

# Simulative Untersuchungen der thermischen Be- und Entladungsprozesse eines sensiblen Hochtemperaturwärmespeichers

(2) Strom, Wärmeerzeugung sowie Speicher

Manuela Richter, B.Eng.

Dipl. Ing.(FH) Sergej Herzog, M.Sc.

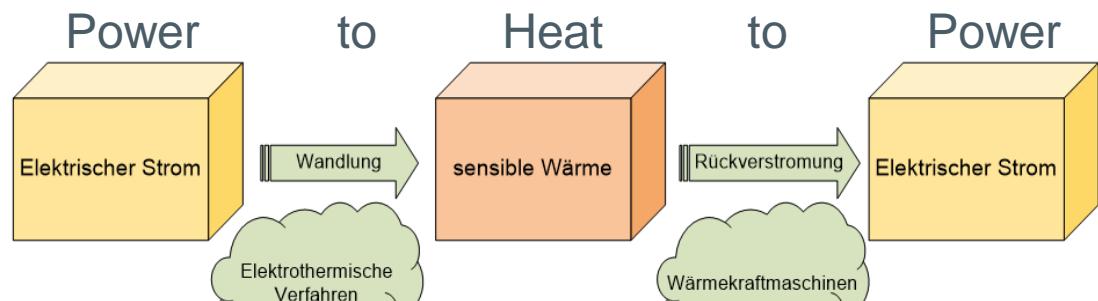
Prof. Dr.-Ing. Stefan Lechner

# Gliederung

1. Sensibler Hochtemperaturwärmespeicher
  - Vorstellung Forschungsprojekt
2. Thermischen Be- und Entladungsprozesse
  - Funktionsprinzip des Hochtemperaturwärmespeichers
3. Simulative Untersuchungen
  - Modellzweck
  - Modellierungsgrundlagen
  - Mathematische Formulierung
  - Modelle zur Parameterbestimmung
4. Ergebnisse
5. Ausblick

