



# Thermodynamikübungsstunde 10

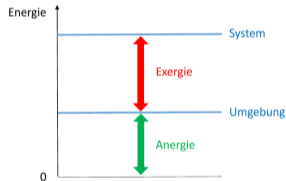
Exergie für offene Systeme

Folien von Dominic Landolf, angepasst durch Pascal Hodel und Auf der Maur

Pascal Auf der Maur

# Exergie

- Exergie ist der Anteil an Energie der **maximal** (reversibel) in Arbeit umgewandelt werden kann bis zum Ausgleich mit der Umgebung.



- Das heisst, eine Energiemenge besteht aus Exergie und Anergie

$$\text{Energie} = \text{Exergie} + \text{Anergie}$$

## Exergie - Geschlossenes System

- Exergie berechnen, indem man die Energie des Systems mit der Energie der Umgebung (Index 0) vergleicht:

$$E_{x,\text{geschl.}} = U - U_0 + p_0(V - V_0) - T_0(S - S_0) + KE + PE$$

$$e_{x,\text{geschl.}} = u - u_0 + p_0(v - v_0) - T_0(s - s_0) + ke + pe$$

## Exergie - offenes System

- Die Exergie, welche ein Massenstrom bzgl. der Umgebung mit sich führt, kann man folgendermassen berechnen:

$$\dot{E}_{x,\text{str}} = \dot{m} \cdot [h - h_0 - T_0(s - s_0) + ke + pe]$$

$$\dot{e}_{x,\text{str}} = h - h_0 - T_0(s - s_0) + ke + pe$$

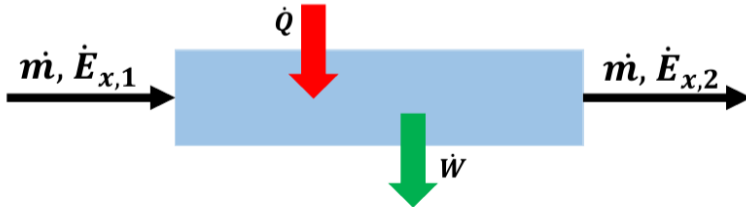
- $[\dot{E}_{x,\text{str}}] = \frac{J}{s} = W$
- $[\dot{e}_{x,\text{str}}] = \frac{J}{kg}$

## Exergie - Exergiedifferenz

- Somit lässt sich die Exergiedifferenz eines Massenstromes von 1 nach 2 berechnen als:

$$\dot{E}_{x,2} - \dot{E}_{x,1} = \dot{m} \cdot [h_2 - h_1 - T_0(s_2 - s_1) + \Delta ke + \Delta pe]$$

$$\dot{e}_{x,2} - \dot{e}_{x,1} = h_2 - h_1 - T_0(s_2 - s_1) + \Delta ke + \Delta pe$$



## Exergie - Exergiebilanz

- Exergie kann durch Wärme oder Arbeit übertragen werden
- Aus der Kombination von Energie- und Entropiebilanz folgt die Exergiebilanz:

$$E_{x,2} - E_{x,1} = \int_1^2 \left(1 - \frac{T_0}{T_G}\right) \partial Q - [W - p_0(V_2 - V_1)] - T_0 \cdot S_{erz}$$

- $T_0$  und  $p_0$  bezeichnen dabei die Umgebungsbedingungen

## Exergiebilanz für offene Systeme

- Die Exergiebilanz für offene Systeme lautet:

$$\frac{dE_x}{dt} = \sum_{i=1}^n \dot{m}_{ie} \cdot e_{x,\text{str},ie} - \sum_{k=1}^n \dot{m}_{ka} \cdot e_{x,\text{str},ka} + \sum_{j=1}^l \left( 1 - \frac{T_0}{T_j} \right) \dot{Q}_j - \dot{W}_s - T_0 \cdot \dot{S}_{\text{erz}}$$

- $T_0$  entspricht der Umgebungstemperatur
- $T_j$  entspricht der jeweiligen Grenztemperatur

## Relative Drücke und Volumina

- Entropieänderung für **ideale Gase**

$$s_2(T_2, p_2) - s_1(T_1, p_1) = s^0(T_2) - s^0(T_1) - R \ln \left( \frac{p_2}{p_1} \right)$$

- Falls der Prozess von 1 nach 2 **isentrop** ist, gilt  $s_2 - s_1 = 0$  und es kann nach dem Druckverhältnis aufgelöst werden:

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{e^{s^0(T_2)/R}}{e^{s^0(T_1)/R}}$$



