

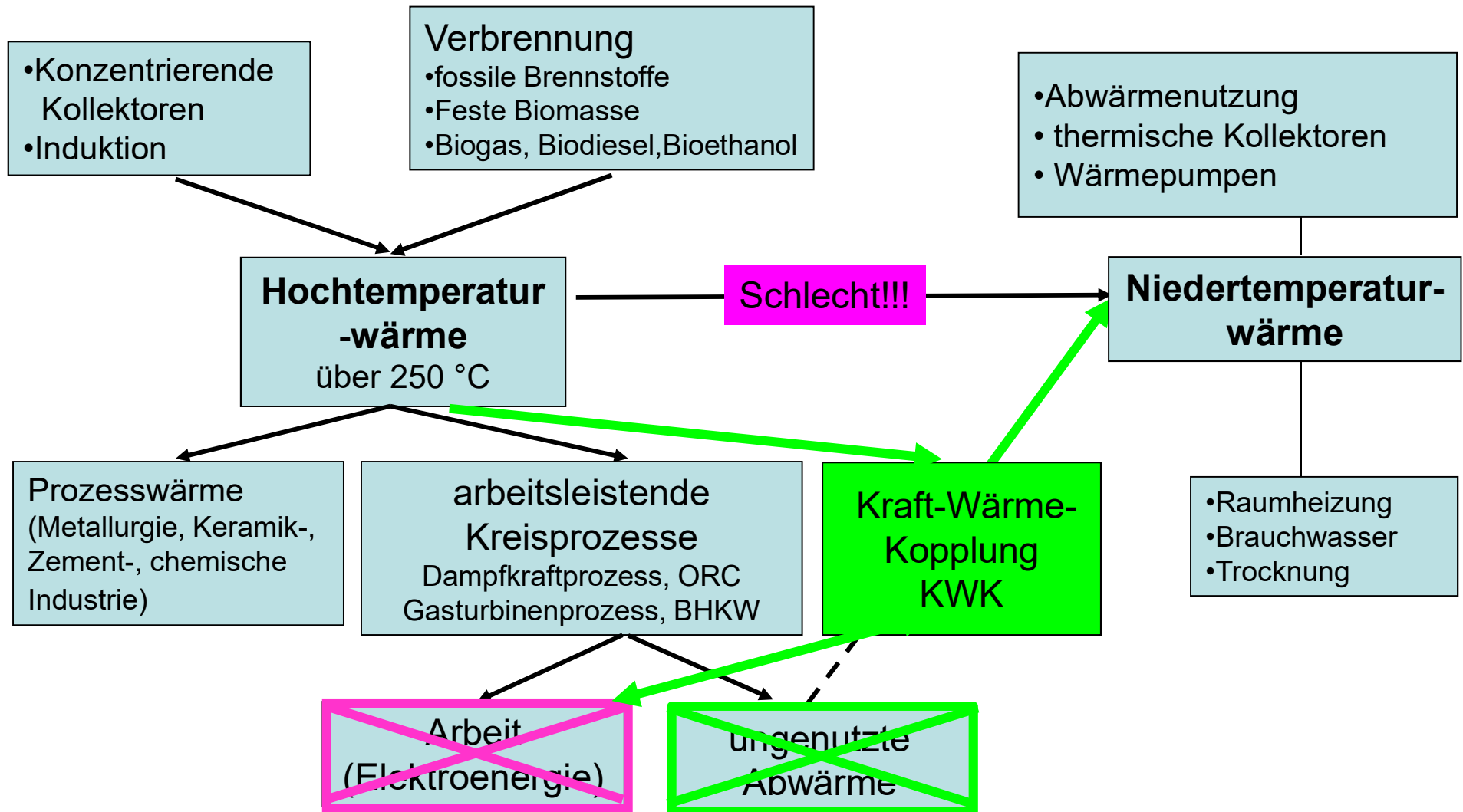


# Master Regenerative Energien

## Regenerative Wärmetechnik

### 4. Vergleich verschiedener Wärmebereitstellungsmethoden

# Wärmebereitstellung - Überblick



# Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)

- effiziente Erzeugung von Heizwärme
- Strom als Koppelprodukt
- Vergleichsszenario: „getrennte Erzeugung“  
Heizwärmebereitstellung durch Verbrennung (fossile oder regenerative Brennstoffe)
- Stromerzeugung aus KWK sollte stets nur fossil erzeugten Strom aus dem Netz verdrängen, deshalb Vergleich für Stromerzeugung auf Basis fossiler Brennstoffe
- Wärmespeicher und Stromeinspeisung sind Möglichkeiten zur Flexibilisierung der KWK
- KWK sollte wärmegeführt, aber mit Flexibilität für den Strommarkt ausgelegt sein (Wärmespeicher und ggf. Power to Heat)
- Saisonale Wärmebedarfsschwankung (fehlender Heizwärmebedarf im Sommer) ist besonders zu berücksichtigen

Stromkennzahl der KWK

$$\sigma = \frac{w_{el}}{q_{Nutz}} = \frac{P_{el}}{\dot{Q}_{Nutz}}$$

Verbraucher kennzahl

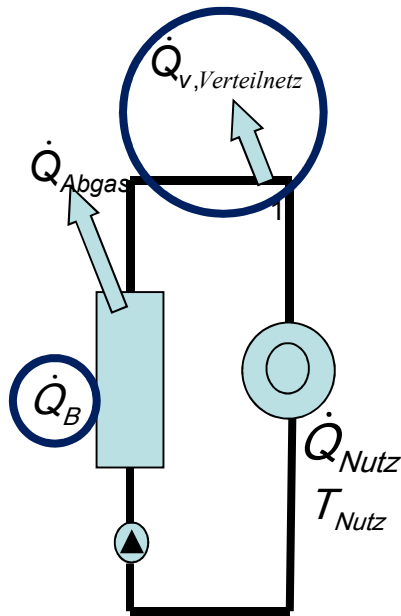
$$S = \frac{P_{el,V}}{\dot{Q}_{Nutz,V}}$$

# Wärmebereitstellung im Heizkessel bzw. Heiznetz

## Wirkungsgrad und Primärenergiefaktor

Wirkungsgrad Wärmebereitstellung (Kesselwirkungsgrad)

$$\dot{Q}_{Nutz} = \eta_K \dot{Q}_{B,Q} \quad \eta_K = \frac{\dot{Q}_{Nutz}}{\dot{Q}_{B,Q}} = \frac{\text{verbrauchte Energie}}{\text{aufgewendete Energie}}$$



Primärenergiefaktor

$$f_P = \frac{PE}{E} = \frac{\text{aufgewendete Energie}}{\text{verbrauchte Energie}}$$

vorgelagerte Prozesskette einschließlich Umwandlung und Verteilung

Primärenergiefaktor Wärmebereitstellung

$$\dot{Q}_{Nutz} = \eta_K \eta_{VN} \dot{Q}_{B,Q} \quad \text{VN - Verteilnetz}$$

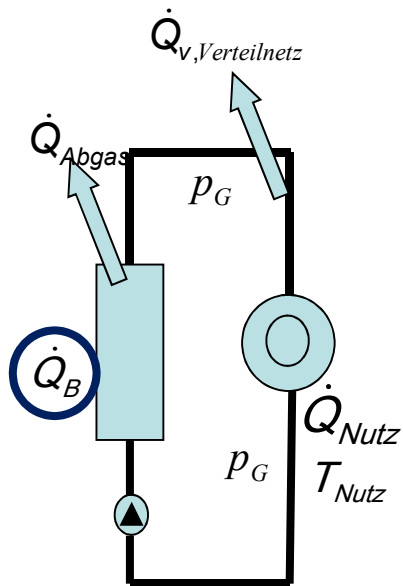
$$f_Q = \frac{PE_{Q_B}}{\dot{Q}_{Nutz}} = \frac{f_B \dot{Q}_{B,Q}}{\eta_K \eta_{VN} \dot{Q}_{B,Q}} = \frac{f_B}{\eta_K \eta_{VN}}$$

# Wärmebereitstellung

## Primärenergiefaktoren Brennstoff und Fernwärme

Primärenergiefaktor Heizwärme

$$f_Q = \frac{PE}{\dot{Q}_{Nutz}} = \frac{f_B}{\eta_K \eta_{VN}}$$



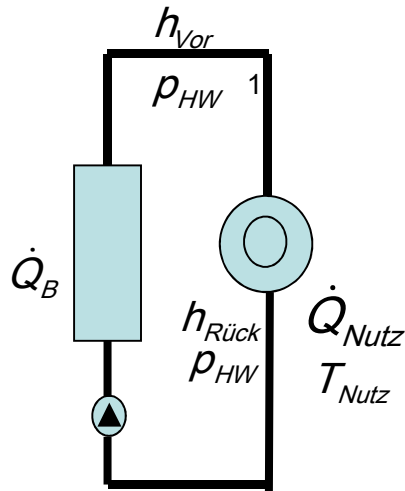
Energieträger		Primärenergiefaktoren $f_p$	
		insgesamt	nicht erneuerbarer Anteil
		A	B
Fossile Brennstoffe	Heizöl EL	1,1	1,1
	Erdgas H	1,1	1,1
	Flüssiggas	1,1	1,1
	Steinkohle	1,1	1,1
	Braunkohle	1,2	1,2
Biogene Brennstoffe	Biogas	1,5	0,5
	Bioöl	1,5	0,5
	Holz	1,2	0,2
Umweltenergie	Solarenergie	1,0	0,0
	Erdwärme, Geothermie	1,0	0,0
	Umgebungswärme	1,0	0,0
	Umgebungskälte	1,0	0,0
Abwärme innerhalb des Gebäudes	aus Prozessen, siehe 3.1.32	1,0	0,0
Nah-/Fernwärme aus Heizwerken	fossiler Brennstoff	1,3	1,3
	erneuerbarer Brennstoff	1,3	0,1

- Primärenergiefaktoren sind ein politisches Steuerungsinstrument und spiegeln die technischen Gegebenheiten nur begrenzt wieder.
- Pauschale Bewertung mit PE-Faktoren und individuelle Bilanzierung können sich unterscheiden

# Wärmebereitstellung mit Heißwasser, Heizdampf oder Frischdampf

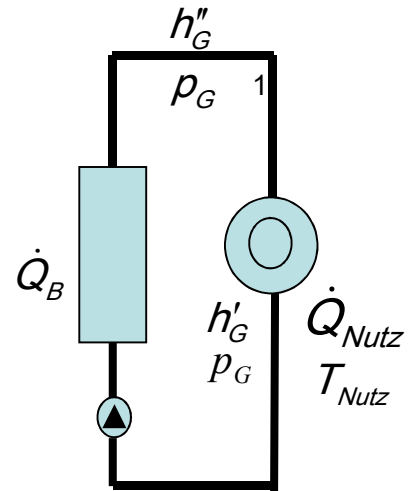
$$\dot{Q}_{Nutz} = \eta_K \dot{m}_B H_i = \dot{m} \Delta h$$

Heißwassererzeugung



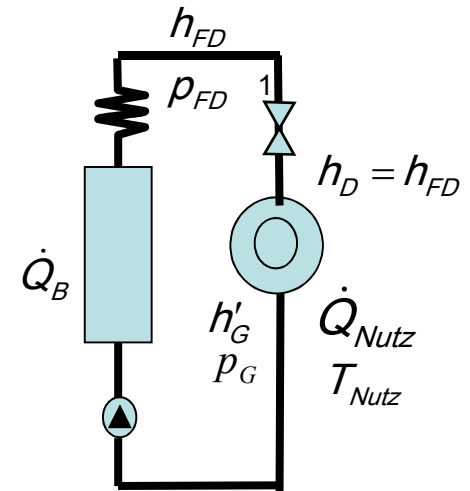
$$\begin{aligned} \dot{Q}_{Nutz} &= \dot{m}_{HW} (h_{Vor} - h_{Rück}) \\ &= \dot{m}_{HW} c_{pW} (T_{Vor} - T_{Rück}) \end{aligned}$$