# 1. Sensibler Hochtemperaturwärmespeicher als Teil eines Speichersystems

Allgemeines Speicherkonzept



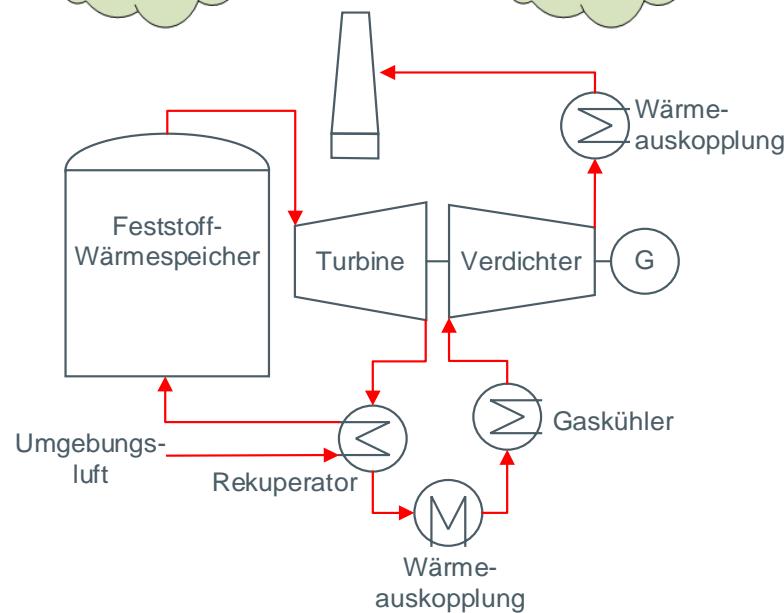
Speichersystem

Speichereinheit

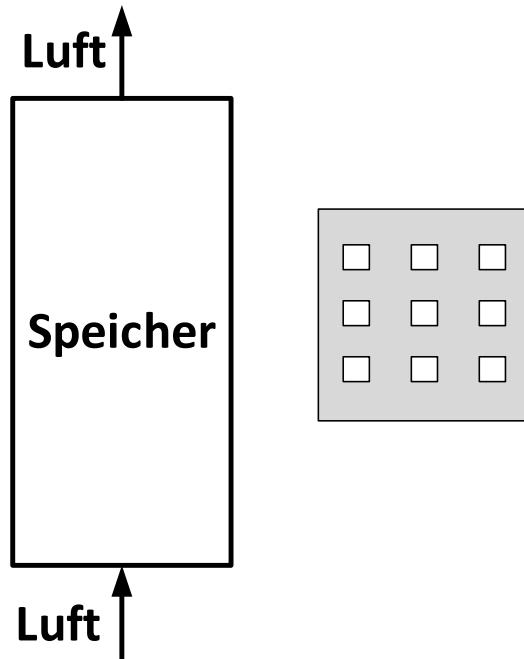
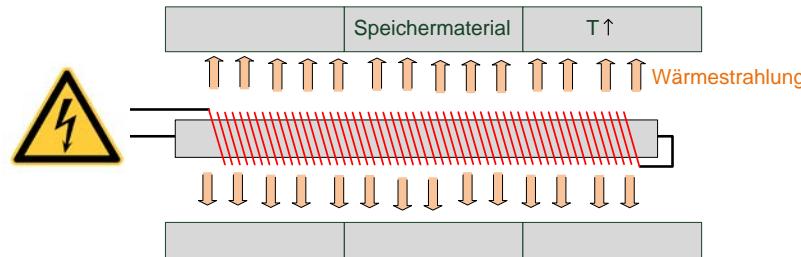
- Feststoff-Wärmespeicher
- Elektrische Heizelemente

Rückverstromungseinheit

- Inverser Gasturbinenprozess



## 2. Thermische Be- und Entladungsprozesse



### Beladen

- Power to Heat
- elektrische Heizelemente
- horizontale Kanäle

### Speichern

- sensible Wärme ( $T > 1000 \text{ } ^\circ\text{C}$ )
- keramisches Speichermaterial

### Entladen

- Luftstrom durch vertikale Kanäle
- konvektive Wärmeübertragung
- heißer Luftstrom tritt in Gasturbinenprozess ein

## 3. Simulative Untersuchungen

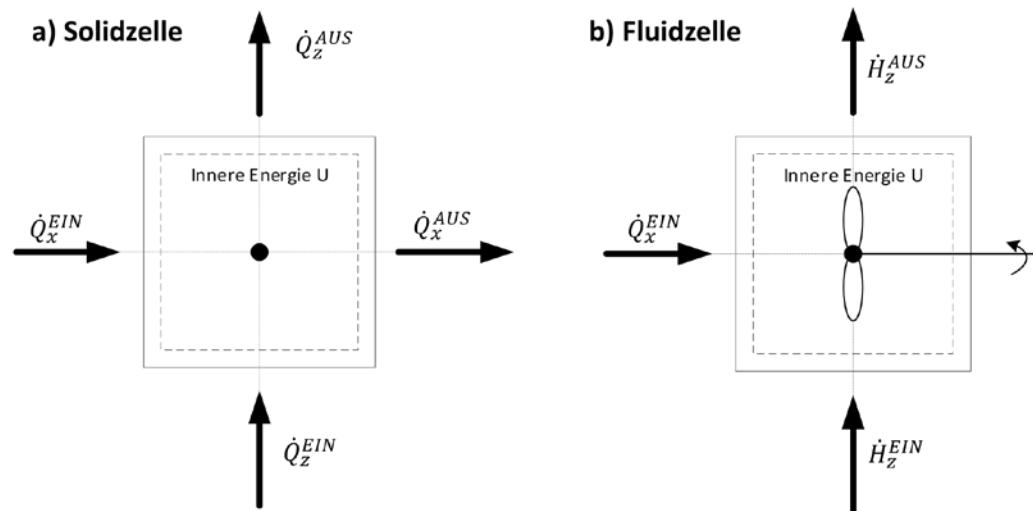
### Modellzweck

- Ermittlung der zeitabhängigen Temperaturverteilung im Speicher
  - Aktueller Beladezustand

