

---

# Datenbasierte Modellierung für den optimalen Systembetrieb von saisonalen Untergrundspeichern

Hannes Gernandt, Franziska Krenzlin, Willem Hagemann, und Johannes Schiffer



- [PUSH-IT – Piloting Underground Storage of Heat In geoThermal reservoirs \(push-it-thermalstorage.eu\)](https://push-it-thermalstorage.eu)
- Aufzeigen wie verschiedene Arten von geothermalen Reserviors (**ATES, BTES, MTES**) effizient genutzt werden können (**6 Demosites in Europa**, gefördert durch **Horizon 2020**, Laufzeit **2023-2026**)
- PUSH-IT umfasst **Entwicklung** der geothermalen Technologien und deren **Umsetzung** an den verschiedenen Standorten mit ihren unterschiedlichen Bedingungen
- Um das Wärmenetz optimal zu betreiben, betrachten wir **Energiemanagement auf der Verbraucher- und Erzeugerseite**
- Zusammenarbeit mit **VITO** und dem erprobten **STORM Controller** für das Verbrauchsmanagement in Quartieren
- In Push-IT soll der STORM Controller **erstmalig geothermale Erzeugung** berücksichtigen



# Push-IT Demosite in Bochum

**Lage:** Ruhr Universität Bochum (RUB)

## Energie-Infrastruktur:

- Wärmenetz der RUB, 2 BHKW (9 MW), 3 Gasboiler (105 MW)
- Wärmenetz versorgt zudem  $\approx$  4800 Wohnungen und 760 Häuser

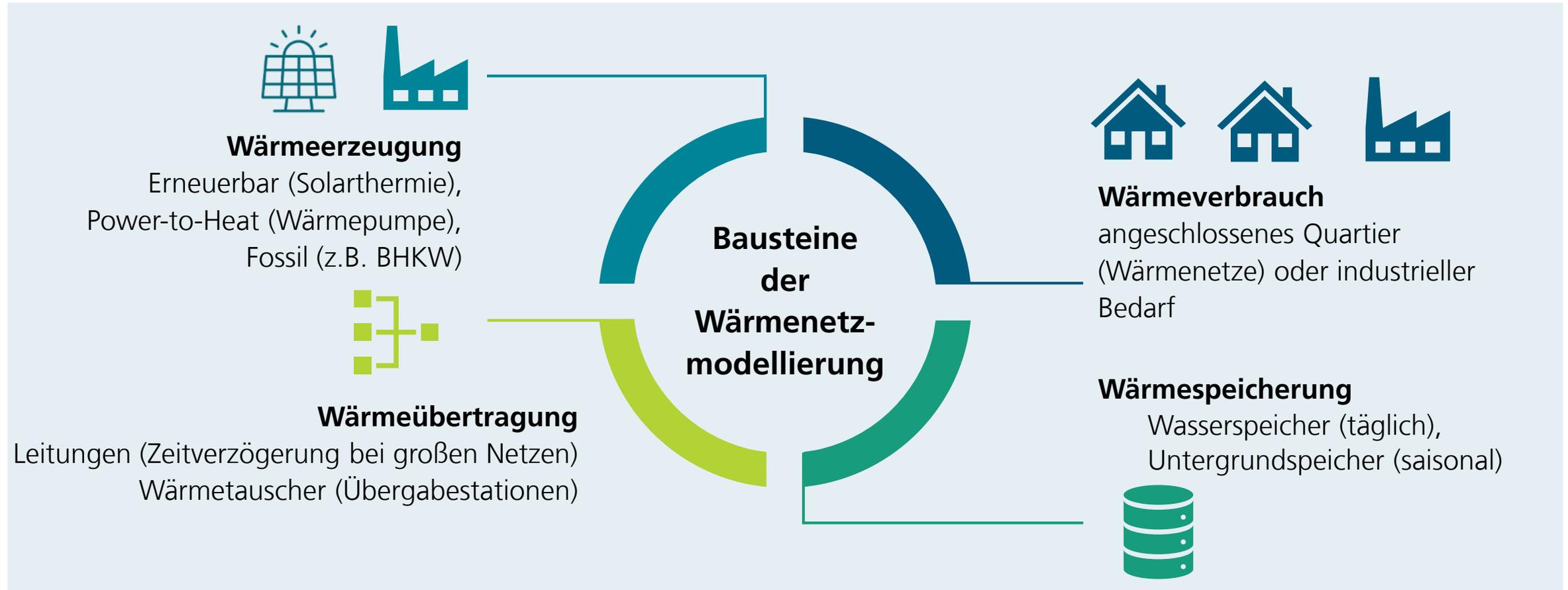
**Temperaturen:** 80-120°C (je nach Außentempereatur).