Sattdampferzeugung



$$\dot{Q}_{Nutz} = \dot{m}_{SD} (h'' - h')$$

Frischdampf-  
Drosselung



$$\dot{Q}_{Nutz} = \dot{m}_{FD} (h_{FD} - h')$$

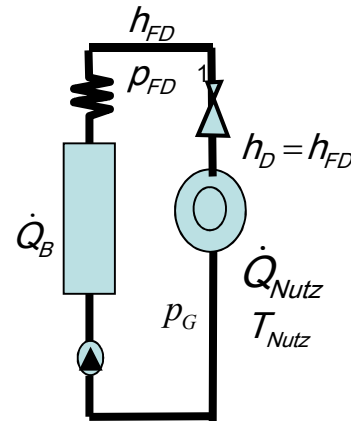
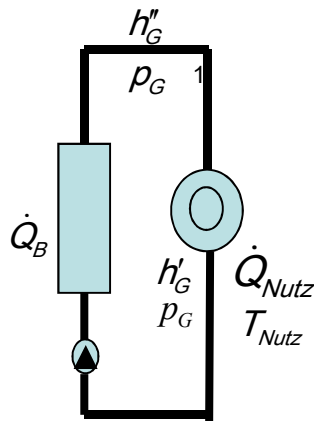
$$\dot{m}_B = \frac{\dot{Q}_{Nutz}}{\eta_K H_i} = \frac{\dot{m} \Delta h}{\eta_K H_i}$$

Die aufzuwendende Brennstoffmenge wird nur durch den Kesselwirkungsgrad, nicht durch die Art des Wärmeträgers (Heizmedium) bestimmt.

## 1. Wärmebereitstellung mit Satttdampf oder Heizdampf

Ein Verbraucher benötigt einen Wärmestrom  $\dot{Q} = 150 \text{ MW}$  mit einer Mindesttemperatur von  $t_D = 200 \text{ °C}$  Dampf (entsprechend  $p_D = 1,555 \text{ MPa}$ ).

- Welcher Massenstrom Dampf muss zur Verfügung gestellt werden, wenn der Dampf mit Satttdampfparametern in einem Dampfkessel erzeugt wird?
- Welcher Brennstoffmassenstrom ( $H_i = 18 \text{ MJ/kg}$ ) wird benötigt, wenn der Kessel mit einem Wirkungsgrad  $\eta_K = 0,92$  arbeitet?
- Wie ändern sich Dampfstrom und Brennstoffaufwand, wenn der Verbraucher durch gedrosselten Frischdampf ( $p_I = 10 \text{ MPa}$  und  $t_I = 450 \text{ °C}$ ) aus dem Dampferzeuger eines Kraftwerks mit gleichem Wirkungsgrad versorgt wird?



# **Wasserdampf** **Zustandsgrößen auf der Siede- und Taulinie**

Tabelle 5.22. Thermodynamische Eigenschaften von Wasser und Wasserdampf  
im Sättigungszustand (Temperaturtafel) /3/

$t$ $^{\circ}\text{C}$	$p$ MPa	$v'$ $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	$v''$ $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	$h'$ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	$h''$ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	$s'$ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$s''$ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
0,01	0,0006112	0,00100022	206,175	0,000614	2501,0	-0,0002	9,1562
5	0,0008719	0,001000	147,167	21,01	2510,2	0,0762	9,0258
10	0,0012271	0,0010003	106,419	41,99	2519,4	0,1510	8,9009
15	0,0017041	0,0010008	77,97	62,94	2528,6	0,2243	8,7815
20	0,0023368	0,0010017	57,833	83,86	2537,7	0,2963	8,6674
25	0,0031663	0,0010029	43,399	104,77	2546,8	0,3670	8,5583
30	0,0042417	0,0010043	32,929	125,66	2555,9	0,4365	8,4537
35	0,0056217	0,0010060	25,246	146,56	2565,0	0,5049	8,3536
40	0,0073749	0,0010078	19,548	167,45	2574,0	0,5721	8,2576
45	0,0095817	0,0010099	15,278	188,35	2582,9	0,6383	8,1655
50	0,012335	0,0010121	12,048	209,26	2591,8	0,7035	8,0771
55	0,015740	0,0010145	9,5812	230,17	2600,7	0,7677	7,9922
60	0,019919	0,0010171	7,6807	251,09	2609,5	0,8310	7,9106
65	0,025008	0,0010199	6,2042	272,02	2618,2	0,8933	7,8320
70	0,031161	0,0010228	5,0479	292,97	2626,8	0,9548	7,7565
75	0,038448	0,0010259	4,1356	313,94	2635,3	1,0154	7,6837
80	0,047359	0,0010292	3,4104	334,92	2643,8	1,0752	7,6135
85	0,057803	0,0010326	2,8300	355,92	2652,1	1,1343	7,5459
90	0,070108	0,0010361	2,3624	376,94	2660,3	1,1925	7,4805
95	0,084525	0,0010398	1,9832	397,99	2668,4	1,2500	7,4174
100	0,101325	0,0010437	1,6738	419,06	2676,3	1,3069	7,3564
110	0,14326	0,0010519	1,2106	461,32	2691,8	1,4185	7,2402
120	0,19854	0,0010606	0,89202	503,7	2706,6	1,5276	7,1310
130	0,27012	0,0010700	0,66851	546,3	2720,7	1,6344	7,0281
140	0,36136	0,0010801	0,50875	589,1	2734,0	1,7390	6,9307
150	0,47597	0,0010908	0,39261	632,2	2746,3	1,8416	6,8381
160	0,61804	0,0011022	0,30685	675,3	2757,7	1,9425	6,7498
170	0,79202	0,0011145	0,24259	719,1	2768,0	2,0416	6,6652
180	1,0027	0,0011275	0,19381	763,1	2777,1	2,1393	6,5838
190	1,2552	0,0011415	0,15631	807,5	2784,9	2,2356	6,5052
200	1,5551	0,0011565	0,12714	852,4	2791,4	2,3307	6,4289
210	1,9079	0,0011726	0,10422	897,8	2796,4	2,4247	6,3546
220	2,3201	0,0011900	0,08602	943,7	2799,9	2,5178	6,2819
230	2,7979	0,0012087	0,07143	990,3	2801,7	2,6102	6,2104
240	3,3480	0,0012291	0,05964	1037,5	2801,6	2,7021	6,1397
250	3,9776	0,0012513	0,05002	1085,8	2799,5	2,7936	6,0693
260	4,6940	0,0012756	0,04212	1135,0	2795,2	2,8850	5,9989
270	5,5051	0,0013025	0,03557	1185,4	2788,3	2,9766	5,9278
280	6,4191	0,0013324	0,03010	1237,0	2778,6	3,0687	5,8555
290	7,4448	0,0013659	0,02551	1290,3	2765,4	3,1616	5,7811
300	8,5917	0,0014041	0,02162	1345,4	2748,4	3,2559	5,7038
310	9,8697	0,0014480	0,01829	1402,9	2726,8	3,3522	5,6224
320	11,290	0,0014995	0,01544	1463,4	2699,6	3,4513	5,5356
330	12,865	0,0015614	0,01296	1527,5	2665,5	3,5546	5,4414
340	14,608	0,0016390	0,01078	1596,8	2622,3	3,6638	5,3363
350	16,537	0,0017407	0,008822	1672,9	2566,1	3,7816	5,2149
360	18,674	0,0018930	0,006970	1763,1	2485,7	3,9189	5,0603
370	21,053	0,0022310	0,004958	1896,2	2335,7	4,1198	4,8031

Tabelle 5.23. Thermodynamische Eigenschaften von Wasser und Wasserdampf  
im Sättigungszustand (Drucktafel) /3/

$p$ MPa	$t$ $^{\circ}\text{C}$	$v' \cdot 10^3$ $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	$v''$ $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	$h'$ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	$h''$ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	$s'$ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$s''$ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
0,001	6,98	1,0001	129,208	19,33	2513,8	0,1060	8,9756
0,002	17,51	1,0012	67,006	73,45	2533,2	0,2606	8,7236
0,003	24,09	1,0027	45,668	101,00	2545,2	0,3543	8,5776
0,004	28,98	1,0040	34,803	121,41	2554,1	0,4224	8,4747
0,005	32,90	1,0052	28,196	137,77	2561,2	0,4762	8,3952
0,006	36,18	1,0064	23,742	151,50	2567,1	0,5209	8,3305
0,007	39,02	1,0074	20,532	163,38	2572,2	0,5591	8,2760
0,008	41,53	1,0084	18,106	173,87	2576,7	0,5926	8,2289
0,009	43,79	1,0094	16,206	183,28	2580,8	0,6224	8,1875
0,01	45,83	1,0102	14,676	191,84	2584,4	0,6493	8,1505
0,02	60,09	1,0172	7,6515	251,46	2609,6	0,8321	7,9092
0,03	69,12	1,0223	5,2308	289,31	2625,3	0,9441	7,7695
0,04	75,89	1,0265	3,9949	317,65	2636,8	1,0261	7,6711
0,05	81,35	1,0301	3,2415	340,57	2646,0	1,0912	7,5951
0,06	85,95	1,0333	2,7329	359,93	2653,6	1,1454	7,5332
0,07	89,96	1,0361	2,3658	376,77	2660,2	1,1921	7,4811
0,08	93,51	1,0387	2,0789	391,72	2666,0	1,2330	7,4360
0,09	96,71	1,0412	1,8701	405,21	2671,1	1,2796	7,3963
0,10	99,63	1,0434	1,6946	417,51	2675,7	1,3027	7,3608
0,15	111,37	1,0530	1,1597	467,13	2693,9	1,4336	7,2243
0,20	120,23	1,0608	0,88592	504,7	2706,9	1,5301	7,1286
0,25	127,43	1,0675	0,71881	535,4	2717,2	1,6072	7,0540
0,30	133,54	1,0735	0,60586	561,4	2725,5	1,6717	6,9930
0,35	138,88	1,0789	0,52425	584,3	2732,5	1,7273	6,9414
0,40	143,62	1,0839	0,46242	604,7	2738,5	1,7764	6,8966
0,45	147,92	1,0885	0,41392	623,3	2743,8	1,8204	6,8570
0,50	151,85	1,0928	0,37481	640,1	2748,5	1,8604	6,8215
0,6	158,84	1,1009	0,31556	670,4	2756,4	1,9308	6,7598
0,7	164,96	1,1082	0,27274	697,1	2762,9	1,9918	6,7074
0,8	170,42	1,1150	0,24030	720,9	2768,4	2,0457	6,6618
0,9	175,36	1,1213	0,21484	742,6	2773,0	2,0941	6,6212
1,0	179,88	1,1274	0,19430	762,6	2777,0	2,1382	6,5847
2,0	212,37	1,1766	0,09953	908,6	2797,4	2,4468	6,3373
3,0	233,84	1,2163	0,06662	1008,4	2801,9	2,6455	6,1832
4,0	250,33	1,2521	0,04974	1087,5	2799,4	2,7967	6,0670
5,0	263,92	1,2858	0,03941	1154,6	2792,8	2,9209	5,9712
6,0	275,56	1,3187	0,03241	1213,9	2783,3	3,0277	5,8878
8,0	294,98	1,3843	0,02349	1317,5	2757,5	3,2083	5,7430
10	310,96	1,4526	0,01800	1408,6	2724,4	3,3616	5,6143
12	324,64	1,5267	0,01425	1492,6	2684,8	3,4986	5,4930
14	336,63	1,6104	0,01149	1572,8	2638,3	3,6262	5,3737
16	347,32	1,7101	0,00933	1651,5	2583,7	3,7486	5,2455
18	356,96	1,8380	0,00753	1733,4	2514,4	3,8739	5,1135
20	365,71	2,0370	0,00587	1828,8	2413,8	4,0181	4,9338
22	373,68	2,6750	0,00376	2007,7	2192,5	4,2891	4,5748