### Modellierungsgrundlagen

- Methode der Blockkapazität
  - System mit konzentrierten Parametern
  - Betrachtung der zeitlichen Änderung der inneren Energie
- Graphentheorie
  - Aufteilung in Knoten und Kanten
  - Darstellung in Matrzenschreibweise
    - ermöglicht simultane Berechnung aller Knoten

## 3.1 Mathematische Formulierung - Bilanzierung



$$\frac{dU}{dt} = \sum \dot{Q}_{Ein} - \sum \dot{Q}_{Aus}$$

$$\frac{dU}{dt} = \sum \dot{H}_{Ein} - \sum \dot{H}_{Aus} + \sum \dot{Q}_{Ein}$$

- Fluidzelle: kontinuierlich betriebener Rührkessel
- Fluidströmung: Rührkesselkaskade

## 3.1 Mathematische Formulierung - Matrzenschreibweise

$$\underline{\underline{C}} \cdot \frac{dT}{dt} = \underline{\underline{K}} \cdot (-\underline{\underline{L}}_C) \cdot \underline{\underline{K}}^T \cdot \underline{T} + \underline{\underline{K}} \cdot (-\underline{\underline{L}}_R) \cdot \underline{\underline{K}}^T \cdot \underline{T}^4 + \underline{\underline{C}} \cdot (\underline{\underline{S}} - \underline{\underline{E}}) \cdot \underline{T} + \underline{I}_1 + \underline{\underline{C}} \cdot \underline{I}_2 \cdot T^{EIN}$$

$\underline{\underline{C}} \cdot \frac{dT}{dt}$ : Änderung der inneren Energie

$\underline{\underline{C}}$ : Kapazitätsmatrix

$\underline{\underline{K}}$ : Kopplungsmatrix [Knoten x Kanten]

$\underline{\underline{K}} \cdot (-\underline{\underline{L}}_C) \cdot \underline{\underline{K}}^T \cdot \underline{T}$ : Wärmeübertragung durch Leitung im Festkörper und Konvektion an dessen Oberfläche

$\underline{\underline{K}} \cdot (-\underline{\underline{L}}_R) \cdot \underline{\underline{K}}^T \cdot \underline{T}^4$ : Wärmeübertragung durch Strahlung (Beladung)

$\underline{\underline{L}}$ : Leitwertmatrizen

$\underline{\underline{C}} \cdot (\underline{\underline{S}} - \underline{\underline{E}}) \cdot \underline{T}$ : Enthalpieströme (Entladung)     $\underline{\underline{C}}$ : Kapazitätsstrommatrix

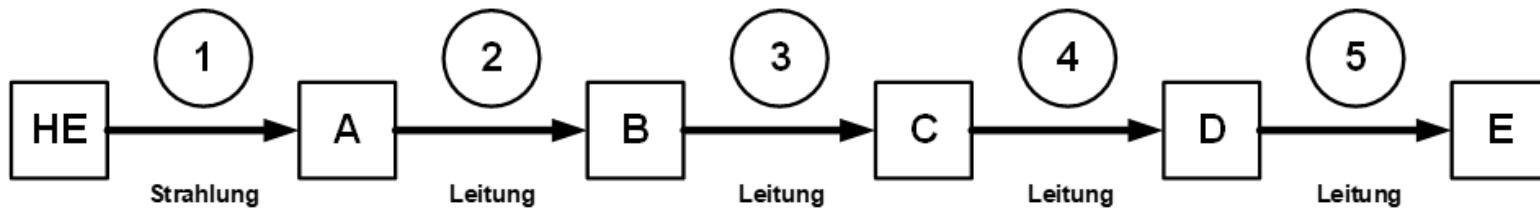
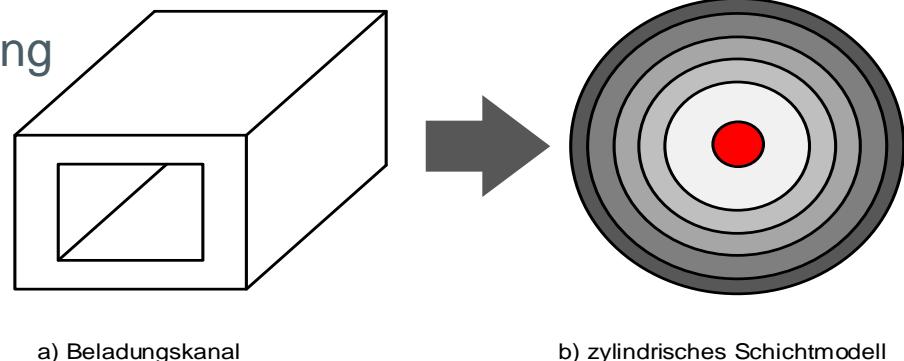
$\underline{\underline{S}}$ : Strukturmatrix

