

# Experimentelle Untersuchung und numerische Modellierung eines sensiblen Hochtemperaturspeichers

Alexej PAUL<sup>1</sup>, Felix HOLY<sup>2</sup>, Michel TEXTOR<sup>3</sup>, Prof. Dr.-Ing. Stefan LECHNER<sup>4</sup>  
Institut für Thermodynamik, Energieverfahrenstechnik und Systemanalyse (THESA)  
der Technischen Hochschule Mittelhessen (THM)

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 03ET1607A gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

## **Kurzfassung:**

Ein großflächiger Strukturwandel der globalen Energiesysteme wird durch die weltweit zunehmenden Naturkatastrophen notwendiger denn je. Die aktuelle Corona Pandemie bietet die Gelegenheit eine nachhaltige Veränderung in der Energiepolitik zu erwirken. Der Wandel kann nicht mit einer Technologie allein umgesetzt werden, sondern vielmehr durch unterschiedliche Ansätze. Ein Schlüsselement können Speichersysteme sein, welche die Auswirkungen der zukünftig immer volatileren Stromerzeugungstechnologien kompensieren. Besonders Speicherkonzepte, die eine Sektorenkopplung sowie die Bereitstellung von Regelenergie abdecken, sorgen für ein sicheres und stabiles Netz. Hochtemperaturspeicher (HTS) zeigen ein hohes Potential als wirtschaftliche und standortunabhängige Speichertechnologie. Die Beladung des HTS basiert auf der Wandlung elektrischer Überschussenergie in Hochtemperaturwärme (Power-to-Heat).

Im Rahmen des Forschungsprojektes „High-T-Stor“ wurde am Zentrum für Energietechnik und Energiemanagement (etem.THM) sowie dem THESA-Institut der THM ein solches Speichersystem konzipiert und erbaut. Der „HTS312“ genannte Prototyp wird im Rahmen dieser Arbeit mit Hilfe eines abstrahierten thermischen Netzwerks simulativ abgebildet. Die messtechnischen Auswertungen der ersten Realversuche am HTS312 werden den Simulationsergebnissen gegenübergestellt, um das verwendete Modell bewerten zu können.

Auf Basis des validierten Modells kann eine Auslegung der neuen Forschungsanlage „HTS600“ für das Nachfolgeprojekt „EnEff:Stadt FlexQuartier Gießen“ erfolgen [1]. Die effiziente Rückverstromung über einen extern beheizten Gasturbinenprozess bedarf hoher Speicheraustrittstemperaturen. Eine Optimierung der Entladecharakteristik durch eine Verbesserung der konvektiven Wärmeübertragung, zum Beispiel durch eine Vergrößerung der Wärmeübertragungsflächen, ist ein quantifizierbares Ergebnis dieser Arbeit.

**Keywords:** Hochtemperaturwärmespeicher, Modellierung, Simulation, Demonstrator

---

<sup>1</sup> E-Mail: alexej.paul@me.thm.de, Tel.: +49-641-309-2135, \*

<sup>2</sup> Jungautor. E-Mail: felix.holy@me.thm.de, Tel.: +49-641-309-2186, \*

<sup>3</sup> Jungautor. E-Mail: michel.textor@me.thm.de, Tel.: +49-641-309-2183, \*

<sup>4</sup> E-Mail: stefan.lechner@me.thm.de, Tel.: +49-641-309-2116, \*

\* Web: [www.thm.de/thesa](http://www.thm.de/thesa) Adresse: Wiesenstraße 14, 35390 Gießen

## 1 Motivation, Fragestellung und Herangehensweise

Konventionelle Stromspeicher wie Batteriespeicher, Pumpspeicherkraftwerke oder Power-To-X-Anlagen sind oft in ihrem wirtschaftlichen Einsatz durch hohe spezifische Investitionskosten oder geringe Verfügbarkeit begrenzt [2]. Um hohe Speicherkapazitäten mit geringen spezifischen Investitionskosten zu ermöglichen, werden aktuell kostengünstige und skalierbare Hochtemperaturspeichersysteme mit verschiedenen Rückverstromungskonzepten erforscht. Der in dieser Arbeit betrachtete Hochtemperaturspeicher (HTS) wandelt mittels integrierter Widerstandsheizelemente Strom in Wärme und speichert diese auf einem Temperaturniveau  $> 1000^{\circ}\text{C}$  in keramischen Festkörpern. Bei Strom- und Wärmebedarf wird die sensible Wärme auf einen Luftstrom übertragen, welcher eine Rückverstromungseinheit nach dem KWK-Prinzip antreibt. Das Verfahren der Hochtemperaturspeicherung stellt somit ein Element der Sektorenkopplung dar, das in Verbindung mit einer Wärmesenke (z.B. Fernwärmenetz) eine hohe Gesamt-Energierückgewinnung bis 90% mit bis zu 45% elektrischem Wirkungsgrad ermöglicht [3].

