

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.

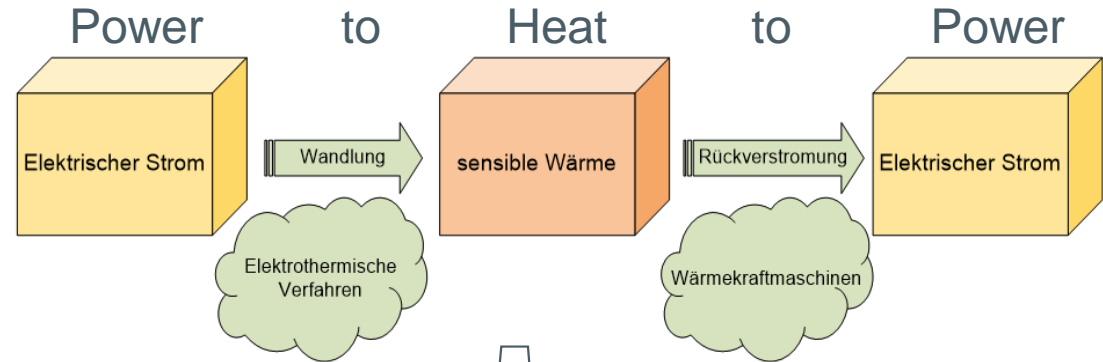
Prof. Dr.-Ing. Stefan Lechner

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



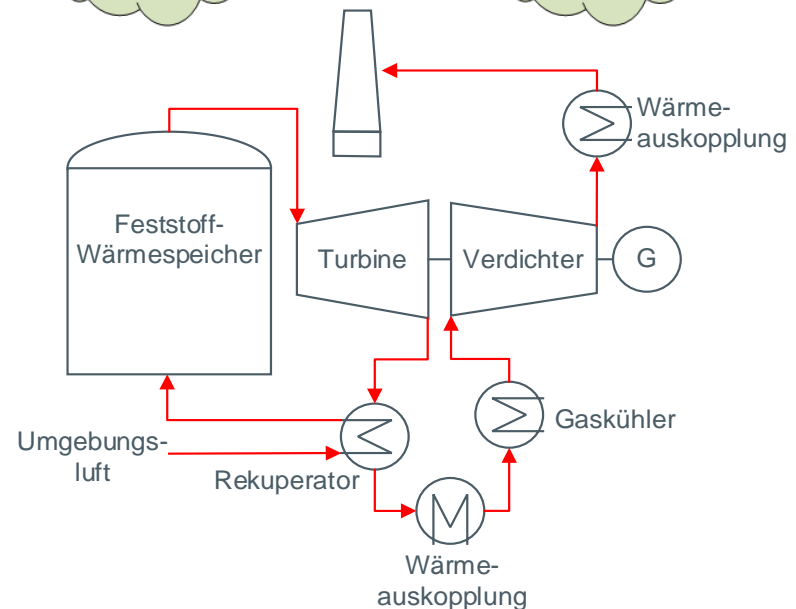
Speichersystem

Speichereinheit

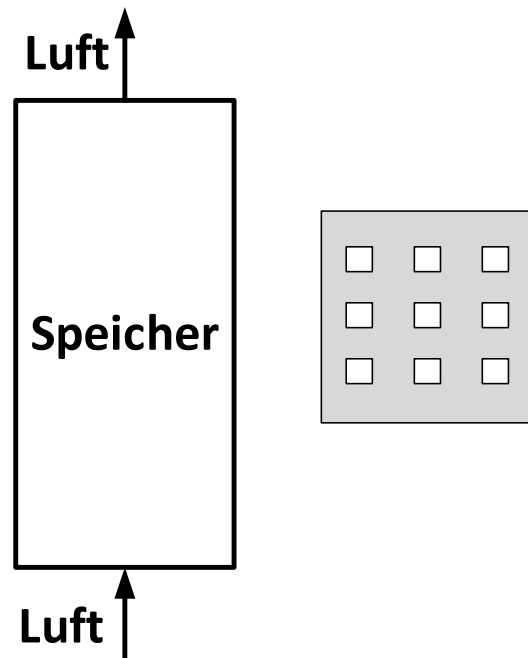
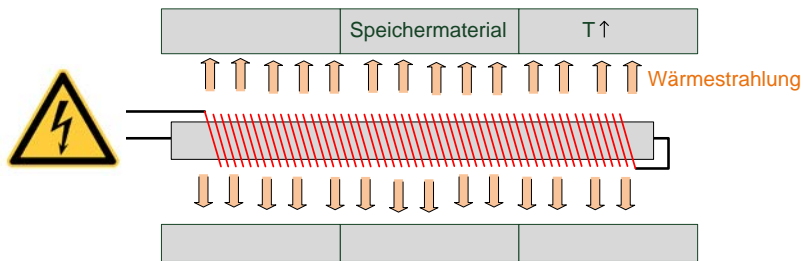
- Feststoff-Wärmespeicher
- Elektrische Heizelemente