$\underline{I}_1$ : konstante Randbedingungen

$\underline{\underline{C}} \cdot \underline{I}_2 \cdot T^{EIN}$ : eintretende Enthalpieströme (Entladung)

## 3.2 Beladungsmodell

- Beladung infolge von Temperaturstrahlung
- Horizontale Kanäle im Speicher
- Eindimensionale Betrachtung durch zylindrisches Schichtmodell

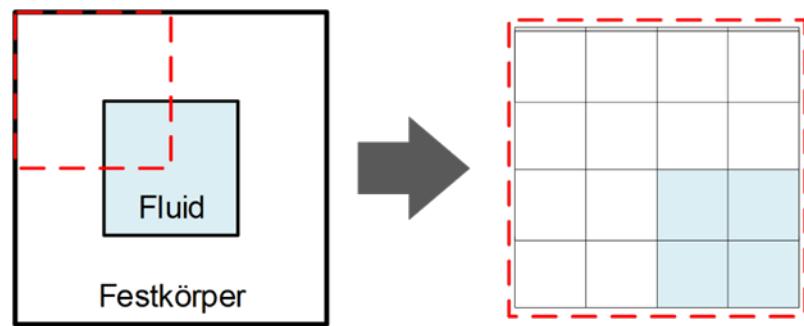


**Zu untersuchende Parameter:**

- Elektrische Heizleistung
- Bestrahlte Oberfläche

### 3.3 Entladungsmodell

- Entladung infolge von Konvektion
- Vertikale Kanäle im Speicher
- Neben Festkörpertemperatur auch Fluidtemperatur von Interesse  
→ Dreidimensionale Betrachtung
- Würfelförmige finite Volumina



