



Energie – Praxiswissen
Panos Konstantin

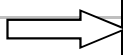
Kapitel 5 Gekoppelte Energieerzeugung & Kostenaufteilung

Anwendungsbeispiele

Disclaimer: Die Rechenbeispiele sind als Unterstützung für das Buch gedacht und haben ausschließlich den Zweck, dem Leser Hilfestellung zu bieten, um die Inhalte besser zu verstehen und den Rechengang nachzuvollziehen. Eine Gewähr für die Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität kann nicht übernommen werden. Die Inhalte sind urheberrechtlich geschützt, eine Vervielfältigung ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des gültigen Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland zulässig.

Hinweise, Anregungen und Verbesserungsvorschläge sind erwünscht und willkommen!

Letzte Aktualisierung
Mai 2017

Position		Einheit	Wert
Technische Parameter			
Elektr. Leistung, Entnahme-Kond., brutto		MW	20.0
Stromeigenbedarf		%	8.0%
Betriebsdampf		MW	46.0
Brennstoffwärmeleistung		MW	95.9
Gesamtwirkungsgrad		%	69%
Benutzungsdauer		h / a	7,500
Energiebilanz			
Stromerzeugung, netto		MWh / a	138,000
Dampferzeugung		MWh / a	345,000
Brennstoffverbrauch		MWh / a	701,975
davon Fremdholz		%	85%
Reststoffmenge		t / a	12,000
Investition		Mio. €	55.0
Jahresbetriebskosten			
Kapitaldienst	7.5% 20 Jahre	T€/a	5,395
Personal	20 Personen 70 T€ / a	T€/a	1,400
Wartung & Instandhaltung	2.0% / a	T€/a	1,100
Versicherung, Verwaltung, Pacht	1.2% / a	T€/a	660
Biomassekosten	3.8 € / MWh 30 € / t	T€/a	4,711
Kosten für Reststoffentsorgung	150 € / t	T€/a	1,800
Summe		T€/a	15,066
. / . Stromvergütung	#####	T€/a	11,592
Restkosten, Dampf		T€/a	3,474
spezifische Kosten von Dampf		€ / MWh	10.07

Wärmeauskopplung aus Steinkohle-Großkraftwerk						
		Strom-Leistungskosten $c_{L,el}$	€/ (kW a)	113.00		
		Strom-Arbeitskosten $c_{A,el}$	€/ MWh	21.00		
Dampfauskopplung			Spezifische Wärmegestehungskosten			
Dampfdruck p bar	Sättigungstemperatur *) t_s °C	Stromverlustkennziffer **) β kW _{el} /kW _{th}	Leistungskosten $\beta \times c_{L,el}$ €/ (kW a)	Arbeitskosten $\beta \times c_{A,el}$ €/ MWh	Mischkosten 6000 h / a €/ MWh	Mischkosten 3500 h / a €/ MWh
16.0	201	0.376	42.50	7.90	14.98	20.04
3.0	134	0.218	24.63	4.58	8.68	11.62
2.0	120	0.195	22.04	4.10	7.77	10.39
1.4	109	0.176	19.89	3.70	7.01	9.38
0.5	81	0.123	13.93	2.59	4.91	6.57

*) Daten wurden mit der Software FluidExcel berechnet und als Wert kopiert

**) Siehe auch typische Werte in Abb. 5.15 im Textteil

Position	Einheit	Wert
Leistungsdaten		
Elektrische Leistung GT	MW	9.0
Brennstoff-Wärmeleistung (in Hu)	MW	15.0
Kennzahlen		
Energienutzungsgrad	-	80%
Stromkennzahl	MWh _{el} / MWh _{th}	0.60
Energiebilanz (gegeben)		
Stromerzeugung	MWh /a	65,700
Wärmeerzeugung	MWh /a	90,000
Brennstoffverbrauch (in Hu)	MWh /a	219,000
Strom- und Brennstoffaufteilung		
KWK-Strom	MWh /a	54,000
Ungekoppelter Strom	MWh /a	11,700
Brennstoffverbrauch:		
für gekoppelter Strom- und Wärme	MWh /a	180,000
für ungekoppelten Strom	MWh /a	39,000

