

RoadMap

M.Zogg/V.070304

Zahlreiche **Hintergrundinformationen** findet man in den **Kommentaren** zu den entsprechenden Zellen der Excel-Arbeitsblätter.

Einfache Berechnungszusammenhänge können den Berechnungsanweisungen der entsprechenden Zellen der Excel-Arbeitsblätter entnommen werden.

Nachfolgend sind zusätzliche **Berechnungsinformationen** und **Berechnungshintergründe** mit Zahlenbeispielen zum besseren Verständnis aufgeführt.

Stoffwerte

CO₂-Produktion bei vollständiger Verbrennung (bezogen auf den unteren Heizwert)

$$\text{Erdgas} \quad \text{CO}_{2\text{EG}} := 0.20 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{kWh}} \quad \text{CO}_{2\text{EG}} = 5.556 \times 10^4 \frac{\text{to}}{\text{PJ}}$$

$$\text{Heizöl-EL} \quad \text{CO}_{2\text{Oel}} := 0.27 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{kWh}} \quad \text{CO}_{2\text{Oel}} = 7.5 \times 10^4 \frac{\text{to}}{\text{PJ}}$$

Werte aus Sebastian Demmel: Analyse von Systemen zur Versorgung mit Strom, Wärme und Kälte, Dissertation TU München 1995

Müllverbrennung

mittlerer Kohlenstoffanteil im Müll
[Auskunft Herr Fahmi, BUWAL 040517]

$$\text{Ant}_C := .3$$

mittlerer Heizwert von Müll

$$h_M := 12 \cdot \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$$

Müllbedarf pro PJ

$$M_M := \frac{1}{h_M}$$

$$M_M = 8.333 \times 10^4 \frac{\text{to}}{\text{PJ}}$$

CO₂-Produktion bei Müllverbrennung

$$\text{CO}_{2\text{M}} := M_M \cdot \left(\text{Ant}_C \cdot \frac{44}{12} \right)$$

$$\text{CO}_{2\text{M}} = 9.167 \times 10^4 \frac{\text{to}}{\text{PJ}}$$

CO₂-Produktion CH-Strommix heute

$$\text{CO}_{2\text{ElCH}} := 0.025 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{kWh}}$$

$$\text{CO}_{2\text{ElCH}} = 6.944 \times 10^3 \frac{\text{to}}{\text{PJ}}$$

Raumheizung (Excel-Tabelle RH)

Die numerische Beispiele dienen dem leichteren Zugang

Wärmepumpen

Anteil an Raumheizungsnutzwärme	$Q_{WP} := 1 \cdot PJ$	
Jahresarbeitszahl	$JAZ := 3.4$	
Bedarf an elektrischer Energie	$E_{WP} := \frac{Q_{WP}}{JAZ}$	$E_{WP} = 0.294 PJ$
Genutzte Umgebungswärme	$Q_U := Q_{WP} - E_{WP}$	$Q_U = 0.706 PJ$

WKK

Anteil an Raumheizungsnutzwärme	$Q_{WKK} := 1 \cdot PJ$	
Wirkungsgrade	$\eta_{el} := 0.3$	$\eta_{tot} := 0.8$
Benötigtes Erdgas	$G_{WKK} := \frac{Q_{WKK}}{\eta_{tot} - \eta_{el}}$	$G_{WKK} = 2 PJ$
Produzierte elektrische Energie	$E_{WKK} := G_{WKK} \cdot \eta_{el}$	$E_{WKK} = 0.6 PJ$