Die zentrale Aufgabe dieser Arbeit ist es, zu untersuchen in welcher Art und Weise der Demonstrator HTS312 optimiert werden kann, um ein möglichst effizientes Entladeverhalten des geplanten HTS600 zu erreichen und somit die Speicherkapazität bestmöglich auszunutzen.

Aufbauend auf dem Forschungsprojekt „High-T-Stor“ wird in dieser Arbeit eine experimentelle Studie mit dem Demonstrator „HTS312“ durchgeführt und zusätzlich das instationäre Verhalten analysiert [4], [5]. Eine detaillierte numerische Strömungsberechnung - englisch auch Computational Fluid Dynamics Simulation (CFD-Simulation) genannt - der instationären Prozesse bedarf zu hoher Rechenzeiten, wodurch die Entwicklung eines abstrahierten thermischen Netzwerks notwendig ist.

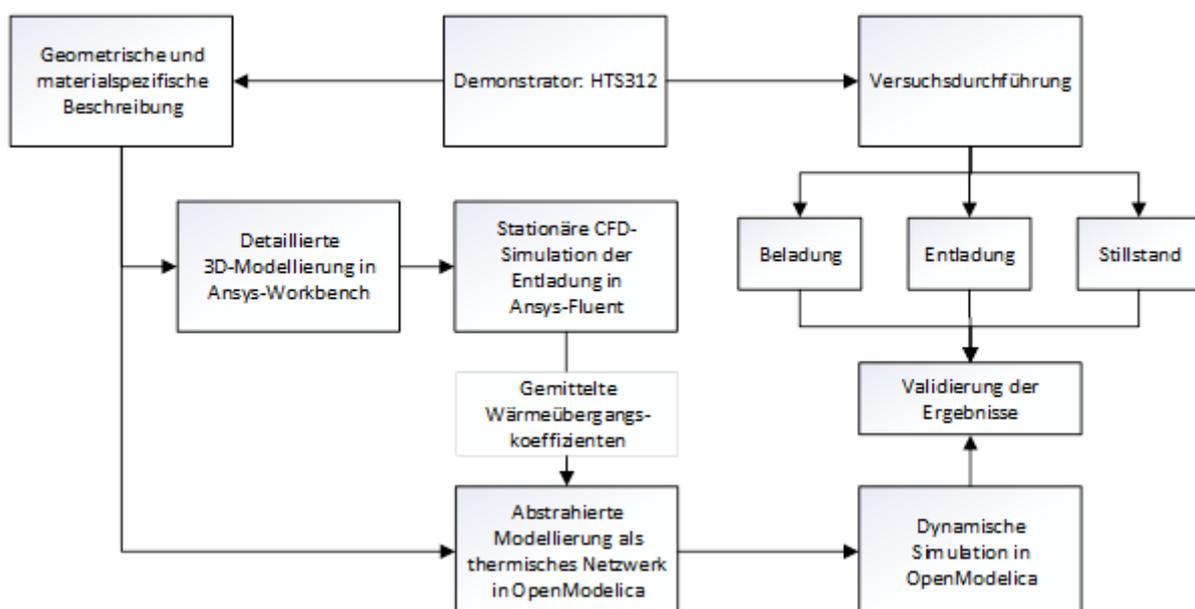


Abbildung 1: Darstellung der Methodik.

