

Formelsammlung zur Technischen Thermodynamik (Quelle: LTT RWTH Aachen)

Erster Hauptsatz

- für geschlossene Systeme $Q_{12} + W_{12} = U_2 - U_1 + E_{a2} - E_{a1} \quad W_{v12} = - \int_1^2 p dV$

- für offene Systeme $Q_{I,II}^* + W_{I,II}^* = U_{II}^* - U_I^* + E_{aII}^* - E_{aI}^* - \sum_i \int_{\tau_I}^{\tau_{II}} (u_i + p_i v_i + e_{a_i}) \dot{m}_i d\tau$

- für stationäre Fließprozesse $\dot{Q}_{12} + P_{t12} = \dot{H}_2 - \dot{H}_1 + \dot{E}_{a2} - \dot{E}_{a1}$
 $w_{t12} = P_{t12}/\dot{m} = w_{R12} + \int_1^2 v dp + e_{a2} - e_{a1} \quad E_a = \frac{m}{2} w^2 + mgz$

Zweiter Hauptsatz

- für geschlossene Systeme $S_2 - S_1 = S_{aust} + S_{pr}$

- für offene Systeme $S_{II}^* - S_I^* - \sum_i \int_{\tau_I}^{\tau_{II}} s_i \dot{m}_i d\tau = S_{aust} + S_{pr}$

- für stationäre Fließprozesse $\dot{S}_2 - \dot{S}_1 = \dot{S}_{aust} + \dot{S}_{pr}$

$S_{aust} = \sum_j \frac{Q_{a_j}}{T_{ma_j}}$ Thermodyn. Mitteltemp. $T_{m12} = \frac{\int_1^2 T ds}{s_2 - s_1}$

$ds = \frac{du + p dv}{T} = \frac{dh - v dp}{T}$ $\int_1^2 T ds = q_{12} + w_{R12}$

Exergie $\dot{E}_{2,u} = \dot{H}_2 - \dot{H}_u + \dot{E}_{a2} - T_u (\dot{S}_2 - \dot{S}_u)$ Exergie der Wärme $e_{q12} = \int_1^2 \frac{T - T_u}{T} \partial q$

Exergieverluststrom $\dot{E}_V = T_u \dot{S}_{pr} \geq 0$

Zustandsgleichung idealer Gase $pV = mRT = n R_m T \quad c_p = c_v + R \quad R_m = M R = 8,3143 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol K}}$
 $\kappa = c_p/c_v$

$u_2 - u_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_v dT$

$h_2 - h_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_p dT = [c_p]_{T_1}^{T_2} (T_2 - T_1) \quad [c_p]_{T_1}^{T_2} = \frac{(T_2 - T_0)[c_p]_{T_0}^{T_2} - (T_1 - T_0)[c_p]_{T_0}^{T_1}}{T_2 - T_1}$

$s_2 - s_1 = \int_{T_1}^{T_2} \frac{c_v}{T} dT + R \ln \frac{v_2}{v_1} = \int_{T_1}^{T_2} \frac{c_p}{T} dT - R \ln \frac{p_2}{p_1}$

id. Gas konst. spez.

Wärmekapazität $s_2 - s_1 = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1} = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1}$

inkompressible feste und flüssige Körper ($v = \text{konst}$)

$u_2 - u_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_F dT \quad h_2 - h_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_F dT + v(p_2 - p_1) \quad s_2 - s_1 = \int_{T_1}^{T_2} \frac{c_F}{T} dT$

Zustandsänderungen

$n = 0$: $p = \text{konst}$ (Isobare)

$n \rightarrow \infty$: $v = \text{konst}$ (Isochore)

$n = 1$: $pv = \text{konst}$

$p_1 v_1^n = p_2 v_2^n \quad \text{für id. Gase} \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}}$

[id. Gas: $T = \text{konst}$ (Isotherme)]

$n = k$: $s = \text{konst}$ (Isentrope)

$n \neq 1$: $w_{v12} = - \int_1^2 p dv = \frac{1}{n-1} [p_2 v_2 - p_1 v_1] \quad \int_1^2 v dp = n w_{v12, pol}$

$n = 1$: $w_{v12} = - \int_1^2 p dv = \int_1^2 v dp = p_1 v_1 \ln \frac{p_2}{p_1} = p_1 v_1 \ln \frac{v_1}{v_2}$