# Ausführliche Wasserdampf-tafel Zustandsgrößen im gesamten Zustandsgebiet nach Isobaren geordnet

Tables of the Properties of Water and Steam

229

**Table 3** Single-phase region – Continued  
(0 °C to 800 °C)

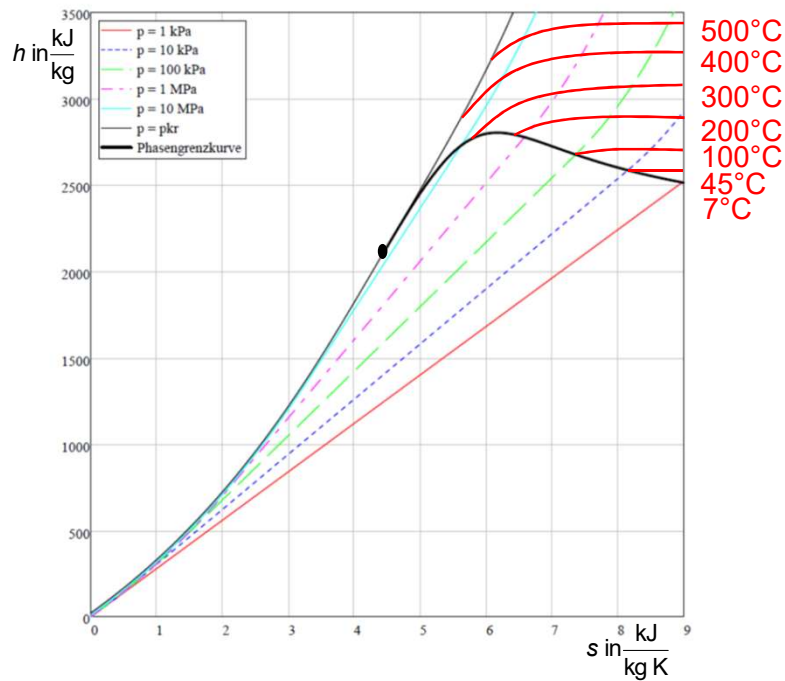
<i>t</i> [ °C ]	<i>v</i> [ m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> ]	<i>h</i> [ kJ kg <sup>-1</sup> ]	<i>s</i> [ kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	<i>p</i> = 100 bar				
				<i>c<sub>p</sub></i> [ kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	<i>w</i> [ m s <sup>-1</sup> ]	<i>κ</i> [ – ]	<i>η</i> [ 10 <sup>-6</sup> Pa s ]	<i>λ</i> [ 10 <sup>-3</sup> W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
250	0.00124116	1085.72	2.7791	4.7883	1180.0	112.19	108.0	625.5
260	0.00126534	1134.13	2.8708	4.8972	1136.3	102.03	103.4	613.0
270	0.00129228	1183.74	2.9629	5.0293	1089.4	91.840	98.99	599.2
280	0.00132264	1234.82	3.0561	5.1931	1038.9	81.605	94.76	584.0
290	0.00135739	1287.75	3.1510	5.4023	983.78	71.300	90.60	567.0
300	0.00139804	1343.10	3.2484	5.6816	922.76	60.905	86.43	548.1
310	0.00144710	1401.77	3.3498	6.0782	854.92	50.507	82.16	526.8
<i>t<sub>s</sub></i> = 310.999 °C								
Liquid	0.00145262	1407.87	3.3603	6.1275	847.74	49.474	81.72	524.5
Vapour	0.0180336	2725.47	5.6159	7.1472	472.44	1.2377	20.19	78.97
320	0.0192716	2782.66	5.7131	5.7468	491.71	1.2546	20.66	74.68
330	0.0204462	2835.67	5.8017	4.9228	508.20	1.2632	21.18	71.67
340	0.0214897	2882.06	5.8780	4.3885	522.16	1.2688	21.68	69.76
350	0.0224422	2923.96	5.9458	4.0118	534.45	1.2728	22.18	68.55
360	0.0233274	2962.61	6.0073	3.7324	545.52	1.2757	22.67	67.72
370	0.0241605	2998.82	6.0641	3.5174	555.64	1.2779	23.15	66.85
380	0.0249522	3033.11	6.1170	3.3471	565.02	1.2794	23.62	66.67
390	0.0257099	3065.87	6.1668	3.2092	573.79	1.2806	24.09	66.91
400	0.0264393	3097.38	6.2139	3.0958	582.04	1.2813	24.55	67.25
410	0.0271447	3127.85	6.2589	3.0013	589.86	1.2818	25.01	67.72
420	0.0278294	3157.45	6.3019	2.9217	597.31	1.2820	25.46	68.30
430	0.0284963	3186.32	6.3432	2.8542	604.44	1.2821	25.91	68.98
440	0.0291475	3214.57	6.3831	2.7965	611.28	1.2820	26.36	69.74
450	0.0297850	3242.28	6.4217	2.7470	617.87	1.2817	26.80	70.56
460	0.0304102	3269.53	6.4591	2.7043	624.24	1.2814	27.24	71.43
470	0.0310246	3296.38	6.4955	2.6674	630.41	1.2810	27.68	72.36
480	0.0316292	3322.89	6.5310	2.6354	636.39	1.2804	28.11	73.32
490	0.0322250	3349.11	6.5655	2.6076	642.21	1.2799	28.54	74.31
500	0.0328129	3375.06	6.5993	2.5833	647.89	1.2792	28.97	75.34
510	0.0333935	3400.78	6.6324	2.5622	653.42	1.2786	29.39	76.39
520	0.0339675	3426.31	6.6648	2.5437	658.83	1.2779	29.81	77.47
530	0.0345355	3451.67	6.6965	2.5275	664.12	1.2771	30.23	78.57
540	0.0350979	3476.87	6.7277	2.5134	669.31	1.2764	30.65	79.69

Zustandsgleichung

$$h(10\text{MPa}, 450^\circ\text{C}) = 3242,3 \text{ kJ / kg}$$

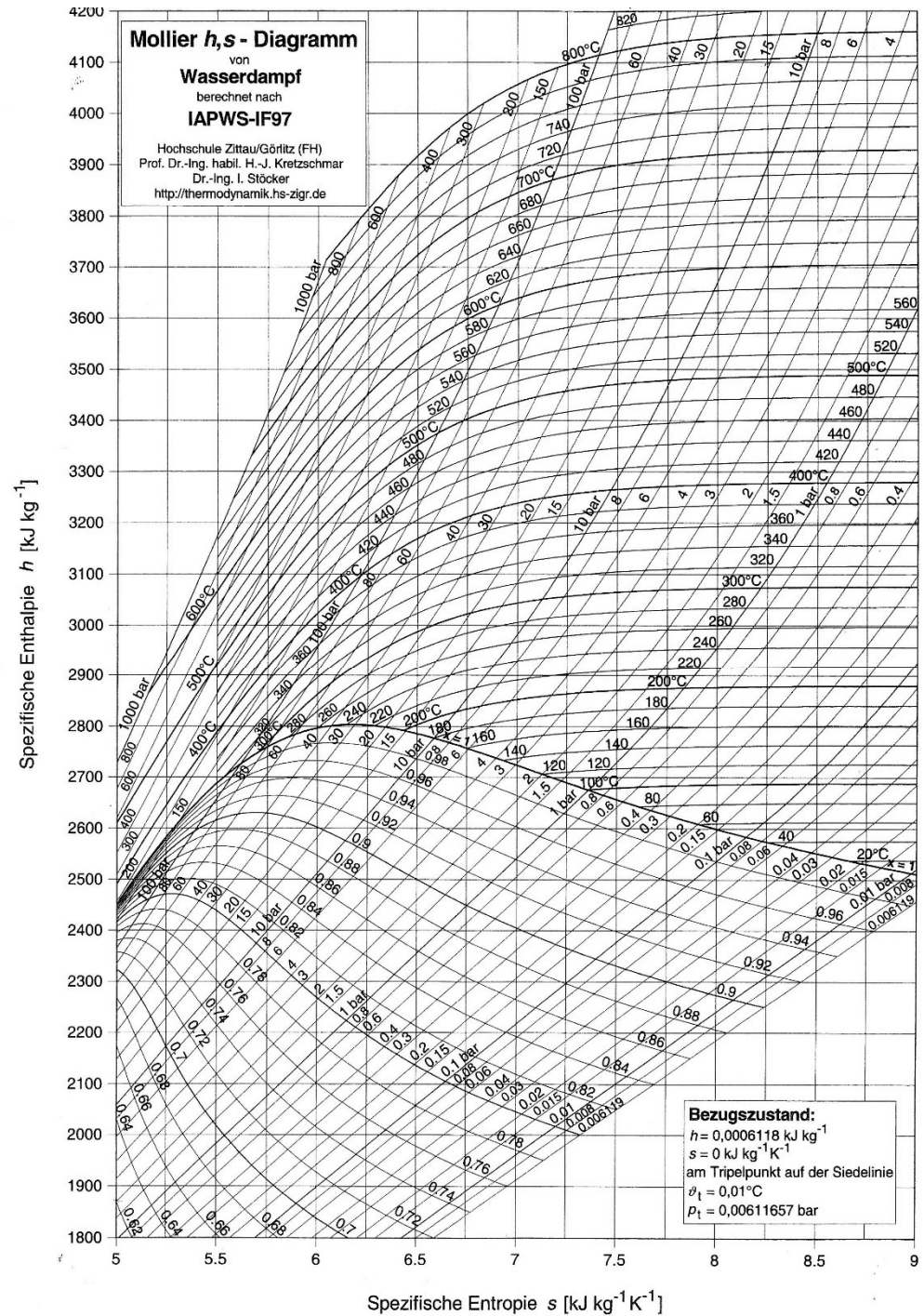
$$s(10\text{MPa}, 450^\circ\text{C}) = 6,422 \text{ kJ / (kg K)}$$

# $h,s$ -Diagramm für Wasser



$$h(10\text{MPa}, 450^\circ\text{C}) = 3242,3 \text{ kJ / kg}$$

$$s(10\text{MPa}, 450^\circ\text{C}) = 6,422 \text{ kJ / (kg K)}$$



# Basistechnologien für Strombereitstellung

## (getrennte Erzeugung, fossile Brennstoffe)

### Kraftwerk

(fossil = Verdrängungsstrom)

Entwicklung der spez. CO<sub>2</sub>-Emissionen ...  
[https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-04-10\\_cc\\_10-2019\\_strommix\\_2019.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-04-10_cc_10-2019_strommix_2019.pdf)

$$\eta_{el} = \frac{P_{el,f}}{\dot{Q}_{B,P}}$$

$$\eta_{el\emptyset,f} = 0,375$$

Mit Anteilen der fossilen Primärenergieträger gewichteter durchschnittlicher Wirkungsgrad