Die simulativen und messtechnischen Untersuchungen des HTS werden in drei Phasen unterteilt. Die Messungen erfolgen vor Ort am Demonstrator und die Modellierung wird in der OpenSource-Sprache Modelica basierend auf der Modelica-Standard-Library umgesetzt. Die methodische Vorgehensweise kann Abbildung 1 entnommen werden. Eine geometrische Abbildung der Strömungskanäle des HTS312 bildet die Grundlage der stationären CFD-Simulationen. Durch die Aufprägung der messtechnisch erfassten Randbedingungen der Luft (Eintrittstemperatur, Massenstrom) und des Festkörpers (Temperaturprofil) wird eine CFD-Simulation der Entladung des HTS mit stationären Randbedingungen durchgeführt. Die numerisch berechneten mittleren Wärmeübergangskoeffizienten gehen als Parameter in die dynamische Simulation ein.

Das thermische Netz, bestehend aus konduktiven, konvektiven, strahlenden und kapazitiven Leitungen, wird mit den geometrischen und materialspezifischen Eigenschaften des HTS312 parametrisiert. Anschließend werden die Ergebnisse aus den jeweiligen Speicherphasen mit den Messdaten aus der experimentellen Studie validiert und bewertet.

## 2 Sensibler Hochtemperaturwärmespeicher

### 2.1 Stand von Wissenschaft und Technik

Sensible Hochtemperaturwärmespeicher sind die einfachste und kosteneffektivste Art von HTS-Systemen [6]. Die Auswahl von möglichen Speichermaterialien basiert auf den jeweiligen Stoffeigenschaften wie Temperaturbeständigkeit, Wärmekapazität, Toxizität, Entflammbarkeit und Beschaffungspreis [7]. Typischerweise finden Gesteine, Keramiken sowie feuerfeste Ziegel und Betonarten Verwendung [8].

Die geometrische Formgebung des Speicherkerns hat einen entscheidenden Einfluss auf Speicherkapazität, Wärmeübertragungseigenschaften und mechanische Stabilität des Speichersystems. Ein Großteil der vorhandenen Literatur beschreibt Festbett-Speicherkonzepte von sensiblen HTS, bei denen ein poröses Schüttmaterial als Speichermasse in einer geeigneten Speicherhülle verpackt wird [9], [10].

HTS-Systeme können direkt im Speicherkern oder indirekt über externe Heizeinheiten beladen werden. Direkte Beladung erfolgt durch den Einbau von Widerstands-Heizelementen im Inneren des Speicherkerns. Für gewöhnlich werden HTS-Systeme jedoch indirekt über externe Heizeinheiten beladen, welche über Widerstands- oder Induktionsheizung einen Fluidstrom erwärmen, der nachfolgend die Wärme an das Speichermaterial abgibt [3], [11–14].

Anstatt durch eine Widerstands- oder Induktionsheizung kann elektrische Energie auch mittels einer Hochtemperaturwärmepumpe zu thermischer Energie gewandelt werden, wodurch im Gesamtsystem Beladungswirkungsgrade  $> 1$  erreicht werden können. Konzepte, die Wärmepumpen verwenden, werden als „Carnot-Batterien“ oder auch „Pumped Thermal Energy Storage“ bezeichnet. Eine Übersicht über den aktuellen Entwicklungsstand ist in [10], [14], [15] zu finden.

Für den Beladungsprozess des Speichers wird eine höchstmögliche Konversionsrate von Strom zu Wärme angestrebt. Analog wird für die Rückverstromung ein höchstmöglicher Wirkungsgrad der Wandlung von Wärme zurück zu Strom (und Wärme) angestrebt. Carnot's

Theorem zufolge steigt das Effizienzpotential einer Wärmekraftmaschine simultan mit der Temperatur ihrer Wärmequelle an. Folglich führen höhere Speichertemperaturen zu potenziell höheren Wirkungsgraden von Rückverstromungseinheiten. Die technische Umsetzung des Rückverstromungsprozesses kann mittels verschiedener thermodynamischer Prozesse realisiert werden.

Bisherige Forschungsarbeit im Bereich von HTS-Systemen, die Gasturbinentechnik zur Speicherentladung verwenden, beschränkt sich auf druckaufgeladenen Speicherbetrieb während der Entladung [10], [11], [14]. Während des Beladungsvorgangs und im Stillstand werden die Speichereinheiten jedoch drucklos betrieben. Bei geringen Arbeitsdrücken reduzieren sich die Kosten der Speichereinheit, womit eine gute Skalierbarkeit ermöglicht wird [10].

