



PRÜFUNGSKLAUSUR F'12

Energietechnik

10. März 2012

Prüfungsdauer: 2153 - Diplomstudiengang: 3 Stunden
21301 - Master-Studiengang: 2 Stunden

Bitte vollständig ausfüllen – eine Bearbeitung ist sonst nicht möglich!

Name, Vorname:

Matr.-Nr.:

Straße:

PLZ und Ort:

Geb.-Datum/-ort:

Im **Diplomstudiengang (Bearbeitungszeit 180 min)** sind alle Aufgaben vollständig zu bearbeiten –
im **Master-Studiengang (Bearbeitungszeit 120 min)** nur die Aufgabenteile [1a) – b), 2a) – d) und 3a) – f)] .

Aufgabe	1	2	3	Summe
Erreichbare Punkte	44 [28]	40 [28]	36 [24]	120 [80]
erreichte Punkte				

Datum

1. Prüfer

2. Prüfer

Note

Ein Dampfkraftwerk sei für eine elektrische Leistung von 800 MW ausgelegt. Die Speisepumpe sauge das Kondensat bei der dem Kondensatordruck $p_1 = 0,05$ bar entsprechenden Sättigungstemperatur T_1 an. Beim Kesseldruck von $p_2 = 200$ bar werde das Wasser erwärmt, verdampft und schließlich auf $T_3 = 530^\circ\text{C}$ überhitzt. Anschließend werde der Dampf in der Hochdruckturbine auf $p_4 = 50$ bar entspannt. Nach Zwischenüberhitzung des Dampfes auf $T_5 = 530^\circ\text{C}$ finde eine zweite Entspannung in der Niederdruckturbine von $p_5 = p_4$ auf den Kondensatordruck $p_6 = p_1$ statt. Die Pumpe und die Turbinen sollen als ideal und verlustlos angenommen werden.

- a) Skizzieren Sie den Prozess im h-s- und im T-s-Diagramm und berechnen Sie dazu alle notwendigen Zustandsgrößen!
- b) Berechnen Sie die prozentuale Aufteilung der im Kessel erzeugten Wärme auf das Vorwärmesystem, das Verdampfungssystem, das Überhitzer- und Zwischenüberhitzersystem! (Die Kennlinien können als stückweise linear angenommen werden!)

===== nur Diplomstudiengang =====

- c) Bestimmen Sie den thermischen Wirkungsgrad des Kreisprozesses und den Carnot-Faktor!
- d) Wie groß ist der Dampfmassenstrom?
- e) Bestimmen Sie den pro Stunde erforderlichen Steinkohleeinsatz, wenn der Kesselwirkungsgrad $\eta_K = 0,9$ beträgt. (Heizwert der Steinkohle: $8,1$ kWh/kg)

Drucktafel für den Sättigungszustand (Auszüge)

