

# Energieeinsparung durch Einbinden von latenten thermischen Energiespeichern in industrielle Prozesse mittels mehrperiodischer Wärmeintegration

**Graz, 16.-18. Februar 2022**

**Simon Möhren**

**SWK E<sup>2</sup> - Institut für Energietechnik und Energiemanagement  
Hochschule Niederrhein**



**Hochschule Niederrhein**  
University of Applied Sciences  
**SWK E<sup>2</sup>**

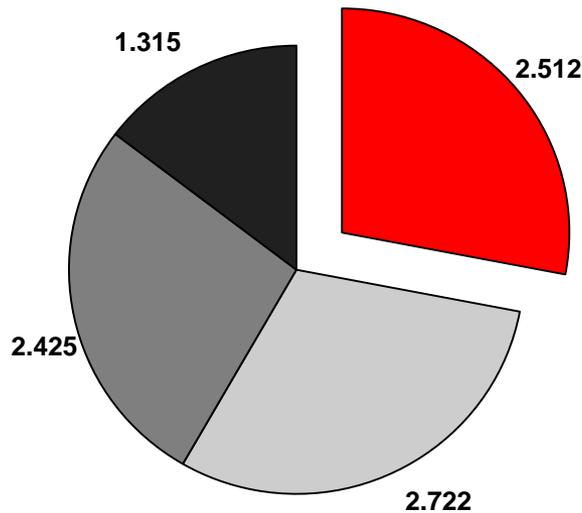
# Inhalt

1. Einleitung
2. Methode
3. Fallbeispiel
4. Ergebnisse

# 1. Einleitung

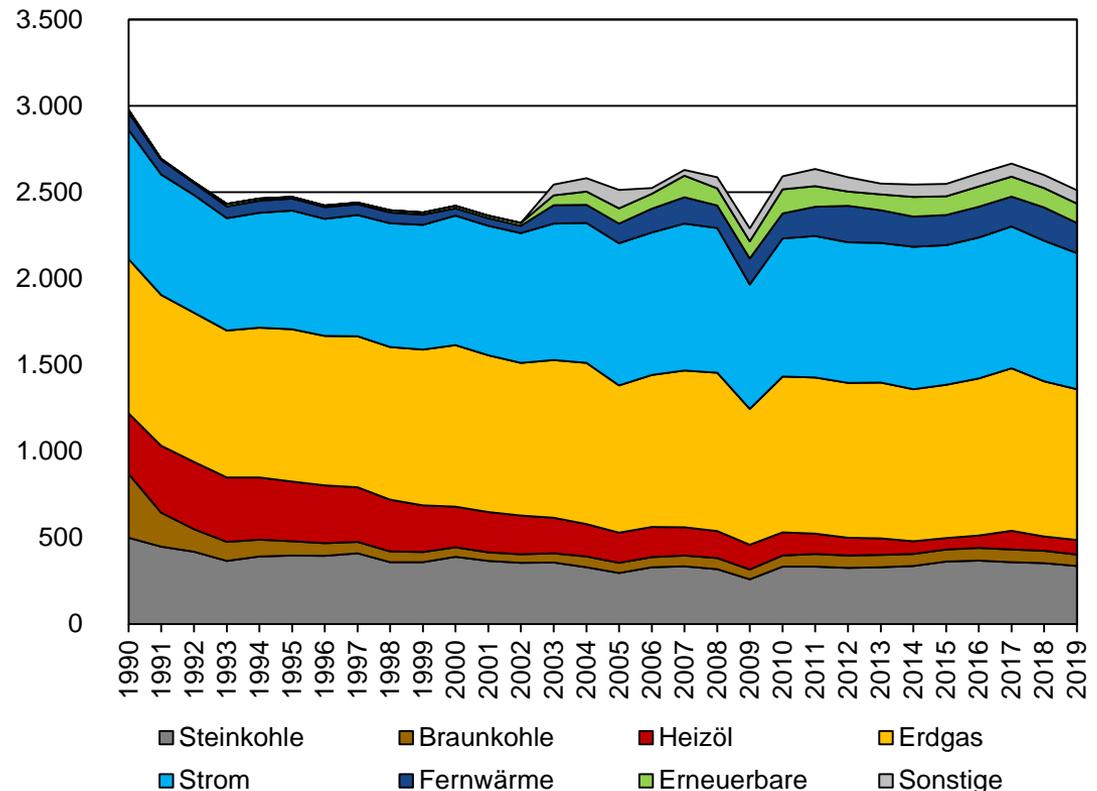
## Endenergiebedarf der deutschen Industrie in PJ nach Sektor und Energieträger