## 2.2 Speicherkonzept High-T-Stor

Die im Projekt High-T-Stor betrachtete Technologie zeichnet sich dadurch aus, dass Strom mittels elektrischer Widerstandsheizelemente zunächst in Hochtemperaturwärme (Temperaturniveau  $> 1000\text{ °C}$ ) gewandelt und anschließend in den circa 18 Tonnen keramischen Speichermaterial (Schamotte) gespeichert wird. Die maximale Beladeleistung des Hochtemperaturspeichers beträgt dabei  $312\text{ kW}_{\text{el}}$ . Nach einer erfolgten Beladung kann im Strom-Bedarfsfall die gespeicherte Wärme (bis zu  $1500\text{ kWh}_{\text{th}}$ ) erst an das Wärmeträgermedium Luft übertragen und mittels Wärmekraftmaschine (inverse Gasturbine) wieder in Strom und nutzbare Wärme zurückgewandelt. Somit entkoppelt das System zeitlich den Strombedarf von der Stromerzeugung, womit es als netzdienlich bezeichnet werden kann. Durch Auskopplung von nutzbarer Wärme unterstützt es ebenso die Sektorenkopplung.

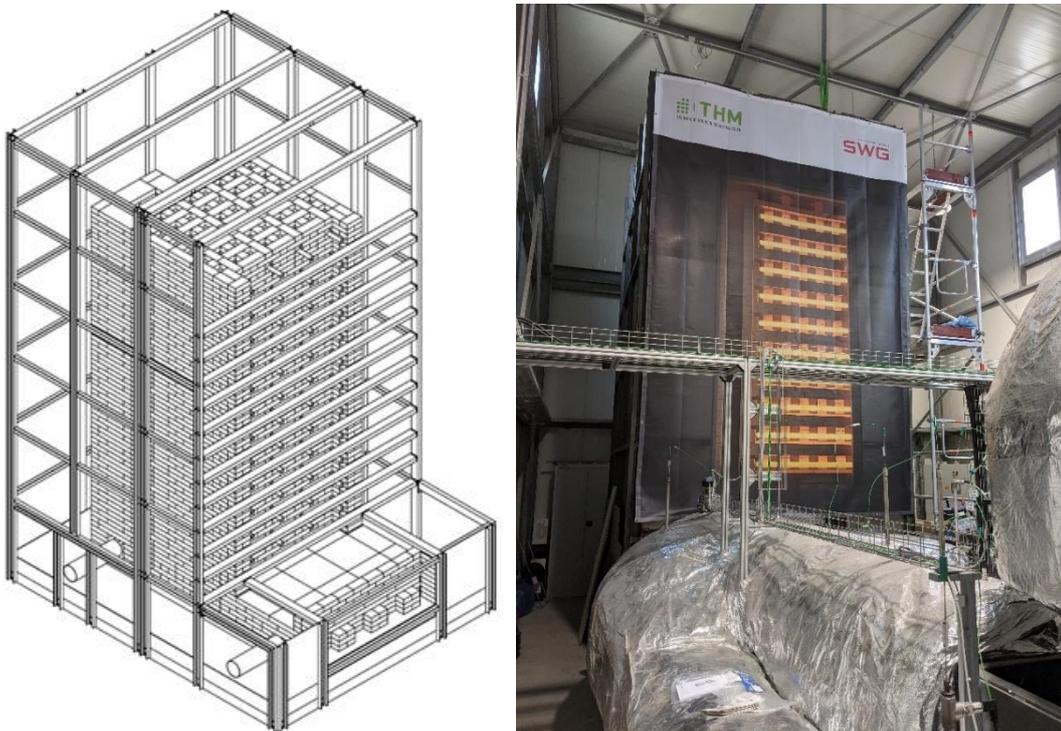


Abbildung 2: Darstellung des Speichers „HTS312“ als Konstruktionszeichnung (links) und als Fotoaufnahme nach der Fertigstellung (rechts).

Die Heizelemente, das keramische Speichermaterial und die Wärmedämmung sowie Speicherhülle ergeben zusammen die Speichereinheit (s. Abbildung 2) des Systems, wohingegen der inverse Gasturbinenprozess die Rückverstromungseinheit darstellt.