**Speichertechnologie:** Mine Thermal energy storage (MTES)

**Wärmequelle:** Abwärme aus Rechenzentrum (700 kW Spitzenlast)  
oder Rücklauf aus Kühlsystem



# Modellierung von Wärmenetzen



# Dynamische Modellierung von Wärmenetzen

- Dynamische Modellierung der Netze: **zeitliche Veränderung** der **Massenflüsse** und **Temperaturen**
- Basierend auf **thermodynamischen Gesetzen** ist die Temperaturänderung gegeben durch

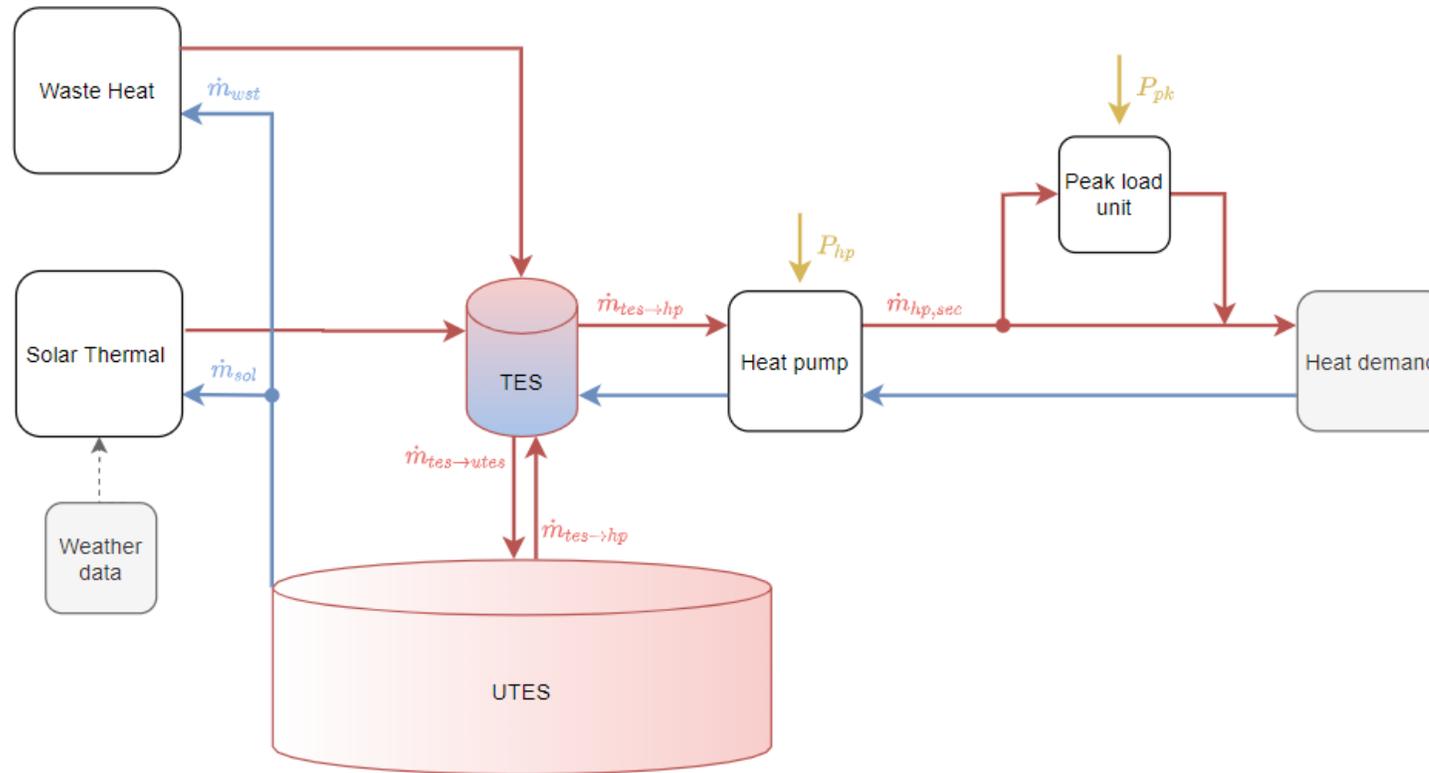
$$\dot{Q} = c_p \cdot \dot{m} \cdot \Delta T, \quad \Delta T = T_{out} - T_{in}$$

wobei  $\dot{m}$  der **Massenfluss**,  $T_{in}$  die **Eingangstemperatur** und  $T_{out}$  die **Ausgangstemperatur** der Komponenten beschreibt

- Im Folgenden wollen wir ein **Modell für ein typisches Netz** aufbauen
  - **Solarthermische** Erzeugung, **Abwärmenutzung** (z.B. Rechenzentrum), **Spitzenlastzeuger**
  - Ein **saisonalen Wärmespeicher** (UTES) und ein **Kurzzeitspeicher** (Wassertank)
  - **Wärmepumpe** zur Anbindung an ein Fernwärmenetz
- Dieses Modell wird anschließend für **Betriebsoptimierung** verwendet, um den **Strombedarf über ein Jahr zu minimieren**



# Wärmemodellnetz für die Betriebsoptimierung



- Skizze des Wärmenetzes mit dem **Kurzzeitspeicher (TES)**, dem **Untergrundspeicher (UTES)**
- Die Pfeile zeigen den Verlauf von **Masseflüssen  $\dot{m}$**  zwischen den Komponenten.

