gelesen werden (keine Rücksicht mehr auf Druck, da näherungsweise druckunabhängig)
- Ausnahme** bildet Wasser: In Tab. A-5 haben wir genaue Daten für flüssiges Wasser bei hohen Drücken, daher obige Annäherung für flüssiges Wasser nur bei niedrigen Drücken (unter 25 bar) verwenden



Inkompressible Flüssigkeit

TABLE A-2 (Continued)

Temp. °C	Press. bars	Specific Volume m ³ /kg		Internal Energy kJ/kg		Enthalpy kJ/kg			Entropy kJ/kg · K		Temp. °C
		Sat. Liquid $v_f \times 10^3$	Sat. Vapor v_g	Sat. Liquid u_f	Sat. Vapor u_g	Sat. Liquid h_f	Evap. h_{fg}	Sat. Vapor h_g	Sat. Liquid s_f	Sat. Vapor s_g	
50	.1235	1.0121	12.032	209.32	2443.5	209.33	2382.7	2592.1	.7038	8.0763	50
55	.1576	1.0146	9.568	230.21	2450.1	230.23	2370.7	2600.9	.7679	7.9913	55
60	.1994	1.0172	7.671	251.11	2456.6	251.13	2358.5	2609.6	.8312	7.9096	60
65	.2503	1.0199	6.197	272.02	2463.1	272.06	2346.2	2618.3	.8935	7.8310	65
70	.3119	1.0228	5.042	292.95	2469.6	292.98	2333.8	2626.8	.9549	7.7553	70
75	.3858	1.0259	4.131	313.90	2475.9	313.93	2321.4	2635.3	1.0155	7.6824	75
80	.4739	1.0291	3.407	334.86	2482.2	334.91	2308.8	2643.7	1.0753	7.6122	80
85	.5783	1.0325	2.828	355.84	2488.4	355.90	2296.0	2651.9	1.1343	7.5445	85
90	.7014	1.0360	2.361	376.85	2494.5	376.92	2283.2	2660.1	1.1925	7.4791	90
95	.8455	1.0397	1.982	397.88	2500.6	397.96	2270.2	2668.1	1.2500	7.4159	95
100	1.014	1.0435	1.673	418.94	2506.5	419.04	2257.0	2676.1	1.3069	7.3549	100
110	1.433	1.0516	1.210	461.14	2518.1	461.30	2230.2	2691.5	1.4185	7.2387	110
120	1.985	1.0603	0.8919	503.50	2529.3	503.71	2202.6	2706.3	1.5276	7.1296	120
130	2.701	1.0697	0.6685	546.02	2539.9	546.31	2174.2	2720.5	1.6344	7.0269	130
140	3.613	1.0797	0.5089	588.74	2550.0	589.13	2144.7	2733.9	1.7391	6.9299	140
150	4.758	1.0905	0.3928	631.68	2559.5	632.20	2114.3	2746.5	1.8418	6.8379	150
160	6.178	1.1020	0.3071	674.86	2568.4	675.55	2082.6	2758.1	1.9427	6.7502	160
170	7.917	1.1143	0.2428	718.33	2576.5	719.21	2049.5	2768.7	2.0419	6.6663	170
180	10.02	1.1274	0.1941	762.09	2583.7	763.22	2015.0	2778.2	2.1396	6.5857	180
190	12.54	1.1414	0.1565	806.19	2590.0	807.62	1978.8	2786.4	2.2359	6.5079	190

Inkompressible Flüssigkeit

TABLE A-2 (Continued)