Rückverstromungseinheit

- Inverser Gasturbinenprozess



2. Thermische Be- und Entladungsprozesse



Beladen

- Power to Heat
- elektrische Heizelemente
- horizontale Kanäle

Speichern

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

Entladen

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

3. Simulative Untersuchungen

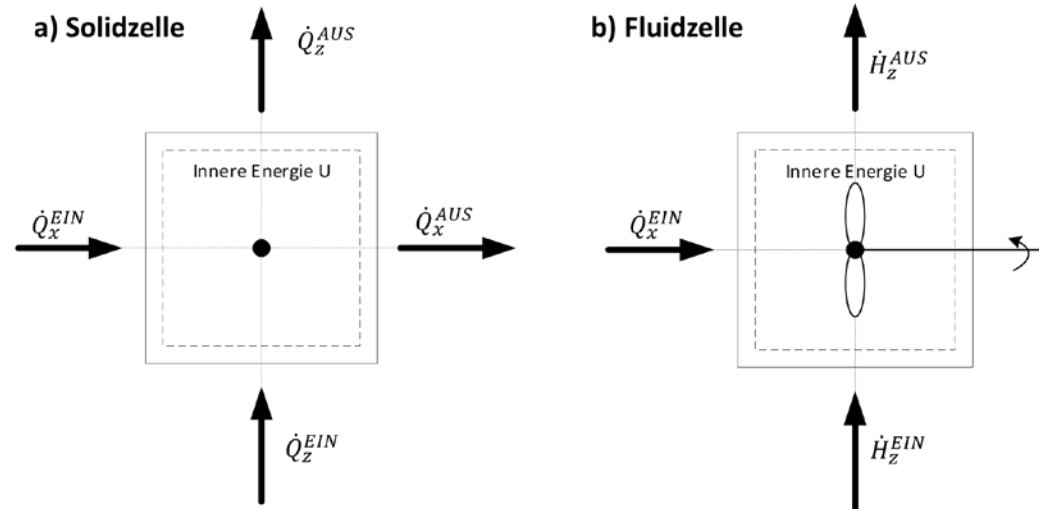
Modellzweck

- 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 Matrixschreibweise
 - 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 - Matrizenschreibweise

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

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

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

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

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

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

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

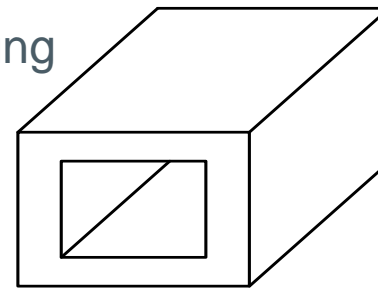
$\underline{\underline{S}}$: Strukturmatrix

\underline{I}_1 : konstante Randbedingungen

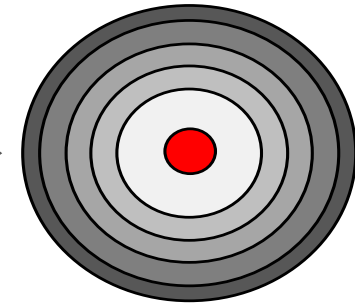
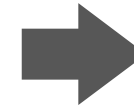
$\underline{\underline{C}} \cdot \underline{I}_2 \cdot T^{EIN}$: eintretende Enthalpieströme (Entladung)