p	t	v'	v''	h'	h''	r	s'	s''
bar	°C	$\frac{m^3}{kg}$	$\frac{m^3}{kg}$	$\frac{kJ}{kg}$	$\frac{kJ}{kg}$	$\frac{kJ}{kg}$	$\frac{kJ}{kg \cdot K}$	$\frac{kJ}{kg \cdot K}$
0.010	6.9828	0.0010001	179.20	29.34	2514.4	2485.0	0.1060	8.9767
0.015	13.036	0.0010006	87.98	54.71	2525.5	2470.7	0.1957	8.9288
0.020	17.513	0.0010012	57.01	73.46	2533.6	2460.2	0.2607	8.7246
0.025	21.096	0.0010020	54.26	88.45	2540.2	2451.7	0.3119	8.6440
0.030	24.100	0.0010027	45.67	101.00	2545.6	2444.6	0.3544	8.5785
0.035	26.694	0.0010033	39.48	111.95	2550.4	2438.5	0.3907	8.5232
0.040	28.983	0.0010040	34.80	121.41	2554.5	2433.1	0.4225	8.4755
0.045	31.035	0.0010046	31.14	129.99	2558.2	2428.2	0.4507	8.4335
0.050	32.898	0.0010052	28.19	137.77	2561.6	2423.8	0.4763	8.3960
0.060	36.183	0.0010064	23.74	151.50	2567.5	2416.0	0.5209	8.3312
0.070	39.025	0.0010074	20.53	163.38	2572.6	2409.2	0.5591	8.2767
0.080	41.534	0.0010084	18.10	173.86	2577.1	2403.2	0.5925	8.2296
0.090	43.787	0.0010094	16.20	183.28	2581.1	2397.9	0.6224	8.1881
0.10	45.833	0.0010102	14.67	191.83	2584.8	2392.9	0.6493	8.1511
0.12	49.449	0.0010119	12.38	206.94	2591.2	2384.3	0.6963	8.0872
0.14	52.574	0.0010133	10.69	220.02	2596.7	2376.7	0.7367	8.0334
0.16	55.341	0.0010147	9.433	231.59	2601.6	2370.0	0.7721	7.9869
0.18	57.826	0.0010160	8.445	241.99	2605.9	2363.9	0.8036	7.9460
0.20	60.086	0.0010172	7.650	251.45	2609.9	2358.4	0.8321	7.9094
0.22	62.162	0.0010183	6.995	260.14	2613.5	2353.3	0.8581	7.8764
0.24	64.082	0.0010194	6.447	268.18	2616.8	2348.6	0.8820	7.8464
0.26	65.871	0.0010204	5.980	275.67	2619.9	2344.2	0.9041	7.8188
0.28	67.547	0.0010214	5.579	282.69	2622.7	2340.0	0.9248	7.7933
0.30	69.124	0.0010223	5.229	289.30	2625.4	2336.1	0.9441	7.7695
0.32	70.615	0.0010232	4.922	295.55	2628.0	2332.4	0.9623	7.7474
0.34	72.029	0.0010241	4.650	301.48	2630.4	2328.9	0.9795	7.7266
0.36	73.374	0.0010249	4.408	307.12	2632.6	2325.5	0.9958	7.7070
0.38	74.658	0.0010257	4.190	312.50	2634.8	2322.3	1.0113	7.6884
0.40	75.886	0.0010265	3.993	317.65	2636.9	2319.2	1.0261	7.6709
0.50	81.345	0.0010301	3.240	340.56	2646.0	2305.4	1.0912	7.5947
0.60	85.984	0.0010333	2.732	359.93	2653.6	2293.6	1.1454	7.5327
0.70	89.529	0.0010361	2.365	376.77	2660.1	2283.3	1.1921	7.4804
0.80	93.512	0.0010387	2.087	391.72	2665.8	2274.0	1.2330	7.4352
0.90	96.713	0.0010412	1.869	405.21	2670.9	2265.6	1.2694	7.3954
1.0	99.832	0.0010434	1.694	417.51	2675.4	2257.9	1.3027	7.3598
1.1	102.32	0.0010455	1.549	428.84	2679.6	2250.8	1.3330	7.3277
1.2	104.81	0.0010476	1.428	439.36	2683.4	2244.1	1.3609	7.2984
1.3	107.13	0.0010495	1.325	449.19	2687.0	2237.8	1.3868	7.2715
1.4	109.32	0.0010513	1.236	458.42	2690.3	2231.9	1.4109	7.2465
1.5	111.37	0.0010530	1.159	467.13	2693.4	2226.2	1.4336	7.2234
1.6	113.32	0.0010547	1.091	475.38	2696.2	2220.9	1.4550	7.2017
1.7	115.17	0.0010563	1.031	483.22	2698.9	2215.7	1.4752	7.1813
1.8	116.93	0.0010579	0.9772	490.70	2701.5	2210.8	1.4944	7.1622
1.9	118.62	0.0010594	0.9290	497.85	2704.0	2206.1	1.5127	7.1440
2.0	120.23	0.0010608	0.8854	504.70	2706.3	2201.6	1.5301	7.1266
2.2	123.27	0.0010636	0.8098	517.62	2710.6	2193.0	1.5627	7.0949
2.4	126.09	0.0010663	0.7465	529.64	2714.5	2184.9	1.5929	7.0657
2.6	128.73	0.0010688	0.6925	540.87	2718.2	2177.3	1.6209	7.0389
2.8	131.20	0.0010712	0.6460	551.44	2721.5	2170.1	1.6471	7.0140
3.0	133.54	0.0010735	0.6056	561.43	2724.7	2163.2	1.6716	6.9909
