

# Technoökonomische Optimierung eines Erdsondenspeichers und Nahwärmesystems unter Nutzung einer neuen Open-Data-Toollandschaft zur integralen Quartiersplanung

---

**Paul Mex | Der Geothermiekongress 2024 | Potsdam**  
**23.10.2024**

Gefördert im Rahmen des  
Projekts ODH@Jülich

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

# Inhaltsangabe

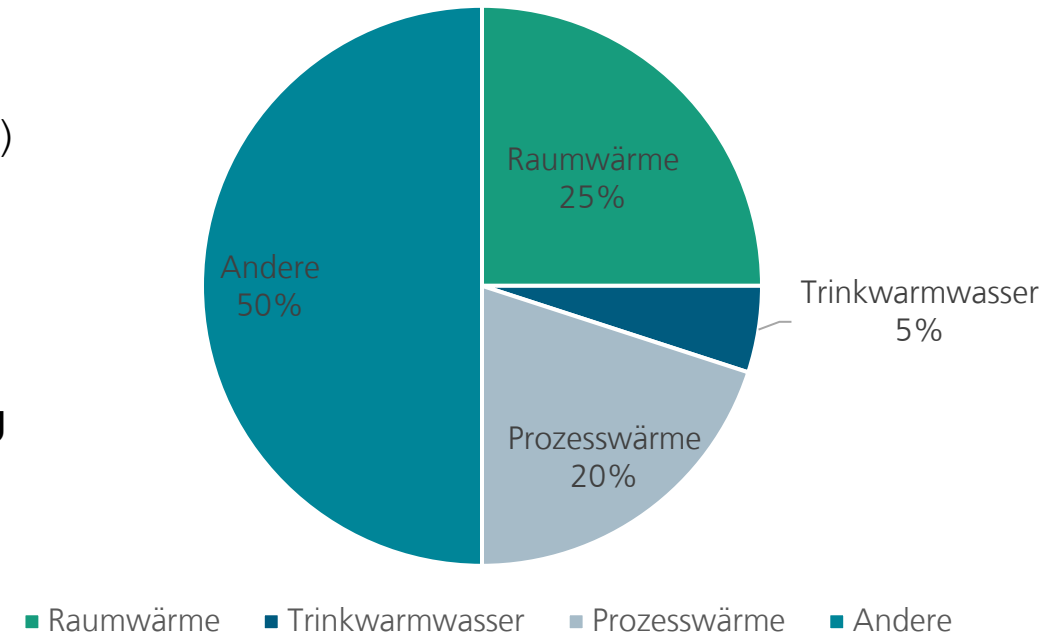
---

1. **Motivation**
2. ***heatopia* – MILP-Optimierung von Fernwärmesystemen**
  - Erdsondenfeldermodelle
3. **Die *ODH@Jülich*-Toollandschaft**
4. **Fallbeispiel**
  - Vorstellung und Erstellung
  - Ergebnisse
5. **Zusammenfassung und Ausblick**

# Motivation

- Laut dem **UN-Abkommen von Paris (2015)** soll der globale mittlere Temperaturanstieg deutlich unter 2 °C liegen und möglichst auf **1,5 °C** begrenzt werden
- Der **Dekarbonisierungsgrad** von **Fernwärmesystemen** (derzeit ~15%) **muss** deutlich **erhöht** werden
- Dann könnten sie eine **Schlüsselrolle** bei der Wärmewende spielen
- **Saisonale Speicher** werden zum Ausgleich von Wärmeangebot und-nachfrage benötigt
- Komplexe Systeme stellen **komplexe** Herausforderungen in der **Planung**

Endenergieverbrauch in Deutschland



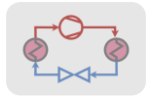
**Abb. 1.** Endenergieverbrauch in Deutschland (BMWK, 2021)