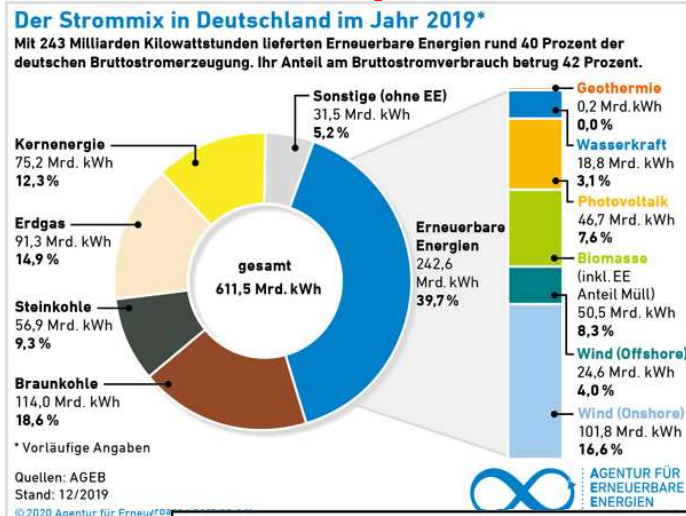


Tabelle 2: CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren fossiler Brennstoffe im Vergleich mit dem CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktor des deutschen Strommix 2017\*

	CO <sub>2</sub> -Emissionsfaktor bezogen auf den Brennstoffeinsatz [g/kWh]	Brennstoffaus-nutzungsgrad netto bezogen auf den Stromverbrauch [%]	CO <sub>2</sub> -Emissionsfaktor bezogen auf den Stromverbrauch [g/kWh]	Vergleich CO <sub>2</sub> -Emissionsfaktor Strommix [g/kWh]
Erdgas	201	54	374	486
Steinkohle	336	41	815	
Braunkohle	407	36	1.142	

Quelle: Umweltbundesamt eigene Berechnungen März 2019

$$f_{P,f} = \frac{\dot{Q}_B}{P_{el,f}} = \frac{1}{\eta_{el\emptyset}} = 2,67$$

Primärenergiefaktor (brennstoffbezogen)

$$f_{P,f} = \frac{PE}{P_{el,f}} = \frac{f_B \dot{Q}_B}{P_{el,f}} = \frac{f_B}{\eta_{el\emptyset}} = \frac{1,1}{0,375} = 2,94$$

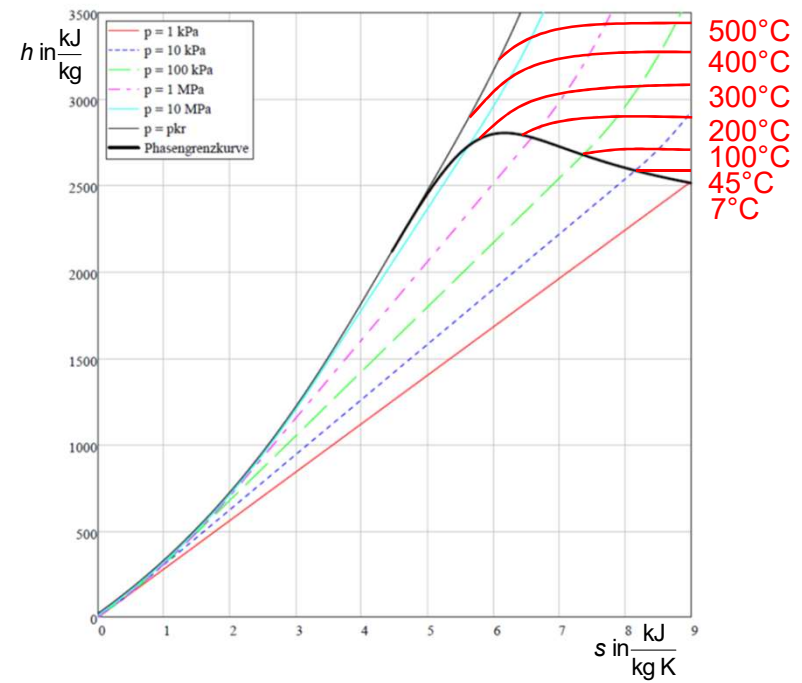
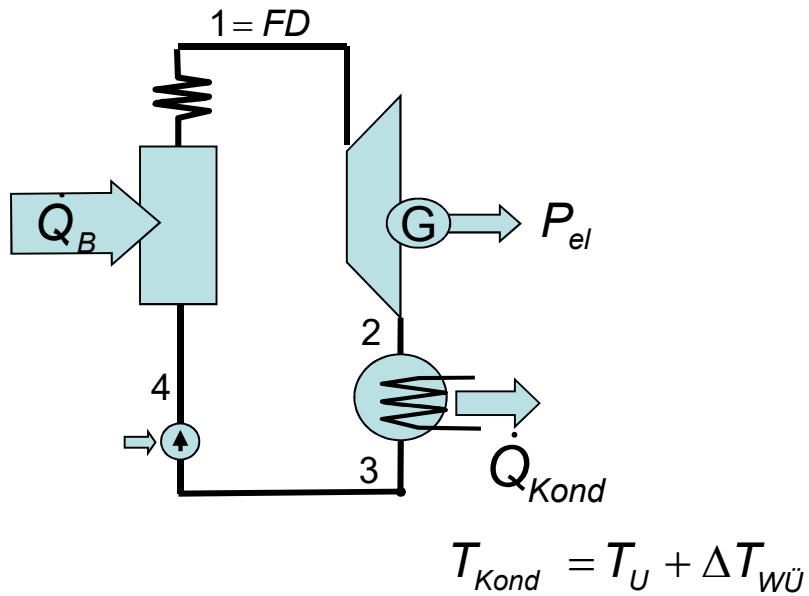
Primärenergiefaktor mit Vorkette der Brennstoffe

Energieträger		Primärenergiefaktoren $f_p$	
		insgesamt	nicht erneuerbarer
		A	B
Strom	allgemeiner Strommix	2,8	2,4
	Verdrängungsstrommix	2,8	2,8

Entspricht einem reg. Anteil am Strom von ca. 55%  
 ab 2016: 1,8



# Stromerzeugung im Kondensations-Dampfkraftwerk



$$w_{t,T} = h_2 - h_1$$

$$w_{t,SP} = h_4 - h_3 \ll w_{t,T}$$

$$w_{KP} \approx w_{t,T}$$

$$q_{zu} \equiv q_{DE} = h_1 - h_4$$

$$P = \dot{m}_D w_{KP}$$

$$\dot{Q}_{zu} = \dot{m}_D q_{zu}$$

$$\boxed{\eta_{th} = \frac{|P|}{\dot{Q}_{zu}} = \frac{|w_{KP}|}{q_{zu}}}$$

# Irreversible Turbinenentspannung

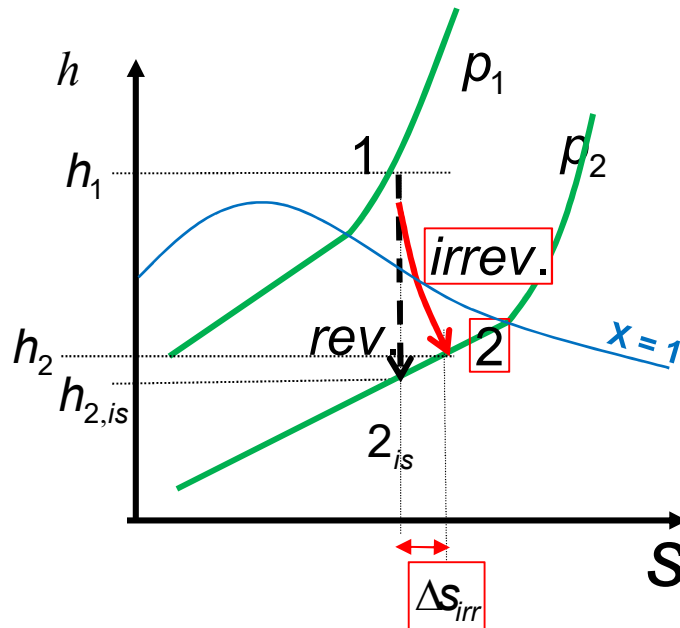
adiabat und reversibel:

$$ds = \frac{dq}{T} + \frac{dw_{Diss}}{T} = 0$$

$$w_{trev} = h_{2is} - h_1$$

adiabat, irreversible Entspannung:

$$ds = \frac{dw_{Diss}}{T} = ds_{irr} > 0$$



$$w_t = h_2 - h_1$$

Isentropenwirkungsgrad, innerer Wirkungsgrad

$$\eta_{is,E} = \frac{w_t}{w_{t,rev}} = \frac{h_2 - h_1}{h_{2is} - h_1}$$

$$h_2 = h_1 - \eta_{is,E} (h_1 - h_{2,rev})$$

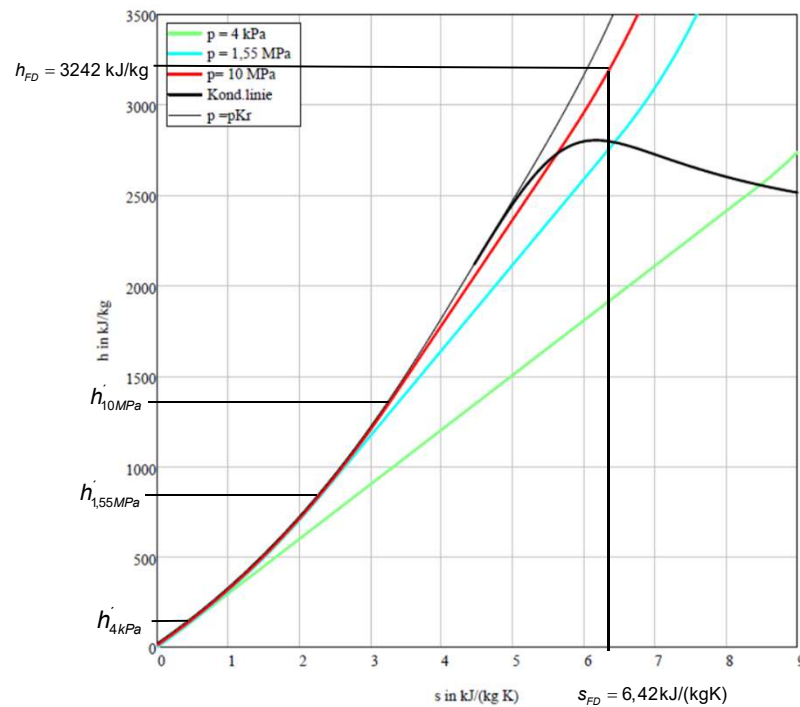
## 2. Kondensationskraftwerk

Ein Verbraucherschwerpunkt benötigt eine elektrische Leistung von  $P = 30 \text{ MW}$ , die mit einem DKP bereitgestellt wird.