3.2	135.75	0.0010757	0.5700	570.90	2727.6	2156.7	1.6948	6.9693
3.4	137.86	0.0010779	0.5385	579.92	2730.3	2150.4	1.7168	6.9489
3.6	139.86	0.0010799	0.5103	588.53	2732.9	2144.4	1.7376	6.9297
3.8	141.78	0.0010819	0.4851	596.77	2735.3	2138.6	1.7574	6.9116
4.0	143.62	0.0010839	0.4622	604.67	2737.6	2133.0	1.7764	6.8943
4.2	145.39	0.0010858	0.4415	612.27	2739.8	2127.5	1.7945	6.8779
4.4	147.09	0.0010875	0.4226	619.60	2741.9	2122.3	1.8120	6.8623
4.6	148.73	0.0010894	0.4053	626.67	2743.9	2117.2	1.8287	6.8473
4.8	150.31	0.0010911	0.3894	633.50	2745.7	2112.2	1.8448	6.8330
5.0	151.84	0.0010928	0.3747	640.12	2747.5	2107.4	1.8604	6.8192
5.0	153.84	0.0011009	0.3155	670.42	2755.5	2085.0	1.9308	6.7575
7.0	164.96	0.0011082	0.2727	697.06	2762.0	2064.9	1.9916	6.7052
8.0	170.41	0.0011150	0.2403	720.94	2767.5	2045.5	2.0457	6.6596
9.0	175.26	0.0011213	0.2148	742.64	2772.1	2029.5	2.0941	6.6192
10	179.88	0.0011274	0.1943	762.61	2776.2	2013.6	2.1382	6.5828
12	187.96	0.0011386	0.1632	798.43	2782.7	1984.9	2.2161	6.5194
14	195.04	0.0011489	0.1407	830.08	2787.8	1957.7	2.2837	6.4651
16	201.37	0.0011585	0.1237	858.56	2791.7	1933.2	2.3436	6.4176
18	207.11	0.0011676	0.1103	884.98	2794.8	1910.3	2.3976	6.3751
20	212.37	0.0011766	0.09954	908.59	2797.2	1888.6	2.4469	6.3367
22	217.24	0.0011850	0.09065	930.95	2799.1	1868.1	2.4922	6.3015
24	221.78	0.0011932	0.08320	951.93	2800.4	1848.5	2.5343	6.2690
26	226.04	0.0012011	0.07686	971.72	2801.4	1829.6	2.5736	6.2387
28	230.05	0.0012088	0.07139	990.48	2802.0	1811.6	2.6106	6.2104
30	233.84	0.0012163	0.06663	1008.4	2802.3	1793.9	2.6455	6.1837
35	242.54	0.0012345	0.05703	1049.8	2802.0	1752.2	2.7253	6.1228
40	250.33	0.0012521	0.04975	1087.4	2800.3	1712.9	2.7955	6.0685
45	257.41	0.0012691	0.04404	1122.1	2797.7	1675.6	2.8512	6.0191
50	263.91	0.0012858	0.03943	1154.5	2794.2	1639.7	2.9026	5.9735
55	269.93	0.0013023	0.03563	1184.9	2789.9	1605.0	2.9575	5.9309
60	275.55	0.0013187	0.03244	1213.7	2785.0	1571.3	3.0073	5.8908
65	280.82	0.0013350	0.02972	1241.1	2779.5	1538.4	3.0759	5.8527
70	285.79	0.0013513	0.02737	1267.4	2773.5	1506.0	3.1219	5.8162
75	290.50	0.0013677	0.02533	1292.7	2766.9	1474.2	3.1657	5.7811
80	294.97	0.0013842	0.02353	1317.1	2759.9	1442.8	3.2076	5.7471
85	299.23	0.0014009	0.02193	1340.7	2752.5	1411.7	3.2479	5.7141
90	303.31	0.0014179	0.02050	1363.7	2744.6	1380.9	3.2867	5.6820
95	307.21	0.0014351	0.01921	1386.1	2736.4	1350.2	3.3242	5.6506
100	310.96	0.0014526	0.01804	1408.0	2727.7	1319.7	3.3605	5.6198
110	318.05	0.0014887	0.01601	1450.6	2709.3	1258.7	3.4304	5.5595
120	324.65	0.0015268	0.01428	1491.8	2689.2	1197.4	3.4972	5.5002
130	330.83	0.0015672	0.01280	1532.0	2667.0	1135.0	3.5616	5.4406
140	336.64	0.0016106	0.01150	1571.6	2642.4	1070.7	3.6242	5.3803
150	342.13	0.0016579	0.01034	1611.0	2615.0	1004.0	3.6859	5.3178
160	347.33	0.0017103	0.009306	1650.5	2584.9	934.3	3.7471	5.2531
170	352.26	0.0017696	0.008371	1691.7	2551.6	859.9	3.8107	5.1856
180	356.96	0.0018399	0.007498	1734.8	2513.9	779.1	3.8765	5.1168
190	361.43	0.0019260	0.006678	1778.7	2470.6	692.0	3.9429	5.0332
200	365.70	0.0020370	0.005877	1826.5	2418.4	591.9	4.0149	4.9412
210	369.78	0.0022015	0.005023	1886.3	2347.6	461.3	4.1048	4.8223
220	373.69	0.0026714	0.003728	2011.1	2195.6	184.5	4.2947	4.5799
221.20	374.15	0.00317			2107.4	0.0		4.4429