3.2 Beladungsmodell

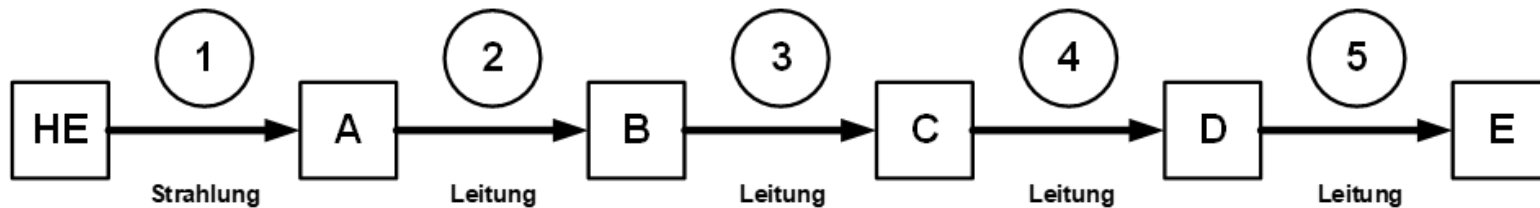
- Beladung infolge von Temperaturstrahlung
- Horizontale Kanäle im Speicher
- Eindimensionale Betrachtung durch zylindrisches Schichtmodell



a) Beladungskanal



b) zylindrisches Schichtmodell



Zu untersuchende Parameter:

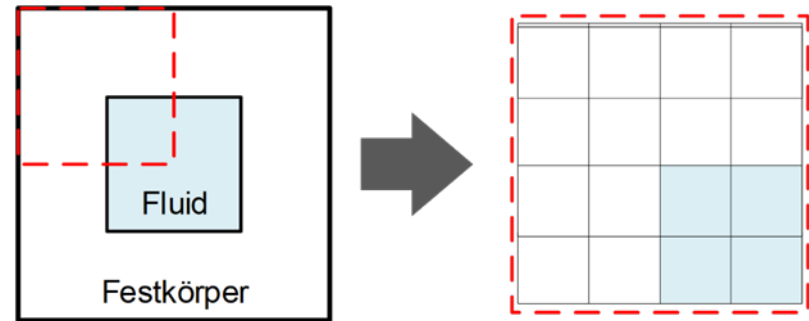
- Elektrische Heizleistung
- Bestrahlte Oberfläche

3.3 Entladungsmodell

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

Zu untersuchende Parameter:

- Kanalbreite bei konstanter Speichergrundfläche



Ortsdiskrete Aufteilung

3.4 Parametervariationen

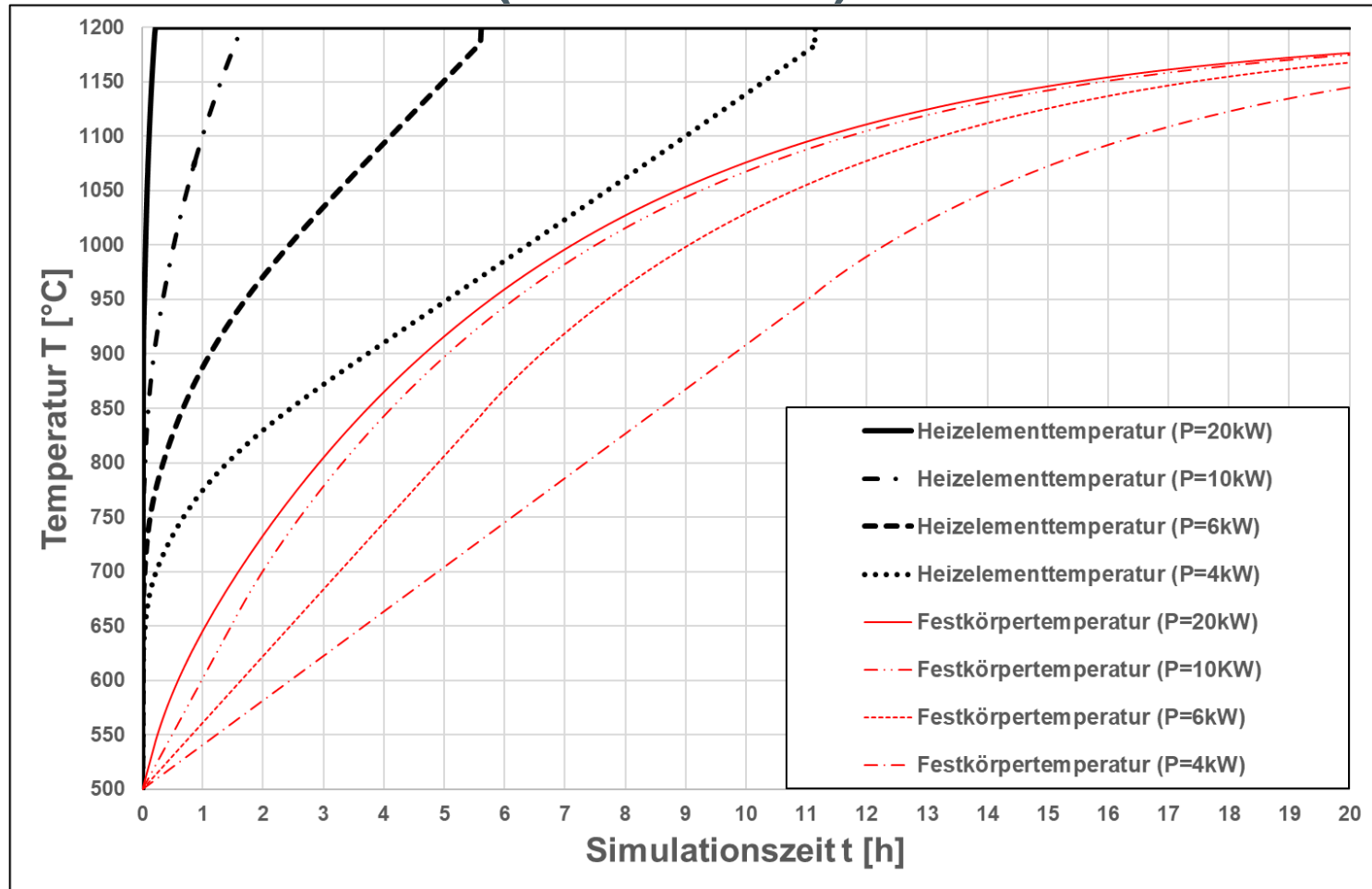
Beladung

- Einfluss der elektrischen Leistung
 - Betriebsfall (500°C – 1200°C)
- Einfluss der Bestrahlungsfläche

