

Varianten der Wärme- und Stromproduktion aus Brennstoffen V.020416

Berechnungsannahmen

zu produzierende elektrische Leistung	$P_{el} := 25 \cdot \text{kW}$
zu produzierende Wärmeleistung	$Q_{st} := 100 \cdot \text{kW}$
mittlere Leistungszahl Wärmepumpe	$\varepsilon_m := 3.5$
Gesamtwirkungsgrad WKK	$\eta_{totWKK} := 0.90$
elektrischer Wirkungsgrad WKK	$\eta_{elWKK} := 0.35$
Übertragungswirkungsgrad Ortsnetz	$\eta_{\ddot{u}WKK} := 0.975$
elektrischer Wirkungsgrad des Kombikraftwerks	$\eta_{elKK} := 0.58$
Übertragungswirkungsgrad Fernleitungen	$\eta_{\ddot{u}KK} := 0.925$
Kesselnutzungsgrad	$\eta_K := 0.95$

Maximale Stickoxidemissionen nach der Luftreinhalteverordnung

auf die Feuerungswärme bezogene maximale Stickoxidemissionen aus Verbrennung.mcd (Näherung für reines Methan als Brennstoff)

WKK mit Verbrennungsmotor	$m_{NO_xWKK} := 282 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{kWh}}$
Kombikraftwerk mit Gasturbine	$m_{NO_xKK} := 151 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{kWh}}$
Heizkessel	$m_{NO_xK} := 80.3 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{kWh}}$

Maximale Kohlenmonoxidemissionen nach der Luftreinhalteverordnung

auf die Feuerungswärme bezogene maximale Stickoxidemissionen aus Verbrennung.mcd (Näherung für reines Methan als Brennstoff)

WKK mit Verbrennungsmotor	$m_{COWKK} := 734 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{kWh}}$
Kombikraftwerk mit Gasturbine	$m_{COKK} := 363 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{kWh}}$
Heizkessel	$m_{COK} := 100.4 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{kWh}}$

1. Kombikraftwerk und Kessel

Wärmeproduktion mit Heizkessel

zur Produktion der geforderten Wärmeleistung benötigte Brennstoffleistung

$$P_{BK} := \frac{Q_{st}}{\eta_K} \quad P_{BK} = 105.3 \text{ kW}$$

erzeugter Stickoxidmassenstrom

$$M_{stNO_xK} := P_{BK} \cdot m_{NO_xK} \quad M_{stNO_xK} = 2.348 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

erzeugter Kohlenmonoxidmassenstrom

$$M_{stCOK} := P_{BK} \cdot m_{COK} \quad M_{stCOK} = 2.936 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Stromproduktion mit Kombikraftwerk

zur Produktion der geforderten elektrischen Leistung benötigte Brennstoffleistung

$$P_{BKK} := \frac{P_{el}}{\eta_{elKK}} \quad P_{BKK} = 43.1 \text{ kW}$$

erzeugter Stickoxidmassenstrom

$$M_{stNO_xKK} := P_{BKK} \cdot m_{NO_xKK} \quad M_{stNO_xKK} = 1.808 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

erzeugter Kohlenmonoxidmassenstrom

$$M_{stCOKK} := P_{BKK} \cdot m_{COKK} \quad M_{stCOKK} = 4.346 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Gesamtbrennstoffleistung

$$P_{B1} := P_{BK} + P_{BKK} \quad P_{B1} = 148.4 \text{ kW}$$

oder direkt

$$P_{B1} := \frac{Q_{st}}{\eta_K} + \frac{P_{el}}{\eta_{elKK}} \quad (1)$$

Gesamtstickoxidemission

$$M_{stNO_{x1}} := M_{stNO_xK} + M_{stNO_xKK} \quad M_{stNO_{x1}} = 4.156 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Gesamtkohlenmonoxidemission

$$M_{stCO1} := M_{stCOK} + M_{stCOKK} \quad M_{stCO1} = 7.282 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

2. WKK für ganze Stromproduktion, Kessel für Restwärme

WKK-Anlage

benötigte Brennstoffleistung $P_{BWKK} := \frac{P_{el}}{\eta_{elWKK}} \quad P_{BWKK} = 71.4 \text{ kW}$

Stickoxidemission

$$M_{stNO_xWKK} := P_{BWKK} \cdot m_{NO_xWKK} \quad M_{stNO_xWKK} = 5.595 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Kohlenmonoxidemission

$$M_{stCOWKK} := P_{BWKK} \cdot m_{COWKK} \quad M_{stCOWKK} = 1.456 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

produzierte Wärmeleistung

$$\eta_{totWKK} = \frac{Q_{stWKK} + P_{el}}{P_{BWKK}}$$

$$Q_{stWKK} := \eta_{totWKK} \cdot P_{BWKK} - P_{el} \quad Q_{stWKK} = 39.3 \text{ kW}$$