# Heatopia – MILP-Optimierung von Fernwärmesystemen

## Anlagen

## Optimierung

## Netztopologie



Großwärmepumpe



Solarthermie



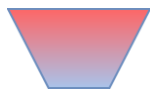
Elektro-Boiler



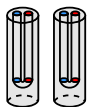
Biogas-Boiler



Pufferspeicher



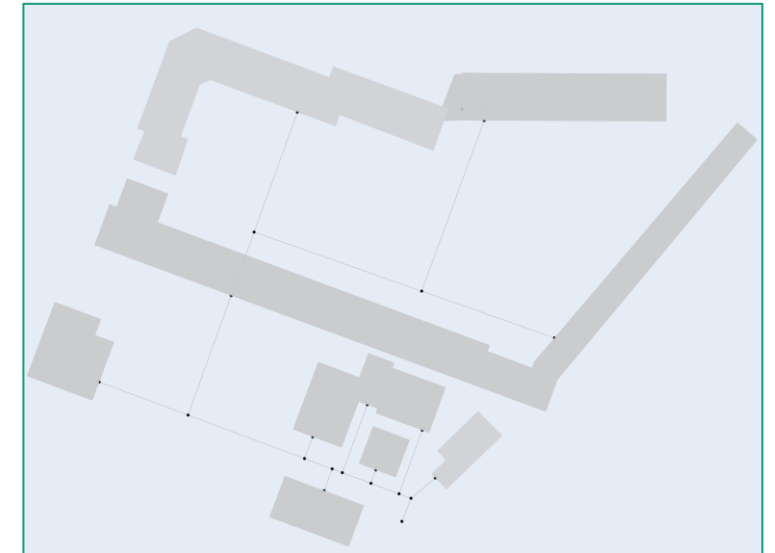
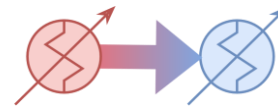
Erdbeckenspeicher



Erdsondenspeicher

**Heatopia**

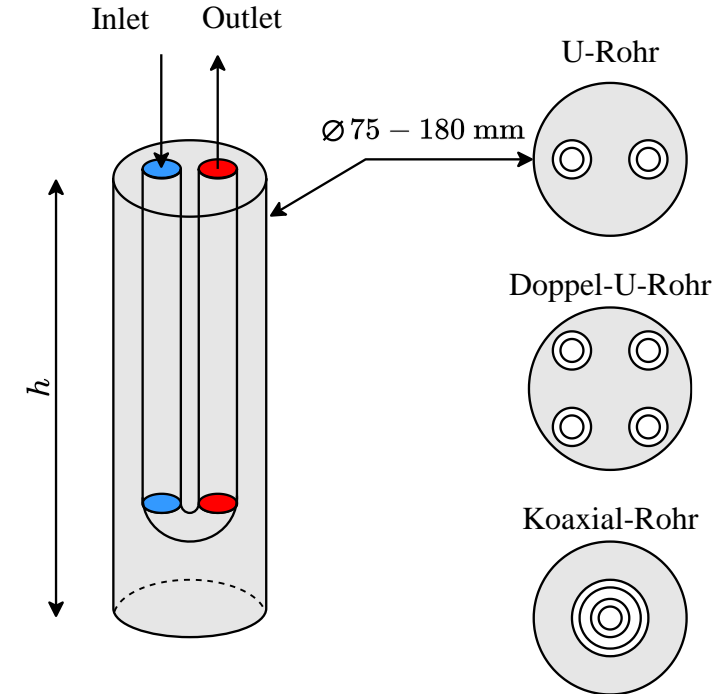
Designing Future District Heating Systems