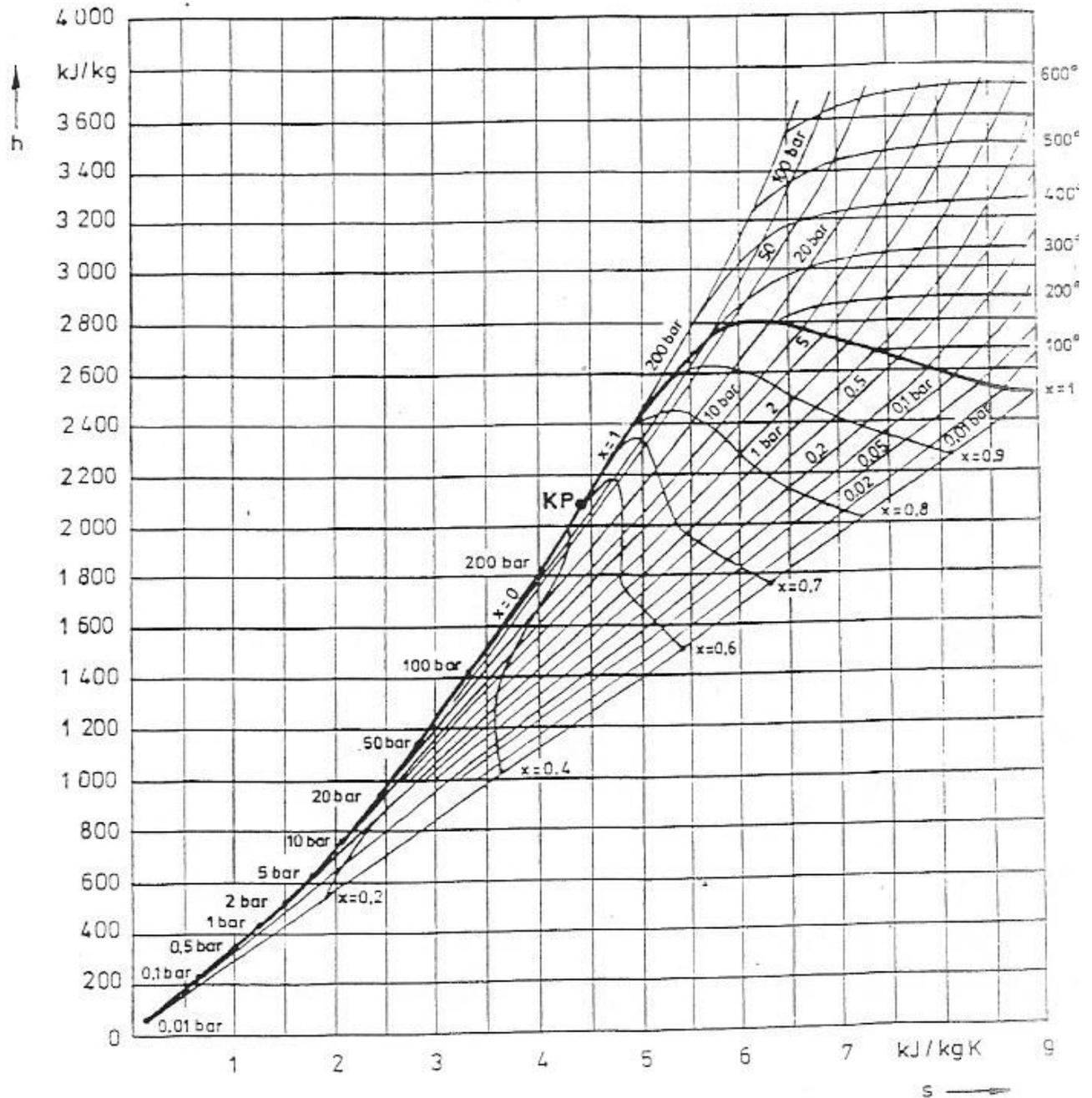


Bild 4.5
h-s-Diagramm für Wasser

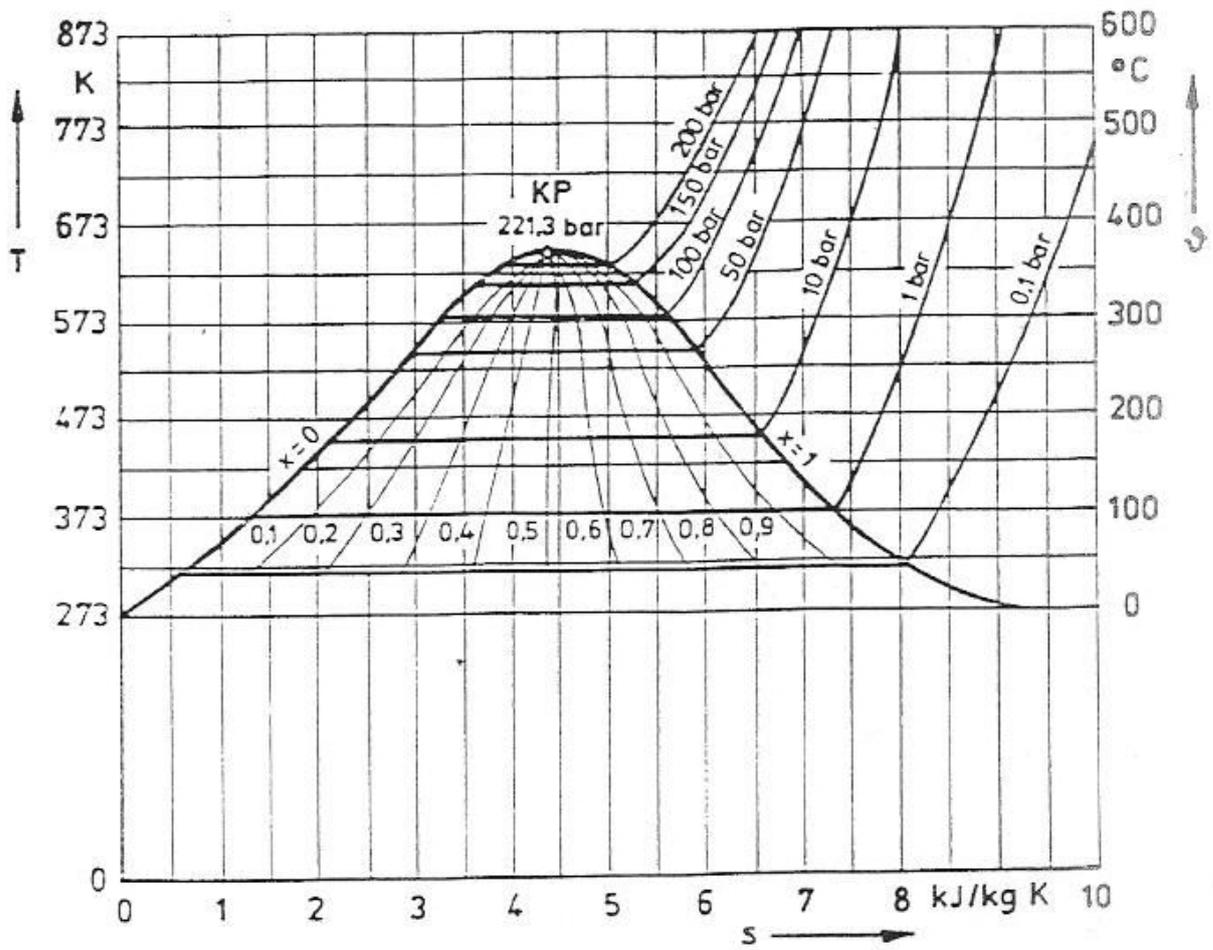


Bild 4.2
T-s-Diagramm für Wasser

Aufgabe 2:**Synchronmaschine**

Ein Synchronmotor soll auf ein Drehstromnetz synchronisiert zugeschaltet werden. Beim Zuschalten eile die Polradspannung dem Vektor der Netzspannung jedoch um einen Fehlerwinkel von $0^\circ 45'$ voraus. Netz- und Polradspannung seien betragsmäßig gleich.

Die im Zuschaltmoment wirksame Reaktanz von Maschine und Netz betrage $X = 0,95 \Omega$.

Netzdaten: $400 \text{ V} / 50 \text{ Hz}$

Maschinendaten: $I_N = 350 \text{ A}$

$\varphi_N = 20^\circ$ (induktiv)

$X_d = 0,7 \Omega$

$p = 2$

- Wie groß ist der im ersten Moment fließende Strom?
- Berechnen Sie das dabei entwickelte Drehmoment!
- Bilden Sie das Verhältnis von dem im Aufgabenteil b) berechneten Drehmoment zum Nenndrehmoment!
- Zeichnen Sie das Zeigerdiagramm für den Nennbetrieb!

===== nur Diplomstudiengang =====

- Welche Leistung kann die Maschine als Phasenschieber ($\vartheta = 0^\circ$) theoretisch maximal aufnehmen bzw. abgeben?