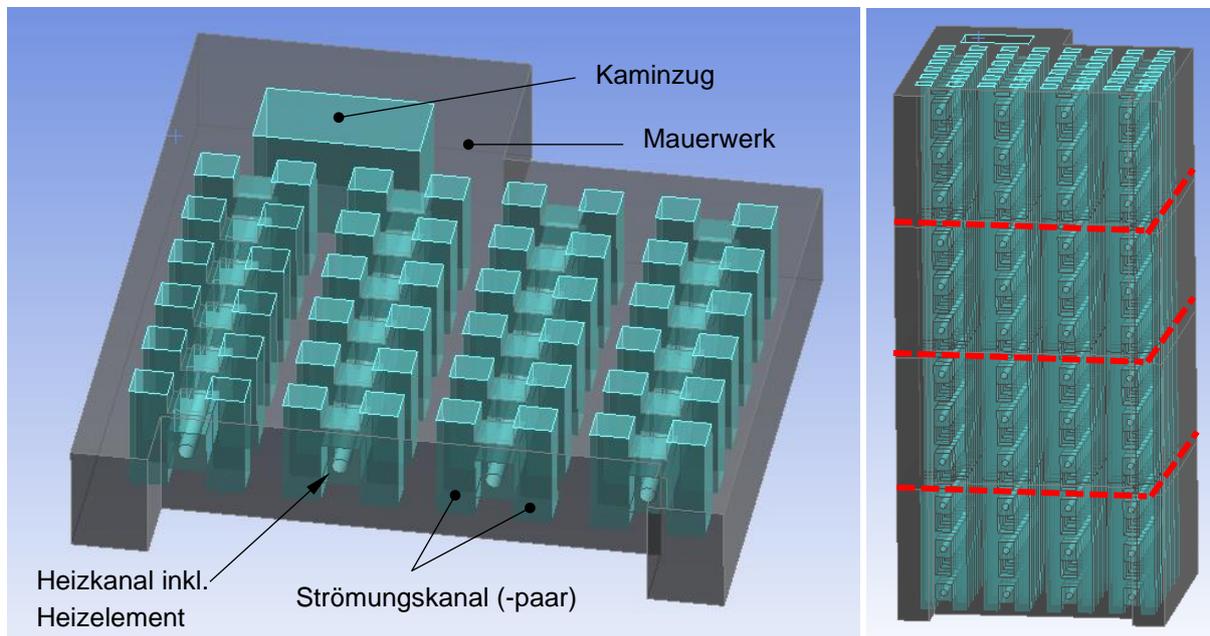


Abbildung 3: 3D-Darstellung der fünf Blocklagen einer Heizebene (links) und des gesamten Speicherkerns (rechts).

Innerhalb der Speichereinheit ist das Speichermaterial, bestehend aus keramischen Normalsteinen in unterschiedlichen Formaten, derart in einem Mauerwerksverband angeordnet, dass horizontale Installationsräume für die Heizelemente (Heizkanäle), paarweise vertikale Kanäle für die Durchströmung (Strömungskanäle) und im hinteren Bereich ein Kaminzug entstehen. Der Kern kann in Heizebenen und Messzonen eingeteilt werden. In Abbildung 3 ist der Aufbau einer Heizebene und des gesamten Speicherkerns als 3D-Geometrie dargestellt. Fünf übereinander gemauerte Blocklagen bilden zusammen eine Heizebene, welche sich im Kernaufbau in vertikaler Richtung wiederholt. Eine Messzone (MZ) setzt sich aus drei Heizebenen und der gesamte Kern aus vier Messzonen (s. Markierungen in Abbildung 3), also insgesamt zwölf Heizebenen zusammen. In jeder Heizebene befinden sich vier Heizelemente mit jeweils einer Anschlussleistung von 6,5 kW installiert. Im gesamten Speicherkern sind somit 48 Heizelemente mit einer Gesamtleistung von 312 kW installiert.

Unterhalb des Speicherkerns ist ein Luftverteiler gebaut worden, der einströmende Luft über alle Strömungskanäle verteilt. Ein Luftsammler, der die Luft oberhalb des Kernes sammelt und in den Kaminzug führt, bildet die Decke des Speicherkerns. Um den gemauerten Kern herum befindet sich Wärmedämmung. An der Stirnseite, vor den Heizkanälen und dem Verteiler, besteht sie zur besseren Revisionierbarkeit aus Mineralwolle und auf allen anderen Seiten aus einer Vermiculite-Schüttung im Zwischenraum von Mauerwerk und dem mit Stahlplatten geschlossenen Stahlgerüst (s. Konstruktionszeichnung in Abbildung 2).