# Komponentenmodelle

- Die Wärmequellen **Solarthermie** und **Abwärme** werden beschrieben durch

$$\dot{Q}_{sol}(k) = c_p \cdot \dot{m}_{sol}(k) \cdot \Delta T_{sol}, \quad \text{und} \quad \dot{Q}_{wst}(k) = c_p \cdot \dot{m}_{wst}(k) \cdot \Delta T_{wst}.$$

Hierbei nehmen wir an, dass die Komponenten auf eine **konstante Temperaturdifferenz  $\Delta T$**  geregelt werden

- Die **Wärmepumpe** wird beschrieben durch

$$\dot{Q}_{hp,pri}(k) = COP(k) \cdot P_{hp}(k) = \dot{Q}_{hp,sec}(k) + P_{hp}(k),$$

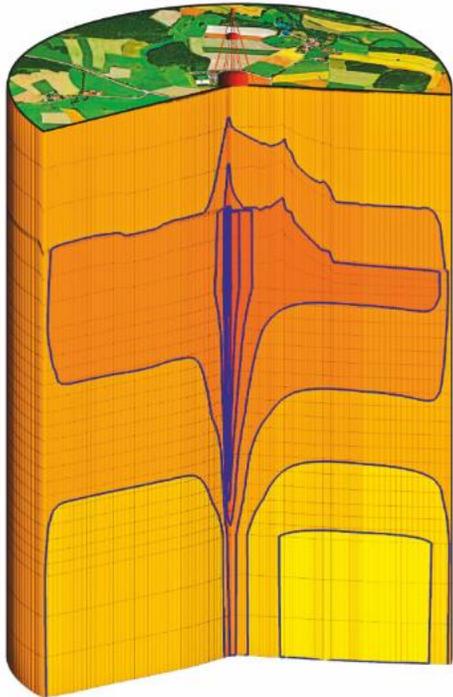
$$\dot{Q}_{hp,sec}(k) = c_p \cdot \dot{m}_{hp,sec}(k) \cdot \Delta T_{hp,sec}(k),$$

$$\dot{Q}_{hp,pri}(k) = c_p \cdot \dot{m}_{hp,pri}(k) \cdot \Delta T_{hp,pri}(k),$$

$$COP(k) = \eta \cdot \frac{T_{hp,pri}(k)}{T_{hp,pri}(k) - T_{hp,sec}(k)},$$

wobei **COP** der Coefficient Of Performance der Wärmepumpe ist und **pri** und **sec** für die Primär- und Sekundarseite stehen

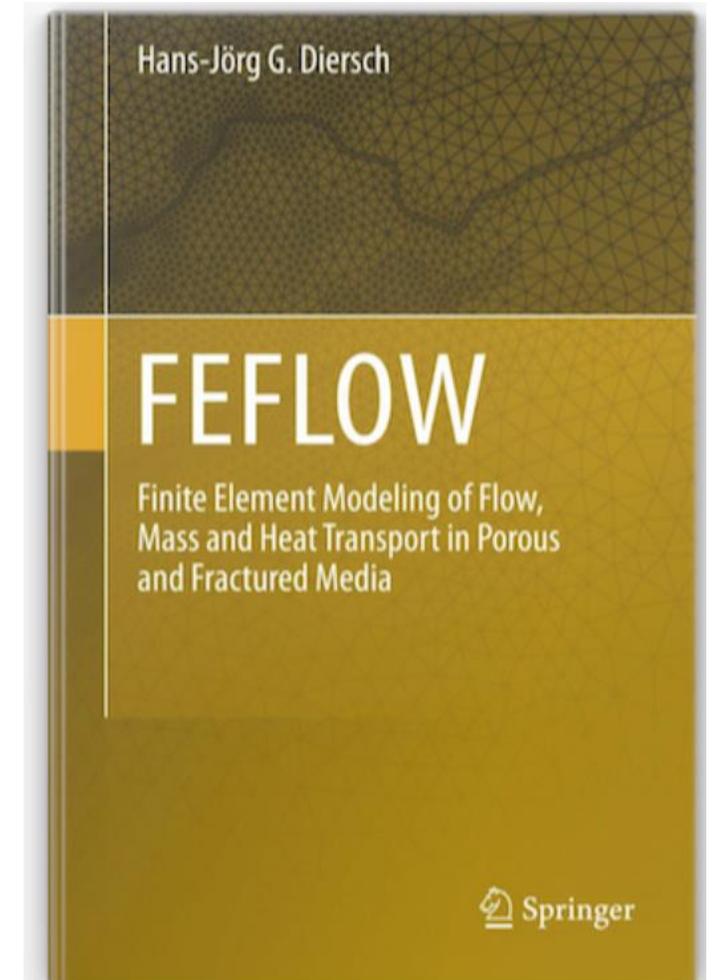
# Finite-Elemente Modellierung von Untergrundspeichern



Schnitt durch ein Tiefengeothermie-Modell:

Darstellung des Elementnetzes und der berechneten Temperaturen.