KVA Annahme 50% Biomasse, Berechnungen analog WKK

Fernwärme Annahme 50% Erdgas, 50% Heizöl, Berechnungen analog WKK

A1 Ersatz Elektrowiderstandsheizung durch Wärmepumpen

Elektrische Energie für Wärmepumpe		$E_{WP} := 1 \cdot PJ$
Wirkungsgrad der ersetzten Widerstandsheizungen		$\eta_{WH} := 0.9$
Nutzwärme bei Widerstandsheizung	$Q_N := E_{WP} \cdot \eta_{WH}$	$Q_N = 0.9 PJ$
Jahresarbeitszahl Wärmepumpen		$JAZ := 4.5$
Nutzwärme Wärmepumpe	$Q_{NWP} := JAZ \cdot E_{WP}$	$Q_{NWP} = 4.5 PJ$
Mehrproduktion an Wärme	$\Delta Q_{WP} := Q_{NWP} - E_{WP} \cdot \eta_{WH}$	
	$\Delta Q_{WP} := E_{WP} \cdot (JAZ - \eta_{WH})$	$\Delta Q_{WP} = 3.60 PJ$

Von den WP benötigte Umgebungswärme

$$Q_U := E_{WP} \cdot (JAZ - 1) \quad Q_U = 3.50 \text{ PJ}$$

Elektrische Energie für **gleiche Nutzwärme wie mit Elektroboiler**

$$E_{WP_r} := E_{WP} \cdot \frac{Q_N}{Q_{NWP}} \quad E_{WP_r} = 0.200 \text{ PJ}$$

Einsparung an elektrischer Energie für gleiche Nutzwärme

$$\Delta E := E_{WP} - E_{WP_r} \quad \Delta E = 0.8 \text{ PJ}$$

Aus den obigen Gleichungen

$$\Delta E := E_{WP} \cdot \frac{(JAZ - \eta_{WH})}{JAZ} \quad (a) \quad \Delta E = 0.800 \text{ PJ}$$

Benötigte Umgebungswärme für gleiche Nutzwärme

$$Q_{Ure} := E_{WP} \cdot \frac{\eta_{WH}}{JAZ} \cdot (JAZ - 1) \quad (b) \quad Q_{Ure} = 0.700 \text{ PJ}$$

A2 Ersatz Kessel durch Elektrowärmepumpen (nukleare Option)

Vor Substitution durch Heizölkessel
zu produzierende Nutzwärme

$$Q_N := 1 \cdot \text{PJ}$$

Nutzungsgrad Kessel

$$\eta_K := 0.85$$

Eingesparter Brennstoff

$$E_B := \frac{Q_N}{\eta_K} \quad (c) \quad E_B = 1.176 \text{ PJ}$$

Elektrische Energie
für Wärmepumpen

$$E_{WP} := \frac{Q_N}{JAZ} \quad (d) \quad E_{WP} = 0.222 \text{ PJ}$$

Von den WP benötigte
Umgebungswärme

$$Q_U := E_{WP} \cdot (JAZ - 1) \quad (e) \quad Q_U = 0.78 \text{ PJ}$$

B Kombinationen Wärmekraftkopplung-Wärmepumpen WKK-WP und Kombikraftwerk-Wärmepumpen KK-WP

Gesamtwärmebedarf

$$Q := 1 \cdot \text{PJ}$$

Jahresarbeitszahl Wärmepumpen

$$JAZ := 4.5$$

Anteil WKK-WP (0: nur KK - 1: nur WKK)

$$\text{Ant}_{WKKWP} := 0.4$$

Gesamtwärmeproduktion WKK-WP

$$Q_{WKKWP} := Q \cdot \text{Ant}_{WKKWP} \quad (1) \quad Q_{WKKWP} = 0.4 \text{ PJ}$$

Gesamtwärmeproduktion KK-WP

$$Q_{KKWP} := Q \cdot (1 - \text{Ant}_{WKKWP}) \quad (2) \quad Q_{KKWP} = 0.6 \text{ PJ}$$

	WKK-WP	KK-WP
Gesamtwirkungsgrad	$\eta_{\text{totWKK}} := 0.90$	$\eta_{\text{totKK}} := 0.85$
elektrischer Wirkungsgrad	$\eta_{\text{elWKK}} := 0.4$	$\eta_{\text{elKK}} := 0.6$
Übertragungswirkungsgrad elektrische Energie	$\eta_{\text{üelWKK}} := 0.975$	$\eta_{\text{üelKK}} := 0.95$
Wirkungsgrad der Wärmeverteilung	$\eta_{\text{WVWKK}} := 0.925$	$\eta_{\text{WVKK}} := 0.85$