### 2.3 Messaufbau

Im Messkonzept der High-T-Stor-Anlage sind im Bereich der Rückverstromung diverse Sensoren vorgesehen. Die für diese Arbeit wesentlichen Messstellen sind in Abbildung 4 erkennbar. Es handelt sich dabei um Thermoelemente Typ K vor und nach dem Speicher sowie im und hinter dem Bypass der HTS-Einheit. Im Bereich zwischen dem Gaskühler und der Verdichtereinheit ist ein Massenstrommesser verortet, der über zwei Drucksensoren und einen Temperaturfühler intern den aktuellen Massenstrom berechnet und aufzeichnet.

Zwischen dem Speicher und der Massenstrommessung liegen zwei Bypässe. Der Turbinenbypass ermöglicht eine flexible Entladung des HTS ohne den Betrieb der Turbinen-Generatoreinheit. Durch den HTS-Bypass lässt sich die Eintrittstemperatur der Turbine begrenzen bzw. regeln.

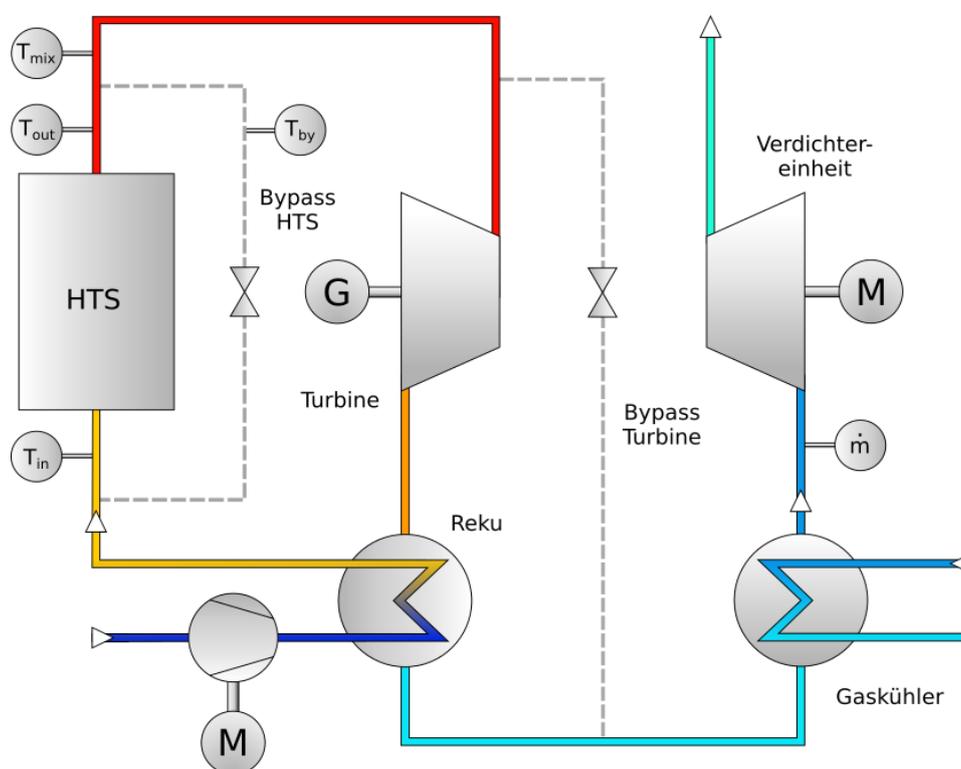


Abbildung 4: Darstellung der wesentlichen Messstellen und der groben Verschaltung der Rückverstromung beim High-T-Stor Projekt.