Temp. °C	Press. bars	Specific Volume m ³ /kg		Internal Energy kJ/kg		Enthalpy kJ/kg			Entropy kJ/kg · K		Temp. °C
		Sat. Liquid $v_f \times 10^3$	Sat. Vapor v_g	Sat. Liquid u_f	Sat. Vapor u_g	Sat. Liquid h_f	Evap. h_{fg}	Sat. Vapor h_g	Sat. Liquid s_f	Sat. Vapor s_g	
50	.1235	1.0121	12.032	209.32	2443.5	209.33	2382.7	2592.1	.7038	8.0763	50
55	.1576	1.0146	9.568	230.21	2450.1	230.23	2370.7	2600.9	.7679	7.9913	55
60	.1994	1.0172	7.671	251.11	2456.6	251.13	2358.5	2609.6	.8312	7.9096	60
65	.2503	1.0199	6.197	272.02	2463.1	272.06	2346.2	2618.2	.8935	7.8310	65
70	.3119	1.0228	5.042	292.95	2469.6	292.98	2333.8	2626.8	.9549	7.7553	70
75	.3858	1.0259	4.131	313.90	2475.9	313.93	2321.4	2635.3	1.0155	7.6824	75
80	.4739	1.0291	3.407	334.86	2482.2	334.91	2308.8	2643.7	1.0753	7.6122	80
85	.5783	1.0325	2.828	355.84	2488.4	355.90	2296.0	2651.9	1.1343	7.5445	85
90	.7014	1.0360	2.361	376.85	2494.5	376.92	2283.2	2660.1	1.1925	7.4791	90
95	.8455	1.0397	1.982	397.88	2500.6	397.96	2270.2	2668.1	1.2500	7.4159	95
100	1.014	1.0435	1.673	418.94	2506.5	419.04	2257.0	2676.1	1.3069	7.3549	100
110	1.433	1.0516	1.210	461.14	2518.1	461.30	2230.2	2691.5	1.4185	7.2387	110
120	1.985	1.0603	0.8919	503.50	2529.3	503.71	2202.6	2706.3	1.5276	7.1296	120
130	2.701	1.0697	0.6685	546.02	2539.9	546.31	2174.2	2720.5	1.6344	7.0269	130
140	3.613	1.0797	0.5089	588.74	2550.0	589.13	2144.7	2733.9	1.7391	6.9299	140
150	4.758	1.0905	0.3928	631.68	2559.5	632.20	2114.3	2746.5	1.8418	6.8379	150
160	6.178	1.1020	0.3071	674.86	2568.4	675.55	2082.6	2758.1	1.9427	6.7502	160
170	7.917	1.1143	0.2428	718.33	2576.5	719.21	2049.5	2768.7	2.0419	6.6663	170
180	10.02	1.1274	0.1941	762.09	2583.7	763.22	2015.0	2778.2	2.1396	6.5857	180
190	12.54	1.1414	0.1565	806.19	2590.0	807.62	1978.8	2786.4	2.2359	6.5079	190

Prozesse

- Durchläuft das System einen Prozess, verändert es seinen Zustand in einen nächsten Zustand
- 1. Übung: Bestimmung des Zustands eines System
Ab 2. Übung: Betrachtung von Prozessen und Zustandsänderungen
(Wärme- bzw. Leistungsabgabe, Wirkungsgrade...)
- Charakterisierung von Prozessen:
 - **Isothermer** Prozess: **Temperatur** konstant
 - **Isobarer** Prozess: **Druck** konstant
 - **Isochorer** Prozess: **Volumen** konstant
 - **Adiabater** Prozess: Kein **Wärmefluss**

Arbeit I

- Mechanik: $W = \int_1^2 \vec{F} \cdot d\vec{s} = \int_{V_1}^{V_2} p(V) \cdot dV, \quad [W] = \text{J}$

- Arbeit ist **keine Zustandsgrösse**:

$$W_{12} = \int_1^2 \delta W \neq W_2 - W_1$$

Grössen W_1 und W_2 bedeutungslos, da Arbeit keine Zustandsgrösse (W_2 hängt beispielsweise vom gewählten Weg von 1 nach 2 ab)

- **Vorzeichenkonvention:**
 - **$W > 0$** : Vom System geleistete Arbeit (**a**bgeführte Arbeit)
 - **$W < 0$** : Am System geleistete Arbeit (**z**ugeführte Arbeit)

Arbeit II

- Beispiel wie System Arbeit verrichtet: **Expansions- und Kompressionsarbeit**
- Beispiel Zylinder-Kolben-Apparat:

- Es gilt: $\delta W = p \cdot A \cdot dx = p \cdot dV$
- Volumenarbeit:

$$W = \int_{V_1}^{V_2} p(V) \cdot dV$$

- Expansion: $W > 0$

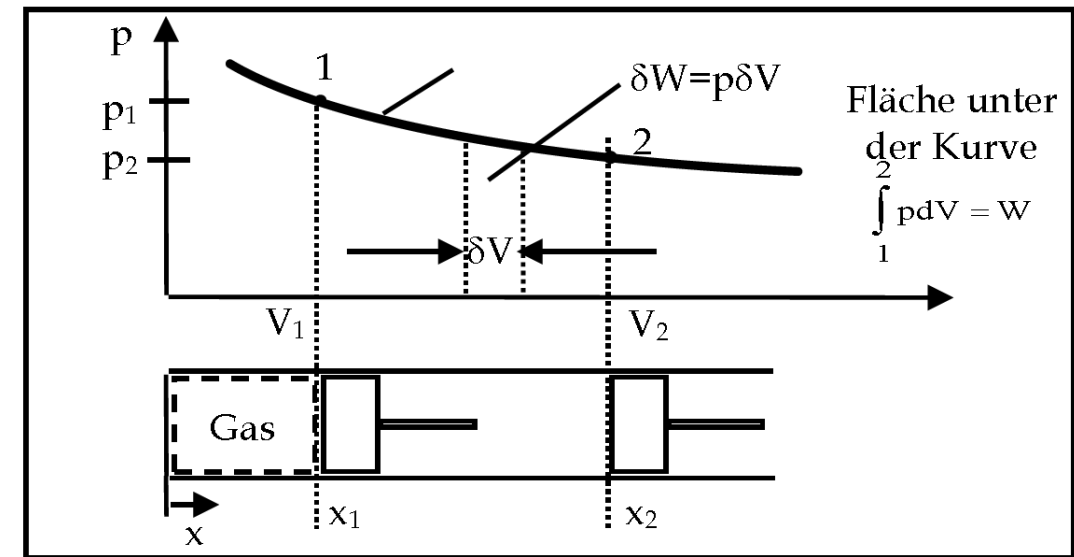
Kompression: $W < 0$

- p-V-Diagramm: Fläche unter Kurve entspricht Arbeit (abhängig von Weg)

- **Polytrope Zustandsänderung:**

Ansatz für Funktion $p(V)$: $p \cdot V^n = \text{konst.}$

mit n : Polytropenkoeffizient



Wärme

- Übertragene Wärmemenge entspricht dem Fluss von Wärme über die Systemgrenze
- Wärme Q ist **keine Zustandsgrösse**:

$$Q_{12} = \int_1^2 \delta Q \neq Q_2 - Q_1$$

- **Vorzeichenkonvention:**
 - **$Q > 0$:** Dem System zugeführte Wärme
 - **$Q < 0$:** Vom System abgegebene Wärme
- Adiabater Prozess: **$Q = 0$**
- Einheit: $[Q] = \text{J}$

Erster Hauptsatz für geschlossene Systeme I

- Der erste Hauptsatz ist nichts anderes als die **Energieerhaltung** resp. eine Energiebilanz
- Energien, welche in einem System auftreten:
 - Kinetische Energie: $KE = \frac{1}{2} \cdot m \cdot w^2$
 - Potentielle Energie: $PE = m \cdot g \cdot z$
 - Innere Energie U
- Folglich gilt für die Gesamtenergie E :
Die Energiedifferenz zwischen 2 Zuständen:

$$E = KE + PE + U$$

$$\Delta E = \Delta KE + \Delta PE + \Delta U$$

Erster Hauptsatz für geschlossene Systeme II

- Erster Hauptsatz für **geschlossene** Systeme:

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

- Einheiten: $[E] = [U] = [W] = [Q] = \text{J}$
- Vereinfachter 1. Hauptsatz: $\Delta KE = 0$, $\Delta PE = 0$

$$\Delta U = Q - W$$

Erster Hauptsatz für geschlossene Systeme III

- Schreibt man den ersten Hauptsatz als momentane Änderung der Energie E so wird er auch **Leistungsbilanz** genannt
- **Leistung** ist pro Zeiteinheit geleistete Arbeit: $\dot{W} = \frac{dW}{dt}$, $[\dot{W}] = \frac{J}{s} = W$
- Die Leistungsbilanz lautet:

zeitliche Änderung
des Betrages der
totalen Energie des
Systems

=

zeitliche Netto-
Wärmeübertra-
gung durch die
Systemgrenze

+

zeitliche über die System -
grenze transferierte Netto -
Arbeit (Leistung)

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W}$$

- Einheiten: $[\dot{E}] = [\dot{Q}] = [\dot{W}] = W$

Ideale Gase

- Gase, bei welchen keine Wechselwirkungskräfte zwischen Gas-Molekülen auftreten (häufig als Näherung)
- Ideale Gasgleichung:

$$pV = n\bar{R}T \quad \text{bzw.} \quad pv = RT$$

wobei:

- $\bar{R} = 8.314 \text{ J/molK}$ (universelle Gaskonstante)
- $R = \frac{\bar{R}}{M}$ mit M: Molare Masse (Tab. A-1) (gilt nur für je eine Substanz, Achtung Einheiten für ideale Gasgleichung)

- Arbeiten mit Idealen Gasen:
 - Kein «Hügel» in p-v/T-v-Diagramm da keine Aggregatzustandsänderung
 - Anstelle der Tabellen benutzen wir häufig ideale Gasgleichung
 - Wasserdampf ist kein ideales Gas ausser in Aufgabenstellung so angenommen

Kreisprozesse

- Endet eine Durchführung von Teilprozessen wieder am Anfangspunkt, nennt man dies einen **Kreisprozess** (geschlossene Kurve in Diagramm)
- Sich periodisch wiederholende Kreisprozesse haben wichtige Anwendungen in Thermodynamik (Dampfmaschine, Ottomotor...)
- Erster Hauptsatz für Kreisprozesse:
Da Anfangs- und Endpunkt übereinstimmt, muss gelten: $\Delta U_{KP} = 0$ (weil innere Energie eine Zustandsgrösse)

$$\Delta U = Q - W = 0 \quad \rightarrow$$

$$W_{KP} = Q_{KP}$$