Position		Einheit	Wert
Gegeben			
Elektrischer Kond.-Wirkungsgrad		-	30%
Dampfskopplung:			
Druck		bar	18.0
Stromverlust-Kennziffer		$\text{kWh}_{\text{el}} / \text{kWh}_{\text{th}}$	0.237
Dampfskopplung:			
Druck		bar	6.0
Stromverlust-Kennziffer		$\text{kWh}_{\text{el}} / \text{kWh}_{\text{th}}$	0.205
Spezifischer Brennstoffverbrauch			
Kondensationsstrom	30%	$\text{kWh}_{\text{th}} / \text{kWh}_{\text{el}}$	3.333
18-bar Dampf *)	0.237	$\text{kWh}_{\text{th}} / \text{kWh}_{\text{el}}$	0.790
6-bar Dampf *)	0.205	$\text{kWh}_{\text{th}} / \text{kWh}_{\text{el}}$	0.683

*) siehe typische Werte in Abb. 5.15 im Textteil

Position	Einheit	Wert
Gegeben		
Elektrische Leistung in KWK	MW	35.1
Brennstoffverbrauch	MW _{th}	172.7
Dampfauskopplung:	MW _{th}	19.8
Druck	bar	18.0
Stromverlust-Kennziffer	MWh _{el} / MWh _{th}	0.237
Dampfauskopplung:	MW _{th}	61.7
Druck	bar	6.0
Stromverlust-Kennziffer	MWh _{el} / MWh _{th}	0.205
Äquivalente elektrische Kond. Leistung	MW	52.4
Elektrische Leistung in KWK	MW	35.1
Verlustleistung durch 18 bar Dampf 0.237	MW	4.69
Verlustleistung durch 6 bar Dampf 0.205	MW	12.65
Elektrischer Wirkungsgrad, Mischbetrieb	-	20.3%
Äquivalente elektrische Kond. Wirkungsgrad	-	30.4%

Position	Einheit	Wert
Entnahme-Kond.-Mischbetrieb		
el. Leistung, Mischbetrieb, brutto	MW _{el}	100.0
el. Leistung, netto	MW _{el}	92.0
Auskopplung 12 bar, Höchstlast	MW _{th}	104.2
Auskopplung 6 bar, Höchstlast	MW _{th}	103.1
Brennstoffwärmeleistung	MW _{th}	430.1
Kennzahlen		
Stromverlustkennziffer, 12 bar	kWh _{el} / kWh _{th}	0.274
Stromverlustkennziffer, 6 bar	kWh _{el} / kWh _{th}	0.239
KWK-Gesamtwirkungsgrad	%	89.7%
Äquivalenter Kondensationsbetrieb		
el. Verlustleistung durch Auskopplung	MW _{el}	53.2
äqu.- el.-Kondensationsleistung, netto	MW _{el}	145.2
äqu.- el.- Kond.-Wirkungsgrad	%	33.8%
Stromkennzahl, 12 bar	kWh _{el} / kWh _{th}	0.164
Stromkennzahl, 6 bar	kWh _{el} / kWh _{th}	0.220
Energiebilanz		
Wärmeerzeugung 12 bar Dampf	MWh _{th} / a	625,467
Wärmeerzeugung 6 bar Dampf	MWh _{th} / a	360,680
Stromerzeugung Mischbetrieb, brutto	MWh _{el} / a	700,000
Stromerzeugung Mischbetrieb, netto	MWh _{el} / a	644,000
<i>davon KWK-Strom</i>	MWh _{el} / a	<i>182,104</i>
<i>davon ungekoppelter Strom</i>	MWh _{el} / a	<i>461,896</i>
el. Verlustarbeit der Auskopplung	MWh _{el} / a	257,580
äqu.-el. Kond.-Arbeit, netto	MWh_{el} / a	901,580
Brennstoffverbrauch, gesamt	MWh_{th} / a	2,670,587
<i>davon für ungekoppelten Strom</i>	MWh _{th} / a	<i>1,368,189</i>
<i>davon für gekoppelte Erzeugung</i>	MWh _{th} / a	<i>1,302,398</i>
Energienutzungsgrad im Mischbetrieb	%	61.0%