# Erdsondenfelder

## Stand der Technik

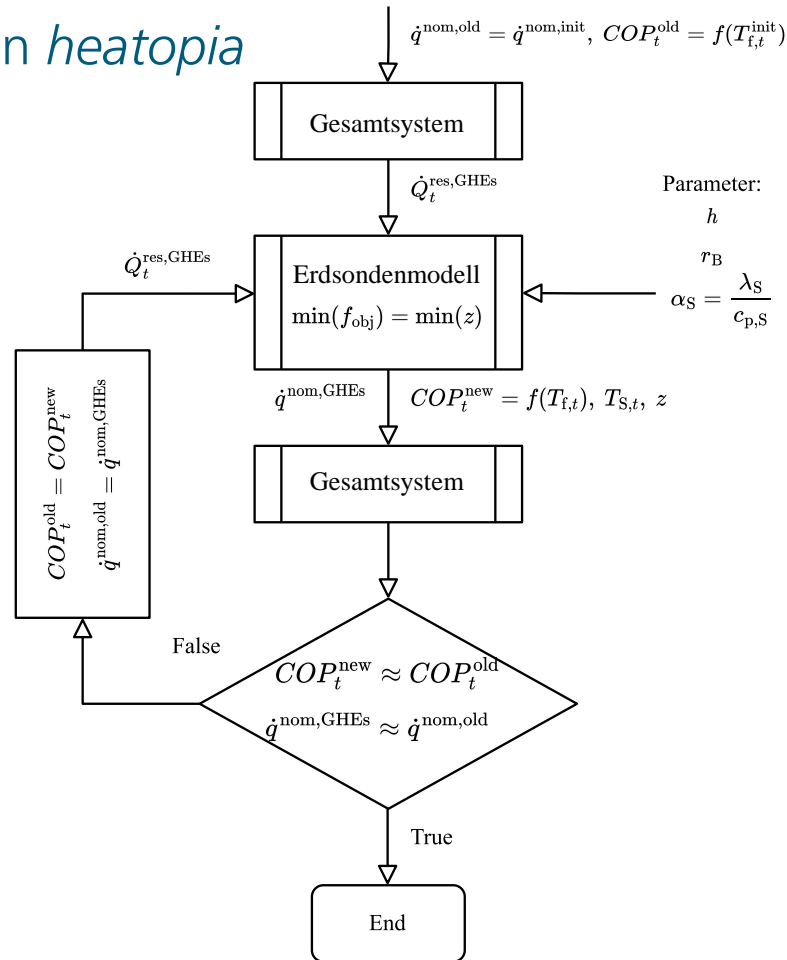
- Mehrere Erdsonden bilden ein Erdsondenfeld
- Für eine Erdsonde wird ein geschlossenes Rohr (Vor- und Rücklauf) in ein vertikales Bohrloch eingelassen, Zwischenräume werden verfüllt.
- Es zirkuliert ein **Fluid** als Arbeitsmedium
- Wärme wird vom Erdreich auf das Fluid übertragen (und vice versa)
- Das Erdsondenfeld ist an eine **Wärmepumpe** gekoppelt um die Temperatur vor der Netzeinspeisung anzuheben
- Erdsondenfelder werden meist unter Verwendung sog. **g-Funktionen modelliert**



**Abb. 2.** Schematische Darstellung einer Erdsonde im Heizmodus

# Erdsondenfelder

## Integration in *heatopia*



**Abb. 3.** Schematisches Flussdiagramm der Kopplung des Erdsondenspeichermodells mit dem MILP-Modell *heatopia*, dessen Zielfunktion die Minimierung der Gesamtkosten ist