Kreisprozesse

	allgemein	Carnot
Thermischer Wirkungsgrad eines Wärme-Kraft-Prozesses	$\eta = \frac{ \sum W_i }{\sum Q_{zu}}$	$\eta_c = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{max}}$
Leistungsziffer eines Kälteprozesses	$\varepsilon_{KP} = \frac{ Q_K }{\sum W_t}$	$\varepsilon_{KP,c} = \frac{T_{min}}{T_{max} - T_{min}}$
Leistungsziffer eines Wärmepumpenprozesses	$\varepsilon_{WP} = \frac{ Q_h }{\sum W_t}$	$\varepsilon_{WP,c} = \frac{T_{max}}{T_{max} - T_{min}}$

Zustandsgrößen des Naßdampfes

$$x = \frac{m''}{m' + m''} = \frac{v - v'}{v'' - v'} = \frac{u - u'}{u'' - u'} = \frac{h - h'}{h'' - h'} = \frac{s - s'}{s'' - s'}$$

Clapeyron-Clausius: $r = h'' - h' = T(s'' - s') = T(v'' - v') \frac{dp}{dT}$

Gemische

Massenanteil: $\xi_i = m_i/m$

Molanteil: $\psi_i = n_i/n$ $n_i = \frac{m_i}{M_i}$ $\xi_i = \psi_i \frac{M_i}{M}$ $M = \sum_{i=1}^N \psi_i M_i$ $\frac{1}{M} = \sum_{i=1}^N \frac{\xi_i}{M_i}$

Gemische idealer Gase

$$R = \sum_{i=1}^N \xi_i \frac{R_m}{M_i} = \sum_{i=1}^N \xi_i R_i \quad p = \sum_{i=1}^N p_i \quad p_i = n_i \frac{R_m T}{V} = m_i \frac{R_i T}{V}$$

Gesetz von Dalton: $p_i/p = n_i/n = \psi_i$

$$H = \sum_{i=1}^N m_i h_i = \sum_{i=1}^N n_i H_{mi} \quad S = \sum_{i=1}^N m_i s_i = \sum_{i=1}^N n_i S_{mi}$$

Feuchte Luft

$$m = m_L + m_W \quad x = \frac{m_W}{m_L} \quad m_W = m_{Wfl} + m_{Wf} + m_{Wd} \quad V = m_L \frac{R_d T}{p} \left(\frac{M_d}{M_L} + x_d \right)$$

$$\varphi = \frac{p_d}{p_s}, \quad 0 \leq \varphi \leq 1 \quad x_d = \frac{p_s(\vartheta)}{p/\varphi - p_s(\vartheta)} \frac{M_d}{M_L} \quad R_d = 461 \text{ J/kg K}$$

$$M_d/M_L = 0,622$$

$$h = H/m_L = h_L + x_{fl} h_{Wfl} + x_f h_{Wf} + x_d h_{Wd}$$

Enthalpie

- der trockenen Luft	$h_L(\vartheta) = c_{pL} \vartheta$	$c_{pL} = 1,004$	kJ/kg K
- des flüssigen Niederschlags	$h_{Wfl}(\vartheta) = c_{Wfl} \vartheta$	$c_{Wfl} = 4,19$	kJ/kg K
- des festen Niederschlags	$h_{Wf}(\vartheta) = c_{Wf} \vartheta - r_{fo}$	$c_{Wf} = 2,05$	kJ/kg K
- des überhitzten Wasserdampfes	$h_{Wd}(\vartheta) = c_{pWd} \vartheta + r_{do}$	$c_{pWd} = 1,86$	kJ/kg K
	$r_{fo} = 333 \text{ kJ/kg}$	$r_{do} = 2500$	kJ/kg

Chemische Umsetzungen

Oxidationsverhältnis: $\lambda = \frac{\dot{n}_{Ox}}{\dot{n}_{Ox,stoech}}$

Als Brennwert H_0 wird der Quotient aus der bei vollständiger Verbrennung abgegebenen Energie und der Menge des Brennstoffes bezeichnet, wenn die Temperatur des Brennstoffes, des Oxidators und der Verbrennungsprodukte 25 °C beträgt und das beim Verbrennen von wasserstoffhaltigen Verbindungen gebildete Wasser nach der Verbrennung in flüssigem Zustand vorliegt.

Als Heizwert H_u wird der Quotient aus der bei vollständiger Verbrennung abgegebenen Energie und der Menge des Brennstoffes bezeichnet, wenn die Temperatur des Brennstoffes, des Oxidators und der Verbrennungsprodukte 25 °C beträgt und das beim Verbrennen von wasserstoffhaltigen Verbindungen gebildete Wasser nach der Verbrennung in dampfförmigem Zustand vorliegt.