- **Finite Elemente Modelle** ermöglichen eine detaillierte Beschreibung des Wärmetransfers und von Grundwasserflüssen
- In Push-IT arbeiten wir mit **FEFLOW** und **Spring**
- **Kopplung mit Netzsimulationssoftware** (Dymola, SimulationX), um den Speicher einzubinden
- Modellkomplexität führt zu **langen Rechenzeiten**
- Wie kann man den Speicher auch **in die Optimierung einbinden?**



# Modellierung des Untergrundspeichers

- **Vorlage:** Heer, Fiorentini, Baldini '23 in welcher das Design von **Sondenspeichern (BTES)** optimiert wurde
- Hierbei wurde die Dynamik der gemittelten Speichertemperatur wie folgt modelliert

$$T_{BT}(k+1) = T_{BT}(k) + \frac{\Delta t}{\rho_g c_{p,g} V} \left( \underbrace{-P_{\text{discharge}}(k)}_{\text{heat pump}} + \underbrace{P_{\text{charge}}(k)}_{\substack{\text{waste heat} \\ \text{or solar thermal}}} - \underbrace{UA(T_{BT}(k) - T_a(k)) - k_g h \frac{D}{2} (T_{BT}(k) - T_g)}_{\text{thermal losses}} \right)$$

- **Vorteil:** Modell kann einfach in die Betriebsoptimierung integriert werden und führt zu einer geringen Rechenzeit aufgrund der vereinfachten Temperaturbeschreibung
- **Nachteil:** Viele unbekannte (geschätzte) Parameter, strukturelle Annahmen an den BTES
- **Fragen:** 1) Lässt sich dieser Ansatz auf andere Speichertypen übertragen?  
2) Wie kann die Genauigkeit des Modells erhöht werden?

# Herleitung von dynamischen Black Box Modellen

- Wir betrachten die folgende allgemeine Klasse von linearen dynamischen Systemen

$$\begin{aligned}x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) + d(k), \quad k \geq 0, & x(0) &= x_0, \\y(k) &= Cx(k) + Du(k),\end{aligned}$$

wobei  $x(k) \in \mathbb{R}^n$  der **Zustand**,

$u(k) \in \mathbb{R}^m$  ist der **Systemeingang** (z.B. thermische Eingangsleistung),

$d(k) \in \mathbb{R}^n$  ist eine **unbekannte Störgröße** (z.B. Bodentemperatur) und

$y(k) \in \mathbb{R}^m$  ist der **Systemausgang** (z.B. thermische Ausgangsleistung)

- Die Matrizen  $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ,  $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$ ,  $C \in \mathbb{R}^{k \times n}$  and  $D \in \mathbb{R}^{m \times m}$  sind unbekannt und sollen aus Simulationszeitreihen  $(u(k), y(k))$ ,  $k \geq 0$  bestimmt werden.



# Kalman-Ho Algorithmus: Vorbereitungen

- Wir entfernen zunächst die unbekannte Störung, indem wir zwei Sätze an Simulationsdaten  $\{(u_1(k), y_1(k))\}_{k \geq 0}$  und  $\{(u_2(k), y_2(k))\}_{k \geq 0}$  erzeugen

- Differenz der Lösungen hängt dann nicht mehr vom Anfangswert und von den Störungen ab

$$x_2(k) - x_1(k) = \sum_{j=0}^{k-1} A^{k-j-1} B (u_2(j) - u_1(j)),$$

- Für den Eingang  $u(0) = 1$  und  $x(0)=0$  erhalten wir

$$D = Cx(0) + Du(0) = y(0), \quad B = Ax(0) + Bu(0) = x(1), \quad CB = Cx(1) + Du(1) = y(1), \dots$$

# Kalman-Ho Algorithmus: Vorbereitungen

Außerdem definieren wir mit den Simulationsdaten die **Hankelmatrix** und die „**shifted**“ **Hankelmatrix**

$$H_{r,r'} = \begin{pmatrix} y(1) & y(2) & y(3) & \dots & y(r') \\ y(2) & y(3) & y(4) & \dots & y(r' + 1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ y(r) & y(r + 1) & y(r + 2) & \dots & y(r' + r - 1) \end{pmatrix},$$

$$\bar{H}_{r,r'} = \begin{pmatrix} y(2) & y(3) & y(4) & \dots & y(r' + 1) \\ y(3) & y(4) & y(5) & \dots & y(r' + 2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ y(r + 1) & y(r + 2) & y(r + 3) & \dots & y(r' + r) \end{pmatrix}.$$

# Kalman-Ho Algorithmus

**Kalman-Ho Algorithmus**, siehe z.B. Section 3.3 in De Schutter (2000), zur Bestimmung von  $(A, B, C, D)$  besteht aus den folgenden Schritten:

1. Wähle  $r$  **hinreichend groß** und berechne  $\rho = \text{rank } H_{r,r}$
2. Bestimme invertierbare  $U, V \in \mathbb{R}^{n \times n}$  **sodass folgendes gilt**  $UH_{r,r}V = \begin{pmatrix} I_\rho & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$ ,  
wobei  $I_\rho \in \mathbb{R}^{\rho \times \rho}$  die Einheitsmatrix ist
3. Setze  $E_{p,q} = \begin{pmatrix} I_p & 0_{p,q-p} \end{pmatrix}$  und **definiere die Systemmatrizen** wie folgt

$$A = E_{\rho,r} P \bar{H}_{r,r} Q E_{\rho,r}^\top, \quad B = E_{\rho,r} P H_{r,r} E_{1,r}^\top, \quad C = E_{1,r} H_{r,r} Q E_{\rho,r}^\top, \quad D = y(0).$$

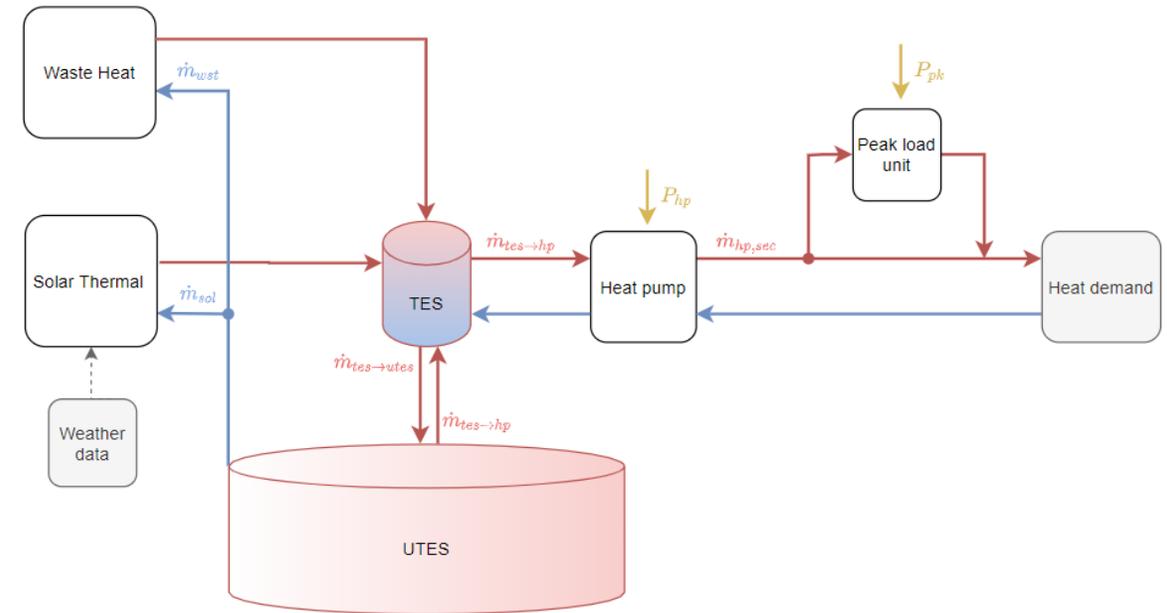
# Simulationsergebnisse für ein Beispielnetz

- Für das Beispielnetz optimieren wir die von Wärmepumpe und Spitzenlasterzeuger verbrauchte **elektrische Leistung**  $P_{pk}$  und  $P_{hp}$  mit konstanten Preisen  $v_{pk}$  und  $v_{hp}$

$$f(P_{hp}, P_{pk}) = \sum_{i=1}^N v_{pk} P_{pk}(i) + v_{hp} P_{hp}(i) \rightarrow \text{Min}$$

über **ein Jahr mit stündlicher Auflösung** ( $N = 8760$  Zeitschritte)