Aufgabe 3:**Asynchronmaschine**

Ein 6-poliger Drehstrom-Asynchronmotor mit Schleifring habe folgende Daten:

$$f_N = 50 \text{ Hz}$$

$$U_N = U_\Delta = 400 \text{ V}$$

$$P_N = 50 \text{ kW}$$

$$n_N = 980 \text{ min}^{-1}$$

- a) Wie groß ist die Drehfelddrehzahl?
- b) Wie groß ist das Nenndrehmoment?
- c) Wie groß ist der Läuferstrom im Nennbetrieb?
- d) Wie groß ist der auf den Ständer bezogene Läuferstrom im Nennbetrieb?
- e) Welche Leistung wird im Nennbetrieb im Läufer in Wärme umgesetzt?
- f) Wie groß ist die Drehfeldleistung im Nennbetrieb?

===== nur Diplomstudiengang =====

- g) Zur Drehzahlstellung wird an die Schleifringe ein Frequenzumrichter angeschlossen. Wie müssen f_2 und U_2 eingestellt werden, damit die Maschine eine Leerlaufdrehzahl von 800 min^{-1} annimmt?

Musterlösung Aufgabe 1:

a)

P	p / bar	ϑ / °C	T / K	h / (kJ/kg)	s / (kJ/kgK)	Erläuterung
1	0,05	32,9	306	<u>137,77</u>	<u>0,25</u>	Die Kondensation endet bei x=0 (Flüssigkeit) und verläuft entlang der Horizontalen im T-s-Diagramm und entlang der Isobaren im h-s-Diagramm; Temperatur wie unter Punkt 8, s. Tabelle bei p=0,05 bar => h' und s'
2	200	<u>32,9</u>	<u>306</u>	<u>137,77</u>	<u>0,25</u>	Fluid wird als inkompressibel angenommen: keine Enthalpieerhöhung mit dem Druck: Punkte 1 und 2 sind näherungsweise identisch
3.1	200	<u>365,7</u>	<u>639</u>	<u>1826,5</u>	<u>4,01</u>	T-s-Diagramm: Erwärmung bei x=0 bis zum Siedepunkt, T, h' und s' aus Tabelle bei p=200 bar; h-s-Diagramm: Erwärmung bis zum „Abzweig“ der Isothermen von der Siedelinie
3.2	200	365,7	639	<u>2418,4</u>	<u>4,94</u>	T-s-Diagramm: Verdampfung bis x=1; h-s-Diagramm: Verdampfung bis zum „Abzweig“ der 365,7-°C-Isothermen, h' und s' aus Tabelle bei p=200 bar
3.3	200	530	803	<u>3400</u>	<u>6,25</u>	h-s-Diagramm: Überhitzung bis 530 °C, Schnittpunkt der (geschätzten) 530°C-Isothermen mit der 200bar-Isobaren => h, s; T-s-Diagramm: Überhitzung entlang der 200bar-Isobaren, auch hier kann s abgelesen werden
4	50	<u>340</u>	<u>613</u>	<u>3000</u>	6,25	h-s-Diagramm: ideale Entspannung entlang der Isentropen bis p=50 bar => T, h
5	50	530	803	<u>3500</u>	<u>7,2</u>	h-s-Diagramm: erneute Überhitzung bis zum Schnittpunkt der 530°C-Isothermen mit der 50bar-Isobaren => h, s; T-s-Diagramm: Überhitzung entlang der 50bar-Isobaren, auch hier kann s abgelesen werden
6	0,05	<u>32,9</u>	<u>306</u>	2200	7,2	ideale Entspannung entlang der Isentropen, h-s-Diagramm: Schnittpunkt der Isentropen mit der 0,05bar-Isobaren => h, (x ca. 0,84); T-s-Diagramm: Schnittpunkt der Isentropen mit der Isothermen bei „Sättigungstemperatur“ für p=0,05 bar (aus Tabelle)

b) Die dem Kreisprozess zugeführte Wärme verteilt sich zunächst auf den Gesamtübergang von 2 nach 3.3 im Kessel und von 4 nach 5 im Zwischenüberhitzer:

$$q_{zu} = q_{zu1} + q_{zu2} = (h_{3,3} - h_2) + (h_5 - h_4)$$

$$q_{zu} = (3400 - 137,77) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + (3500 - 3000) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 3262,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 500 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \approx 3762 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Die Wärmezufuhr im Kessel kann aufgeteilt werden in:

$$q_{zu1} = q_{VW} + q_{Verd} + q_{\dot{U}H}$$

$$q_{VW} = q_{3,1} - q_2 = 1826,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 137,77 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \approx 1689 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$q_{Verd} = q_{3,2} - q_{3,1} = 2418,4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 1826,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \approx 592 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$q_{\dot{U}H} = q_{3,3} - q_{3,2} = 3400 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 2418,4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \approx 982 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

prozentual:

$$\frac{q_{VW}}{q_{zu}} = \frac{1689 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{3762 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = \underline{\underline{44,9\%}} \quad , \quad \frac{q_{Verd}}{q_{zu}} = \frac{592 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{3762 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = \underline{\underline{15,7\%}}$$

$$\frac{q_{\dot{U}H}}{q_{zu}} = \frac{982 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{3762 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = \underline{\underline{26,1\%}} \quad , \quad \frac{q_{Z\dot{U}H}}{q_{zu}} = \frac{q_{zu22}}{q_{zu}} \cdot \frac{500 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{3762 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = \underline{\underline{13,3\%}}$$

Hier kann unmittelbar und durchgehend mit den spezifischen Wärmemengen gerechnet werden, weil alle Komponenten vom selben Massenstrom durchsetzt werden.