Strömungsprozesse

$$h_2 - h_1 = \nu \int_1^2 v dp \quad \text{Polytrophenverhältnis } \nu = \frac{1-m/n}{1-m/k}$$

$$\text{Isentropenexponent } k = -\frac{v}{p} \left(\frac{\partial p}{\partial v} \right)_s \quad \text{Isenthalpenexponent } m = -\frac{v}{p} \left(\frac{\partial p}{\partial v} \right)_h$$

Kontinuitätsgleichung $\dot{m} = \dot{V} \rho = A w \rho = \text{konst}$

Schallgeschw. $w_s^2 = k p v$ beliebiger spez. Querschnitt $a = \frac{A}{\dot{m}} = \frac{1}{\rho w} = \frac{v}{w}$

Lavalzustand $\frac{p_L}{p_t} = \left(\frac{2}{n+1} \right)^{\frac{n}{n-1}} \quad \frac{1}{a^2} = 2\nu \frac{p_t}{v_t} \psi^2 \quad w_L^2 = \nu n p_L v_L$

Molare Enthalpien und Entropien

(aus Bošnjaković: Technische Thermodynamik II, Leipzig 1967, Zwischenwerte sind interpoliert)

Der Enthalpienullpunkt von H_2O stimmt nicht mit dem der Wasserdampfart überein. Die molaren Entropien gelten für den Druck von $p_0 = 1\text{bar}$.