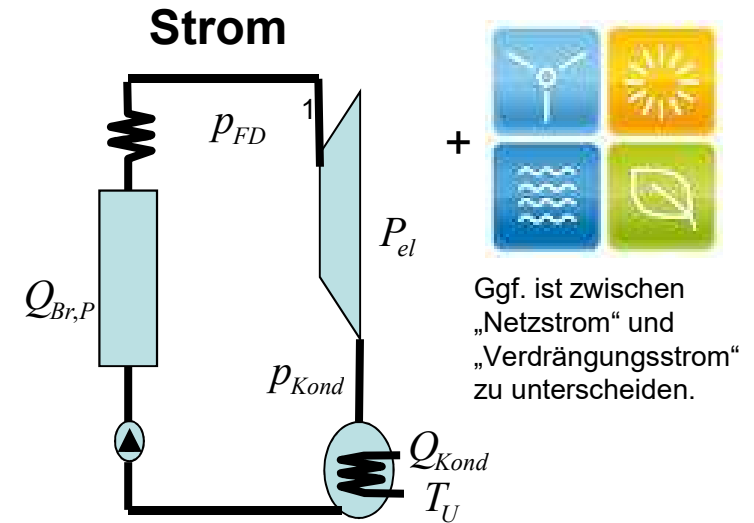
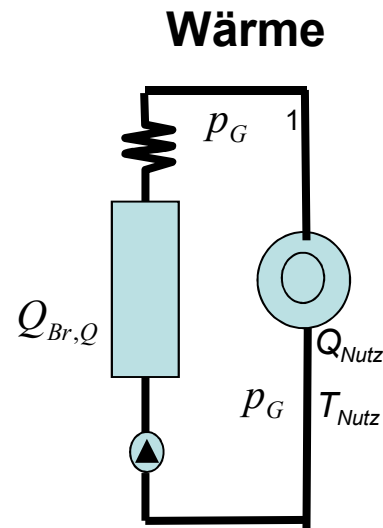
Der Dampfkessel hat einen Wirkungsgrad von  $\eta_K = 0,92$ , er Frischdampf für die Turbinen wird mit  $p_I = 10 \text{ MPa}$  und  $t_I = 450 \text{ °C}$  erzeugt. Die Turbine arbeitet mit einem Isentropenwirkungsgrad von  $\eta_{iz} = 0,88$ . Der Kondensatordruck beträgt  $p_K = 4 \text{ kPa}$ .

Als Brennstoff dient Biomasse mit einem Heizwert  $H_U = 18 \text{ MJ/kg}$ .

Bestimmen Sie die Enthalpien  $h_{1-3}$ , berechnen Sie den thermischen Wirkungsgrad und den benötigten Dampf- und Brennstoffmassenstrom.



# Brennstoffaufwand für Vergleichsprozess „Getrennte Erzeugung“



Wirkungsgrad

$$\eta_K = \frac{\dot{Q}_{Nutz}}{\dot{Q}_{B,Q}}$$

$$\eta_{el\emptyset} = \frac{P_{el}}{\dot{Q}_{B,P}}$$

Brennstoffaufwand

$$\dot{Q}_{B,Q} = \frac{\dot{Q}_{Nutz}}{\eta_K}$$

$$\dot{Q}_{B,P} = \frac{P_{el}}{\eta_{el\emptyset}}$$

Gesamt-Brennstoffaufwand  
bei Erzeugung von Strom und Wärme

$$\dot{Q}_B = \dot{Q}_{B,Q} + \dot{Q}_{B,P} = \frac{\dot{Q}_{Nutz}}{\eta_K} + \frac{P_{el}}{\eta_{elKond}}$$

Brennstoffaufwands-  
Kennzahl bezogen auf  $\dot{Q}_{Nutz}$

$$\left( \frac{\dot{Q}_B}{\dot{Q}_{Nutz}} \right)_{getrennt} = \frac{1}{\eta_K} + \frac{S}{\eta_{el\emptyset}}$$

$$S = \frac{P_{el,V}}{\dot{Q}_{Nutz,V}} = \frac{W_{el,V}}{Q_{Nutz,V}}$$

Ein Verbraucherschwerpunkt benötigt eine elektrische Leistung von  $P = 30 \text{ MW}$  und einen Wärmestrom  $\dot{Q} = 147 \text{ MW}$  (Satt-Dampf mit einer Kondensationstemperatur  $t = 200 \text{ °C}$ ,  $p_D = 1,555 \text{ MPa}$ ). Berechnen Sie Dampf- und Brennstoffbedarf

a) bei getrennter Erzeugung in einem Heizkessel und einem Kondensationskraftwerk.

Die Dampfkessel haben einen Wirkungsgrad von  $\eta_K = 0,92$ .

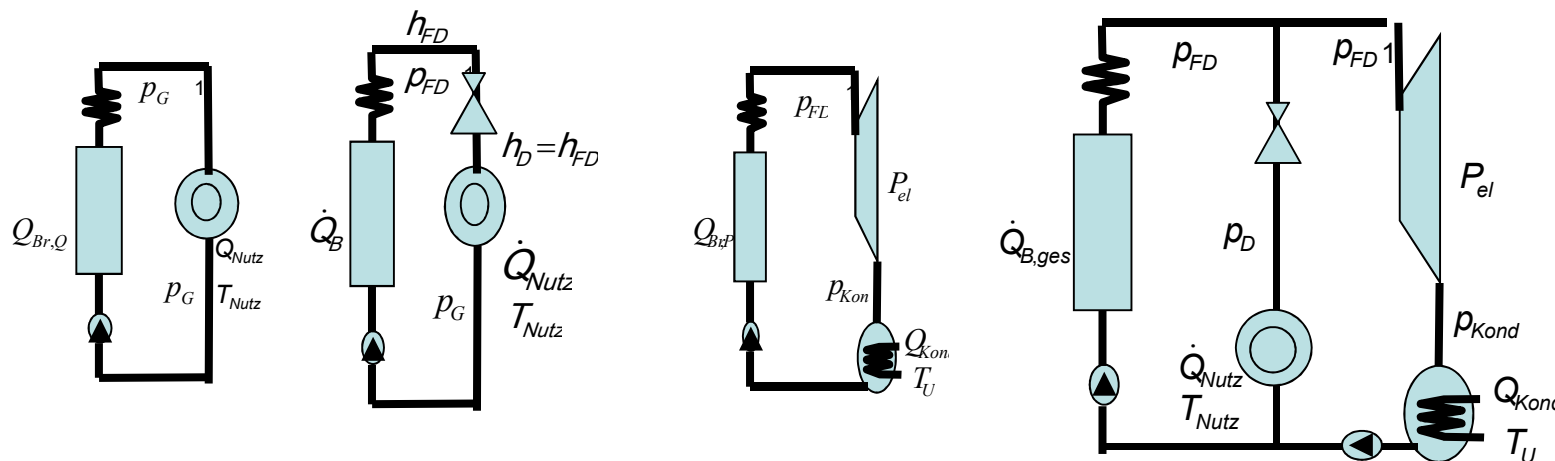
Die Turbine haben Isentropenwirkungsgrade  $\eta_{is} = 0,88$  ( $\eta_{mech}$ ,  $\eta_{Gen}$  vernachlässigen).

Der Frischdampf für die Turbinen wird mit  $p_I = 10 \text{ MPa}$  und  $t_I = 450 \text{ °C}$  erzeugt.

Der Kondensatordruck beträgt  $p_K = 4 \text{ kPa}$ ., die Umgebungstemperatur  $t_U = 20 \text{ °C}$ .

Die Speisepumpenarbeit kann vernachlässigt werden.

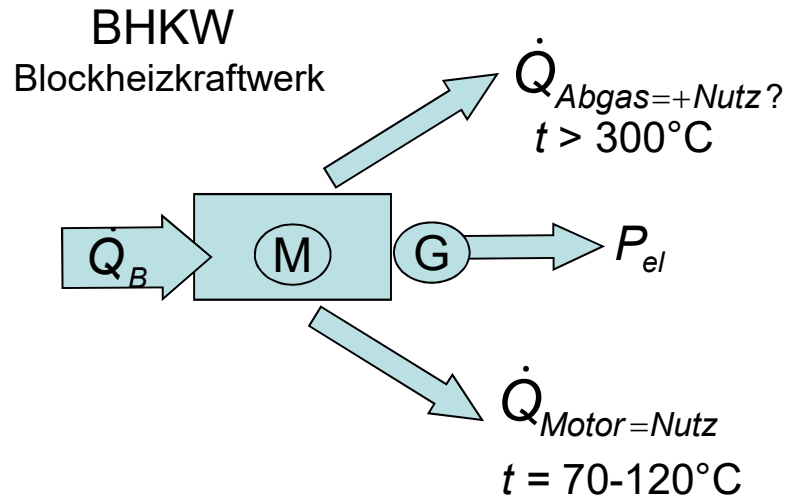
Als Brennstoff dient Holz mit einem Heizwert  $H_i = 18 \text{ MJ/kg}$  und einer spezifischen Exergie  $e_B \sim H_i$ .



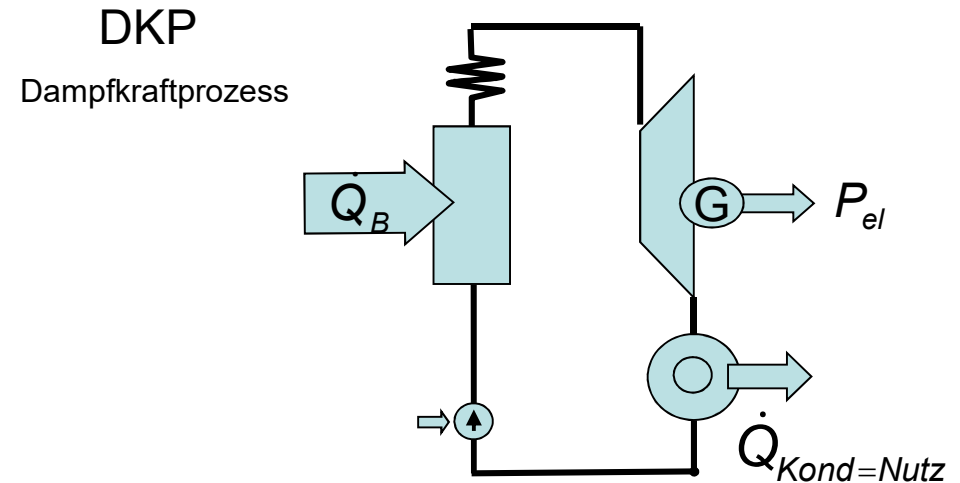


# Kraft- Wärme – Kopplung (KWK)

Gekoppelte (gleichzeitige) Erzeugung von Strom und Wärme



feststehende Wärmenutzungstemperatur,  
Abgaswärme bleibt oft ungenutzt



Temperatur der Abwärme kann auf Verbraucher-bedürfnisse  
abgestimmt werden → veränderliche  
Verhältnisse zwischen Strom und Wärme,  
Abgasverluste ähnlich Heizkessel

Auch Brennstoffzellen können als KWK genutzt werden

## Kennzahlen zur Bewertung

Wirkungsgrade:

$$\eta_{ges} = \frac{P_{el} + \dot{Q}_{Nutz}}{\dot{Q}_B} \quad \eta_{el} = \frac{P_{el}}{\dot{Q}_B} \quad \eta_{th} = \frac{\dot{Q}_{Nutz}}{\dot{Q}_B}$$