Gesamtnutzungsgrad WKK-WP aus [4]

$$NG_{WKK} := (\eta_{\text{totWKK}} - \eta_{\text{elWKK}}) \eta_{\text{WVWKK}} + \eta_{\text{elWKK}} \cdot \text{JAZ} \cdot \eta_{\text{üelWKK}} \quad (3)$$

Gesamtnutzungsgrad KK-WP aus [4]

$$NG_{KK} := (\eta_{\text{totKK}} - \eta_{\text{elKK}}) \eta_{\text{WVKK}} + \eta_{\text{elKK}} \cdot \text{JAZ} \cdot \eta_{\text{üelKK}} \quad (4)$$

Brennstoffbedarf

$$G_{WKK} := \frac{Q_{WKKWP}}{NG_{WKK}} \quad (5) \quad G_{KK} := \frac{Q_{KKWP}}{NG_{KK}} \quad (5') \quad G := G_{WKK} + G_{KK} \quad (6)$$

Produzierte elektrische Energie

$$E_{WKK} := G_{WKK} \cdot \eta_{\text{elWKK}} \quad (7) \quad E_{KK} := G_{KK} \cdot \eta_{\text{elKK}} \quad (7') \quad E := E_{WKK} + E_{KK} \quad (8)$$

Durch WP entzogene Umgebungswärme [4]

$$Q_U := (\text{JAZ} - 1) \cdot (E_{WKK} \cdot \eta_{\text{üelWKK}} + E_{KK} \cdot \eta_{\text{üelKK}}) \quad (9)$$

	WKK-WP	KK-WP	Total
	$NG_{WKK} = 2.217$	$NG_{KK} = 2.777$	
	$G_{WKK} = 0.18 \text{ PJ}$	$G_{KK} = 0.216 \text{ PJ}$	$G = 0.40 \text{ PJ}$
	$E_{WKK} = 0.07 \text{ PJ}$	$E_{KK} = 0.13 \text{ PJ}$	$E = 0.20 \text{ PJ}$
			$Q_U = 0.68 \text{ PJ}$

In den Excel-Tabellen wird mit den folgenden gewichteten Mittelwerten für die gemeinsame Erfassung der Systeme WKK-WP und KK-WP gerechnet:

aus (1),(2),(5),(5') und (6) folgt

$$\frac{Q}{NG} = \frac{Q \cdot \text{Ant}_{\text{WKKWP}}}{NG_{\text{WKK}}} + \frac{Q \cdot (1 - \text{Ant}_{\text{WKKWP}})}{NG_{\text{KK}}}$$

daraus der mittlere Nutzungsgrad von WKK-WP und KK-WP

$$NG := \frac{NG_{\text{WKK}} \cdot NG_{\text{KK}}}{\text{Ant}_{\text{WKKWP}} \cdot NG_{\text{KK}} + NG_{\text{WKK}} - NG_{\text{WKK}} \cdot \text{Ant}_{\text{WKKWP}}} \quad (10)$$

Kontrolle Gesamtbrennstoffbedarf

$$NG = 2.523$$

$$G := \frac{Q}{NG} \quad (5'')$$

$$G = 0.40 \text{ PJ}$$

mittlerer elektrischer Wirkungsgrad aus (1), (2), (5), (5') und (6)

$$\frac{Q}{NG} \cdot \eta_{\text{el}} = \frac{Q \cdot \text{Ant}_{\text{WKKWP}}}{NG_{\text{WKK}}} \cdot \eta_{\text{elWKK}} + \frac{Q \cdot (1 - \text{Ant}_{\text{WKKWP}})}{NG_{\text{KK}}} \cdot \eta_{\text{elKK}}$$

$$\eta_{\text{el}} := NG \cdot \left[\frac{(1 - \text{Ant}_{\text{WKKWP}})}{NG_{\text{KK}}} \cdot \eta_{\text{elKK}} + \text{Ant}_{\text{WKKWP}} \cdot \frac{\eta_{\text{elWKK}}}{NG_{\text{WKK}}} \right] \quad (11)$$