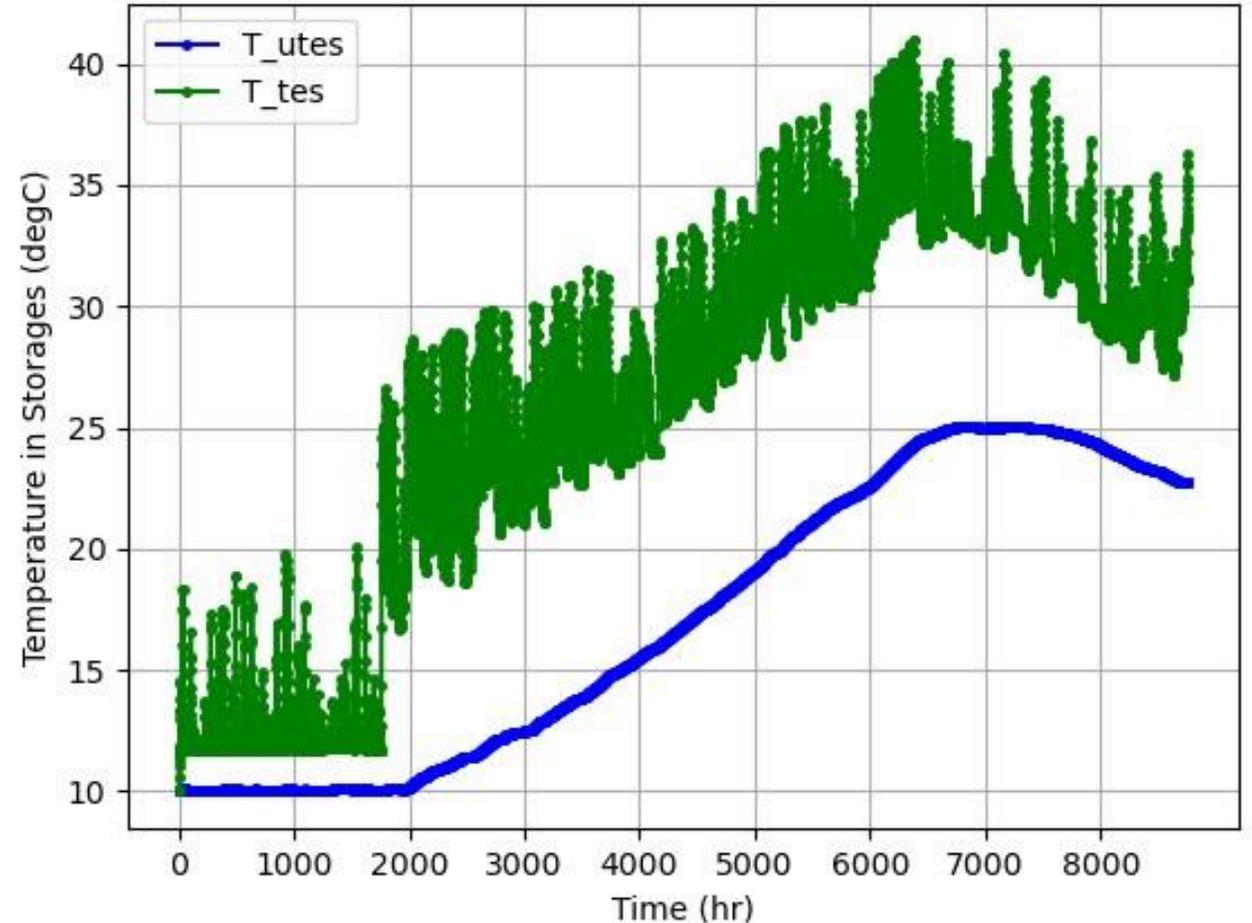
- Die **FEFLOW Daten** für einen Sondenwärmespeicher wurden von der TU Darmstadt (danke an Max Ohagen) bereitgestellt
- Um die Simulationsdaten nachzubilden war eine Ordnung des reduzierten Systems von  $r = 1$  ausreichend



# Simulationsergebnisse für ein Beispielnetz

## Verhalten der Wärmespeicher:

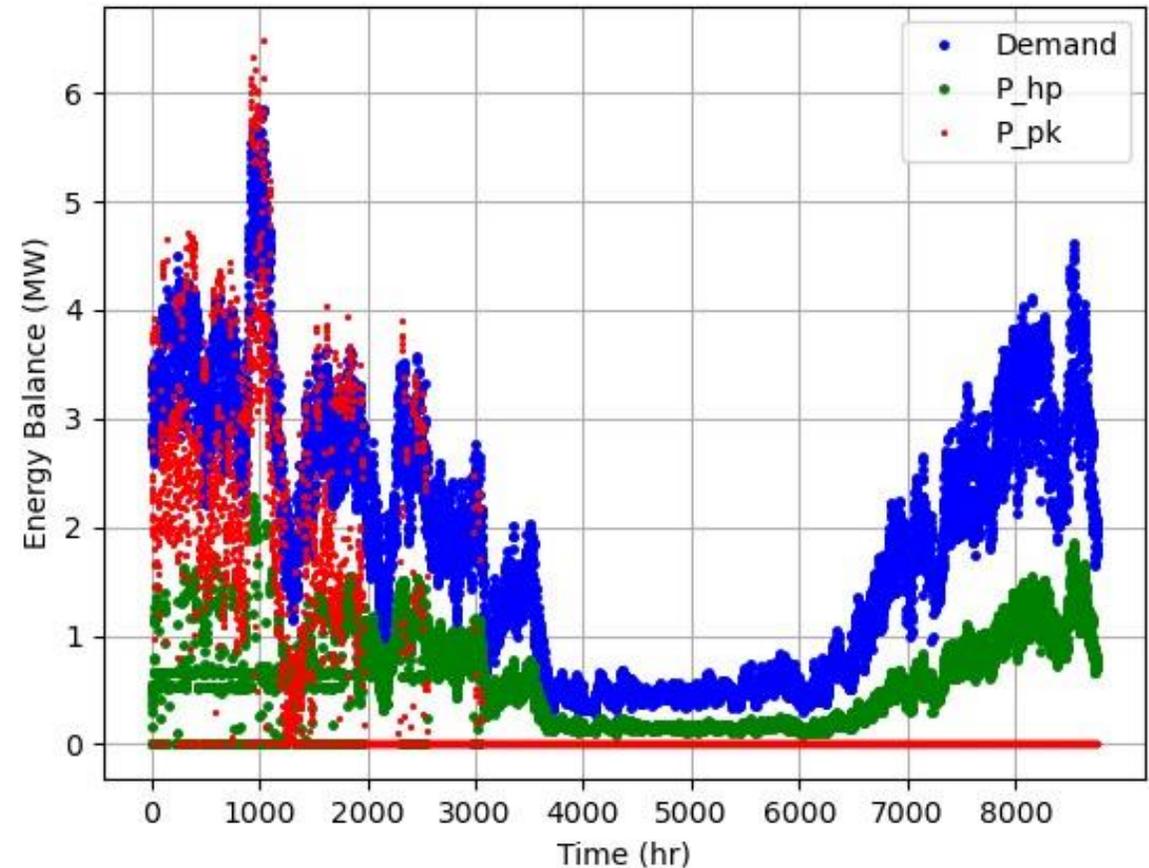
- große **tägliche Schwankungen** im TES
- **Höheres Temperaturniveau** im TES gegenüber UTES
- Untere Schanke  $T_{utes} \geq 10 \text{ °C}$  wird im
- **Saisonal Effekt:** Optimierung startet im Januar
  - UTES Temperatur wird im Januar mit  $10 \text{ °C}$  initialisiert
  - Das Temperaturniveau im Speicher bleibt von Januar bis März niedrig
  - Aufladen im Sommer, Ausspeichern ab November
- Der UTES kann ganzjährig zum Kühlen verwendet werden