**Tab. 1:** Gleichungen zur Beschreibung des vereinfachten Speichermodells innerhalb des MILP-Modells *heatopia*:

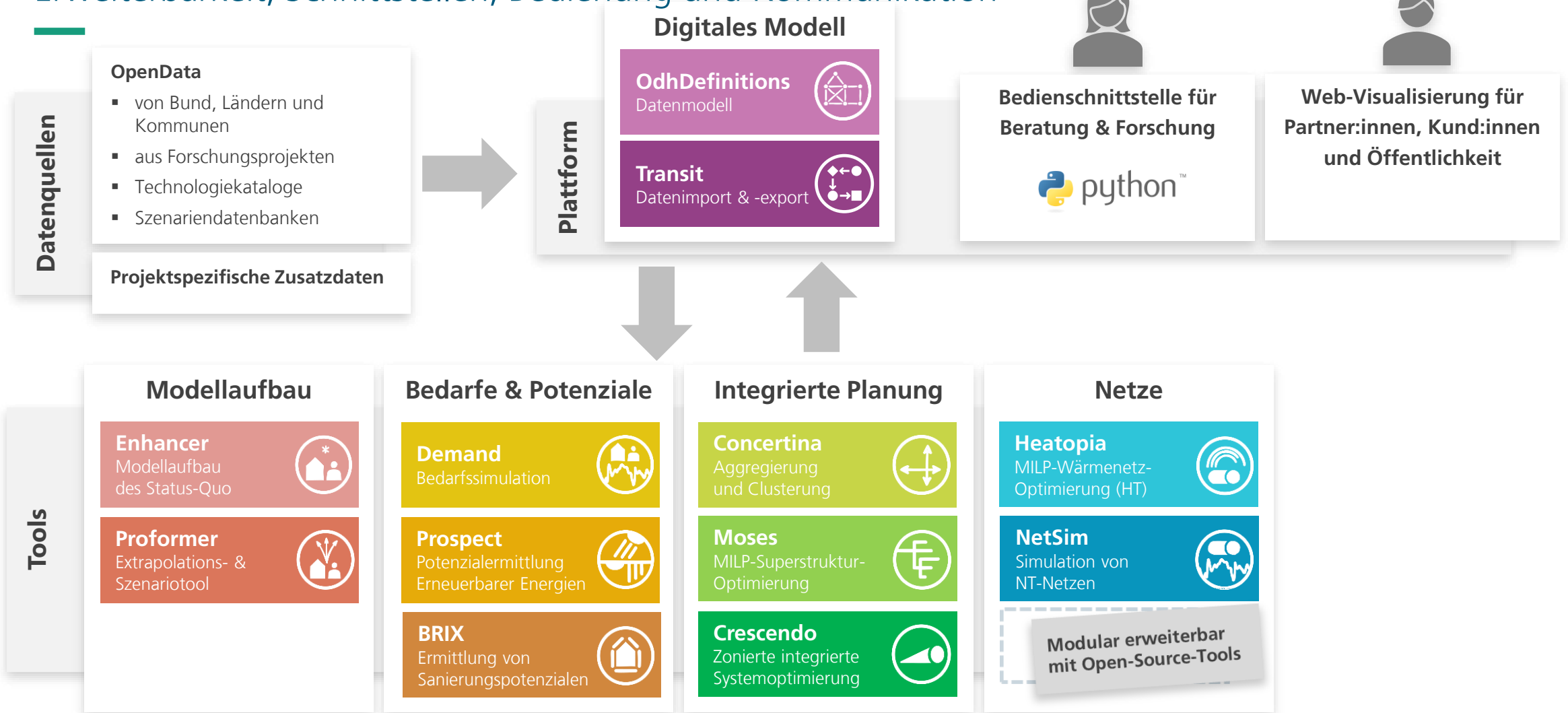
	$\dot{Q}_{k=BTES,t}^{res} = \dot{Q}_{k=BTES,t}^{out} - \dot{Q}_{k=BTES,t}^{in} \text{ for } t \in Z^{time} \quad (1)$
	$E_{k,t} = E_{k,t-1} + \Delta t (\dot{Q}_{k,t}^{in} - \dot{Q}_{k,t}^{out} - \dot{Q}_{k,t}^{loss}) \text{ for } t \in Z^{time}, k \in Z^{stor} \quad (2)$
	$E_{k \in Z^{stor}, t=0} = E_{k \in Z^{stor}, t=end} \quad (3)$
	$\dot{Q}_k^{nom} \leq \dot{q}_k^{nom, GHEs} \cdot h_k \cdot z_k \text{ for } k \in Z^{BTES} \quad (4)$
	$C_k^{inv} \leq h_k \cdot z_k \cdot c_k^{drill} \text{ for } k \in Z^{BTES} \quad (5)$

Verwendete Tools:

- *heatopia* (Sporleder et al., 2024)
- *GHEDesigner* (Spitler et al., 2022) für das Erdsondenspeichermodell