$$\eta_{\text{el}} = 0.509$$

Kontrolle Gesamtbrennstoffbedarf

$$E := G \cdot \eta_{\text{el}} \quad (7'')$$

$$E = 0.2 \text{ PJ}$$

Mittlerer elektrischer Übertragungswirkungsgrad

Die der Umgebung entzogene Wärme

$$Q_U = (\text{JAZ} - 1) \cdot E \cdot \eta_{\text{üel}} \quad (9')$$

$$Q_U = 0.68 \text{ PJ}$$

muss jener aus (9) entsprechen

$$(\text{JAZ} - 1) \cdot E \cdot \eta_{\text{üel}} = (\text{JAZ} - 1) \cdot (E_{\text{WKK}} \cdot \eta_{\text{üelWKK}} + E_{\text{KK}} \cdot \eta_{\text{üelKK}})$$

daraus

$$\eta_{\text{üel}} = \frac{(E_{\text{WKK}} \cdot \eta_{\text{üelWKK}} + E_{\text{KK}} \cdot \eta_{\text{üelKK}})}{E_{\text{WKK}} + E_{\text{KK}}}$$

mit (1), (2), (5), (5'), (7) und (7')

$$(12)$$

$$\eta_{\text{üel}} := \frac{\text{Ant}_{\text{WKKWP}} \cdot \eta_{\text{elWKK}} \cdot \eta_{\text{üelWKK}} \cdot NG_{\text{KK}} + (1 - \text{Ant}_{\text{WKKWP}}) \cdot \eta_{\text{elKK}} \cdot \eta_{\text{üelKK}} \cdot NG_{\text{WKK}}}{\text{Ant}_{\text{WKKWP}} \cdot \eta_{\text{elWKK}} \cdot NG_{\text{KK}} + (1 - \text{Ant}_{\text{WKKWP}}) \cdot \eta_{\text{elKK}} \cdot NG_{\text{WKK}}}$$

$$\eta_{\text{üel}} = 0.959$$

Mittlerer Gesamtwirkungsgrad

Für die Wärmeproduktion aus WKK und KK (soweit genutzt) muss gelten [4]

$$G \cdot (\eta_{\text{tot}} - \eta_{\text{el}}) = G_{\text{WKK}} \cdot (\eta_{\text{totWKK}} - \eta_{\text{elWKK}}) + G_{\text{KK}} \cdot (\eta_{\text{totKK}} - \eta_{\text{elKK}})$$

Mit (1), (2), (5), (5') und (5'') folgt daraus

$$\eta_{\text{tot}} := \left[\frac{\text{Ant}_{\text{WKKWP}}}{\text{NG}_{\text{WKK}}} \cdot (\eta_{\text{totWKK}} - \eta_{\text{elWKK}}) + \frac{1 - \text{Ant}_{\text{WKKWP}}}{\text{NG}_{\text{KK}}} \cdot (\eta_{\text{totKK}} - \eta_{\text{elKK}}) \right] \cdot \text{NG} + \eta_{\text{el}} \quad (13)$$

$$\eta_{\text{tot}} = 0.873$$

Mittlerer Wirkungsgrad für die Wärmeverteilung ab WKK und KK

Es muss gelten

$$G \cdot \eta_{\text{el}} \cdot \eta_{\text{WV}} = G_{\text{WKK}} \cdot \eta_{\text{elWKK}} \cdot \eta_{\text{WVWKK}} + G_{\text{KK}} \cdot \eta_{\text{elKK}} \cdot \eta_{\text{WVKK}}$$

Mit (1), (2), (5), (5') und (5'') folgt daraus

$$\eta_{\text{WV}} := \left(\frac{\text{Ant}_{\text{WKKWP}}}{\text{NG}_{\text{WKK}}} \cdot \eta_{\text{elWKK}} \cdot \eta_{\text{WVWKK}} + \frac{1 - \text{Ant}_{\text{WKKWP}}}{\text{NG}_{\text{KK}}} \cdot \eta_{\text{elKK}} \cdot \eta_{\text{WVKK}} \right) \cdot \frac{\text{NG}}{\eta_{\text{el}}} \quad (14)$$

$$\eta_{\text{WV}} = 0.877$$

F Ersatz Oel- und Gaskessel durch Erdwärme (tiefe Geothermie)