Endenergiebedarf in PJ nach Sektoren



■ Industrie □ Verkehr ■ Haushalte ■ GHD

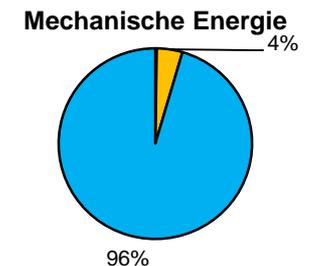
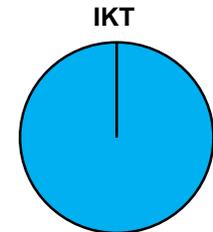
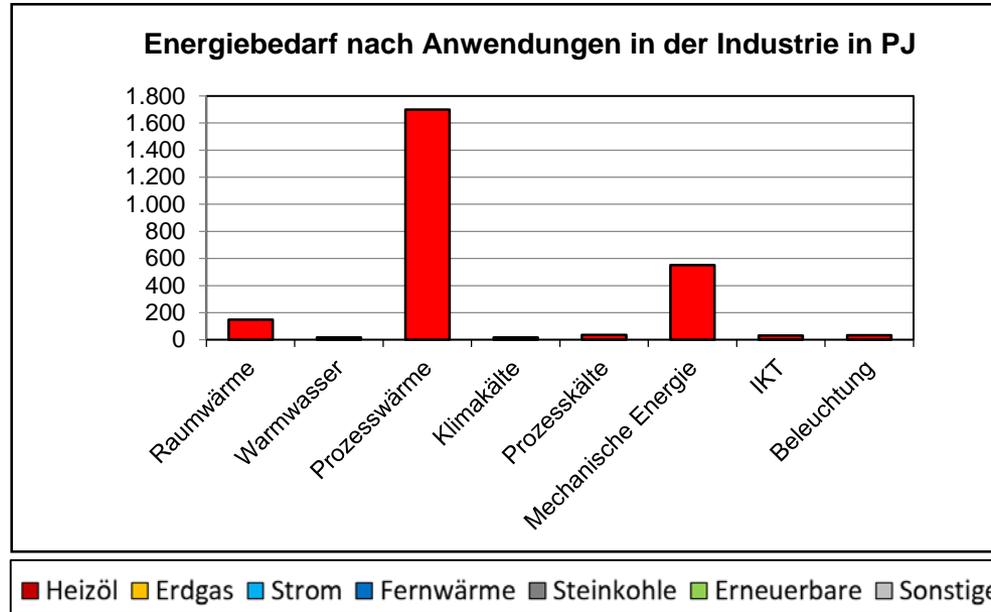
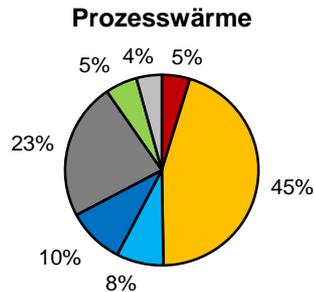
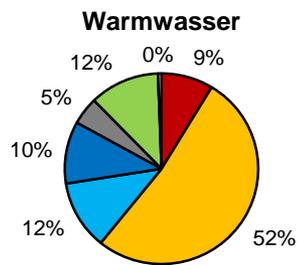
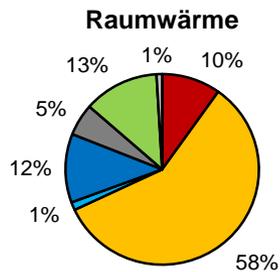
Endenergiebedarf der Industrie in PJ



Quelle: BMWi Energiedaten, Stand 2021

# 1. Einleitung

## Endenergiebedarf der deutschen Industrie in PJ nach Anwendung und Energieträger



Quelle: BMWi Energiedaten, Stand 2021

## 2. Methode

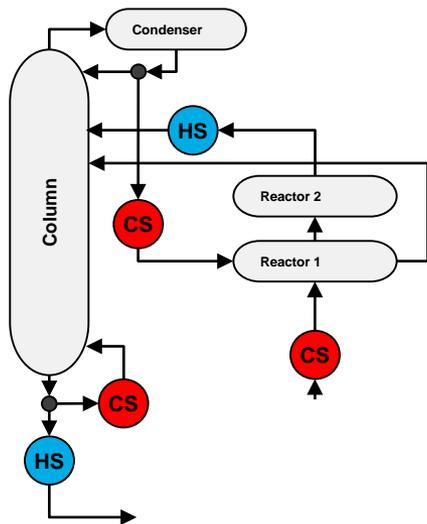
# Grundlagen Wärmeintegration



Überbegriff für Methoden mit dem Ziel, den externen Energiebedarf eines Systems durch optimales Verknüpfen von Wärmequellen und Wärmesenken (Wärmeübertrager-Netzwerk) zu minimieren.