# Architektur der *ODH@Jülich*-Planungsplattform

Erweiterbarkeit, Schnittstellen, Bedienung und Kommunikation



# Vorstellung eines Fallbeispiels

Erstellung eines Knotenmodells mithilfe der ODH-Tools



**Gebäude und  
Verbräuche**

**Netztopologie**

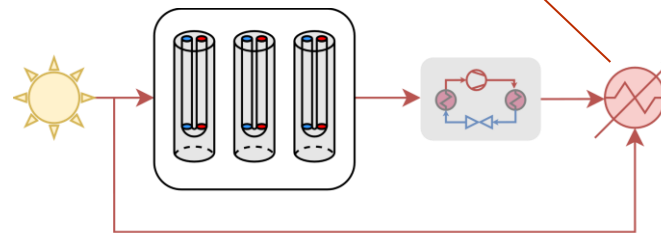
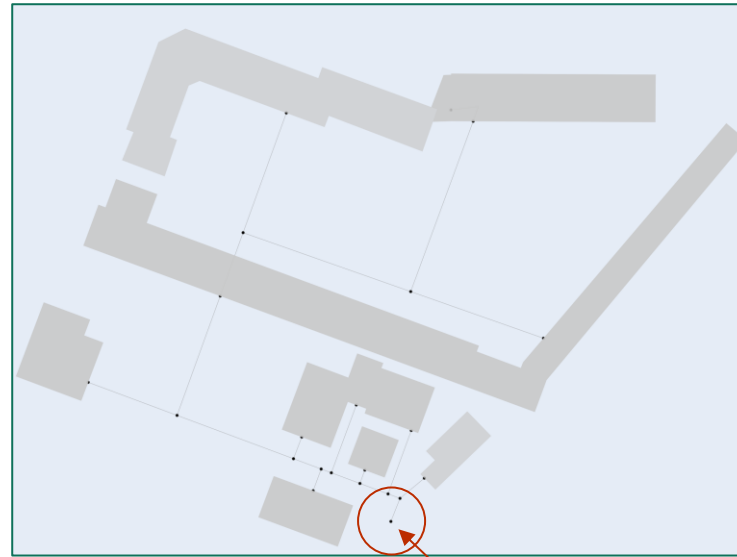
**Rechenbares  
Knotenmodell**