Anteil an Raumheizungsnutzwärme

$$Q_{\text{ORC}} := 1 \cdot \text{PJ}$$

Wirkungsgrade

$$\eta_{\text{el}} := 0.08$$

$$\eta_{\text{tot}} := 0.75$$

Benötigte Erdwärme

$$Q_{\text{Geo}} := \frac{Q_{\text{ORC}}}{\eta_{\text{tot}} - \eta_{\text{el}}}$$

$$Q_{\text{Geo}} = 1.49 \text{ PJ}$$

Produzierte elektrische Energie

$$E_{\text{ORC}} := Q_{\text{ORC}} \cdot \eta_{\text{el}}$$

$$E_{\text{ORC}} = 0.08 \text{ PJ}$$

Warmwasserbereitung (Excel-Tabelle WW)

Die Ersatzmöglichkeiten A bis G entsprechen mit Ausnahme von A und E jenen in der Tabelle RH. Neu sind die Solaranlagen.

In A wird zunächst vom vollständigen Ersatz der Elektroboiler ausgegangen. Der Nutzungsgrad berücksichtigt die Wärmeverluste in Speicher und Warmwasserverteilung. Diese werden für Elektro- und Solarboiler als gleich gross angenommen. Ausser bei Thermosiphonanlagen wird für Pumpen und Steuerung elektrische Energie benötigt. Die Nachheizung im Winter soll dagegen nicht durch elektrische Widerstandsheizung erfolgen.

In E werden zusätzlich Heizöl und Erdgas durch Solarwärme ersetzt.

Die übrigen Ersatzmöglichkeiten wurden bereits im Abschnitt RH erläutert.

Verkehr (Excel-Tabelle VK)

Gegenüber den Tabellen RH und WW wird hier im Hinblick auf die dürftigere Datenlage und die noch recht spekulativen Zukunftsannahmen eine einfachere Darstellung gewählt. Es wird nur der Ersatz der nach der Bedarfsvision geschätzten unerwünschten Endenergien erfasst.

E Ersatz durch Wasserstoff aus Elektrizität

Für diesen Ersatztreibstoff sind im Wirkungsgrad der Umwandlungswirkungsgrad bei der Elektrolyse, die Lagerung und der Transport bis zur Verfügbarkeit als Endenergie einzuschliessen.

Prozesswärme (Excel-Tabelle PW)

Die Fernwärme wird hier nicht berücksichtigt; der Überschuss in der chemischen Industrie steht einem ähnlichen Bedarf in der Papierindustrie entgegen.

Situation heute

Elektrische Energie wird für Wärme (Brüdenkompression, Schmelzöfen) und Kälte benötigt (W+K in der Tabelle PW).

Kessel und Wärmeverteilung: Bei der industriellen Wärme gibt es oft bedeutende Verluste in der Wärmeverteilung (Dampfnetze) - die Nutzungsgrade sind entsprechend tief

Nutzenergien WKK

Nutzungsgrade der WKK $\eta_{elWKK} := 0.4$ $\eta_{totWKK} := 0.8$

Benötigte Nutzwärme $Q_{WKK} := 1 \cdot PJ$

Dafür benötigte Brennstoffenergie

$$E_{BWKK} := \frac{Q_{WKK}}{\eta_{totWKK} - \eta_{elWKK}} \quad (15) \quad E_{BWKK} = 2.50 PJ$$

A Reduktion der Wärmeverteilverluste

Diese sind heute bei Dampfwärmeverteilnetzen beträchtlich und können noch deutlich reduziert werden.