Ortsdiskrete Aufteilung

**Zu untersuchende Parameter:**

- Kanalbreite bei konstanter Speichergrundfläche

## 3.4 Parametervariationen

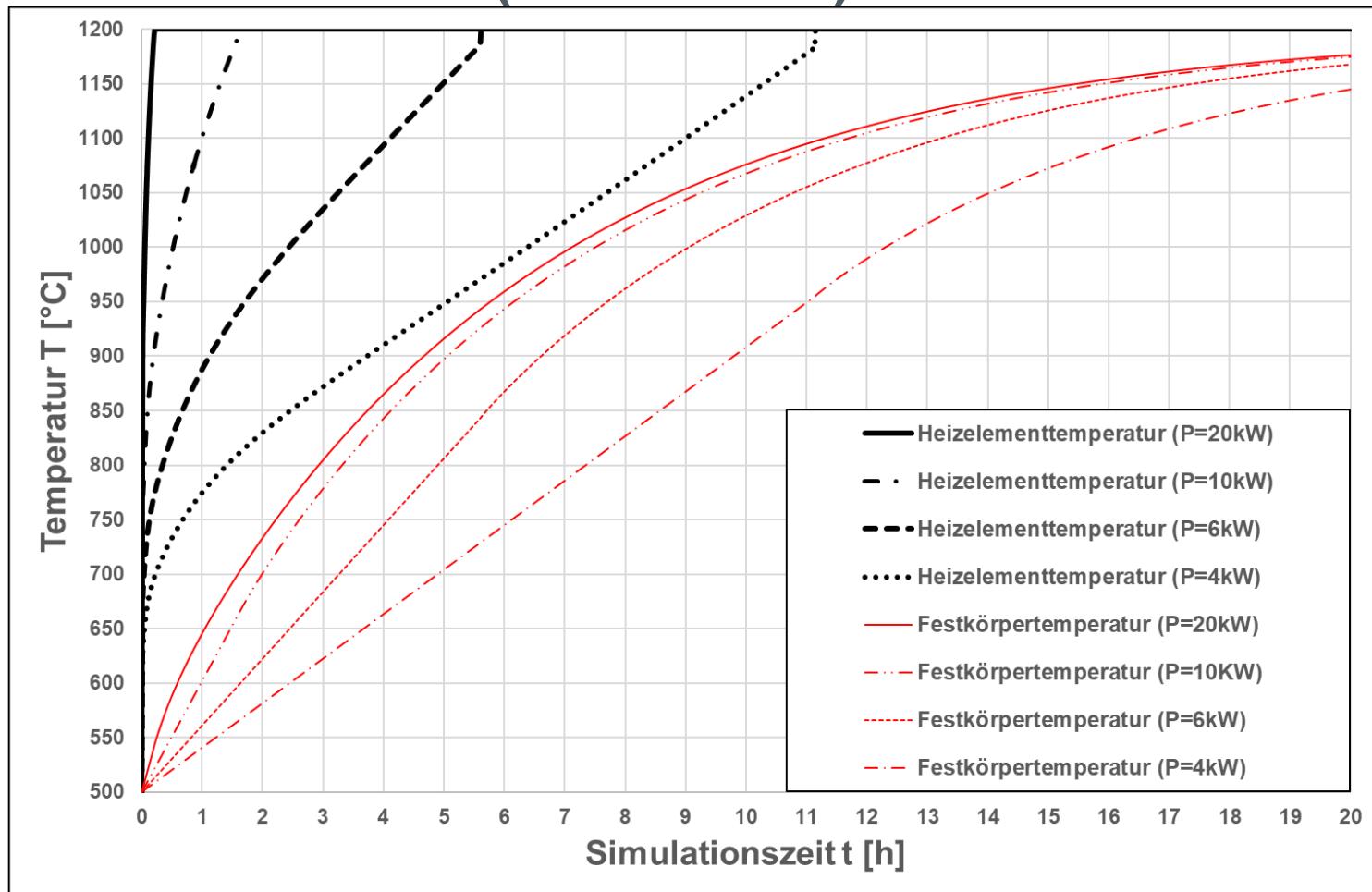
### Beladung

- Einfluss der elektrischen Leistung
  - Betriebsfall ( $500^{\circ}\text{C}$  –  $1200^{\circ}\text{C}$ )
- Einfluss der Bestrahlungsfläche