**Abb. 4.** Verschneidung der Gebäude und Netzebene zur Erstellung eines Knotenmodells



# Vorstellung eines Fallbeispiels

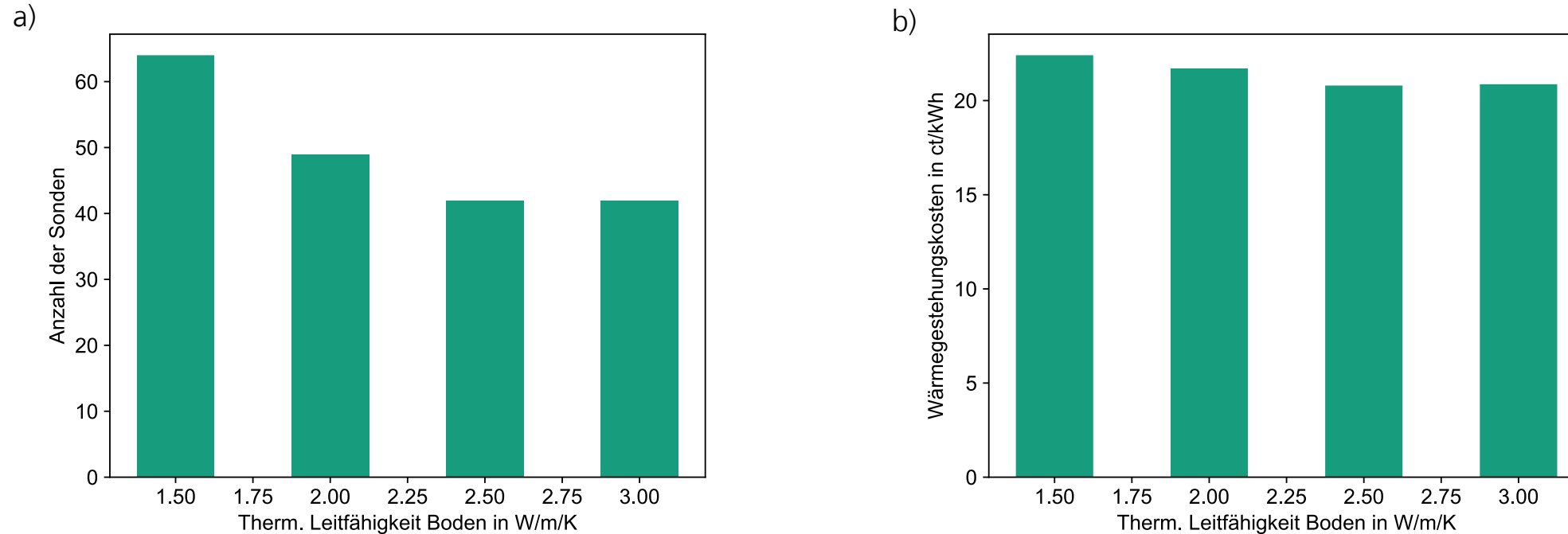
## Erzeugerpark



**Abb. 5.** Darstellung von Knotenmodell und Erzeugerpark.

# Sensitivitätsanalyse

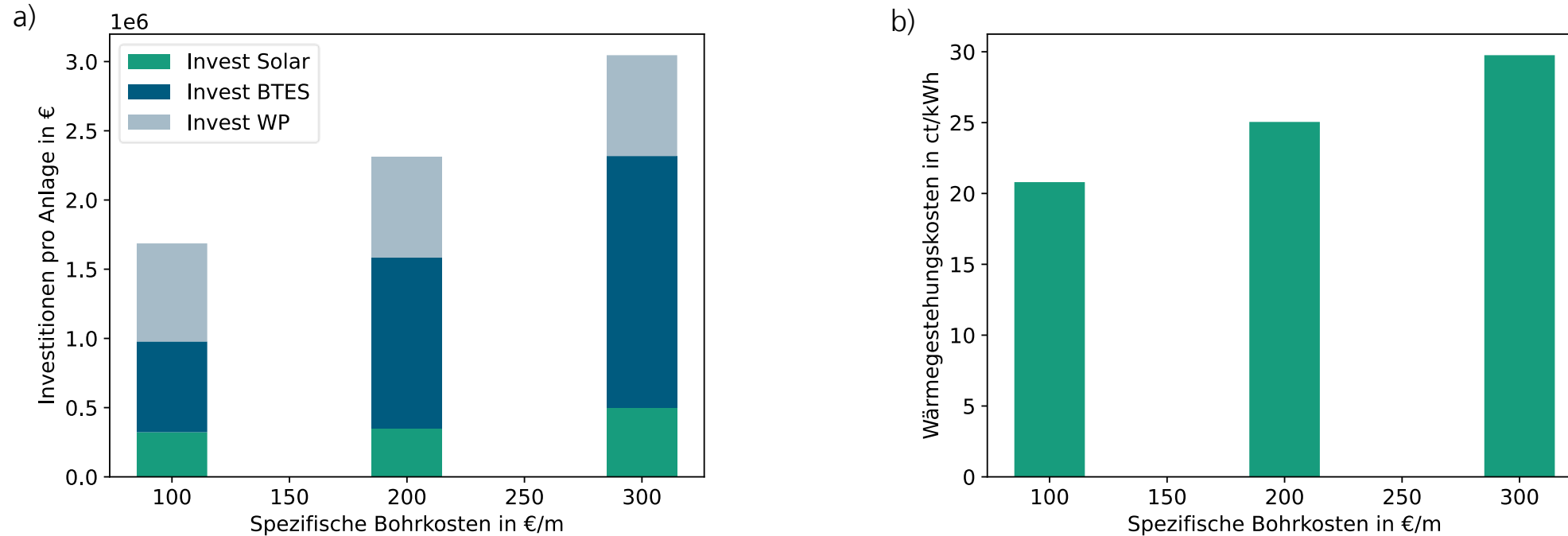
## Thermische Leitfähigkeit des Untergrunds



**Abb. 5.** a) Anzahl der Sonden und b) Wärmegestehungskosten des Gesamtsystems über einer variierten thermischen Wärmeleitfähigkeit des Untergrunds