Anmerkung: Die Anteile aus Vorwärmer, Verdampfer und Überhitzer können auch aus den Entropiedifferenzen berechnet werden.

$$c) \quad \eta_c = 1 - \frac{T_U}{T_O} = 1 - \frac{306 \text{ K}}{803 \text{ K}} = \underline{\underline{62\%}}$$

$$\eta_{th} = \frac{P_{Nutz}}{Q_{zu}} = \frac{w_t}{q_{zu}} = \frac{w_{HD} + w_{ND}}{q_{zu}} = \frac{(h_{3,3} - h_4) + (h_5 - h_6)}{q_{zu}} = \frac{400 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 1300 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{3762 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = \underline{\underline{45\%}}$$

$$d) \quad P_{mech} = P_{Nutz} = 800 \text{ MW} = \dot{m} \cdot w_t \Rightarrow \quad \dot{m} = \frac{800 \text{ MW}}{1700 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 470 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$e) \quad \dot{m}_{Kohle} = \frac{Q_{zu}}{P_{Kessel}} = \frac{q_{zu} \cdot \dot{m}}{\eta_{Kessel} \cdot 8,1 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}} = \frac{3762 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 470 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{0,9 \cdot 8,1 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}} = \underline{\underline{242 \frac{\text{t}}{\text{h}}}}$$

Hier ist mit P_{Kessel} die auf die Masse bezogene Gesamtheizleistung des Kessels gemeint.