## Relative Drücke und Volumina

- Ein relativer Druck (**keine Einheit!**) kann also definiert werden als:

$$p_r = p_r(T) = e^{s^0(T)/R}$$

- Beachte, dass der relative Druck nur eine Funktion der Temperatur ist
- Somit gilt für **isentropen Prozesse bei Luft als ideales Gas:**

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{p_{r2}}{p_{r1}}$$

## Relative Drücke und Volumina

- Mit der idealen Gasgleichung für Luft findet man folgenden Ausdruck für das Verhältnis der spezifischen Volumen:

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{RT_2}{p_2} \cdot \frac{p_1}{RT_1} = \frac{RT_2}{p_{r2}} \cdot \frac{p_{r1}}{RT_1}$$

- Man definiert das relative Volumen als:

$$v_r = \frac{RT}{p_r}$$

- Somit gilt für **isentropen Prozesse bei Luft als ideales Gas**:

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{v_{r2}}{v_{r1}}$$

## Relative Drücke und Volumina

TABLE A-22 Ideal Gas Properties of Air

T(K), h and u(kJ/kg), s*(kJ/kg·K)											
T	h	$p_r$	u	$v_r$	s*	T	h	$p_r$	u	$v_r$	s*
200	199.97	0.3363	142.56	1707.	1.29559	450	451.80	5.775	322.62	223.6	2.11161
210	209.97	0.3987	149.69	1512.	1.34444	460	462.02	6.245	329.97	211.4	2.13407
220	219.97	0.4690	156.82	1346.	1.39105	470	472.24	6.742	337.32	200.1	2.15604
230	230.02	0.5477	164.00	1205.	1.43557	480	482.49	7.268	344.70	189.5	2.17760
240	240.02	0.6355	171.13	1084.	1.47824	490	492.74	7.824	352.08	179.7	2.19876
250	250.05	0.7329	178.28	979.	1.51917	500	503.02	8.411	359.49	170.6	2.21952
260	260.09	0.8405	185.45	887.8	1.55848	510	513.32	9.031	366.92	162.1	2.23993
270	270.11	0.9590	192.60	808.0	1.59634	520	523.63	9.684	374.36	154.1	2.25997
280	280.13	1.0889	199.75	738.0	1.63279	530	533.98	10.37	381.84	146.7	2.27967
285	285.14	1.1584	203.33	706.1	1.65055	540	544.35	11.10	389.34	139.7	2.29906
290	290.16	1.2311	206.91	676.1	1.66802	550	554.74	11.86	396.86	133.1	2.31809
295	295.17	1.3068	210.49	647.9	1.68515	560	565.17	12.66	404.42	127.0	2.33685
300	300.19	1.3860	214.07	621.2	1.70203	570	575.59	13.50	411.97	121.2	2.35531
305	305.22	1.4686	217.67	596.0	1.71865	580	586.04	14.38	419.55	115.7	2.37348
310	310.24	1.5546	221.25	572.3	1.73498	590	596.52	15.31	427.15	110.6	2.39140
315	315.27	1.6442	224.85	549.8	1.75106	600	607.02	16.28	434.78	105.8	2.40920
320	320.29	1.7375	228.42	528.6	1.76690	610	617.53	17.30	442.42	101.2	2.42644
325	325.31	1.8345	232.02	508.4	1.78249	620	628.07	18.36	450.09	96.92	2.44356
330	330.34	1.9352	235.61	489.4	1.79783	630	638.63	19.44	457.78	92.84	2.46048
340	340.42	2.149	242.82	454.1	1.82790	640	649.22	20.64	465.50	88.99	2.47716
350	350.49	2.379	250.02	422.2	1.85708	650	659.84	21.86	473.25	85.34	2.49364
360	360.58	2.626	257.24	393.4	1.88543	660	670.47	23.13	481.01	81.89	2.50985
370	370.67	2.892	264.46	367.2	1.91313	670	681.14	24.46	488.81	78.61	2.52589
380	380.77	3.176	271.69	343.4	1.94001	680	691.82	25.85	496.62	75.50	2.54175
390	390.88	3.481	278.93	321.5	1.96633	690	702.52	27.29	504.45	72.56	2.55731
400	400.98	3.806	286.16	301.6	1.99194	700	713.27	28.80	512.33	69.76	2.57277
410	411.12	4.153	293.43	283.3	2.01699	710	724.04	30.38	520.23	67.07	2.58810
420	421.26	4.522	300.69	266.6	2.04142	720	734.82	32.02	528.14	64.53	2.60319
430	431.43	4.915	307.99	251.1	2.06533	730	745.62	33.72	536.07	62.13	2.61803
440	441.61	5.332	315.30	236.8	2.08870	740	756.44	35.50	544.02	59.82	2.63280