Brennstoffnutzungsgrad      elektrisch      thermisch

$$\eta_{ges,ex} = \frac{P_{el} + \frac{T_{Heiz} - T_U}{T_{Heiz}} \dot{Q}_{Nutz}}{\dot{Q}_B} = \eta_{el} + \eta_{exHK}$$

exergetisch

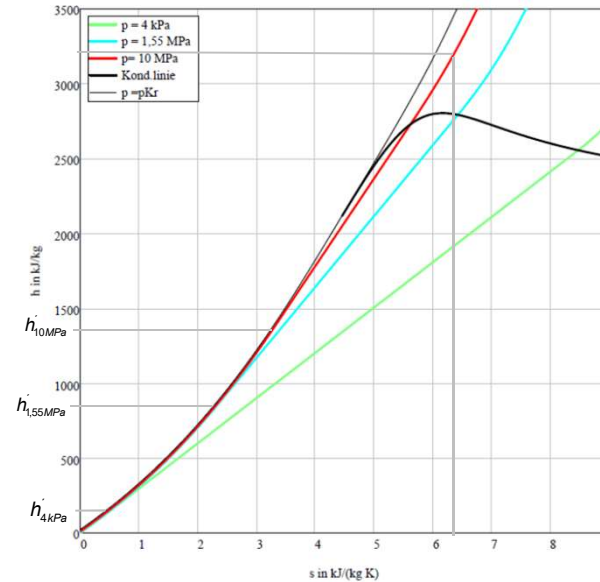
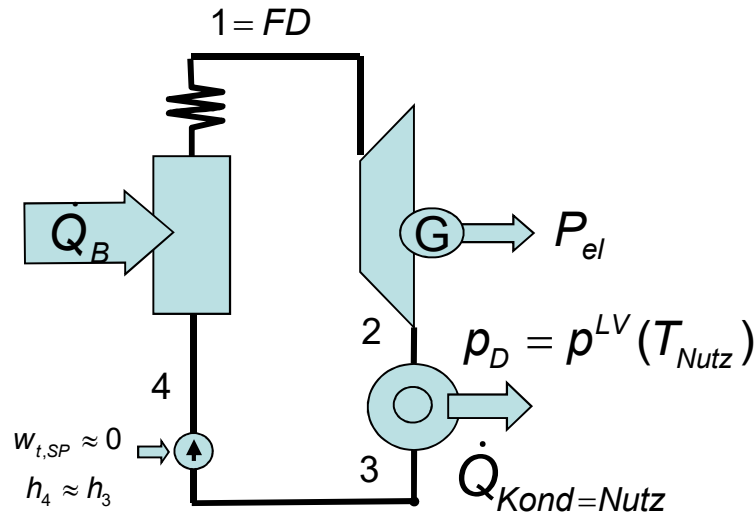
Stromkennzahl:

Heizzahl:

$$\sigma = \frac{P_{el}}{\dot{Q}_{Nutz}} = \frac{1}{h} \quad h = \frac{\dot{Q}_{Nutz}}{P_{el}} = \frac{1}{\sigma}$$

Abwärme Kreisprozess und  
Nutzwärme können sich unterscheiden

# Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) mit DKP



## Reine Gegendruckturbine

$$w_{t,T} = h_2 - h_1$$

$$q_{Nutz} = h_3 - h_2$$

$$\sigma = \frac{w_{t,T}}{q_{Nutz}} = \frac{\dot{m}_D (h_2 - h_1)}{\dot{m}_D (h_3 - h_2)} = \frac{P_{el}}{\dot{Q}_{Nutz}}$$

$$q_{zu} = h_1 - h_{4=3} = w_{t,T} + q_{Nutz}$$

$$\eta_{KWK} = \frac{w_{t,T} + q_{Nutz}}{q_{zu}} = 1$$

innerer Wirkungsgrad  
der KWK

$$\eta_{ges} = \frac{P_{el} + \dot{Q}_{Nutz}}{\dot{Q}_B} = \eta_K < 1$$

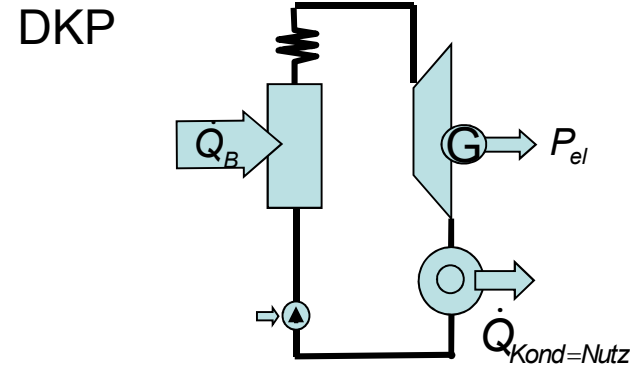
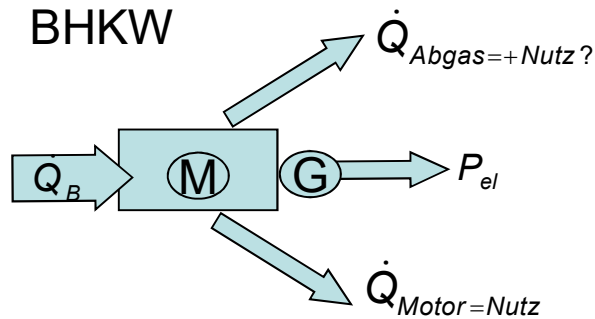
Gesamtwirkungsgrad,  
brennstoffbezogen

- Temperatur der Nutzwärme bestimmt den Turbinenenddruck und damit die Stromkennzahl
- Arbeit und Wärme lassen sich nicht unabhängig voneinander einstellen.

$$\dot{Q}_B = \frac{\dot{m}_D (w_{t,T} + q_{Nutz})}{\eta_{ges=K}}$$

# Beziehungen zwischen den Kennzahlen

(nur zwei Kennzahlen können unabhängig voneinander definiert werden)



Wirkungsgrade:

$$\eta_{ges} = \frac{P_{el} + \dot{Q}_{Nutz}}{\dot{Q}_B} \triangleq \eta_K$$

Abgasverluste  
ähnlich Heizkessel

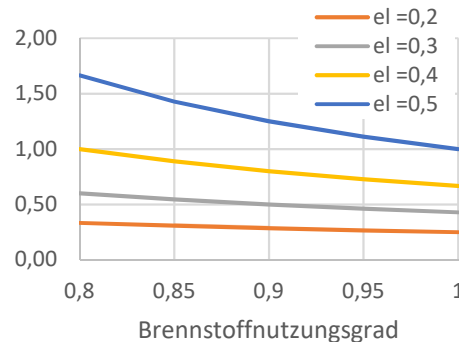
$$\eta_{el} = \frac{P_{el}}{\dot{Q}_B}$$

Stromkennzahl:

$$\sigma = \frac{P_{el}}{\dot{Q}_{Nutz}} = \frac{P_{el}}{\eta_{ges} \dot{Q}_B - P_{el}} = \frac{\eta_{el}}{\eta_{ges} - \eta_{el}}$$

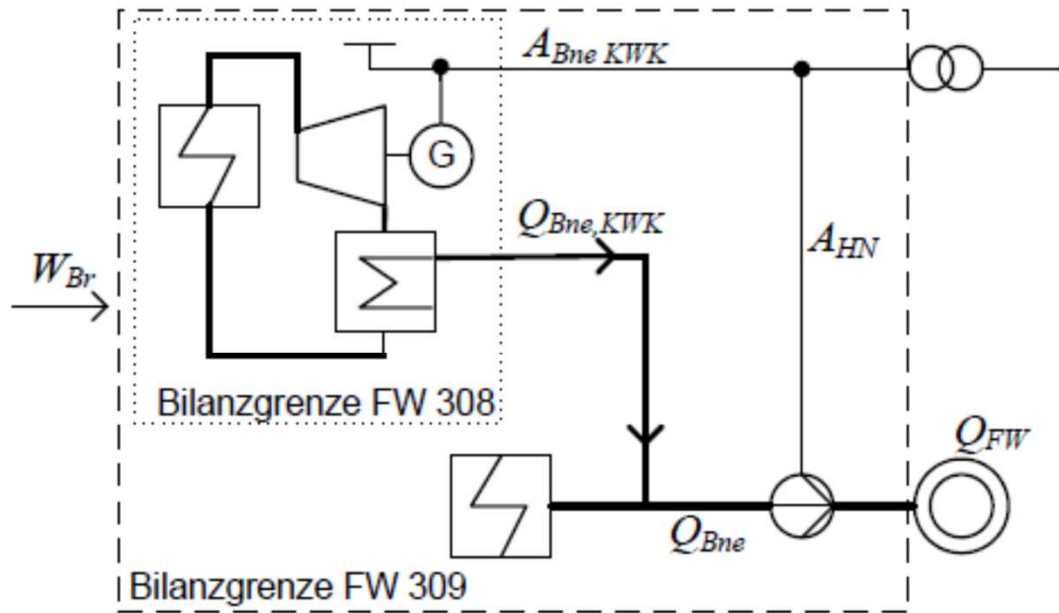
$$\eta_K = 0,9 \quad \eta_{el} = 0,4 \quad \sigma = 0,8$$

Stromkennzahlen KWK



Stromkennzahlen steigen mit abnehmendem  
Gesamt- und thermischem Wirkungsgrad.  
Erwünscht sind aber hohe  $\eta_{el}$  und  $\eta_{ges}$

# Bewertung von Heizkraftwerken (Fernwärme)



Arbeitsblatt AGFW FW 309 Teil 1

**Energetische Bewertung von Fernwärme**  
- Bestimmung der spezifischen Primärenergiefaktoren für Fernwärmeversorgungssysteme -

Energy Performance of District Heating  
- Determination of the specific primary energy factors in district heating supply -

Mai 2014

$A$	Stromarbeit	MWh
$f$	Faktor	–
$Q$	Wärmearbeit	MWh
$W$	Brennstoffwärme	MWh <sub>Hi</sub>

$$A = W_{el}$$

$$W_{Br} = Q_B = H_B = m_B H_{i/s}$$

$$\dot{Q}_B = \dot{H}_B = \dot{m}_B H_{i/s}$$

$H_{i/s}$  - Heizwert/Brennwert

$$f_{P,FW} = \frac{(1 + \sigma) \cdot \alpha_{KWK} \cdot f_{P,Br}}{\zeta_{ne,KWK} \cdot \zeta_{HN}} + \frac{(1 - \alpha_{KWK}) \cdot f_{P,Br}}{\zeta_{ne,th} \cdot \zeta_{HN}} - \frac{(\sigma \cdot \alpha_{KWK} - \alpha_{HN}) \cdot f_{P,verdr}}{\zeta_{HN}}$$

mit

$\sigma$  Stromkennziffer der KWK-Anlage

$\alpha_{KWK}$  KWK-Deckungsanteil

$\alpha_{HN}$   $A_{HN} / Q_{Bne}$  Hierfür ist 0,015 einzusetzen.

$\zeta_{HN}$  Nutzungsgrad des Heiznetzes. Hierfür kann 0,90 eingesetzt werden.