# Simulationsergebnisse für ein Beispielnetz

## Verhalten des Wärmebedarfs:

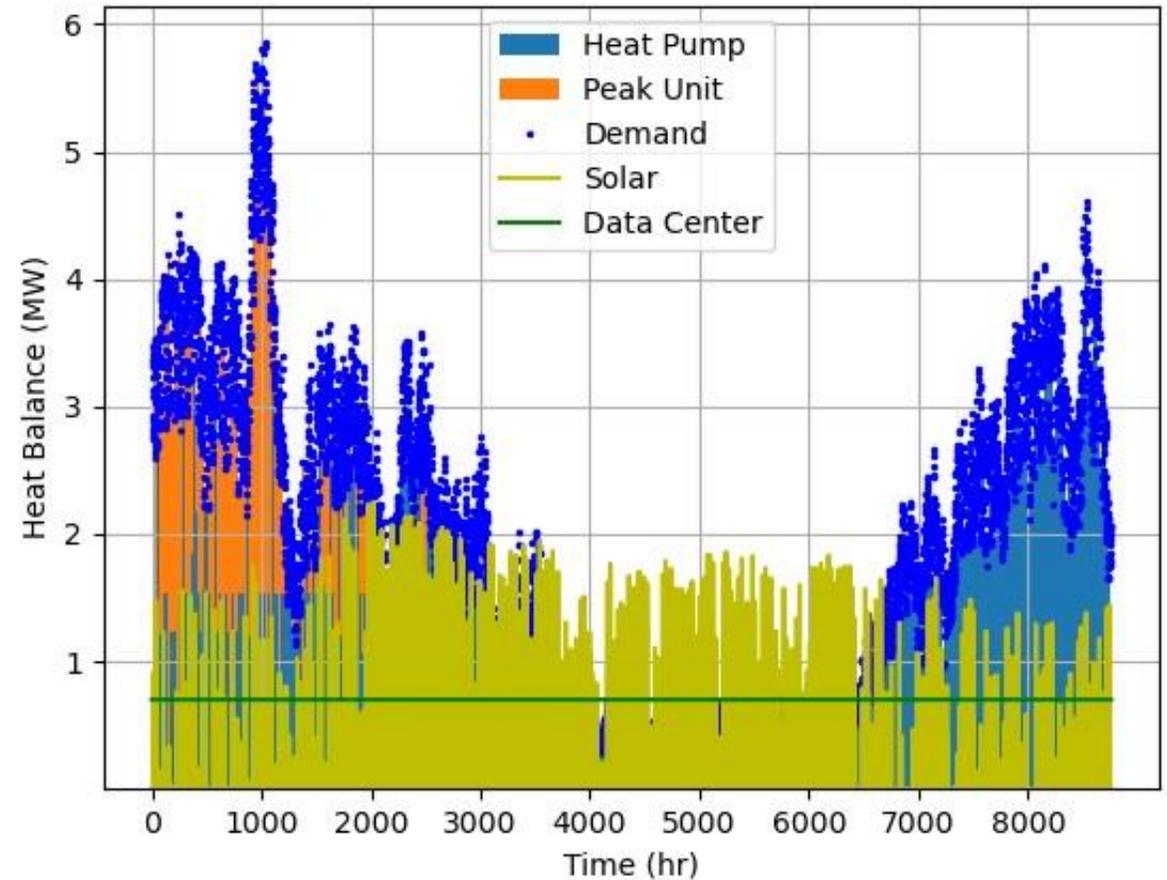
- **Typisches Lastprofil** mit Lastspitzen in den Wintermonaten
- **Spitzenlastezeuger** ist überwiegend Null bei aufgeladenem Speicher
- **Spitzenlastezeuger** wird häufig verwendet im Zeitraum Januar- März, da der UTES noch nicht geladen ist
- **Lastdeckung:**  $Demand = COP \cdot P_{hp} + 0.9 P_{pk}$