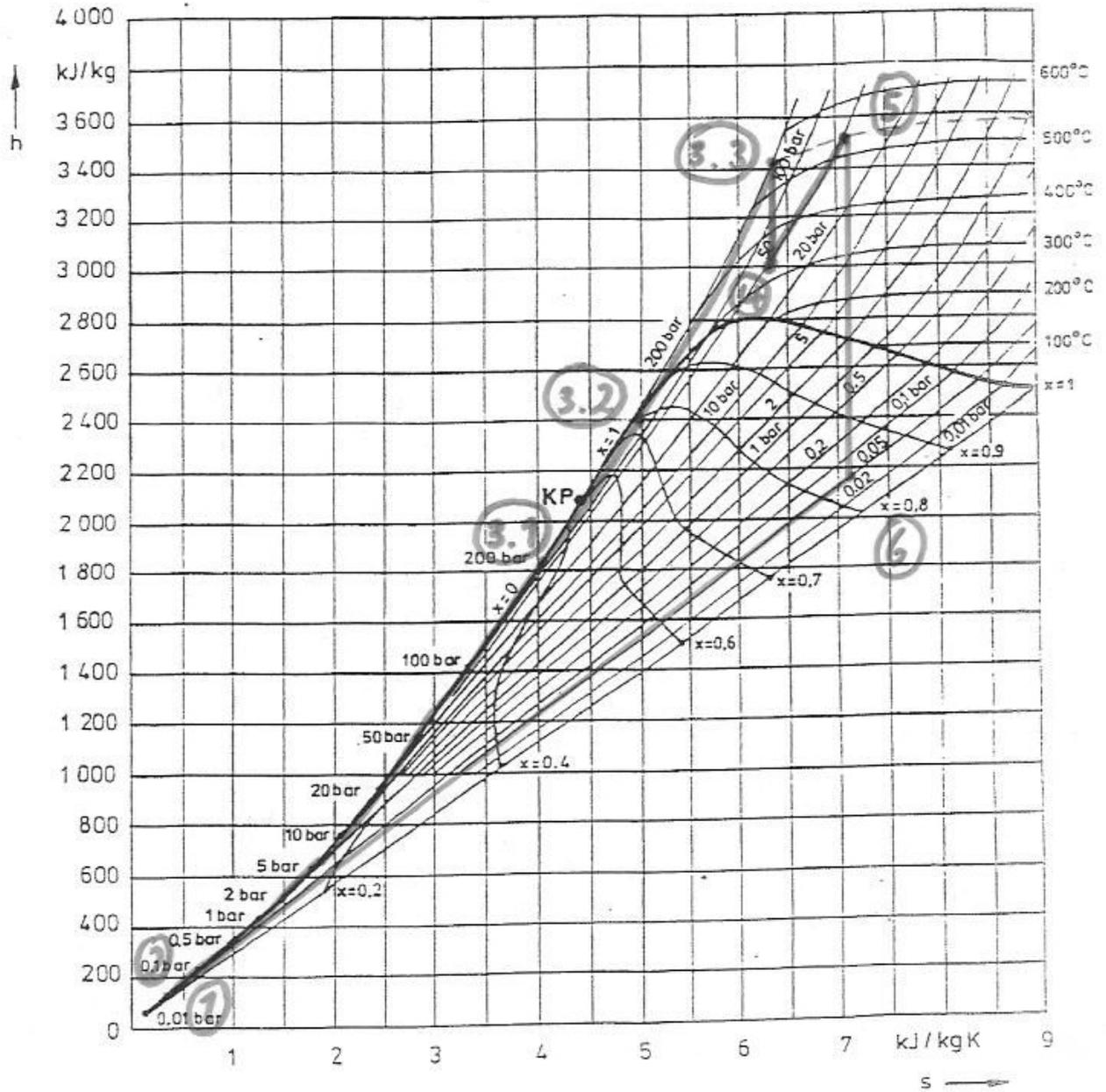


Bild 4.5
h-s-Diagramm für Wasser

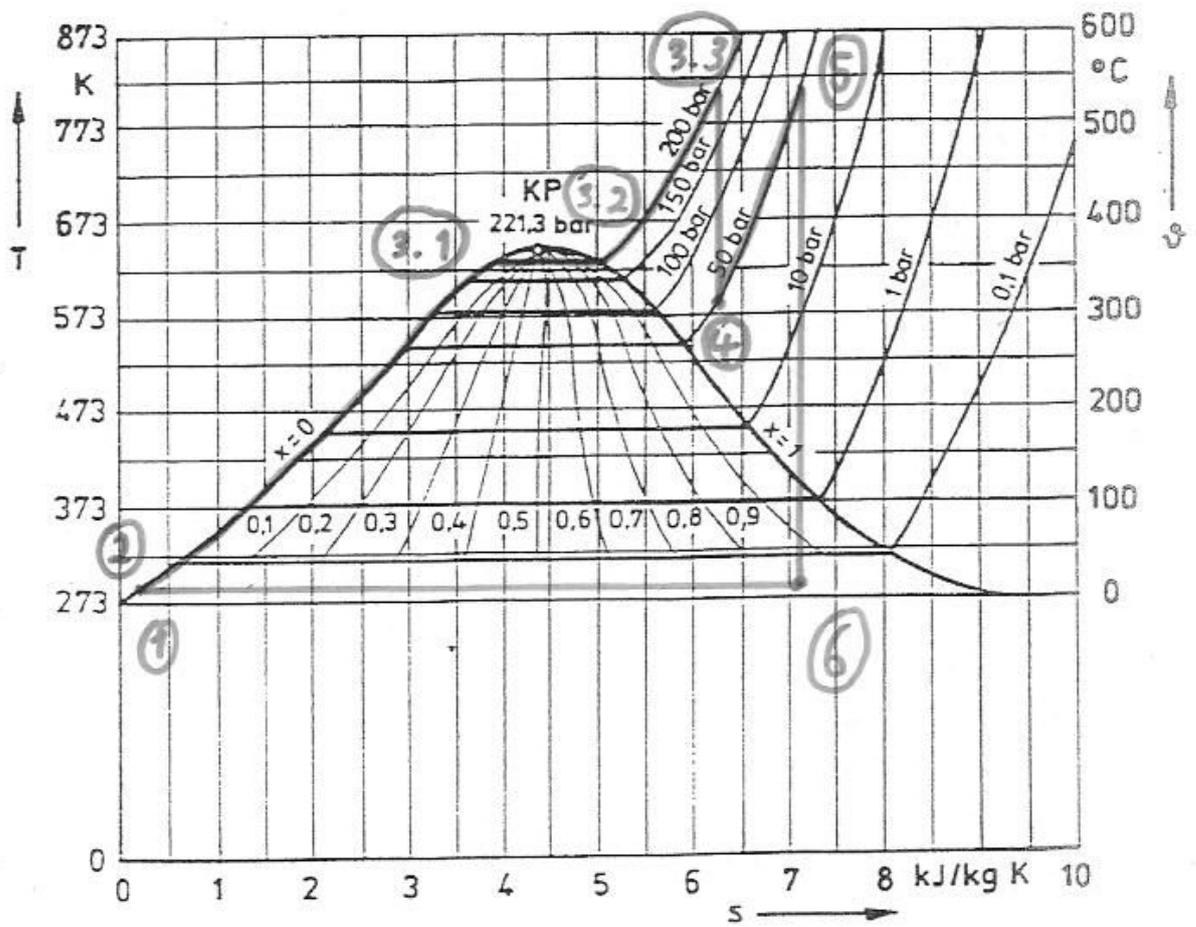


Bild 4.2
T-s-Diagramm für Wasser

Musterlösung Aufgabe 2:

- a) Synchronmaschine im Motorbetrieb \Rightarrow Verbraucherzählpeilsystem ist vorteilhaft
Polradwinkel im Zuschaltaugenblick: $\vartheta_0 = 0,75^\circ$

Die Spannungsdifferenz fällt über der synchronen Reaktanz ab:

$$\underline{I}_{S,0} = \frac{\underline{U}_S - \underline{U}_P}{jX_d} = \frac{400 \text{ V} \cdot (1 - \cos 0,75^\circ - j \sin 0,75^\circ)}{\sqrt{3} \cdot j0,95 \Omega}$$

$$\underline{I}_{S,0} = -243 \text{ A} \cdot \sin 0,75^\circ \approx \underline{\underline{-3,18 \text{ A}}}$$

Im Zuschaltaugenblick fließt ein negativer Strom: der synchronisierte Motor wirkt wegen des geringfügig voreilenden Polradwinkels kurzzeitig als Generator.

- b) $P_0 = M_0 \cdot \Omega_0 = m_s \cdot U_S \cdot I_{S,0} \cdot \cos \varphi_0$ vergl. mech. Leistung nach (19.9)

$$M_0 = \frac{m_s \cdot p}{\omega_s} \cdot \frac{U_S \cdot U_P}{X_d} \cdot \sin \vartheta_0 = \frac{3 \cdot 2}{2\pi \cdot 50 \text{ s}^{-1}} \cdot \frac{(400 \text{ V})^2}{3 \cdot 0,7 \Omega} \cdot \sin 0,75^\circ \approx \underline{\underline{19 \text{ Nm}}} \quad (19.12)$$

Dieses ist ein Bremsmoment, wegen des positiven Polradwinkels.