$\zeta_{ne,KWK}$  Nutzungsgrad der KWK-Anlage

$\zeta_{ne,th}$  Nutzungsgrad der ungekoppelten Wärmeerzeugung

Netzstrom und KWK-Strom haben unterschiedliche Wirkungsgrade

Wird KWK-Strom eingespeist, so wird bilanziell durch diesen Strom ausschließlich fossiler Strom ersetzt (Verdrängungsstrom)

# Methoden zur Bestimmung von Primärenergiefaktoren der Kraft-Wärme-Kopplung

- **Arbeitswertmethode**

Vergleich der KWK mit Kondkraftwerk (bei gleicher Stromerzeugung)

$$PE_Q = PE_{KWK} - PE_{P_{el}, kond}$$

- **Exergetische Methode (Carnot-Methode)**

Bewertung des Arbeitswertes der Wärme mit  $\frac{T_m - T_U}{T_m} Q$  als „Stromverlust“

- **Stromgutschriftenmethode**

$$PE_Q = PE_{KWK} - f_{P\emptyset} P_{el, KWK}$$

- **Finnische Methode**

Vergleich von gekoppelter Erzeugung mit getrennter Erzeugung

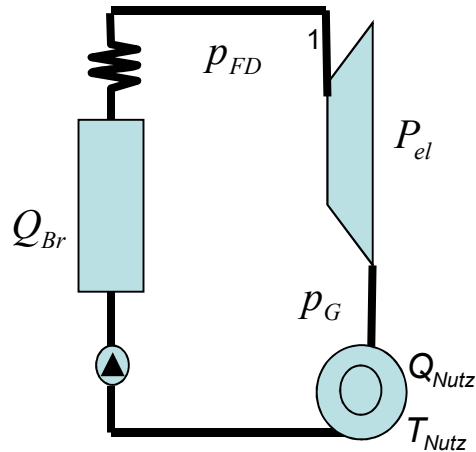
Zwei Referenzsysteme notwendig, (Ergebnis wird stark vom Referenzsystem beeinflusst)

- **Kalorische Methode (Internationale Energie-Agentur-Methode)**

Brennstoffaufteilung prozentual zu Strom und Wärme,

(eigentlich ungeeignet, nur sofern keine anderen Daten zur Verfügung stehen)

# Gesamtbrennstoffaufwand Kraft - Wärme - Kopplung



$$\eta_{elKWK} = \frac{P_{el}}{\dot{Q}_B}$$

$$\eta_K = \frac{P_{el} + \dot{Q}_{Nutz}}{\dot{Q}_B}$$

$$\dot{Q}_B = \frac{P_{el}}{\eta_{elKWK}} = \frac{P_{el} + \dot{Q}_{Nutz}}{\eta_K} = \frac{P_{el}}{\eta_K} + \frac{\dot{Q}_{Nutz}}{\eta_K}$$

$$\left( \frac{\dot{Q}_B}{\dot{Q}_{Nutz}} \right)_{KWK} = \frac{\sigma}{\eta_{elKWK}} = \frac{\sigma}{\eta_K} + \frac{1}{\eta_K}$$

# Vergleich Brennstoffaufwandskennzahlen

Getrennte Erzeugung

$$\left( \frac{\dot{Q}_B}{\dot{Q}_{Nutz}} \right)_{getrennt} = \frac{1}{\eta_K} + \frac{S}{\eta_{el\emptyset}}$$

$$\eta_K = 0,9$$

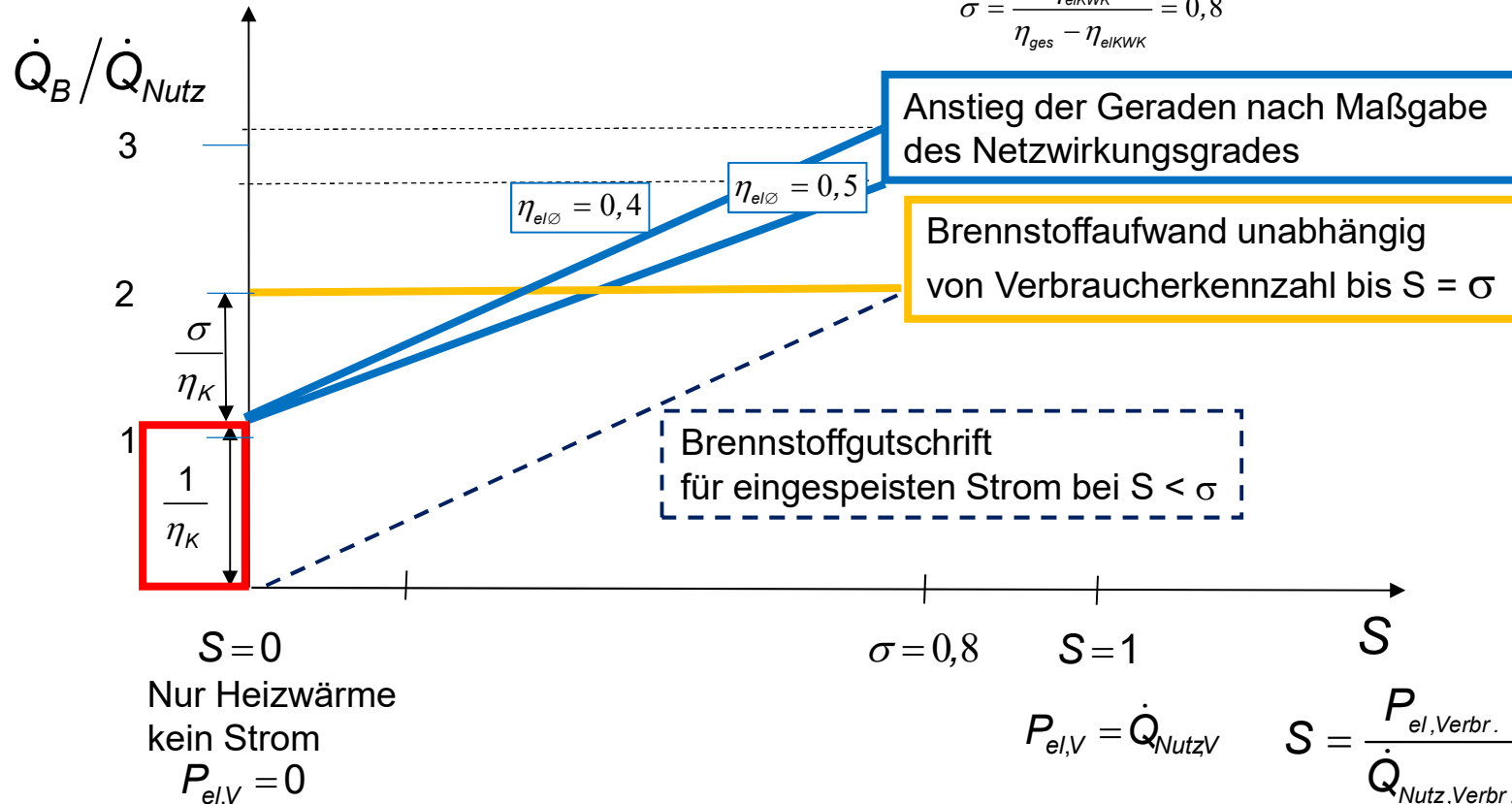
KWK

$$\left( \frac{\dot{Q}_B}{\dot{Q}_{Nutz}} \right)_{KWK} = \frac{1}{\eta_K} + \frac{\sigma}{\eta_K} - \frac{(\sigma - S)}{\eta_{el,Verdrängungsstrom}}$$

$$\eta_K = 0,9; \eta_{el} = 0,4$$

$$\sigma = \frac{\eta_{elKWK}}{\eta_{ges} - \eta_{elKWK}} = 0,8$$

Brennstoffaufwand



## Kraft-Wärme-Kopplung mit Dampfkraftprozess

Ein Verbraucherschwerpunkt benötigt eine elektrische Leistung von  $P = 30$  MW und einen Wärmestrom  $\dot{Q} = 149,4$  MW (Satt-Dampf mit einer Kondensationstemperatur  $t = 200$  °C,  $p_D = 1,555$  MPa).

Vergleichen Sie Dampf- und Brennstoffbedarf

- a) bei getrennter Erzeugung in einem Heizkessel und einem Kondensationskraftwerk.,
- b) bei Verwendung einer reinen Gegendruckturbine.

Die Dampfkessel haben einen Wirkungsgrad von  $\eta_K = 0,92$ .

Die Turbine haben Isentropenwirkungsgrade  $\eta_{is} = 0,88$  ( $\eta_{mech}$ ,  $\eta_{Gen}$  vernachlässigen).

Der Frischdampf für die Turbinen wird mit  $p_I = 10$  MPa und  $t_I = 450$  °C erzeugt.

Der Kondensatordruck beträgt  $p_K = 4$  kPa., die Umgebungstemperatur  $t_U = 20$  °C.

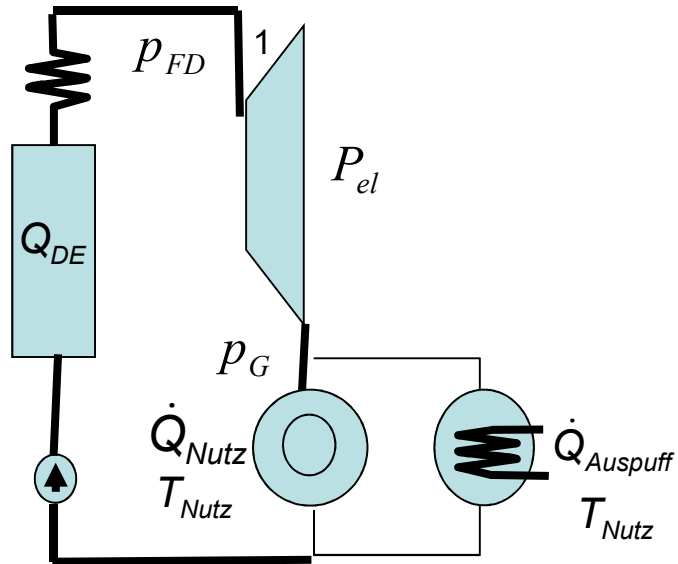
Die Speisepumpenarbeit kann vernachlässigt werden.

Als Brennstoff dient Holz mit einem Heizwert  $H_i = 18$  MJ/kg und einer spezifischen Exergie  $e_B \sim H_i$ .

- c) Wie ändern sich die Verhältnisse, wenn der Wärmebedarf nur  $\dot{Q} = 60$  MW beträgt?
- d) Vergleichen Sie den Dampfbedarf für den verminderten Nutzwärmestrom bei Nutzung einer Entnahmekondensationsturbine und einer verbundenen Gegendruckturbine.