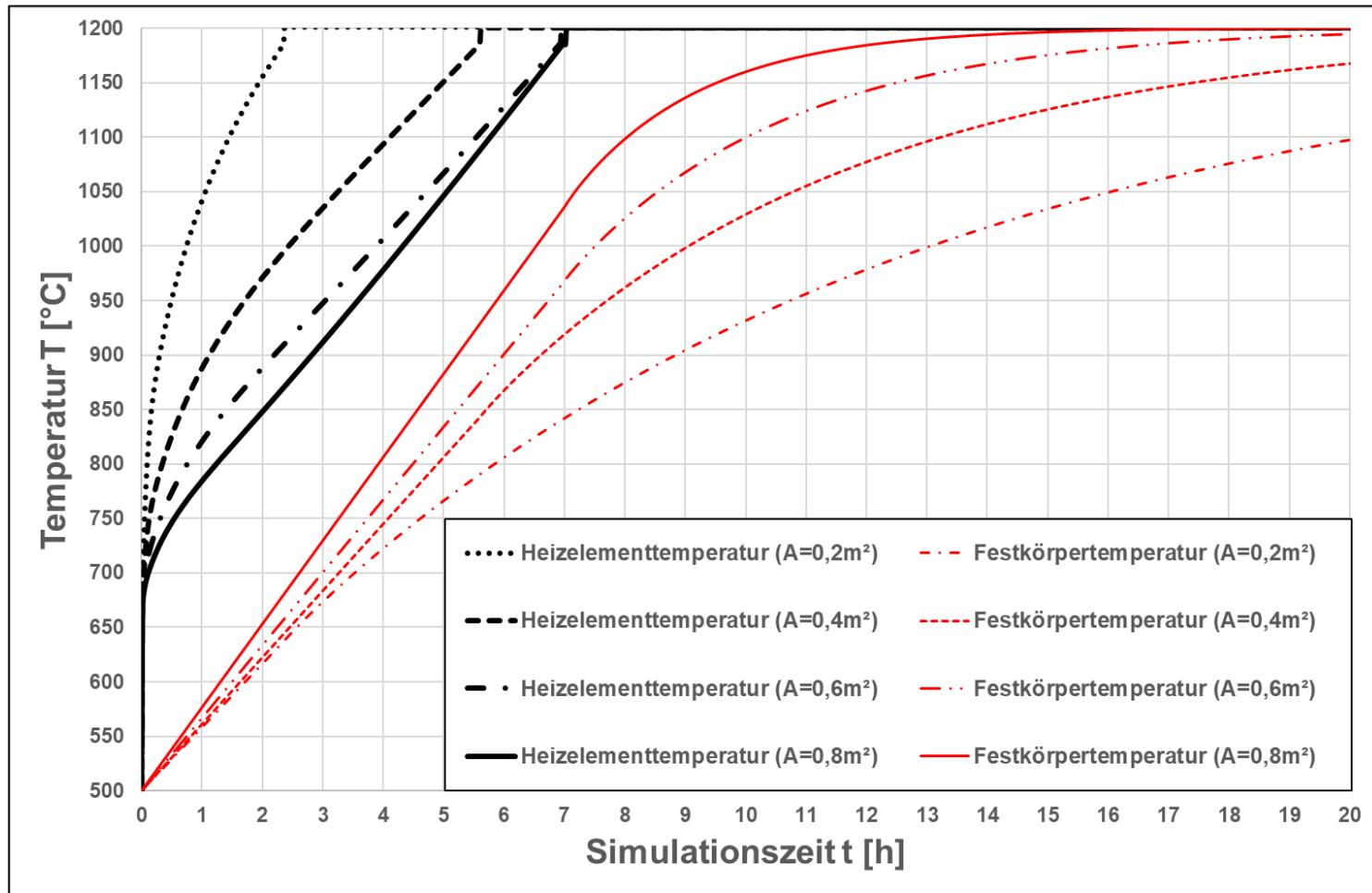
### Entladung

- Einfluss Kanalbreite
  - Zeitlicher Temperaturverlauf
  - Temperaturverlauf entlang Speicherhöhe