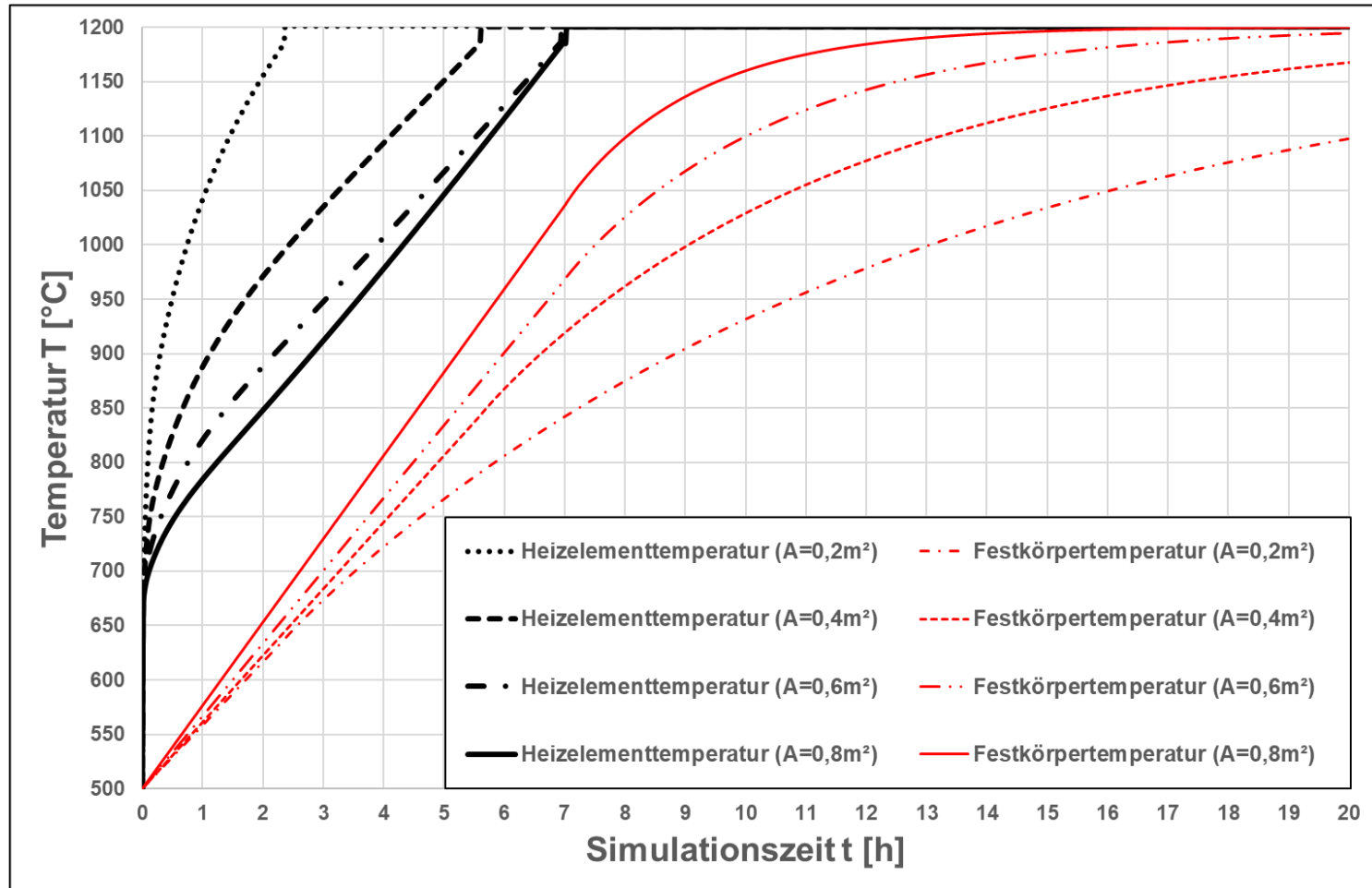
Entladung

- Einfluss Kanalbreite
 - Zeitlicher Temperaturverlauf
 - Temperaturverlauf entlang Speicherhöhe