Der Massenstrom durch den HTS kann über die Energie- und Massenstrombilanz des Bypasses mit den folgenden Gleichungen ermittelt werden. Dabei sind es jeweils der Massenstrom und die Enthalpie nach dem Mischpunkt ( $\dot{m}_{mix}$ ,  $h_{mix}$ ), am Hochtemperaturspeicher ( $\dot{m}_{HTS}$ ,  $h_{HTS}$ ) und am Bypass ( $\dot{m}_{Bypass}$ ,  $h_{Bypass}$ ).

$$\dot{m}_{mix} \cdot h_{mix} = \dot{m}_{HTS} \cdot h_{HTS} + \dot{m}_{Bypass} \cdot h_{Bypass} \quad (1)$$

$$\dot{m}_{mix} = \dot{m}_{HTS} + \dot{m}_{Bypass} \quad (2)$$

$$\dot{m}_{HTS} = \dot{m}_{mix} \cdot \frac{h_{mix} - h_{Bypass}}{h_{HTS} - h_{Bypass}} \quad (3)$$

Innerhalb des Speichers befinden sich zur Beladungssteuerung 12 Thermoelemente. Jeweils ein Thermoelement ist pro Heizebene in der unmittelbaren Nähe eines Heizelementes verortet. 20 weitere Thermoelemente sind im Speicherkern verbaut, um die Temperaturverteilung innerhalb des Speichermaterials erfassen zu können. Diese sind in Gruppen mit je fünf Einheiten in vier Ebenen verortet. Jeweils eine Gruppe liegt in der mittleren Heizebene einer jeden Messzone (s. Kap. 2.2 und Abbildung 5).

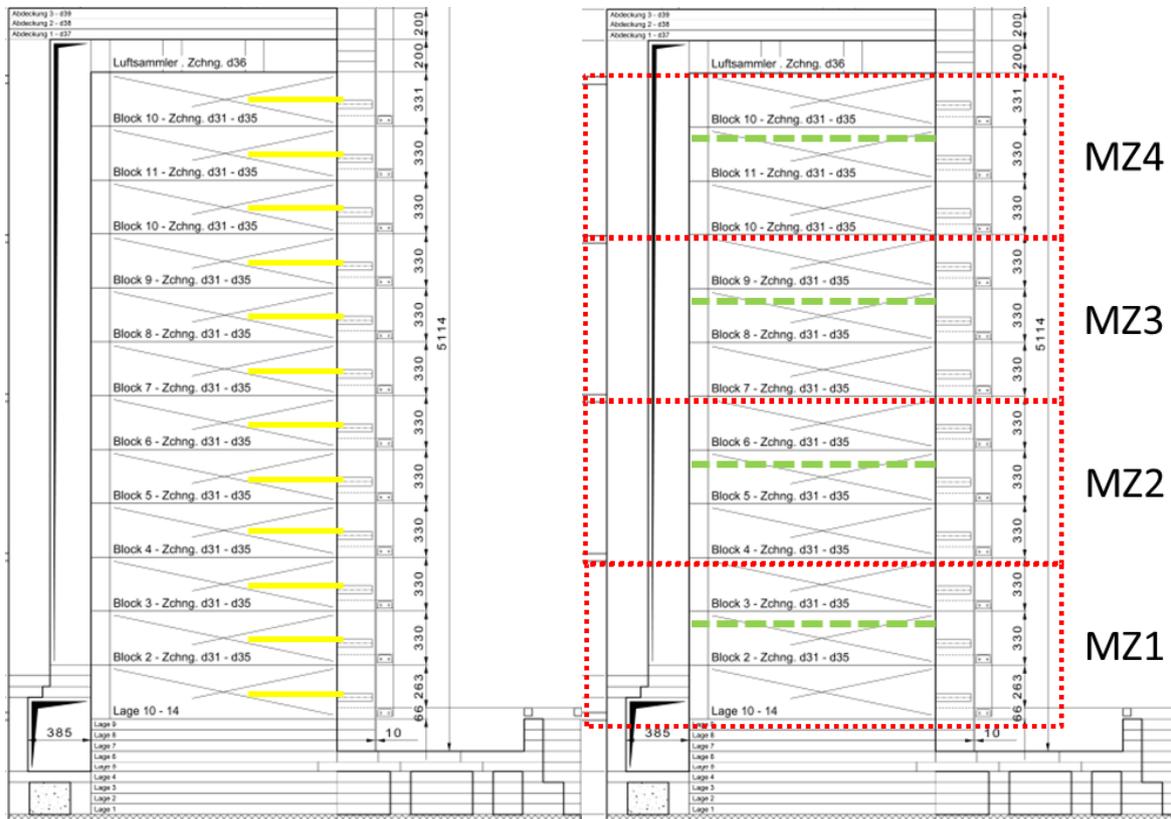


Abbildung 5: Schnittdarstellung zur Verortung der Thermoelemente zur Beladungssteuerung (links) und der Thermoelemente zur Temperaturverteilung im Speicher (rechts).