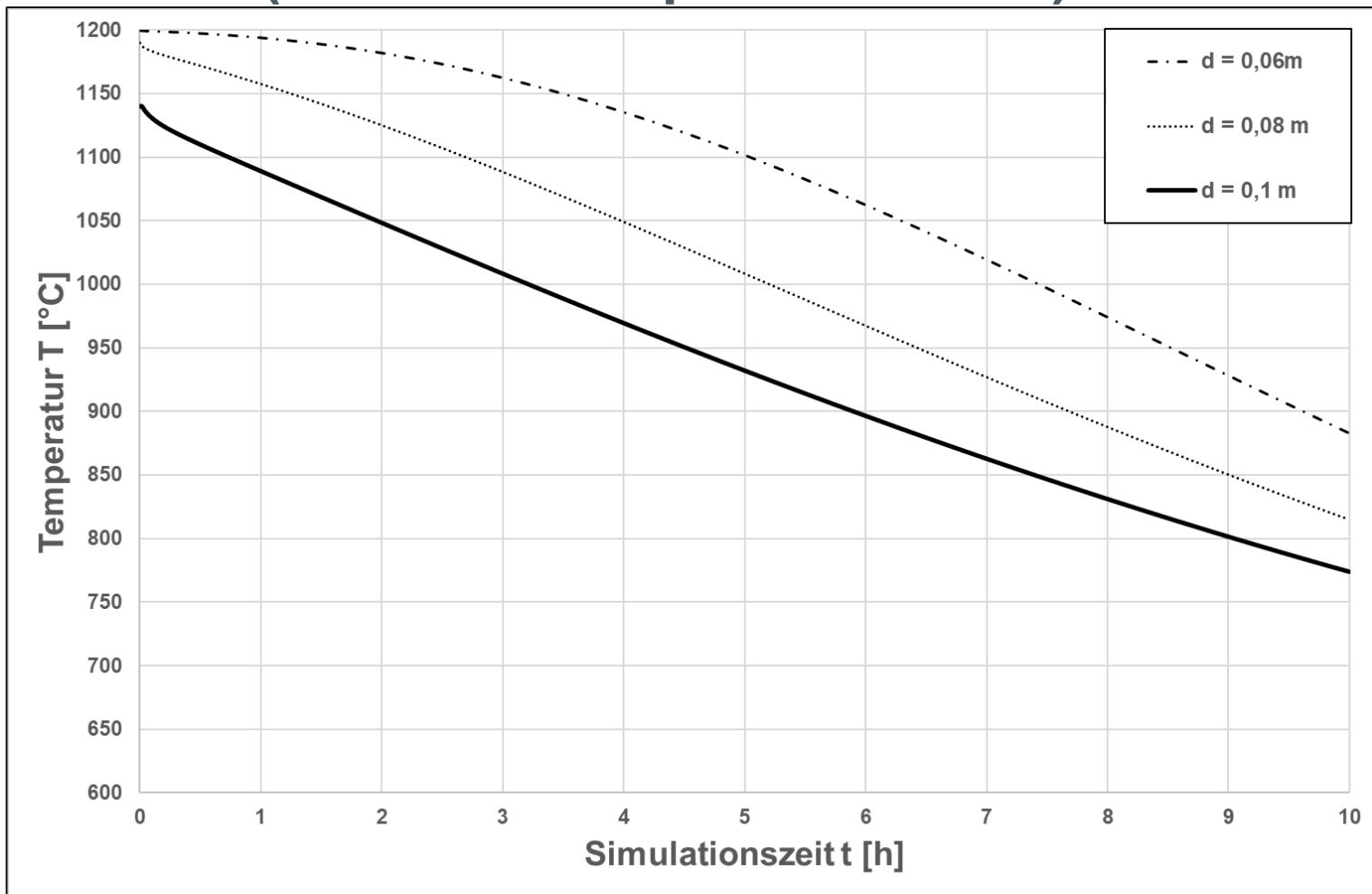
# Beladung – Einfluss der elektrischen Leistung (Betriebsfall)



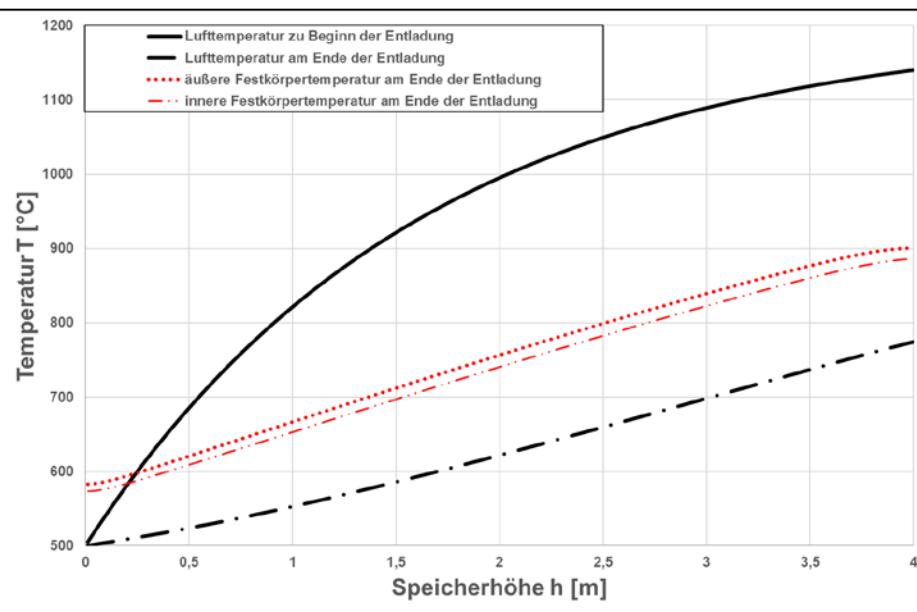
# Beladung – Einfluss der Bestrahlungsfläche (Betriebsfall)



