

Calculation and Optimization of Heat Generator Systems

Dipl.-Ing. (FH) Jonas Pfeiffer

2024-09-09

1 Introduction

This document describes the mathematical models and optimization functions used to calculate and evaluate various heat generation systems. The code focuses on optimizing energy efficiency and economic viability, applying the VDI 2067 guidelines for cost analysis.

2 Economic Analysis According to VDI 2067

2.1 Einleitung

Die Berechnung der Wirtschaftlichkeit technischer Anlagen ist ein zentraler Bestandteil des Energiemanagements. Die Annuitätsmethode gemäß VDI 2067 ermöglicht es, die Gesamtkosten einer technischen Anlage über die gesamte Nutzungsdauer zu erfassen und zu bewerten. Die Kosten umfassen die kapitalgebundenen, bedarfsgebundenen und betriebsgebundenen Kosten, sowie Erlöse.

2.2 Die Annuität

Die Annuität bezeichnet eine jährliche Zahlung, die Kapital- und Betriebskosten sowie Wartungskosten und gegebenenfalls Erlöse berücksichtigt. Die Berechnung der Annuität basiert auf den folgenden Komponenten:

2.2.1 Formel zur Berechnung der Annuität

Die Annuität A_N wird durch die Summe der folgenden Komponenten bestimmt:

$$A_N = A_{N,K} + A_{N,V} + A_{N,B} + A_{N,S} - A_{N,E}$$

wobei:

- $A_{N,K}$: Kapitalgebundene Kosten
- $A_{N,V}$: Bedarfsgebundene Kosten

- $A_{N,B}$: Betriebsgebundene Kosten
- $A_{N,S}$: Sonstige Kosten
- $A_{N,E}$: Erlöse

2.2.2 Kapitalgebundene Kosten

Die kapitalgebundenen Kosten $A_{N,K}$ umfassen die Investitionskosten und den Restwert der Anlage:

$$A_{N,K} = (A_0 - R_W) \cdot a$$

wobei:

- A_0 die Anfangsinvestition ist,
- R_W der Restwert der Anlage nach Ablauf der Nutzungsdauer T ist,
- a der Annuitätsfaktor ist:
$$a = \frac{q - 1}{1 - q^{-T}}$$
- q der Zinsfaktor ist, also $q = 1 + \text{Zinssatz}$.

2.2.3 Bedarfsgebundene Kosten

Die bedarfsgebundenen Kosten $A_{N,V}$ werden aus dem Energiebedarf und den Energiekosten berechnet:

$$A_{N,V} = \text{Energiebedarf} \cdot \text{Energiekosten} \cdot a \cdot b_V$$

wobei:

$$b_V = \frac{1 - \left(\frac{r}{q}\right)^T}{q - r}$$

und r der Preissteigerungsfaktor (Inflation) ist.

2.2.4 Betriebsgebundene Kosten

Die betriebsgebundenen Kosten $A_{N,B}$ setzen sich aus den Betriebskosten und den Wartungskosten zusammen:

$$A_{N,B} = (\text{Bedienaufwand} \cdot \text{Stundensatz} + A_0 \cdot (f_{\text{Inst}} + f_{\text{W.Insp}})/100) \cdot a \cdot b_B$$

wobei:

- f_{Inst} : Installationsfaktor,
- $f_{\text{W.Insp}}$: Wartungs- und Inspektionsfaktor.

2.2.5 Sonstige Kosten

Sonstige Kosten $A_{N,S}$ können in ähnlicher Weise berechnet werden, wobei keine weiteren Parameter in diesem Beispiel angegeben sind.

2.2.6 Erlöse

Falls Erlöse $A_{N,E}$ vorhanden sind (z.B. durch den Verkauf von Energie), werden diese von der Annuität abgezogen:

$$A_{N,E} = E_1 \cdot a \cdot b_E$$

2.2.7 Rückgabewert

Die Gesamtannuität wird als Summe der Komponenten berechnet. Sie ergibt die jährlichen Gesamtkosten oder Erträge der Anlage:

$$A_N = -(A_{N,K} + A_{N,V} + A_{N,B} + A_{N,S} - A_{N,E})$$

2.3 Zusammenfassung

Die Annuitätsberechnung gemäß VDI 2067 bietet eine umfassende Methode, um die Kosten und Erlöse einer technischen Anlage über die gesamte Nutzungsdauer zu bewerten. Durch die Anwendung von Kapitalwertfaktoren und Preissteigerungsfaktoren können die jährlichen Belastungen und Einsparungen realitätsnah abgebildet werden.

3 Optimierungsfunktion für den Erzeugermix

3.1 Einleitung

Die Berechnungsfunktion `Berechnung_Erzeugermix` ermittelt die optimale Energieerzeugung für einen vorgegebenen Mix an Technologien. Ziel ist es, die Wärmeerzeugung für ein bestimmtes Lastprofil unter Einbeziehung verschiedener Kosten-, Effizienz- und Emissionsfaktoren zu berechnen.