- Pinch Analyse
- Mathematische Optimierung

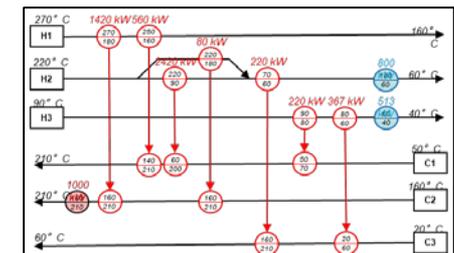
Morar und Agachi (2010): Review: Important contributions in development and improvement of the heat integration techniques, *Computers and Chemical Engineering* 34, 1171-1179



→ Formulieren aller Wärmequellen und Wärmesenken als Wärmetransportproblem

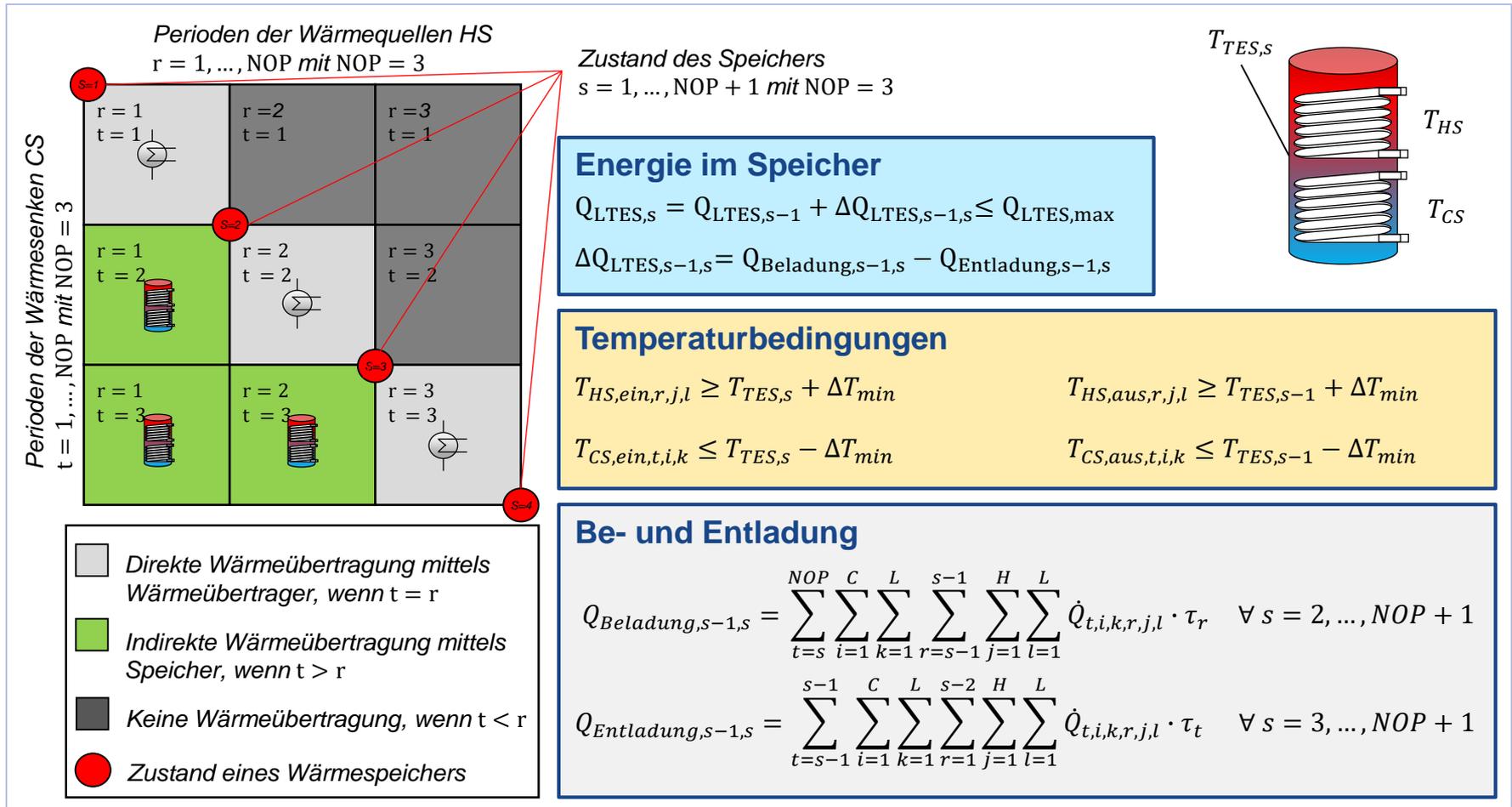
→ Minimieren von Energiebedarfs, THG-Emissionen oder Kosten des Gesamtsystems