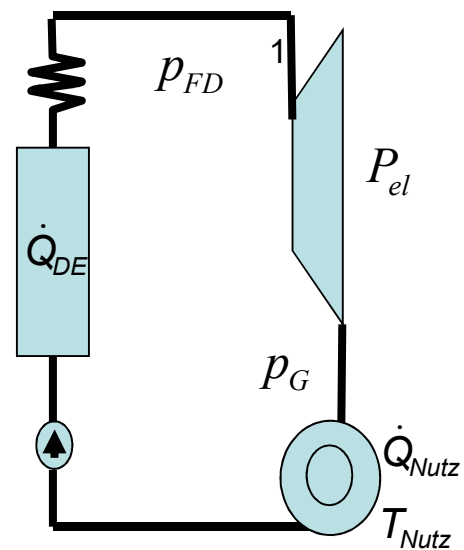
# Anpassung an Heizwärmebedarf



$$H < h$$

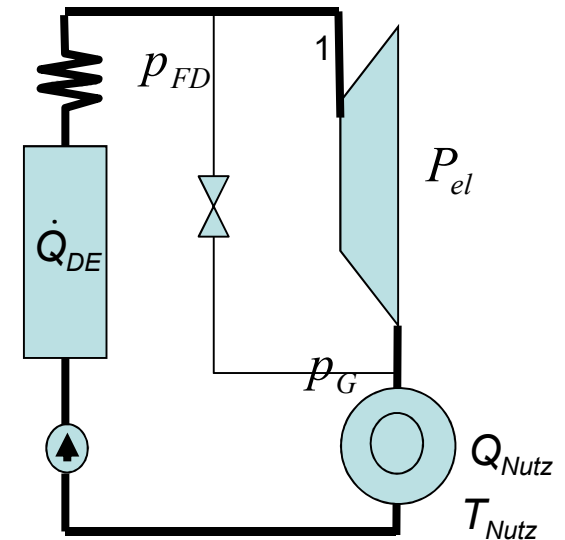
Auspuffbetrieb  
GD-Turbine

Verbraucher benötigt weniger Dampf,  
als zur Elektroenergiebereitstellung  
benötigt wird



$$S = \sigma \quad H = h$$

Optimale Übereinstimmung  
KWK - Verbraucher



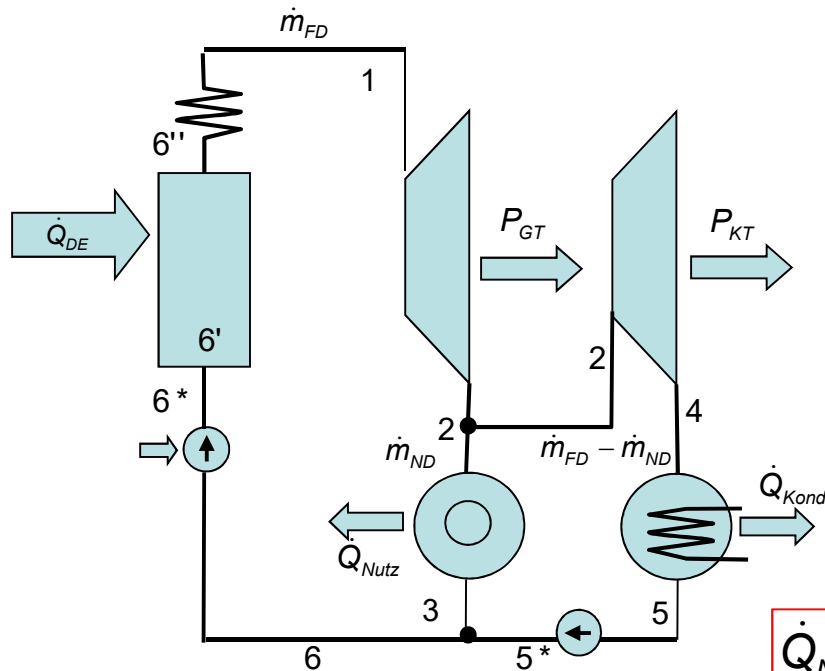
$$H > h$$

Spitzenlast-  
Kessel

Verbraucher benötigt mehr Dampf,  
als bei maximaler Last der Turbine  
angeboten wird

# Anpassung von Strom – und Wärmebedarf

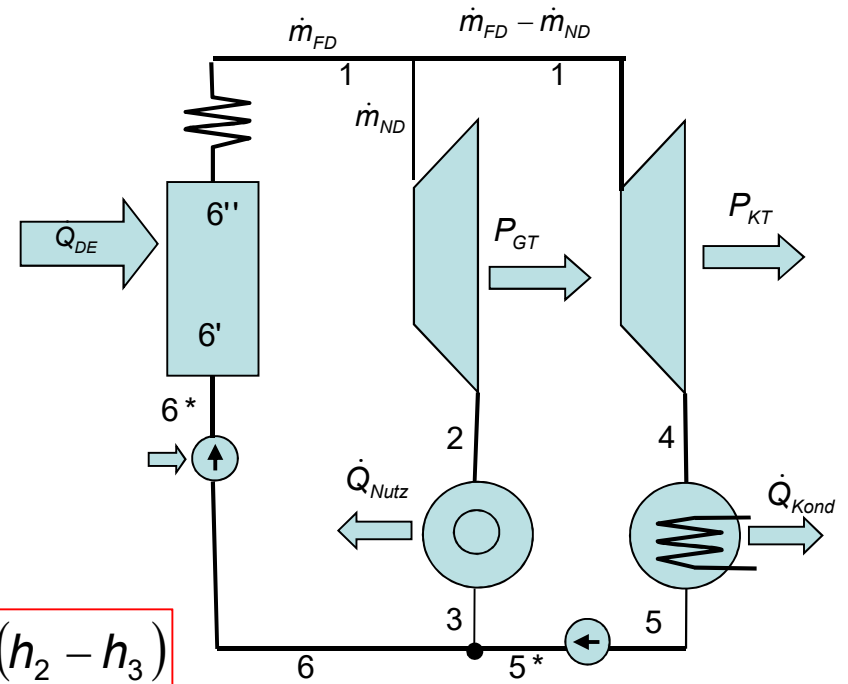
Entnahmekondensations-Turbine



$$\dot{Q}_{Nutz} = \dot{m}_{ND}(h_2 - h_3)$$

$$P_{el} = \dot{m}_{FD}(h_1 - h_2) + (\dot{m}_{FD} - \dot{m}_{ND})(h_2 - h_4)$$

Verbundene Gegendruck-Turbine



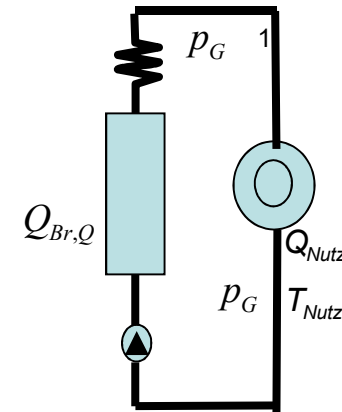
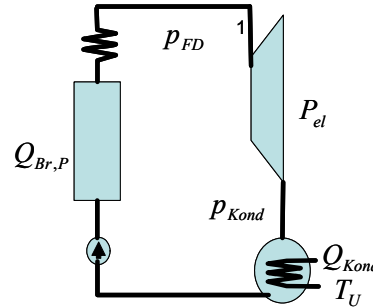
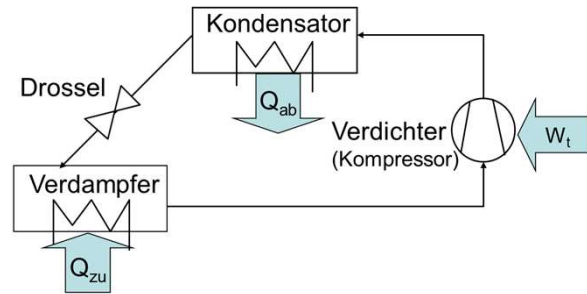
$$P_{el} = \dot{m}_{ND}(h_1 - h_2) + (\dot{m}_{FD} - \dot{m}_{ND})(h_1 - h_4)$$

$$\dot{Q}_{DE} = \dot{m}_{FD}(h_1 - h_{6*})$$

Massenbilanz  
Kondensatmischpunkt

$$\dot{m}_{FD} h_6 = \dot{m}_{ND} h_3 + (\dot{m}_{FD} - \dot{m}_{ND}) h_{5*}$$

# Mindestleistungsziffer der Wärmepumpe im Vergleich zum Heizkessel auf Brennstoffbasis



$$\varepsilon_{WP} = \frac{\dot{Q}_{Nutz}}{P_{el}}$$

$$\eta_{el\varnothing} = \frac{P_{el}}{\dot{Q}_{B,P}}$$

$$\eta_K = \frac{\dot{Q}_{Nutz}}{\dot{Q}_B}$$

$$\varepsilon_{WP} = \frac{\dot{Q}_{Nutz}}{\eta_{el\varnothing} \dot{Q}_{B,P}}$$

$$\left( \frac{\dot{Q}_B}{\dot{Q}_{Nutz}} \right)_{WP} = \frac{1}{\eta_{el\varnothing} \varepsilon_{WP}}$$

wenn WP im Vorteil sein soll

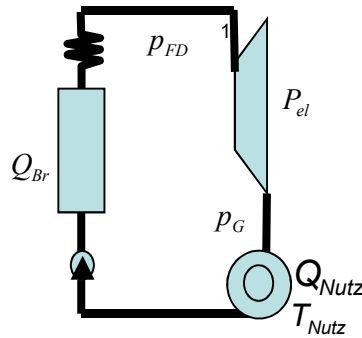
$$\frac{1}{\eta_K} = \left( \frac{\dot{Q}_B}{\dot{Q}_{Nutz}} \right)_{Kessel}$$

$$\varepsilon \geq \frac{\eta_K}{\eta_{el\varnothing}}$$

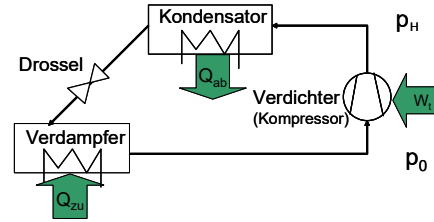
Mindestleistungsziffer  
Wärmepumpe

$$\varepsilon_{\min} = \frac{1}{0,33} = 3 \quad \varepsilon_{\min} = \frac{1}{0,5} = 2$$

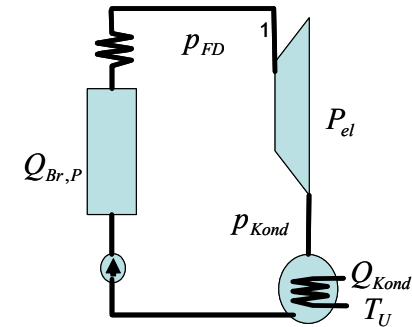
# Brennstoffaufwandsvergleich WP-KWK



$$\eta_{ges} = \eta_K$$



$$\dot{Q}_{B_{WP}} = \frac{\dot{Q}_{Nutz}}{\eta_{el\emptyset} \varepsilon_{WP}}$$



$$\dot{Q}_{B_P} = \frac{P_{el}}{\eta_{el\emptyset}}$$

$$\dot{Q}_B = \frac{P_{el}}{\eta_{elKWK}} = \frac{P_{el} + \dot{Q}_{Nutz}}{\eta_K} = \frac{P_{el}}{\eta_K} + \frac{\dot{Q}_{Nutz}}{\eta_K}$$

$$\dot{Q}_{B_{ges}} = \frac{\dot{Q}_{Nutz}}{\eta_{el\emptyset} \varepsilon_{WP}} + \frac{P_{el}}{\eta_{el\emptyset}}$$

In KWK als Koppelprodukt anfallender Strom ist zusätzlich zu erzeugen

$$\left( \frac{\dot{Q}_B}{\dot{Q}_{Nutz}} \right)_{KWK} = \frac{\sigma}{\eta_K} + \frac{1}{\eta_K} = \frac{1}{\eta_K - \eta_{elKWK}}$$

$$\left( \frac{\dot{Q}_B}{\dot{Q}_{Nutz}} \right)_{WP} = \frac{\sigma}{\eta_{el\emptyset}} + \frac{1}{\eta_{el\emptyset} \varepsilon_{WP}}$$

$$\frac{1}{\eta_K - \eta_{elKWK}} \geq \frac{\sigma}{\eta_{el\emptyset}} + \frac{1}{\eta_{el\emptyset} \varepsilon_{WP}}$$

Wenn WP im Vorteil sein soll

# Brennstoffaufwandsvergleich WP - KWK

$$\frac{1}{\eta_K - \eta_{elKWK}} \geq \frac{\sigma}{\eta_{el\emptyset}} + \frac{1}{\eta_{el\emptyset} \varepsilon_{WP}}$$

$$\sigma = \frac{\eta_{elKWK}}{\eta_{ges} - \eta_{elKWK}}$$

$$\varepsilon_{WP,min} = \frac{\eta_K - \eta_{elKWK}}{\eta_{el\emptyset} - \eta_{elKWK}}$$

Schon bei  $\eta_{KWK} > 30\%$  ist die KWK effizienter als eine KWP