3.2 Mathematisches Modell

3.2.1 Eingangsparameter

Die Berechnungsfunktion nimmt eine Reihe von Eingangsparametern an, die die technologischen und ökonomischen Bedingungen beschreiben. Diese beinhalten unter anderem:

- **tech_order**: Liste der zu betrachtenden Technologien.
- **initial_data**: Tuple bestehend aus Zeitpunkten, Lastprofil, Vorlauf- und Rücklauftemperaturen.

- **Gaspreis, Strompreis, Holzpreis:** Energiekosten in €/kWh.
- **BEW:** Spezifische CO2-Emissionen des Strommixes in kg CO2/kWh.
- **kapitalzins, preissteigerungsrate, betrachtungszeitraum:** Finanzielle Parameter für die Kostenberechnung.

3.2.2 Berechnungslogik

Die Funktion berechnet zunächst die Jahreswärmebedarfe basierend auf dem Lastprofil L und der zeitlichen Auflösung:

$$\text{Jahreswärmebedarf} = \frac{\sum L}{1000} \cdot \text{duration}$$

Die Wärmebedarfsfunktion läuft über eine Schleife für jede Technologie in der `tech_order`. Je nach Art der Technologie (Solarthermie, Abwärme, Geothermie usw.) wird ein spezifisches Berechnungsmodell angewandt.

3.2.3 Technologiespezifische Berechnung

Jede Technologie verwendet unterschiedliche Berechnungsmodelle:

- **Solarthermie:** Berechnet den Ertrag basierend auf der Vorlauftemperatur und der solaren Einstrahlung aus dem Testreferenzjahr (TRY).
- **Wärmepumpen und Abwärme:** Verwenden den COP-Wert (*Coefficient of Performance*) und Strompreis zur Ermittlung der Betriebsaufwendungen.
- **Blockheizkraftwerke (BHKW):** Berücksichtigen sowohl thermische als auch elektrische Leistungen, sowie den Brennstoffverbrauch.

3.3 Kapital- und Emissionskosten

Neben den Betriebskosten werden auch kapitalgebundene und emissionsbasierte Kosten berechnet. Der kapitalgebundene Kostenanteil ergibt sich aus:

$$A_{N,K} = A_0 \cdot \frac{(q - 1)}{1 - q^{-T}}$$

wobei $q = 1 + \text{Zinsrate}$.

Die spezifischen CO2-Emissionen werden pro erzeugte Wärmemenge berechnet:

$$\text{CO2.Emissionen} = \frac{\sum \text{Wärmemenge}_i \cdot \text{spec.co2}_i}{\text{Jahreswärmebedarf}}$$

3.4 Zusammenfassung

Die Funktion `Berechnung_Erzeugermix` führt eine detaillierte Berechnung der Energieerzeugung durch, indem sie mehrere Technologien gleichzeitig berücksichtigt. Die Berechnung erfolgt basierend auf stündlichen Daten für Lastprofile, Temperaturen und Emissionen.

4 Berechnungsfunktion für den Erzeugermix

4.1 Einleitung

Die Optimierungsfunktion `optimize_mix` verwendet mathematische Optimierungstechniken, um den Mix aus Energieerzeugungstechnologien zu optimieren. Das Ziel der Optimierung ist es, die Kosten, CO₂-Emissionen und den Primärenergieverbrauch zu minimieren, indem verschiedene Technologien mit unterschiedlichen Parametern berücksichtigt werden.

4.2 Mathematisches Modell

4.2.1 Zielgrößen

Die Optimierung basiert auf der Minimierung einer gewichteten Summe von drei Zielgrößen:

$$\text{Ziel} = w_{\text{WGK}} \cdot \text{WGK_Gesamt} + w_{\text{CO}_2} \cdot \text{CO}_2\text{-Emissionen_Gesamt} + w_{\text{Primärenergie}} \cdot \text{Primärenergie_Faktor_Gesamt}$$

Hierbei sind w_{WGK} , w_{CO_2} , $w_{\text{Primärenergie}}$ die Gewichte, die den Einfluss der jeweiligen Zielgröße auf das Gesamtergebnis steuern.

4.2.2 Optimierungsverfahren

Die Optimierung erfolgt mittels des SLSQP-Algorithmus, der für nichtlineare Probleme mit Nebenbedingungen geeignet ist. Der Algorithmus sucht nach den optimalen Parametern für die Technologien (z.B. Fläche für Solarthermie, Leistung für BHKW), die die gewichtete Summe der Zielgrößen minimieren.

4.2.3 Nebenbedingungen

Für jede Technologie werden Schranken (*bounds*) für die zu optimierenden Parameter definiert, um physikalisch sinnvolle Werte sicherzustellen. Zum Beispiel:

- Für die Fläche eines Solarthermie-Systems: $\text{min_area} \leq \text{Fläche} \leq \text{max_area}$
- Für die Leistung eines BHKW: $\text{min_Leistung} \leq \text{Leistung} \leq \text{max_Leistung}$

4.3 Ergebnis

Nach erfolgreicher Optimierung gibt die Funktion die optimierten Parameter für jede Technologie zurück. Diese Parameter minimieren die gewichtete Summe der Kosten, CO₂-Emissionen und des Primärenergieverbrauchs.