# Sensitivitätsanalyse

## Spezifische Bohrkosten der Erdsonden

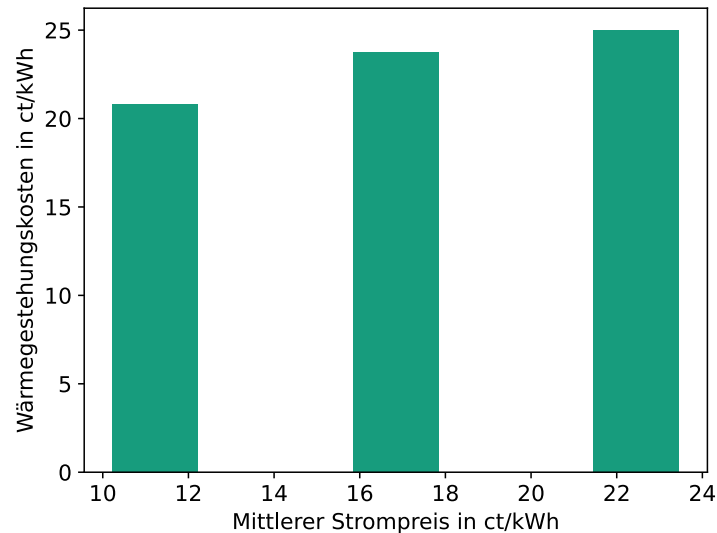


**Abb. 5.** a) Investitionen pro Anlage und b) Wärmegestehungskosten des Gesamtsystems über variierten Bohrkosten der Erdsonden

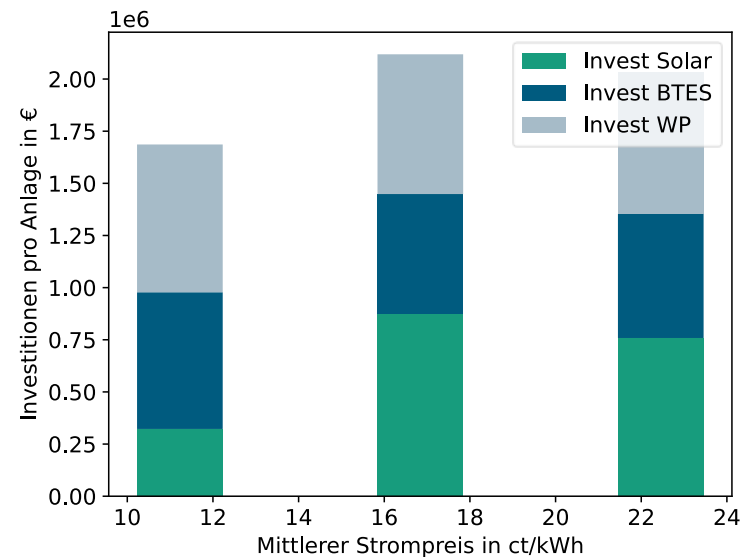
# Sensitivitätsanalyse

## Spezifische Bohrkosten der Erdsonden

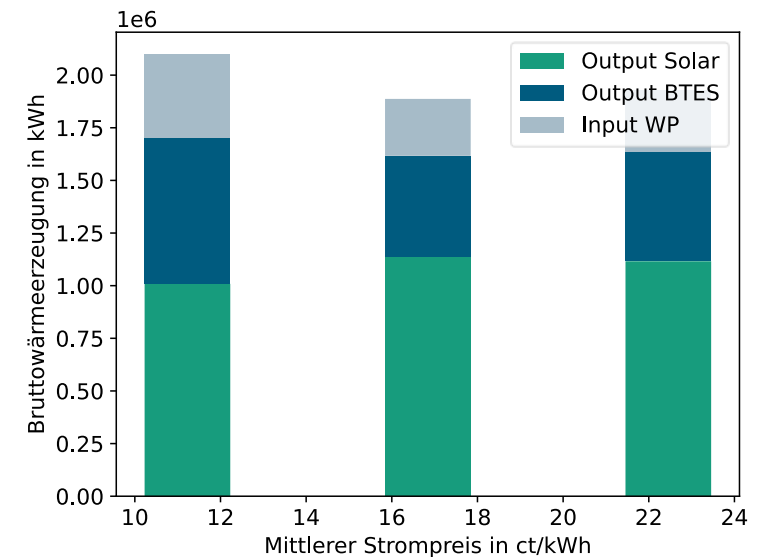
a)



b)



c)