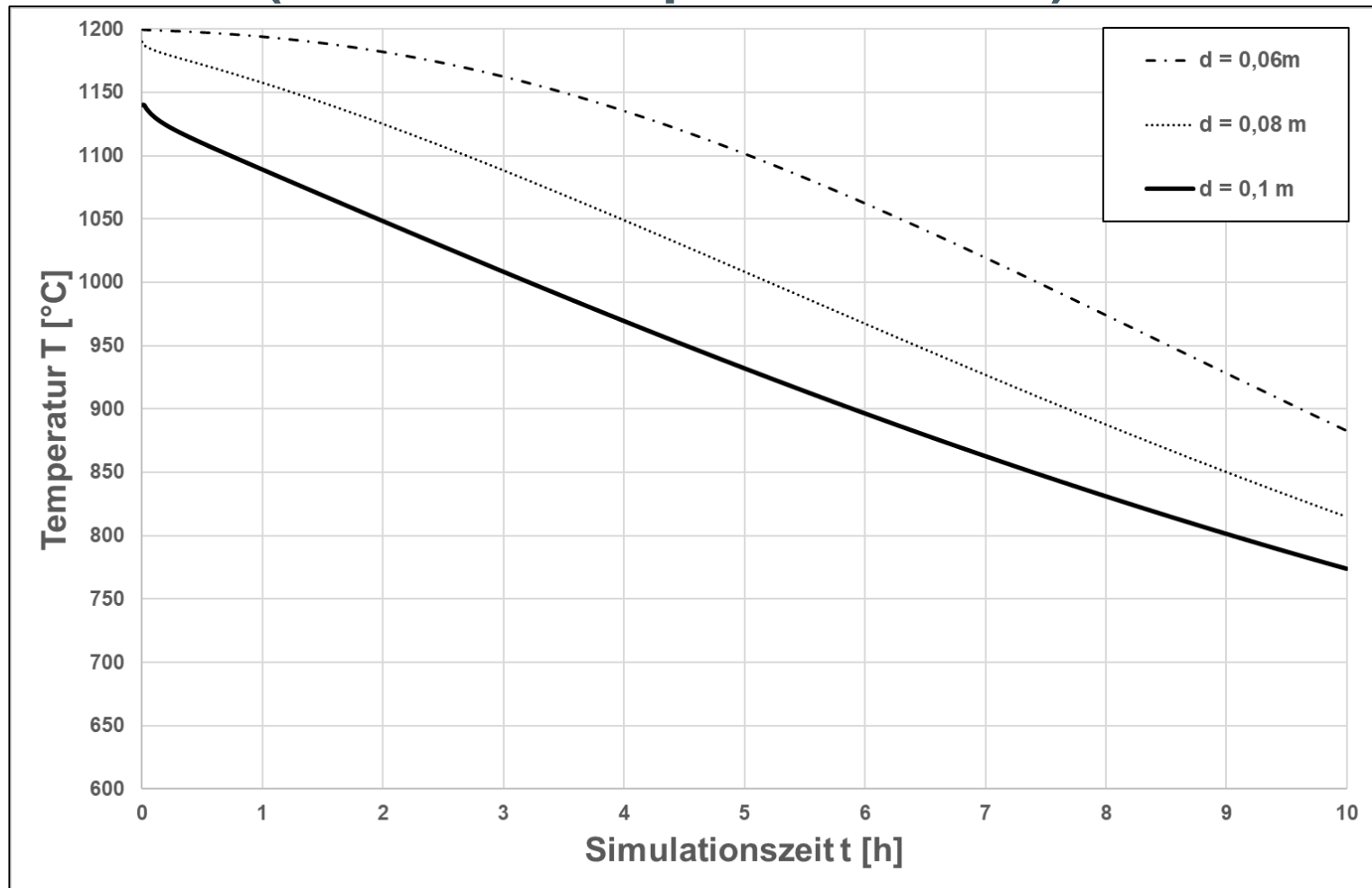
Beladung – Einfluss der elektrischen Leistung (Betriebsfall)



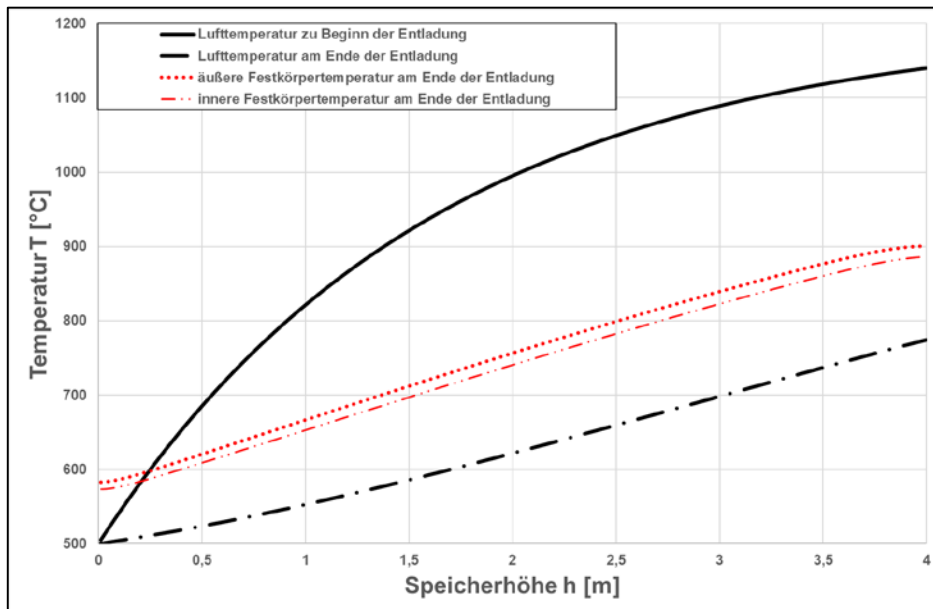
Beladung – Einfluss der Bestrahlungsfläche (Betriebsfall)