# Simulationsergebnisse für ein Beispielnetz

## Verhalten des Wärmebedarfs:

- **Typisches Lastprofil** mit Lastspitzen in den Wintermonaten
- **Spitzenlastezeuger** ist überwiegend Null bei aufgeladenem Speicher
- **Spitzenlastezeuger** wird häufig verwendet im Zeitraum Januar- März, da der UTES noch nicht geladen ist
- **Lastdeckung:**  $Demand = COP \cdot P_{hp} + 0.9 P_{pk}$



# Zusammenfassung und Ausblick

1

## Modellierung des Wärmenetzes

Massenflüsse und Temperaturen, bisher keine Rohrmodelle, mehr Temperaturniveaus

2

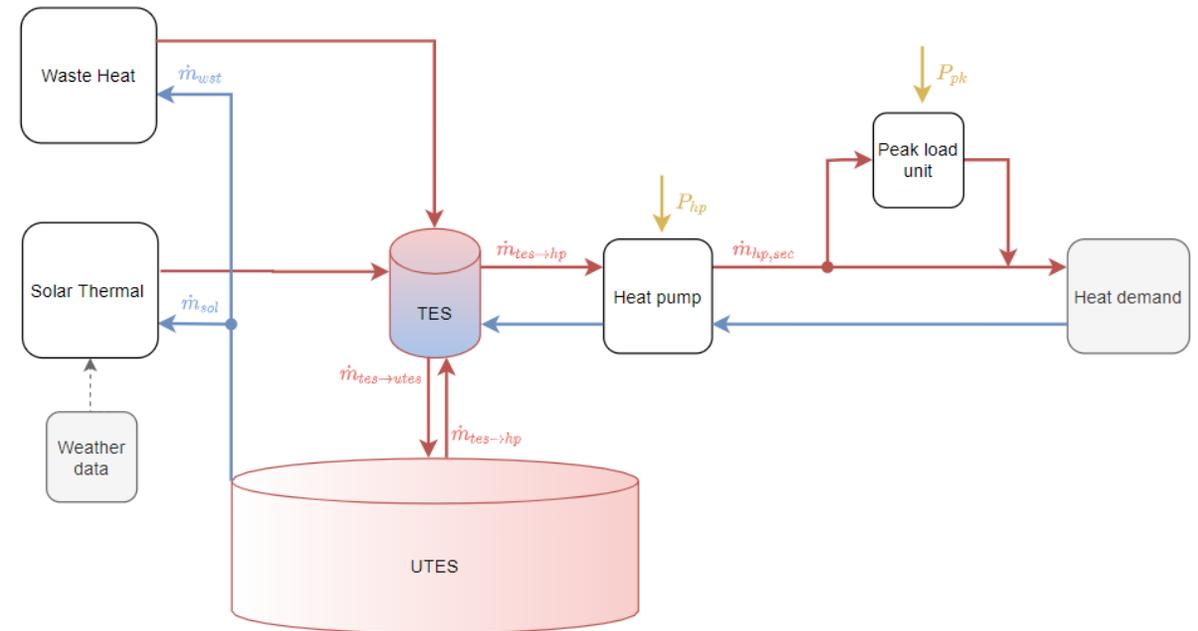
## Blackbox Modell für UTES

Kalman-Ho Algorithmus, Erweiterungen auf nichtlineares Systemverhalten (z.B. Sindy)

3

## Fallstudie für ein Wärmenetz

Vorbild Bochum, SONDENSPEICHER statt MTES, Optimierung über ein Jahr mit festen Strompreisen



Vielen Dank für Ihre  
Aufmerksamkeit!

---

**Fragen?**

# Kontakt

---

**Hannes Gernandt**  
**Fraunhofer IEG Cottbus**  
**Energiemanagement und Regelung**  
**Gulbener Straße 23**  
**03096 Cottbus**

[hannes.gernandt@ieg.fraunhofer.de](mailto:hannes.gernandt@ieg.fraunhofer.de)



 [info@project-PUSH-IT.eu](mailto:info@project-PUSH-IT.eu)

 [www.project-PUSH-IT.eu](http://www.project-PUSH-IT.eu)

 [project-PUSH-IT\\_eu](https://twitter.com/project-PUSH-IT_eu)

 [project-PUSH-IT\\_eu](https://www.linkedin.com/company/project-PUSH-IT_eu)

# Weitere Simulationsergebnisse: COP und Massenflüsse