Position	Formel	Einheit	Zahlenwert
Steinkohle Dampfkraftwerk	-	MW	600
Leistungskosten, Kond.-Strom	$c_{L,el}$	€ / (kW*a)	202.00
Arbeitskosten, Kond.-Strom	$c_{A,el}$	€ / MWh	40.00
Dampfauskopplung	-	bar/°C	6 / 250°C
Dampflieferung, Höchstlast	Q_{max}	MW	50
Dampflieferung, Jahresarbeit	W_{th}	MWh / a	350,000
Stromverlustkennziffer, Dampf	β	kWh _{el} / kWh _{th}	0.250
Dampfkosten *)			
Spez. Leistungskosten, Dampf	$c_{L,D} = \beta \times c_{L,el}$	€ / (kW*a)	50.50
Spez. Arbeitskosten, Dampf	$c_{A,D} = \beta \times c_{A,el}$	€ / MWh	10.00
Jahreskosten, Dampf		T€ / a	6,025.0
davon Leistungskosten	$C_{L,D} = c_{L,D} \times Q_{max}$	T€ / a	2,525.0
davon Arbeitskosten	$C_{A,D} = c_{A,D} \times W_{th}$	T€ / a	3,500.0
Durchschnittskosten, Dampf	c_D	€ / MWh	17.21

*) ohne Kosten für Auskopplungseinrichtungen und Antransportleitung zum Fernwärmenetz

Position	Formel	Einheit	Zahlenwert
Angaben			
Leistungskosten, Strom	$C_{L,el}$	€ / (kW*a)	202.00
Arbeitskosten, Strom	$C_{A,el}$	€ / MWh	40.00
Wärmelieferung, Höchstlast	Q_{max}	MW	75
davon aus unterem 1 bar- Heizkondensator		%	50%
Wärmelieferung, Jahresarbeit	W_{FW}	MWh / a	525,000
davon aus unterem 1bar- Heizkondensator		%	70%
Stromverlustkennziffer, 3 bar- Dampf	β_{3bar}	kWh _{el} / kWh _{th}	0.235
Stromverlustkennziffer, 1 bar-Dampf	β_{1bar}	kWh _{el} / kWh _{th}	0.125
Fernwärmekosten *)			
Stromverlustkennziffer, gemittelt:			
Leistung 50% 1 bar / 50% 3 bar	$\beta_L = 0,5 \times \beta_{1bar} + 0,5 \times \beta_{3bar}$	kWh _{el} / kWh _{th}	0.180
Arbeit 70% 1 bar / 30% 3 bar	$\beta_A = 0,7 \times \beta_{1bar} + 0,3 \times \beta_{3bar}$	kWh _{el} / kWh _{th}	0.158
Spez. Leistungskosten Fernwärme	$C_{L,FW} = \beta_L \times C_{L,el}$	€ / (kW*a)	36.36
Spez. Arbeitskosten Fernwärme	$C_{A,FW} = \beta_A \times C_{A,el}$	€ / MWh	6.32
Jahreskosten, Fernwärme frei Kraftwerk	$C_{FW} = C_{L,FW} + C_{A,FW}$	T€ / a	6,045
davon Leistungskosten	$C_{L,FW} = C_{L,FW} \times Q_{max}$	T€ / a	2,727
davon Arbeitskosten	$C_{A,FW} = C_{A,FW} \times W_{FW}$	T€ / a	3,318
Durchschnittskosten, Fernwärme	C_{FW}	€ / MWh	11.51

*) ohne Kosten für Auskopplungseinrichtungen und Antransportleitung zum Fernwärmenetz

Energieträger	bar	°C	Energie- gehalt*)	Exergie *)	
			kJ / kg	kJ / kg	%
Elektrizität	n.a.	n.a.	100%	n.a.	100%
Dampf	245	620	3,557	1,702	48%
	180	540	3,390	1,555	46%
	20	250	2,903	1,018	35%
	6	159	2,756	810	29%
	0.045	31	2,557	2	0.1%
Kühlwasser	3.5	15	63	0	0%

Anmerkung: Exergie ist der Teil der Energie eines Energieträgers, der maximal in mechanische Energie umgewandelt werden kann.

*) berechnet mit FluidEXL, Null Exergie Niveau Kühlwassre Tu=

15 °C

Energieträger	Druck bar	Temperatur °C	Enthalpie *) kJ/kg	Exergie *) kJ/kg	Nutzbarer Exergie Anteil kJ/kg	Exergie nach Verlust MWh/t	Spezifische kosten -
Elektrizität	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	69.33 €/MWh
Dampf 12 bar	12.0	284	3,011	755	566	0.157	10.90 €/t
Dampf 6 bar	6.0	216	2,885	606	455	0.126	8.76 €/t
Dampf 3 bar	3.0	164	2,790	476	357	0.099	6.88 €/t
Null Exergie Niveau	1.0	54	224	(0.00)	(0.00)	- 0.000	n.a.
Vollbenutzungsstunden für alle 7,500 h/a				Exergieverlust	25%	kWh/kg=MWh/t	Tu=54