→ Darstellen als Wärmeübertragernetzwerk



## 2. Methode

### Einbinden eines thermischen Energiespeichers (Sensibel oder latent)



# 2. Methode

## Problemstellung und Lösungsansatz

Perioden der Wärmequellen HS  
r = 1, ..., NOP mit NOP

Perioden der Wärmesenken CS  
t = 1, ..., NOP mit NOP

r = 1 t = 1	r = 2 t = 1
r = 1 t = 2	r = 2 t = 2
r = 1 t = 3	r = 2 t = 3

  Direkte Wärmeübertragung  
 Wärmeübertrager, wenn  $t > r$   
  Indirekte Wärmeübertragung  
 Speicher, wenn  $t > r$   
  Keine Wärmeübertragung  
● Zustand eines Wärmespeichers

**Fragestellung**

Speichertemperatur und Energie im Speicher sind zum Zeitpunkt der Problemformulierung unbekannt, aber notwendig zur Überprüfung der Temperaturbedingungen!

**Temperaturbedingungen**

$$T_{HS,ein,r,j,l} \geq T_{TES,s} + \Delta T_{min}$$

$$T_{HS,aus,r,j,l} \geq T_{TES,s-1} + \Delta T_{min}$$

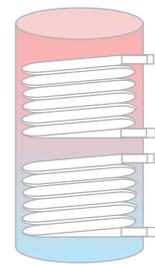
$$T_{CS,ein,t,i,k} \leq T_{TES,s} - \Delta T_{min}$$