**Abb. 5.** a) Investitionen pro Anlage und b) Wärmegestehungskosten des Gesamtsystems über variierten Bohrkosten der Erdsonden

# Zusammenfassung & Ausblick

## Solare Nahwärmesysteme mit Erdsondenspeicher

---

### Zusammenfassung

- Die **Wärmegestehungskosten** des Gesamtsystems **steigen...**
  - ...**leicht** über der **therm. Leitfähigkeit des Bodens**
  - ...**moderat** über dem **Strompreis**
  - ...**stark** über den **spezifischen Bohrkosten**
- **Dimensionierung und Betrieb** des Gesamtsystems hängen stark vom **opex**/Strompreis und weniger vom capex ab. Grund ist der Betrieb der Wärmepumpe.

### Ausblick

- Untersuchungen von...
  - ...**Erdsondenfeldern** mit **Niedertemperaturquellen** und **–netzen**
  - Die Konkurrenz/Zusammenspiel **von PV- und Solarthermieanlagen** in Nahwärmesystemen mit Erdsondenspeichern
- **Integration** von weiteren komplexen saisonalen Speichersystemen wie **Aquifer- oder Minenspeichern**

# Bibliography

---

- Beck, M., Bayer, P., Paly, M. de, Hecht-Méndez, J. and Zell, A., 2013, Geometric arrangement and operation mode adjustment in low-enthalpy geothermal borehole fields for heating, *Energy*, Vol. 49, pp. 434–443.
- Carslaw, H.S. and Jaeger, J.C., 1959, *Conduction Of Heat In Solids*, 2nd ed., Oxford University Press, London, Great Britain.
- [Cimmino 2018b] Cimmino, Massimo: pygfunction: an open-source toolbox for the evaluation of thermal response factors for geothermal borehole fields. Version: 2018. <http://dx.doi.org/10.1080/19401493.2017.1423390>. In: Proceedings of eSim 2018, the 10th conference of IBPSA-Canada Bd. 11. 2018. – DOI 10.1080/19401493.2017.1423390, S. 655–668.
- Eskilson, P. and Claesson, J., 1988, Simulation Model For Thermally Interacting Heat Extraction Boreholes, *Numerical Heat Transfer*, Vol. 13 No. 2, pp. 149–165.
- Gabrielli, P., Acquilino, A., Siri, S., Bracco, S., Sansavini, G. and Mazzotti, M., 2020, Optimization of low-carbon multi-energy systems with seasonal geothermal energy storage: The Anergy Grid of ETH Zurich, *Energy Conversion and Management: X*, Vol. 8, p. 100052.
- Kümpel, A., Stoffel, P. and Müller, D., 2022, Development of a Long-Term Operational Optimization Model for a Building Energy System Supplied by a Geothermal Field, *J. Therm. Sci (Journal of thermal science)*, Vol. 31 No. 5, pp. 1293–1301.
- Paly, M. de, Hecht-Méndez, J., Beck, M., Blum, P., Zell, A. and Bayer, P., 2012, Optimization of energy extraction for closed shallow geothermal systems using linear programming, *Geothermics*, Vol. 43, pp. 57–65.
- Peere, W. and Blanke, T., 2022, GHEtool: An open-source tool for borefield sizing in Python, *Journal of Open Source Software*, 7(76) No. 4406.
- Spitler, J., West, T. and Liu, X., 2022, Proceedings of the IGSHPA Research Track 2022, in *Proceedings of the IGSHPA Research Track 2022, 2022*, International Ground Source Heat Pump Association.

# Bibliography

---

Sporleder, M., Xu, Y., Rath, M., Ragwitz, M. and van Beek, M., 2023, 36th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems (ECOS 2023), in Smith, J.R. (Ed.), *36th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems (ECOS 2023)*, Las Palmas De Gran Canaria, Spain, 01.09.2020 - 05.09.2020, ECOS 2023, Las Palmas De Gran Canaria, Spain, pp. 2241–2252.

Sporleder, M., Rath, M. and Ragwitz, M., 2024, Solar thermal vs. PV with a heat pump: A comparison of different charging technologies for seasonal storage systems in district heating networks, *Energy Conversion and Management: X*, Vol. 22, p. 100564.