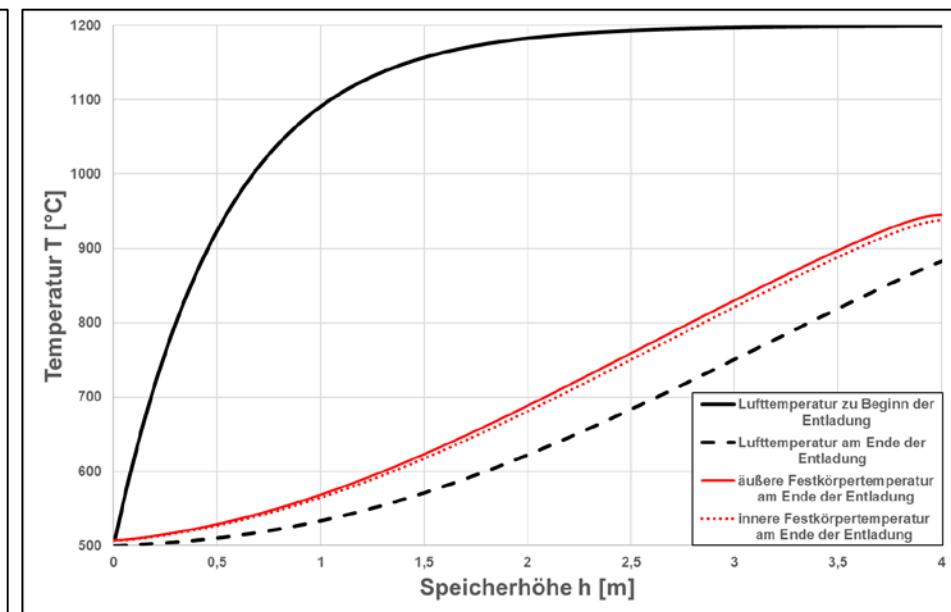
## Entladung – Einfluss der Kanalbreite (zeitlicher Temperaturverlauf)



# Entladung – Einfluss der Kanalbreite (örtlicher Temperaturverlauf)



Kanalbreite d=0,1m



Kanalbreite d=0,06m

## 4. Ergebnisse

### Beladung

- Instationäres Verhalten der Heizelemente
- Aufteilung der Gesamtleistung auf mehrere, leistungsschwächere Heizelemente
- Erhöhung der bestrahlten Fläche und Minderung der Schichtdicke vorteilhaft

### Entladung

- Keine zeitlich konstante Luftaustrittstemperatur
- Kleinere Kanalbreiten vorteilhaft
  - Druckverlust beachten
- Temperaturschichtung
  - Gezieltes Nachbeladen einzelner Schichten möglich

## 5. Ausblick

- Zusammenführung zu einem Modell für die Betriebsstrategie
  - Anpassung an reale Speichergeometrie
- Validierung der simulativen Ergebnisse durch experimentelle Untersuchungen an der Demonstrationsanlage



# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung



FORSCHUNG AN  
FACHHOCHSCHULEN

Förderkennzeichen: 13FH163IN6

Manuela Richter, B.Eng.  
[manuela.richter@me.thm.de](mailto:manuela.richter@me.thm.de)  
+49 641/309 2194

Technische Hochschule Mittelhessen  
Fachbereich Maschinenbau und Energietechnik  
Institut für Thermodynamik, Energieverfahrenstechnik und Systemanalyse (THESA)