$$T_{CS,aus,t,i,k} \leq T_{TES,s-1} - \Delta T_{min}$$

**Be- und Entladung**

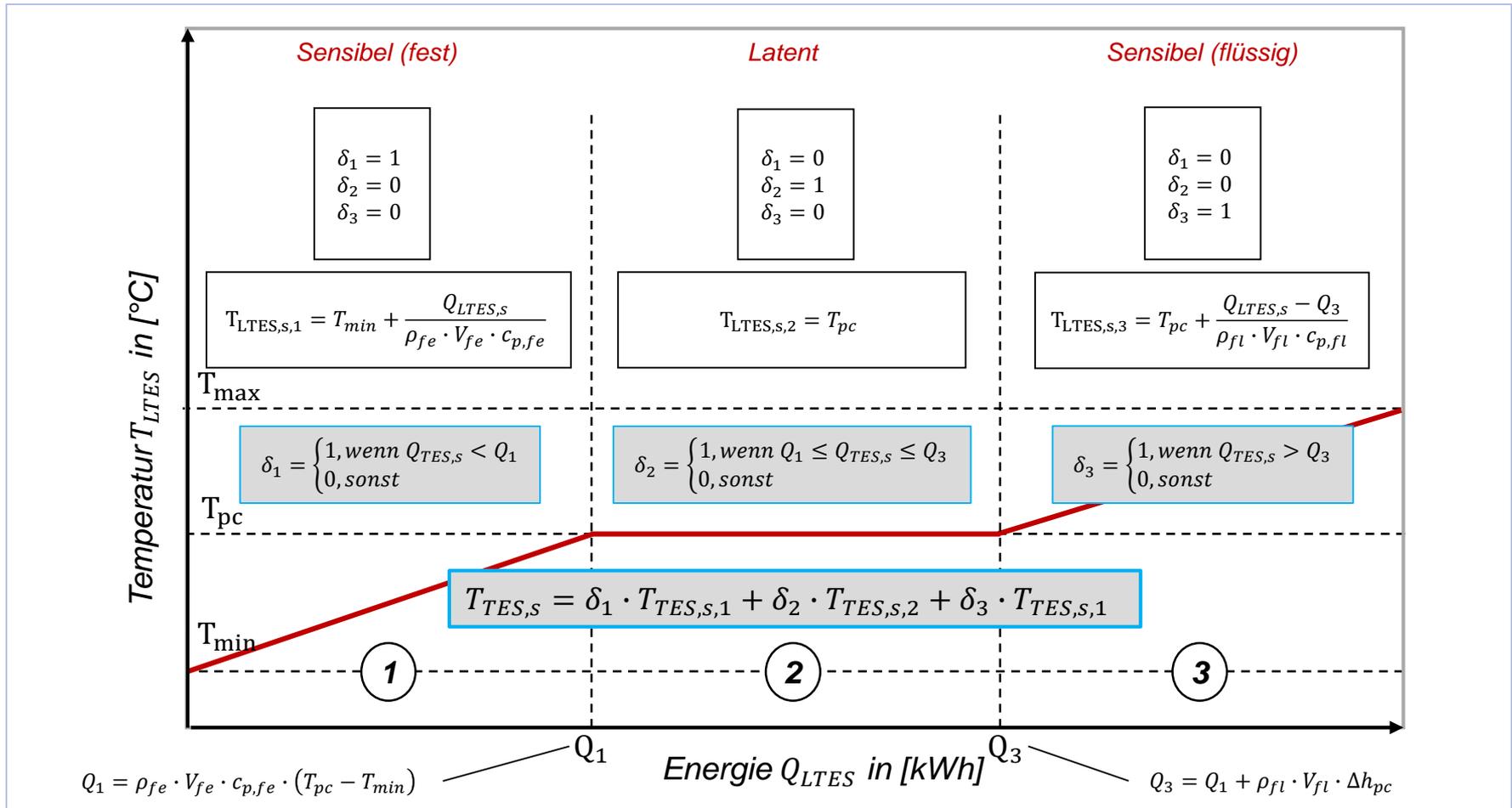
**Lösung**

- Formulierung mit Binärvariablen und Big-M-Formulierungen.
- Linearisierungen mit weiteren Hilfsvariablen



## 2. Methode

# Zusammenhang zwischen Speichertemperatur und gespeicherter Energie



## 2. Methode

### Linearisierung mit Hilfe von Hilfsvariablen

#### Einsetzen der Temperaturfunktionen

$$T_{TES,s} = \delta_1 \cdot \left( T_{min} + \frac{Q_{TES,s}}{\rho_{fe} \cdot V_{fe} \cdot c_{p,fe}} \right) + \delta_2 \cdot T_{pc} + \delta_3 \cdot \left( T_{pc} + \frac{Q_{TES,s} - Q_3}{\rho_{fl} \cdot V_{fl} \cdot c_{p,fl}} \right)$$

**Problem:** Nicht-Lineares Optimierungsproblem

→ Linearisierung durch Einfügen von Hilfsvariablen  $z_1$  und  $z_3$  mit  $z_1, z_3 \in \mathbb{R}$

$$T_{TES,s} = \left[ \delta_1 \cdot T_{min} + \frac{z_1}{\rho_{fe} \cdot V_{fe} \cdot c_{p,fe}} \right] + [\delta_2 \cdot T_{pc}] + \left[ \delta_3 \cdot T_{pc} + \frac{z_3}{\rho_{fl} \cdot V_{fl} \cdot c_{p,fl}} - \frac{\delta_3 \cdot Q_3}{\rho_{fl} \cdot V_{fl} \cdot c_{p,fl}} \right]$$