T	H ₂		H ₂ O		N ₂		CO		CO ₂		C _{Graphit}		CH ₄	
	h _m MJ/kmol	s _m MJ/kmolK	h _m MJ/kmol	s _m MJ/kmolK	h _m MJ/kmol	s _m MJ/kmolK	h _m MJ/kmol	s _m MJ/kmolK	h _m MJ/kmol	s _m MJ/kmolK	h _m MJ/kmol	s _m MJ/kmolK	h _m MJ/kmol	s _m MJ/kmolK
K														
3000	97,20	0,20289	106,80	0,28452	101,25	0,28710	101,40	0,26691	-230,97	0,33415	62,76	0,051091	165,16	0,34577
2800	89,83	0,20035	98,84	0,28178	-112,60	0,28319	94,01	0,26436	-243,39	0,32986	57,42	0,049250	144,97	0,33881
2600	82,56	0,19766	90,97	0,27886	-123,76	0,27907	86,65	0,26163	-255,77	0,32529	52,14	0,047292	124,99	0,33140
2400	75,40	0,19479	83,18	0,27574	-134,71	0,27467	79,32	0,25870	-268,07	0,32036	46,91	0,045200	105,22	0,32349
2200	68,35	0,19172	75,49	0,27240	-145,44	0,27001	72,04	0,25553	-280,30	0,31505	41,74	0,042949	85,74	0,31502
2000	61,42	0,18842	67,88	0,26877	-155,92	0,26502	64,81	0,25209	-292,42	0,30927	36,64	0,040522	66,65	0,30592
1900	58,01	0,18667	64,12	0,26684	-161,06	0,26239	61,22	0,25025	-298,45	0,30618	34,12	0,039229	57,28	0,30113
1800	54,63	0,18485	60,37	0,26482	-166,12	0,25965	57,66	0,24831	-304,44	0,30295	31,62	0,037878	48,02	0,29612
1700	51,30	0,18294	56,56	0,26269	-171,09	0,25680	54,10	0,24629	-310,39	0,29954	29,15	0,036459	38,92	0,29091
1600	48,01	0,18095	52,96	0,26045	-175,98	0,25385	50,58	0,24415	-316,29	0,29597	26,69	0,034974	29,98	0,28550
1500	44,76	0,17885	49,29	0,25808	-180,76	0,25076	47,08	0,24189	-322,16	0,29219	24,27	0,033409	21,22	0,27984
1450	43,16	0,17775	47,47	0,25683	-183,10	0,24914	45,35	0,24070	-325,07	0,29018	23,08	0,032585	16,95	0,27690
1400	41,55	0,17664	45,65	0,25557	-185,44	0,24752	43,61	0,23950	-327,98	0,28816	21,88	0,031761	12,67	0,27395
1350	39,97	0,17547	43,84	0,25423	-187,73	0,24583	41,89	0,23823	-330,86	0,28691	20,71	0,030893	8,52	0,27087
1300	38,38	0,17429	42,03	0,25289	-190,01	0,24413	40,17	0,23695	-333,73	0,28591	19,54	0,030024	+4,37	0,26779
1250	36,83	0,17304	40,24	0,25144	-192,24	0,24235	38,48	0,23560	-336,57	0,28315	18,39	0,029108	+0,36	0,26458
1200	35,27	0,17179	38,45	0,25002	-194,47	0,24057	36,78	0,23424	-339,40	0,27938	17,24	0,028192	-3,66	0,26137
1150	33,73	0,17046	36,67	0,24848	-196,64	0,23869	35,11	0,23278	-342,20	0,27694	16,12	0,027217	-7,52	0,25801
1100	32,19	0,16912	34,89	0,24693	-198,80	0,23680	33,43	0,23132	-344,99	0,27450	15,00	0,026242	-11,38	0,25465
1050	30,67	0,16767	33,14	0,24526	-200,91	0,23480	31,78	0,22975	-347,73	0,27189	13,91	0,025200	-15,07	0,25114
1000	29,15	0,16622	31,39	0,24359	-203,01	0,23280	30,13	0,22818	-350,47	0,26928	12,82	0,024158	-18,75	0,24762
950	27,65	0,16464	29,66	0,24173	-205,05	0,23066	28,51	0,22648	-353,15	0,26646	11,76	0,023046	-22,24	0,24396
900	26,15	0,16305	27,92	0,23986	-207,08	0,22851	26,89	0,22477	-355,83	0,26363	10,70	0,021933	-25,72	0,24029
850	24,66	0,16130	26,22	0,23790	-209,05	0,22619	25,31	0,22290	-358,45	0,26156	9,69	0,020736	-28,99	0,23644
800	23,17	0,15955	24,52	0,23593	-211,02	0,22387	23,72	0,22102	-361,06	0,25948	8,67	0,019539	-32,26	0,23259
750	21,70	0,15758	22,85	0,23370	-212,93	0,22132	22,17	0,21895	-363,59	0,25511	7,70	0,018249	-35,28	0,22857
700	20,22	0,15561	21,18	0,23147	-214,84	0,21877	20,61	0,21687	-366,11	0,25073	6,73	0,016958	-38,30	0,22454
650	18,75	0,15335	19,55	0,22897	-216,69	0,21593	19,09	0,21453	-368,53	0,24700	5,84	0,015577	-41,05	0,22031
600	17,28	0,15108	17,92	0,22646	-218,54	0,21308	17,56	0,21218	-370,95	0,24327	4,94	0,014196	-43,80	0,21607
550	15,82	0,14881	16,35	0,22358	-220,33	0,20982	16,07	0,20947	-373,26	0,23908	4,14	0,012745	-46,27	0,21158
500	14,35	0,14654	14,77	0,22070	-222,11	0,20655	14,58	0,20675	-375,56	0,23489	3,34	0,011293	-48,73	0,20708
475	13,62	0,14411	14,01	0,21899	-222,98	0,20462	13,85	0,20511	-376,64	0,23250	3,01	0,010551	-49,82	0,20467
450	12,89	0,14248	13,24	0,21729	-223,85	0,20268	13,11	0,20347	-377,71	0,23010	2,67	0,009810	-50,90	0,20226
425	12,16	0,14084	12,48	0,21558	-224,72	0,20075	12,38	0,20183	-378,79	0,22771	2,34	0,009068	-51,99	0,19985
400	11,43	0,13921	11,71	0,21387	-225,59	0,19881	11,64	0,20019	-379,86	0,22531	2,00	0,008326	-53,07	0,19744
375	10,69	0,13710	10,97	0,21173	-226,44	0,19624	10,91	0,19808	-380,84	0,22248	1,75	0,007607	-54,02	0,19471
350	9,97	0,13500	10,22	0,20959	-227,28	0,19367	10,18	0,19598	-381,82	0,21965	1,50	0,006888	-54,97	0,19198
325	9,24	0,13289	9,48	0,20745	-228,13	0,19110	9,45	0,19387	-382,81	0,21683	1,25	0,006169	-55,92	0,18925
298	8,45	0,13063	8,68	0,20515	-229,04	0,18834	8,67	0,19161	-383,86	0,21379	0,98	0,005397	-56,94	0,18632
0	0		0		-238,95		0		-393,23		0		-66,96	

Molmassen in kg/kmol: C = 12; H = 1; N = 14;