Kessel

$$\text{Aus } E_{\text{Balt}} = \frac{Q_{\text{Nutz}}}{\eta_{\text{thalt}}} \quad \text{und } E_{\text{Bneu}} = \frac{Q_{\text{Nutz}}}{\eta_{\text{thneu}}} \quad \text{folgt } E_{\text{Bneu}} = \frac{E_{\text{Balt}} \cdot \eta_{\text{thalt}}}{\eta_{\text{thneu}}}$$

Brennstoffeinsparung:

$$\Delta E_{\text{B}} = E_{\text{Balt}} - E_{\text{Bneu}} = E_{\text{Balt}} \left(1 - \frac{\eta_{\text{thalt}}}{\eta_{\text{thneu}}} \right) \quad (16)$$

WKK

Die Gl.(16) gilt mit $\eta_{\text{th}} = \eta_{\text{tot}} - \eta_{\text{el}}$ auch für Wärme-Kraft-Kopplung

Mit dem geringeren Wärmebedarf ergibt sich folgende Reduktion der Elektrizitätsproduktion

$$\Delta E = \eta_{\text{el}} \cdot (E_{\text{Balt}} - E_{\text{Bneu}}) = E_{\text{Balt}} \cdot \eta_{\text{el}} \left(1 - \frac{\eta_{\text{thalt}}}{\eta_{\text{thneu}}} \right) \quad (16')$$

$$E_{\text{Balt}} := 1 \cdot \text{PJ} \quad \eta_{\text{el}} := .3 \quad \eta_{\text{totalt}} := .6 \quad \eta_{\text{totneu}} := .8$$

$$\eta_{\text{thalt}} := \eta_{\text{totalt}} - \eta_{\text{el}} \quad \eta_{\text{thalt}} = 0.3 \quad \eta_{\text{thneu}} := \eta_{\text{totneu}} - \eta_{\text{el}} \quad \eta_{\text{thneu}} = 0.5$$

$$\Delta E_{\text{B}} := E_{\text{Balt}} \left(1 - \frac{\eta_{\text{thalt}}}{\eta_{\text{thneu}}} \right) \quad \Delta E_{\text{B}} = 0.4 \text{ PJ}$$

$$\Delta E := \Delta E_{\text{B}} \cdot \eta_{\text{el}} \quad \Delta E = 0.12 \text{ PJ}$$

B Ersatz durch Absorptionskälteanlagen

Ersatz elektrisch angetriebener Kältemaschinen durch Absorptionskälteanlagen. Betrieb dieser Absorptionskälteanlagen mit bisher ungenutzter Prozessabwärme. Nur möglich, wo ungenutzte Prozessabwärme mit genügender Temperatur gleichzeitig mit dem Kältebedarf vorhanden ist.

Ersetzte Kompressionskälteanlagen

$$\text{mit der ersetzten elektrischen Energie von } E_{\text{K}} := 1 \cdot \text{PJ}$$

$$\text{und einem mittleren COP-Wert von } \text{COP}_{\text{K}} := 2$$

wurde folgende

$$\text{"Kälteenergie" produziert } Q_{\text{K}} := E_{\text{K}} \cdot \text{COP}_{\text{K}} \quad (17) \quad Q_{\text{K}} = 2 \text{ PJ}$$

Abwärme an Umgebung $Q_{AW} := E_K + Q_K$ (18) $Q_{AW} = 3 \text{ PJ}$

Absorptionskälteanlagen

mittlere Kältezahl der AKA $K_{AKA} := 0.6$

benötigte elektrische Energie für Pumpen/Steuerung $E_{AKA} := 0.05 \cdot E_K$

Die 5% Pumpstrombedarf und die Kältezahl von 0.6 werden in der Tabelle PW ohne spezielle Eingaben berücksichtigt.

benötigte Antriebswärme aus $K_{AKA} = \frac{Q_K}{Q_{AKA} + E_{AKA}}$

$Q_{AKA} := \frac{Q_K}{K_{AKA}} - E_{AKA}$ (19) $Q_{AKA} = 3.28 \text{ PJ}$

Abwärme an Umgebung $Q_{abAKA} := Q_K + Q_{AKA} + E_{AKA}$

$Q_{abAKA} := Q_K \cdot \frac{K_{AKA} + 1}{K_{AKA}}$ (20) $Q_{abAKA} = 5.33 \text{ PJ}$

C Bereitstellen weiterer Wärme durch WKK-Anlagen

Ersatz eines Teils der Kessel. Wirtschaftliches Potenzial allerdings begrenzt, da die Kessel zur Deckung der Spitzenlast dienen.