4.4 Zusammenfassung

Die Funktion `optimize_mix` erlaubt eine simultane Optimierung mehrerer Technologien basierend auf benutzerdefinierten Zielgrößen. Durch die Verwendung von mathematischen Optimierungsverfahren wie `SLSQP` werden die besten Kombinationen von Technologien und Parametern ermittelt.

5 HeatPump Class

The `HeatPump` class represents a heat pump system and provides methods to calculate various performance and economic metrics. The class is highly modular, making it possible to adapt it to different types of heat sources and use cases. The primary attributes and methods of the class are detailed below:

5.1 Attributes

- `name (str)`: The name of the heat pump.
- `spezifische_Investitionskosten_WP (float)`: Specific investment costs of the heat pump per kW. Default is 1000 €/kW.
- `Nutzungsdauer_WP (int)`: Useful life of the heat pump in years. Default is 20 years.
- `f_Inst_WP (float)`: Installation factor for the heat pump. Default is 1.
- `f_W.Insp_WP (float)`: Maintenance and inspection factor for the heat pump. Default is 1.5.
- `Bedienaufwand_WP (float)`: Operating effort for the heat pump in hours. Default is 0.
- `f_Inst_WQ (float)`: Installation factor for the heat source. Default is 0.5.
- `f_W.Insp_WQ (float)`: Maintenance and inspection factor for the heat source. Default is 0.5.
- `Bedienaufwand_WQ (float)`: Operating effort for the heat source in hours. Default is 0.
- `Nutzungsdauer_WQ_dict (dict)`: Dictionary containing useful life of different heat sources (e.g., waste heat, river water).
- `co2_factor_electricity (float)`: CO₂ emission factor for electricity in tCO₂/MWh. Default is 2.4.

5.2 Methods

- `COP_WP(VLT_L, QT, COP_data)`: Calculates the coefficient of performance (COP) of the heat pump by interpolating the COP data based on flow temperatures (VLT_L) and source temperatures (QT).
- `WGK(Wärmeleistung, Wärmemenge, Strombedarf, spez_Investitionskosten_WQ, Strompreis, q, r, T, BEW, stundensatz)`: Calculates the weighted average cost of heat generation (WGK) based on thermal performance, investment, and operational costs.

6 RiverHeatPump Class

The `RiverHeatPump` class extends the `HeatPump` class and models a heat pump system that uses river water as the heat source. In addition to the attributes of the base class, it includes parameters specific to river water heat pumps.

6.1 Attributes

- `Wärmeleistung_FW_WP (float)`: Heat output of the river water heat pump in kW.
- `Temperatur_FW_WP (float)`: Temperature of the river water in °C.
- `dT (float)`: Temperature difference across the heat exchanger in °C.
- `spez_Investitionskosten_Flusswasser (float)`: Specific investment costs for the river water heat pump per kW.
- `min_Teillast (float)`: Minimum partial load. Default is 0.2.
- `co2_factor_electricity (float)`: CO₂ emission factor for electricity in tCO₂/MWh.
- `primärenergiefaktor (float)`: Primary energy factor for river water heat pumps.

6.2 Methods

- `Berechnung_WP(Wärmeleistung_L, VLT_L, COP_data)`: Calculates the cooling load, electric power consumption, and adjusted flow temperatures based on the given load and COP data.
- `calculate(VLT_L, COP_data, Strompreis, q, r, T, BEW, stundensatz, duration, general_results)`: Calculates the economic and environmental metrics for the river heat pump based on flow temperatures, electricity prices, and other input parameters.

7 CHP Class

The `CHP` class represents a combined heat and power (CHP) system. It extends the `HeatPump` class and provides methods to calculate both the electrical and thermal performance of the CHP system.

7.1 Attributes

- `th_Leistung_BHKW` (float): Thermal power of the CHP system in kW.
- `spez_Investitionskosten_GBHKW` (float): Specific investment costs for gas CHPs in €/kW. Default is 1500 €/kW.
- `el_Wirkungsgrad` (float): Electrical efficiency of the CHP system. Default is 0.33.
- `KWK_Wirkungsgrad` (float): Combined heat and power efficiency. Default is 0.9.
- `min_Teillast` (float): Minimum part-load operation as a fraction of the nominal load. Default is 0.7.
- `speicher_aktiv` (bool): Indicates whether a storage system is used.

7.2 Methods

- `BHKW(Last_L, duration)`: Simulates the operation of the CHP system without storage.
- `storage(Last_L, duration)`: Simulates the operation of the CHP system with thermal storage.
- `calculate(Gaspreis, Holzpreis, Strompreis, q, r, T, BEW, stundensatz, duration, general_results)`: Calculates the economic and environmental performance of the CHP system for both gas and wood-based CHPs.

8 Conclusion

This document provides a comprehensive overview of the models and optimization strategies used for heating systems. Future work will extend the system to cover additional environmental factors and economic uncertainties.