Kessel

durch Kessel noch zu deckende Restwärmeleistung

$$Q_{stK} := Q_{st} - Q_{stWKK} \quad Q_{stK} = 60.7 \text{ kW}$$

zur Produktion dieser Restwärmeleistung benötigte Brennstoffleistung

$$P_{BK} := \frac{Q_{stK}}{\eta_K} \quad P_{BK} = 63.9 \text{ kW}$$

Stickoxidemission

$$M_{stNO_xK} := P_{BK} \cdot m_{NO_xK} \quad M_{stNO_xK} = 1.426 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Kohlenmonoxidemission

$$M_{stCOK} := P_{BK} \cdot m_{COK} \quad M_{stCOK} = 1.782 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Gesamtbrennstoffleistung

$$P_{B2} := P_{BWKK} + P_{BK} \quad P_{B2} = 135.3 \text{ kW}$$

oder direkt

$$P_{B2} := \frac{P_{el}}{\eta_{elWKK}} + \frac{Q_{st} - \left(\eta_{totWKK} \cdot \frac{P_{el}}{\eta_{elWKK}} - P_{el} \right)}{\eta_K} \quad (2)$$

Gesamtstickoxidemission

$$M_{stNOx2} := M_{stNOxK} + M_{stNOxWKK} \quad M_{stNOx2} = 7.021 \times 10^{-6} \frac{kg}{s}$$

Gesamtkohlenmonoxidemission

$$M_{stCO2} := M_{stCOK} + M_{stCOWKK} \quad M_{stCO2} = 1.635 \times 10^{-5} \frac{kg}{s}$$

3. WKK-WP im Stromgleichgewicht und WKK für zusätzliche Stromproduktion

Stromproduktion WKK

benötigte Brennstoffleistung $P_{BWKK} := \frac{P_{el}}{\eta_{elWKK}} \quad P_{BWKK} = 71.4 \text{ kW}$

Stickoxidemission

$$M_{stNOxWKK} := P_{BWKK} \cdot m_{NOxWKK} \quad M_{stNOxWKK} = 5.595 \times 10^{-6} \frac{kg}{s}$$

Kohlenmonoxidemission

$$M_{stCOWKK} := P_{BWKK} \cdot m_{COWKK} \quad M_{stCOWKK} = 1.456 \times 10^{-5} \frac{kg}{s}$$

produzierte Wärmeleistung

$$Q_{stWKK} := \eta_{totWKK} \cdot P_{BWKK} - P_{el} \quad Q_{stWKK} = 39.3 \text{ kW}$$

Wärmeproduktion mit WKK-WP-System im Stromgleichgewicht

mit WKK-WP zu deckende Restwärme $Q_{stR} := Q_{st} - Q_{stWKK} \quad Q_{stR} = 60.7 \text{ kW}$

Aus WKK_WP1.mcd, Gl.(5) mit vernachlässigbarem
Wärmeverteilungsverlust ($\eta_{WV} = 1$)

$$Q_{stR} = [(\eta_{\ddot{u}WKK} \cdot \varepsilon_m - 1) \cdot \eta_{elWKK} + \eta_{totWKK}] \cdot P_{BWKKWP}$$

nach der Brennstoffleistung aufgelöst

$$P_{BWKKWP} := \frac{Q_{stR}}{(\eta_{\ddot{u}WKK} \cdot \varepsilon_m \cdot \eta_{elWKK} - \eta_{elWKK} + \eta_{totWKK})} \quad P_{BWKKWP} = 34.8 \text{ kW}$$

Stickoxidemission

$$M_{stNOxWKKWP} := P_{BWKKWP} \cdot m_{NOxWKK} \quad M_{stNOxWKKWP} = 2.726 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Kohlenmonoxidemission

$$M_{stCOWKKWP} := P_{BWKKWP} \cdot m_{COWKK} \quad M_{stCOWKKWP} = 7.097 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Gesamtbrennstoffleistung

$$P_{B3} := P_{BWKK} + P_{BWKKWP} \quad P_{B3} = 106.2 \text{ kW}$$

oder direkt

$$P_{B3} := \frac{P_{el}}{\eta_{elWKK}} + \frac{Q_{st} - \left(\eta_{totWKK} \cdot \frac{P_{el}}{\eta_{elWKK}} - P_{el} \right)}{(\eta_{\ddot{u}WKK} \cdot \varepsilon_m \cdot \eta_{elWKK} - \eta_{elWKK} + \eta_{totWKK})} \quad (3)$$