Annahme Übertragungsverluste für die produzierte elektrische Energie vernachlässigbar

Gesamtwirkungsgrad $\eta_{\text{totWKKPW}} := 0.95$

elektrischer Wirkungsgrad $\eta_{\text{elWKKPW}} := 0.4$

Wirkungsgrad der Wärmeverteilung $\eta_{\text{WVWKKPW}} := 0.9$

benötigte Nutzwärme der WKK-Anlagen $Q_{\text{NWKKPW}} := 1 \cdot \text{PJ}$

Wärme von der WKK $Q_{\text{WKKPW}} := \frac{Q_{\text{NWKKPW}}}{\eta_{\text{WVWKKPW}}}$ $Q_{\text{WKKPW}} = 1.111 \text{ PJ}$

Dafür benötigte Brennstoffenergie

$$E_{\text{BWKKPW}} := \frac{Q_{\text{NWKKPW}}}{\eta_{\text{WVWKKPW}} \cdot (\eta_{\text{totWKKPW}} - \eta_{\text{elWKKPW}})} \quad (21)$$

$$E_{\text{BWKKPW}} = 2.02 \text{ PJ}$$

und produzierte elektrische Energie

$$E_{WKKPW} := E_{BWKKPW} \cdot \eta_{elWKKPW} \quad (22) \quad E_{WKKPW} = 0.808 \text{ PJ}$$

Elektrische Energie (Excel-Tabelle EI)

Priorität haben die erneuerbaren Energien. Sie werden im Basisjahr den Werten mit Export gleichgesetzt. Der Exportüberschuss wird nur den nicht erneuerbaren Energie proportional zu ihrem Nutzenergieanteil belastet.

Verhältnis ε für den Bedarf an elektrischer Nutzenergie ohne Export zu jenem mit Export (Index 0) im Basisjahr:

$$\varepsilon = \frac{EE_0 + \alpha \cdot NE_0}{EE_0 + NE_0} \quad (23)$$

Daraus der Proportionalitätsfaktor α

$$\alpha = \frac{(EE_0 + NE_0)}{NE_0} \cdot \varepsilon - \frac{EE_0}{NE_0} \quad (24)$$

Analog erfolgt die Be- oder Entlastung der nicht erneuerbaren Energien durch die Verbrauchs- und Effizienzänderung ("ohne und mit Massnahmen"). Dabei wird wie folgt vorgegangen:

- erneuerbare Energien ausser Wasserkraft (EEoW) gegenüber dem Basisjahr nicht verändert;
- Erhöhung der Wasserkraft (WK) bis zum Erreichen des CH-Potenzials (Eingabe in der Tabelle "RoadMapStart / CH-Potenzial").

Der Proportionalitätsfaktor für die Aufteilung auf die nicht erneuerbaren Energien folgt dann aus:

$$\varepsilon = \frac{WK + EEoW_0 + \alpha \cdot NE_0}{WK_0 + EEoW_0 + NE_0} \quad (25)$$

bzw.

$$\alpha = \frac{(WK_0 + EEoW_0 + NE_0)}{NE_0} \cdot \varepsilon - \frac{(EEoW_0 + WK)}{NE_0} \quad (26)$$

Da ein Stromexport ausgeschlossen wird, kann die Kernenergie nur bis zur Deckung des jeweils verbleibenden Inlandbedarfs genutzt werden. Das Programm enthält entsprechende Begrenzungen.

Referenzen

- [4] M. Zogg: Wärme und Strom aus Brennstoffen, Gas-Wasser-Abwasser, 82(2002)12, 907/912; Berechnungsgleichungen in den in [4] erwähnten Downloads.