**Linearisierung:**  $z_1 = \delta_1 \cdot Q_{TES,s}$

$$0 \leq z_1 \leq Q_1$$

$$0 \leq z_1 \leq Q_1 \cdot \delta_1$$

$$Q_{TES,s} - (1 - \delta_1) \cdot Q_1 \leq z_1 \leq Q_{TES,s}$$

$$z_1 \leq Q_{TES,s} + (1 - \delta_1) \cdot Q_1$$

**Linearisierung:**  $z_3 = \delta_3 \cdot Q_{TES,s}$

$$0 \leq z_3 \leq Q_{TES,max}$$

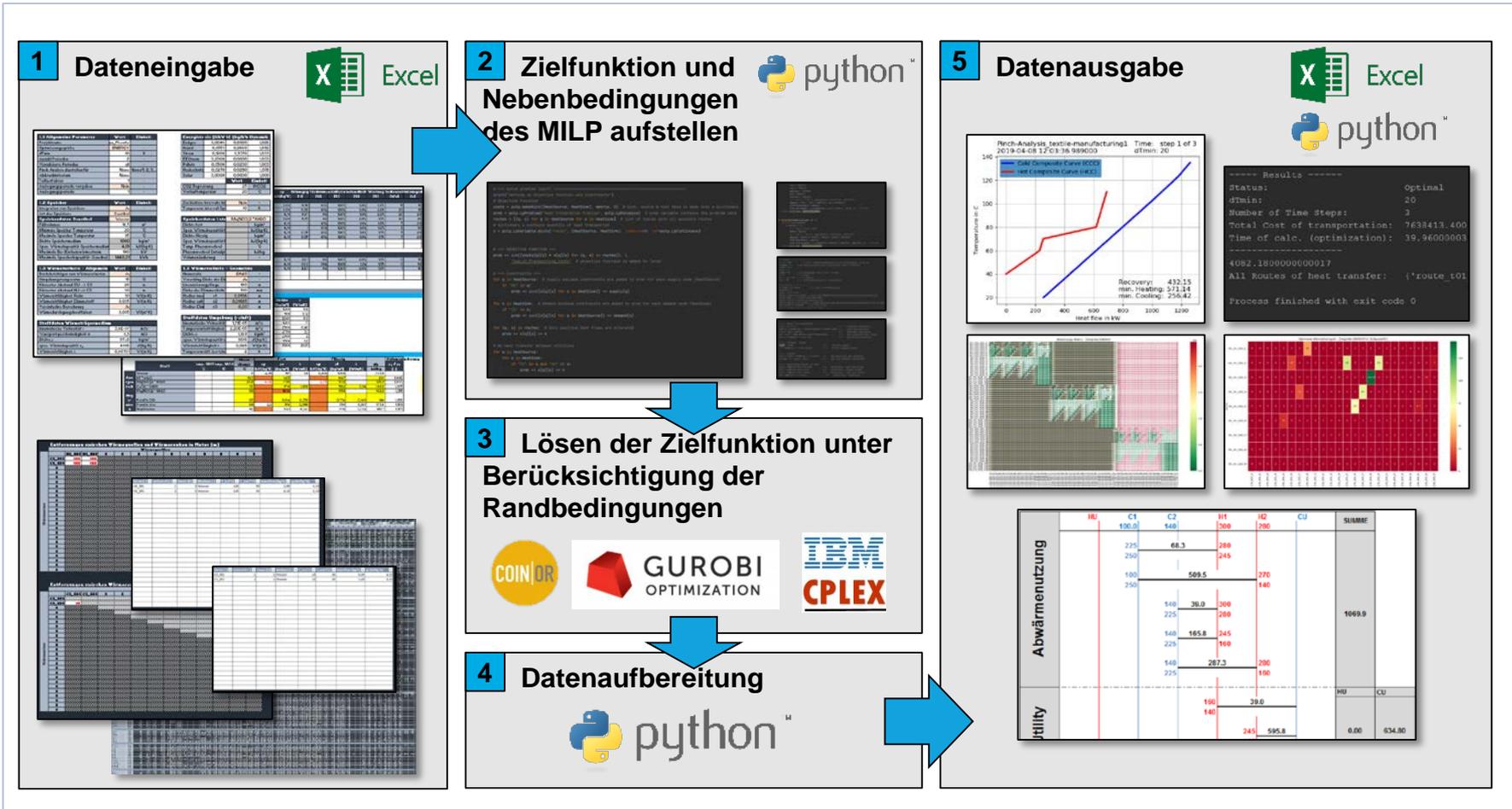
$$Q_3 \cdot \delta_3 \leq z_3 \leq Q_{TES,max} \cdot \delta_3$$

$$Q_{TES,s} - (1 - \delta_3) \cdot Q_{TES,max} \leq z_3$$

$$\leq Q_{TES,s} - (1 - \delta_3) \cdot Q_3$$

$$z_3 \leq Q_{TES,s} + (1 - \delta_3) \cdot Q_{TES,max}$$

# 3. Fallbeispiel Implementierung in Python (und Excel)



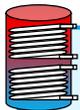
# 3. Fallbeispiel

## Problemschreibung

### Problembeschreibung:

- 1 Wärmequellen (HS)
- 1 Wärmesenken (CS)
- 12 Perioden
- $\Delta T_{\min} = 10 \text{ K}$