Gesamtstickoxidemission

$$M_{stNOx3} := M_{stNOxWKK} + M_{stNOxWKKWP} \quad M_{stNOx3} = 8.322 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Gesamtkohlenmonoxidemission

$$M_{stCO3} := M_{stCOWKK} + M_{stCOWKKWP} \quad M_{stCO3} = 2.166 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

4. Kombikraftwerk-WP für ganze Wärmeproduktion

Stromproduktion mit Kombikraftwerk

zur Produktion der geforderten elektrischen Leistung benötigte Brennstoffleistung

$$P_{BKK} := \frac{P_{el}}{\eta_{elKK}} \quad P_{BKK} = 43.1 \text{ kW}$$

Stickoxidemission

$$M_{stNO_xKK} := P_{BKK} \cdot m_{NO_xKK} \quad M_{stNO_xKK} = 1.808 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Kohlenmonoxidemission

$$M_{stCO_{KK}} := P_{BKK} \cdot m_{CO_{KK}} \quad M_{stCO_{KK}} = 4.346 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Wärmeproduktion nur mit Wärmepumpen und Strom aus Kombikraftwerk

Aus WKK_WP1.mcd, Gl.(5) mit vernachlässigbarem
Wärmeverteilungsverlust ($\eta_{WV} = 1$)

$$P_{BKKWP} := \frac{Q_{st}}{(\eta_{üKK} \cdot \varepsilon_m \cdot \eta_{elKK} - \eta_{elKK} + \eta_{elKK})}$$

$$P_{BKKWP} := \frac{Q_{st}}{(\eta_{üKK} \cdot \varepsilon_m \cdot \eta_{elKK})} \quad P_{BKKWP} = 53.3 \text{ kW}$$

Stickoxidemission

$$M_{stNO_xKKWP} := P_{BKKWP} \cdot m_{NO_xKK} \quad M_{stNO_xKKWP} = 2.234 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Kohlenmonoxidemission

$$M_{stCO_{KKWP}} := P_{BKKWP} \cdot m_{CO_{KK}} \quad M_{stCO_{KKWP}} = 5.370 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Gesamtbrennstoffleistung

$$P_{B4} := P_{BKK} + P_{BKKWP} \quad P_{B4} = 96.4 \text{ kW}$$

oder direkt

$$P_{B4} := \frac{P_{el}}{\eta_{elKK}} + \frac{Q_{st}}{(\eta_{üKK} \cdot \varepsilon_m \cdot \eta_{elKK})} \quad P_{B4} = 96.4 \text{ kW}$$

Gesamtstickoxidemission

$$M_{stNO_x4} := M_{stNO_xKK} + M_{stNO_xKKWP} \quad M_{stNO_x4} = 4.042 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Gesamtkohlenmonoxidemission

$$M_{stCO_4} := M_{stCO_{KK}} + M_{stCO_{KKWP}} \quad M_{stCO_4} = 9.716 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Relativer Brennstoffbedarf für die 4 Fälle der Wärme- und Stromproduktion (Bezug auf den schlechtesten Fall 1)

		Ersparnis
$\phi_2 := \frac{P_{B2}}{P_{B1}}$	$\phi_2 = 0.912$	$1 - \phi_2 = 8.78 \%$
$\phi_3 := \frac{P_{B3}}{P_{B1}}$	$\phi_3 = 0.716$	$1 - \phi_3 = 28.4 \%$
$\phi_4 := \frac{P_{B4}}{P_{B1}}$	$\phi_4 = 0.649$	$1 - \phi_4 = 35.1 \%$

Relative NOx-Emissionen für die 4 Fälle der Wärme- und Stromproduktion (Bezug auf den Fall 1)

		Ersparnis (+) / Mehrproduktion (-)
$\psi_2 := \frac{M_{stNOx2}}{M_{stNOx1}}$	$\psi_2 = 1.689$	$1 - \psi_2 = -68.94 \%$
$\psi_3 := \frac{M_{stNOx3}}{M_{stNOx1}}$	$\psi_3 = 2.002$	$1 - \psi_3 = -100.24 \%$
$\psi_4 := \frac{M_{stNOx4}}{M_{stNOx1}}$	$\psi_4 = 0.973$	$1 - \psi_4 = 2.75 \%$

Relative CO-Emissionen für die 4 Fälle der Wärme- und Stromproduktion (Bezug auf den Fall 1)

		Ersparnis (+) / Mehrproduktion (-)
$\chi_2 := \frac{M_{stCO2}}{M_{stCO1}}$	$\chi_2 = 2.245$	$1 - \chi_2 = -124.47 \%$
$\chi_3 := \frac{M_{stCO3}}{M_{stCO1}}$	$\chi_3 = 2.974$	$1 - \chi_3 = -197.45 \%$
$\chi_4 := \frac{M_{stCO4}}{M_{stCO1}}$	$\chi_4 = 1.334$	$1 - \chi_4 = -33.43 \%$