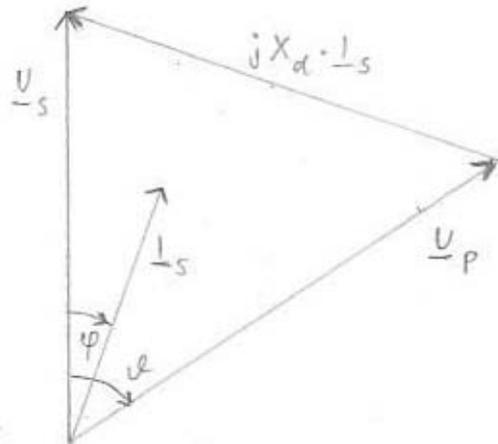
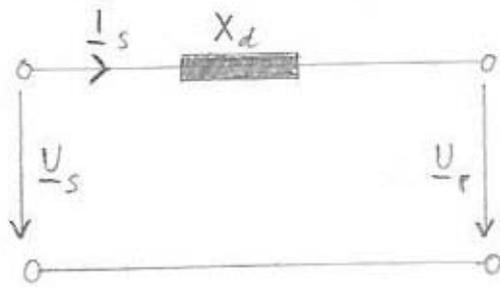
- c) $U_{p,N} = \underline{U}_S - jX_d \cdot \underline{I}_{S,N} = 231 \text{ V} - j0,7 \Omega \cdot 350 \text{ A} \cdot e^{-j20^\circ} = 273 \text{ V} \cdot e^{-j57,4^\circ}$

Der Polradwinkel im Nennbetrieb beträgt $\vartheta_N = -57,4^\circ$ – der Läufer bleibt im Motorbetrieb konstant um diesen Winkel hinter dem Ständerdrehfeld zurück.

$$\Rightarrow \frac{M_0}{M_N} = \frac{\sin \vartheta_0}{\sin \vartheta_N} = \frac{0,013}{-0,842} = \underline{\underline{-0,015}} \quad (19.15)$$

Das Nennmoment ist ca. 65 mal größer als das Zuschaltmoment und diesem entgegengesetzt gerichtet.

d) Mit dem Maßstab $40 \text{ V} \hat{=} 1 \text{ cm}$, $100 \text{ A} \hat{=} 1 \text{ cm}$:



e) Im Phasenschieberbetrieb kann die Polradspannung zwischen $U_{p,N}$ und 0 V eingestellt werden:

$$Q_{\min} = 3 \cdot \frac{U_s \cdot (U_s - U_{p,N})}{X_d} = \frac{231 \text{ V} \cdot (-42 \text{ V})}{0,7 \Omega} = \underline{\underline{-41,7 \text{ kvar}}}$$

Hier ist die von der Maschine „aufgenommene“ Blindleistung (VZS) minimal, d.h. negativ – kapazitives Verhalten.

$$Q_{\max} = 3 \cdot \frac{U_s \cdot (U_s - 0 \text{ V})}{X_d} = \frac{(231 \text{ V})^2}{0,7 \Omega} = \underline{\underline{228,6 \text{ kvar}}}$$

Wenn die Polradspannung auf 0 gesetzt wird, bezieht die Maschine ihre gesamte Blindleistung aus dem Netz – sie stellt eine große Induktive Last dar.

Wegen $\vartheta = 0$ kann hier rein betragsmäßig gerechnet werden: beide Spannungszeiger liegen auf der reellen Achse.

Musterlösung Aufgabe 3:

f) $n_d = \frac{f_n}{p} = \frac{50 \text{ Hz}}{3} = \frac{3000 \text{ min}^{-1}}{3} = \underline{\underline{1000 \text{ min}^{-1}}}$

g) P_N ist mechanische Leistung (Motorbetrieb):

$$P_N = M_N \cdot \Omega_N \quad \Rightarrow \quad M_N = \frac{P_N}{\Omega_N} = \frac{50 \text{ kW}}{2\pi \cdot n_N} = \frac{50 \text{ kW}}{2\pi \cdot \frac{980}{60} \text{ s}^{-1}} = \underline{\underline{487,2 \text{ Nm}}}$$

h) Da keine weitere Angabe gemacht ist, kann mit dem Übersetzungsverhältnis 1:1 gerechnet werden:

$$I_{r,N} = \frac{P_N}{\sqrt{3} \cdot U_N} = \frac{50 \text{ kW}}{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V}} = \underline{\underline{72,17 \text{ A}}}$$

i) Mit derselben Annahme wie oben vereinfacht sich

$$\eta = \frac{P_{\text{mech}}}{P_\delta} \quad \text{zu} \quad \eta_N = \frac{I'_{r,N}}{I_{s,N}} = 1 - s_N = 1 - \frac{n_0 - n_N}{n_0} = \frac{n_N}{n_0} = \frac{980 \text{ min}^{-1}}{1000 \text{ min}^{-1}} = \underline{\underline{98\%}}$$

j) $P_{vr,N} = \frac{P_{\text{mech},N}}{\eta_N} \cdot s_N = \frac{50 \text{ kW}}{0,98} \cdot 0,02 = \underline{\underline{1,02 \text{ kW}}}$

k) $P_{\delta,N} = \frac{P_{\text{mech},N}}{\eta_N} = \frac{50 \text{ kW}}{0,98} \cdot 0,02 = \underline{\underline{51,02 \text{ kW}}}$

l) Das durch den Läufer erzeugte „Gegenfeld“ muss mit der Differenzdrehzahl

$$\Delta n = n_d - n'_d = (1000 - 800) \text{ min}^{-1} = 200 \text{ min}^{-1}$$

$$\text{umlaufen: } f'_2 = \Delta n \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = \underline{\underline{3\frac{1}{3} \text{ Hz}}}$$

Wie bei der „Parallelverschiebung der Grundkennlinie (Typ 4)“ muss nach Gln. (17.30) und (17.31) für Spannung und Frequenz gelten:

$$\frac{U_2}{f_2} = \text{const} \quad \Rightarrow \quad U'_2 = \frac{U_2}{f_2} \cdot f'_2 = 400 \text{ V} \cdot \frac{3\frac{1}{3} \text{ Hz}}{16\frac{2}{3} \text{ Hz}} = 400 \text{ V} \cdot \frac{200}{1000} = \underline{\underline{80 \text{ V}}}$$