	$T_{\text{ein}}$ [°C]	$T_{\text{aus}}$ [°C]	$c_p$ [ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ ]	Massenströme in [kg/s] der Perioden											
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
HS	120	50	4,19	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0
CS	10	80	4,19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20
HU	120	120													
CU	5	18													



### Daten des PCM Speichers:

$$\rho_{fe} = 1.795 \text{ kg/m}^3; \rho_{fl} = 1.738 \text{ kg/m}^3$$

$$c_{p,fe} = 2,34 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}; c_{p,fl} = 2,78 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

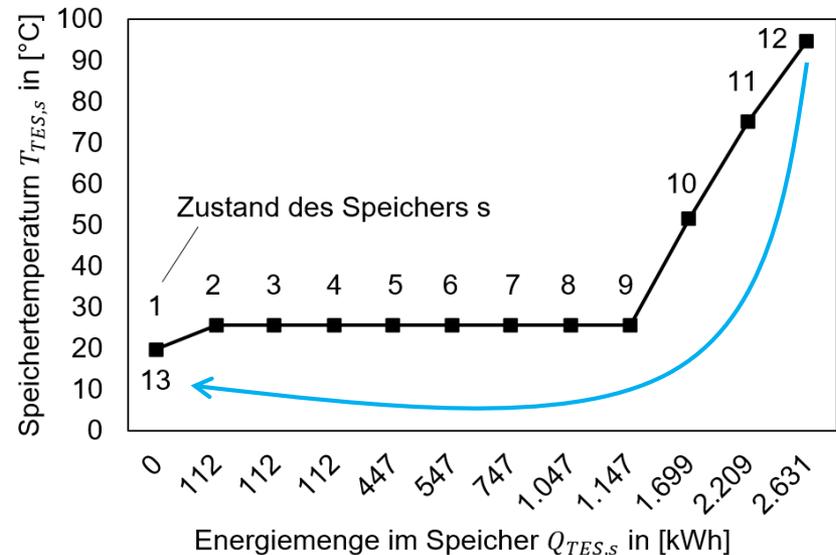
$$\Delta h = 125,9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}; V_{fe} = 16,5 \text{ m}^3$$

$$T_{pcm} = 25,8 \text{ }^\circ\text{C}; T_{max} = 95 \text{ }^\circ\text{C}; T_{min} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$



### Ergebnisse:

- Das schrittweise Beladen des Speichers bildet das Temperaturprofil des PCM ab.
- Erfolgreiche Integration von latenten TES
- Zusätzliche Energieeinsparungen durch den Phasenwechsel



# 4. Ergebnisse

- Erstmalig wurde eine Methode zur Einbindung von latenten thermischen Energiespeichern in die Methode der Wärmeintegration entwickelt und vorgestellt.
- Die Funktionsweise wurde in einer einfachen Fallstudie demonstriert.
- Bei geeigneten betrieblichen Randbedingungen kann der Energiebedarf eines Gesamtsystems stark reduziert werden.
- Einschränkungen: Nur 1 Speicher, einheitliche Speichertemperatur

## Weitere Betrachtungsfelder:

- Berücksichtigung der Wärmeverluste von
  - Rohrleitungen (im Review)
  - Thermischen Energiespeichern (in Bearbeitung)
- Einbinden von Wärmepumpen (Forschungsprojekt IONA ab Juli 2022)



**Hochschule Niederrhein**  
University of Applied Sciences  
**SWK E<sup>2</sup>**



**TECHNISCHE UNIVERSITÄT  
BERGAKADEMIE FREIBERG**  
Die Ressourcenuniversität. Seit 1765.



**GAS- UND  
WÄRMETECHNISCHE  
ANLAGEN**

# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

**Hochschule Niederrhein**  
**SWK E<sup>2</sup>**  
Obergath 79 (Gebäude J)  
47805 Krefeld  
Germany

**Simon Möhren, M.Sc.**

[Simon.moehren@hs-niederrhein.de](mailto:Simon.moehren@hs-niederrhein.de)  
Tel: +49 (0)2151 822-6698



**Hochschule Niederrhein**  
University of Applied Sciences