*) Daten wurden mit der Software FluidEXL berechnet

Technische Parameter		
Merkmal	Einheit	Wert
Strom		
Exergieanteil	-	100.0%
Leistung	MW	600
Vollbenutzungsstunden	h /a	7,500
Dampf 6 bar		
Nutzbarer Exergieanteil	MWh/t	0.126
Leistung	MW	50
Vollbenutzungsstunden	h /a	5,000

Kosten		
Merkmal	Einheit	Wert
Strom		
Leistung	€ / (kW a)	220
Arbeit	€ / MWh	40.00
Durchschnitt	€ / MWh	69.33
Dampf 6 bar		
Leistung	€ / (t a)	27.8
Arbeit	€ / t	5.05
Durchschnitt	€ / t	10.61

Anmerkung: Es wird angenommen, dass das HKW 2500 h/a Strom anstatt Wärme erzeugen kann

Leistungs- und Energiebilanz					
Position	Höchstlast MW	Leistungsanteil %	Volllaststunden h/a	Energieerzeugung MWh/a	Arbeitsanteil %
Strom,brutto	86.2		8,000	689,907	
Strom, netto *)	83.7	42.4%	8,000	669,209	46.5%
23bar Dampf	20.4	10.4%	7,500	153,370	10.6%
12bar Dampf	79.0	40.0%	7,000	553,043	38.4%
4,5bar Dampf	14.4	7.3%	4,500	64,657	4.5%
Summe	197.5	100.0%	-	1,440,279	100.0%

*) Stromeigenverbrauch 3.0%

Aufteilung der Energiegestehungskosten					
Position	Leistungskosten *)		Arbeitskosten **)		Mischkosten ***)
	Gesamt T€ / a	spezifisch € / (kW*a)	Gesamt T€ / a	spezifisch € / MWh	
Strom	4,130	49.37	13,537	20.23	26.40
23bar Dampf	1,010	49.37	3,102	20.23	26.81
12bar Dampf	3,901	49.37	11,187	20.23	27.28
4,5bar Dampf	709	49.37	1,308	20.23	31.20
Summe ****)	9,750	-	29,135		-

*) Verteilt auf Basis der Leistungsanteile aus der Leistungsbilanz

***) Verteilt auf der Basis der Energieanteile aus der Energiebilanz

****) bezogen auf die Energieerzeugung aus Leistungs- und Energiebilanz

*****) Jahreskosten in separater Rechnung ermittelt

Position		Einheit	Wert
Leistungsdaten			
Elektrische Leistung, netto (2 Module)		kW	997
Thermische Leistung		kW	1,502
Brennstoffwärmeleistung		kW	2,836
Energiebilanz			
Stromerzeugung *)	6,000 h/a	MWh / a	5,982
Wärmeerzeugung	5,500 h/a	MWh / a	8,261
Brennstoffverbrauch, in Hu	6,000 h/a	MWh / a	17,016
Wirtschaftliche Eckdaten			
Erdgaspreis in Hu		€ / MWh	25.00
Strombezugspreis **)		€ / MWh	50.00
Netznutzungsentgelte (NNE):			
Leistung		€ / (kW*a)	63.00
Arbeit		€ / MWh	4.00
Jahreskosten			
Fixe Kosten (in separater Rechnung ermittelt)		T€ / a	176.0
Brennstoffkosten		T€ / a	425.4
Zwischensumme		T€ / a	601.4
Stromgutschrift			
Vermiedener Strombezug		T€ / a	299.1
Vermiedene NNE, Leistung		T€ / a	62.8
Vermiedene NNE, Arbeit		T€ / a	23.9
Zwischensumme		T€ / a	385.8
Spezifische Stromgutschrift		€ / MWh	64.50
Restkosten, Wärme			
Leistungskosten ***)		€ / (kW*a)	42.00
Arbeitskosten ***)		€ / MWh	18.46
spezifische Wärmekosten		€ / MWh	26.09

*) 500 h/a in Bypass Betrieb

**) Beschaffung aufgrund von Fahrplänen, ohne Leistungspreis

***) Zuordnung nach dem Verhältnis fixe Kosten bzw. Brennstoffkosten zu Gesamtkosten