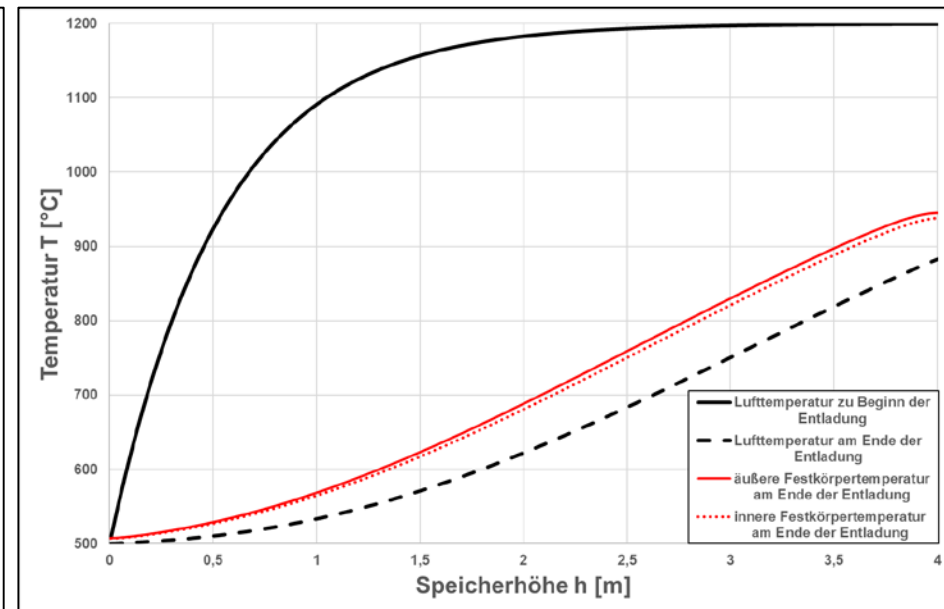
Entladung – Einfluss der Kanalbreite (zeitlicher Temperaturverlauf)



Entladung – Einfluss der Kanalbreite (örtlicher Temperaturverlauf)



Kanalbreite $d=0,1\text{m}$



Kanalbreite $d=0,06\text{m}$

4. Ergebnisse

Beladung

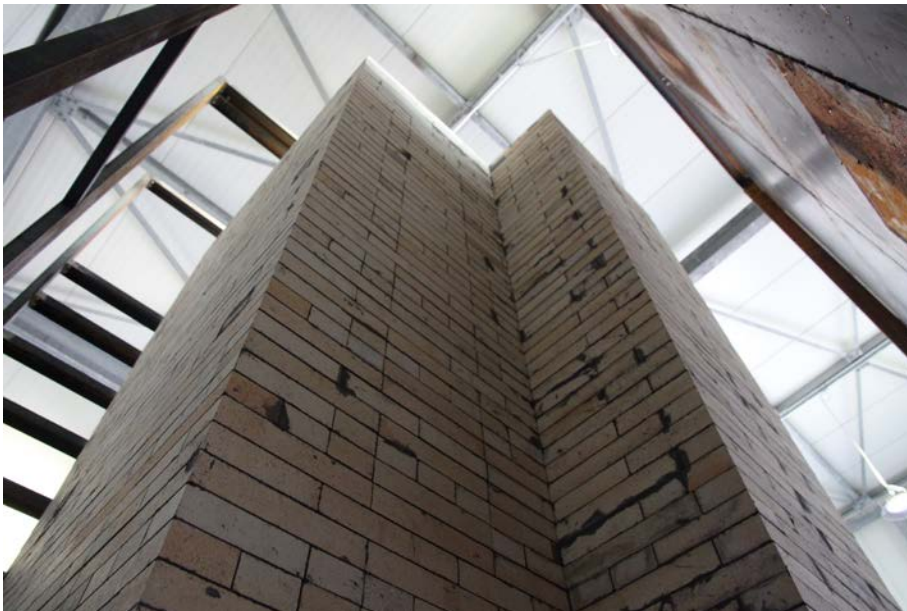
- Instationäres Verhalten der Heizelemente
- Aufteilung der Gesamtleistung auf mehrere, leistungsschwächere Heizelemente
- Erhöhung der bestrahlten Fläche und Minderung der Schichtdicke vorteilhaft

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



Förderkennzeichen: 13FH163IN6

Manuela Richter, B.Eng.
manuela.richter@me.thm.de
+49 641/309 2194

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