Die Thermoelemente im Speicherkern wurden nach dem Erstellen des Mauerwerksverbands mit Hilfe von Bohrungen in den Steinfugen installiert. Die exakte Position der Thermoelemente ist mit nicht vernachlässigbaren Abweichungen verbunden, wodurch die Interpretation der Ergebnisse erschwert wird.

Um die Auswirkungen der unbekannt Position zu mildern, werden für die Gegenüberstellung mit den Simulationsergebnissen Mittelwerte über die jeweils fünf Messwerte innerhalb einer Messzone (MZ) gebildet.

### 3 Modellierung und Simulation

Die Modellierung umschließt die Vereinfachung des Speichers auf die wichtigsten geometrischen und funktionellen Charakteristika. Dabei muss das Modell alle thermischen Vorgänge innerhalb des Speichers abbilden. Die Nutzungszyklen können in drei Zustände unterteilt werden:

1. Die Beladung / das Einspeichern
2. Der Stillstand / das Speichern
3. Die Entladung / das Ausspeichern

Während eines Beladungsvorgangs wird im Inneren des Speichers elektrische Energie per Widerstandsheizelemente in Wärme umgewandelt. Durch die hohe Soll-Temperatur des beladenen Speichers ( $>1000\text{ °C}$ ), sind auch hohe Temperaturen an den Heizelementen zu erwarten und die Energie wird hauptsächlich durch Strahlung an den Festkörper übertragen. Dabei sind Wärmeleitung und Strahlungsaustausch die treibenden Vorgänge.

Befindet sich der Speicher im Stillstand (zwischen Beladung und Entladung), sind die thermischen Verluste an die Umgebung maßgebend, da sie zwangsläufig zu einer Selbstentladung führen.

Bei der Entladung wird der Speicher mit dem Arbeitsmedium Luft durchströmt, wobei dem Speichermaterial thermische Energie entzogen wird. Dabei sind Wärmeübergang an der Festkörperoberfläche, Turbulenzen innerhalb des strömenden Fluids und Wärmeleitung sowohl im Fluid als auch im Festkörper von Bedeutung.

#### 3.1 3D Modellierung und stationäre CFD-Simulation

##### 3.1.1 Grundlagen CFD

Während einer CFD-Simulation werden eine Reihe von maßgebenden Gleichungen gelöst. Sie bestehen aus den Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen (RANS) [16].

Die Strömungsgrößen der exakten Navier-Stokes-Gleichungen werden bei der Reynold'schen Mittelung in die gemittelten und fluktuierenden Bestandteile zerlegt. Sie erfolgt für stationäre Berechnungen über Zeitintervalle und für instationäre Berechnungen in den meisten Fällen über Ensembles [17]. Dadurch kommen weitere Variablen hinzu, wodurch das Gleichungssystem unterbestimmt wird und Approximationen erforderlich sind. Ein bewährter Ansatz hierbei ist die Modellierung des Spannungstensors mittels empirischen Turbulenz- oder auch Wirbelviskositätsmodellen. Dadurch wird das Gleichungssystem numerisch lösbar. Das Turbulenzmodell **k- $\omega$ -sst** ist hier besonders hervorzuheben. Es ist die Weiterentwicklung des Baseline k- $\omega$  (BSL k- $\omega$ ) und hat damit auch die Vorzüge guter Ergebnisse in der Kernströmung von k- $\epsilon$  und in Wandnähe von k- $\omega$  vereint [16].

##### 3.1.2 Modellierung und Randbedingungen

Der gesamte Speicher wird auf die Strömungskanäle reduziert sowie in drei Teile und somit separate Simulationsmodelle aufgeteilt. Darunter ist der Luftverteiler (s. Abbildung 6), ein Minimalmodell des Kernes mit einem der insgesamt 48 Strömungskanäle und der Luftsammler inklusive Kaminzug (s. Abbildung 7). Die Modelle müssen sequenziell ausgeführt werden, da sie voneinander abhängig sind.

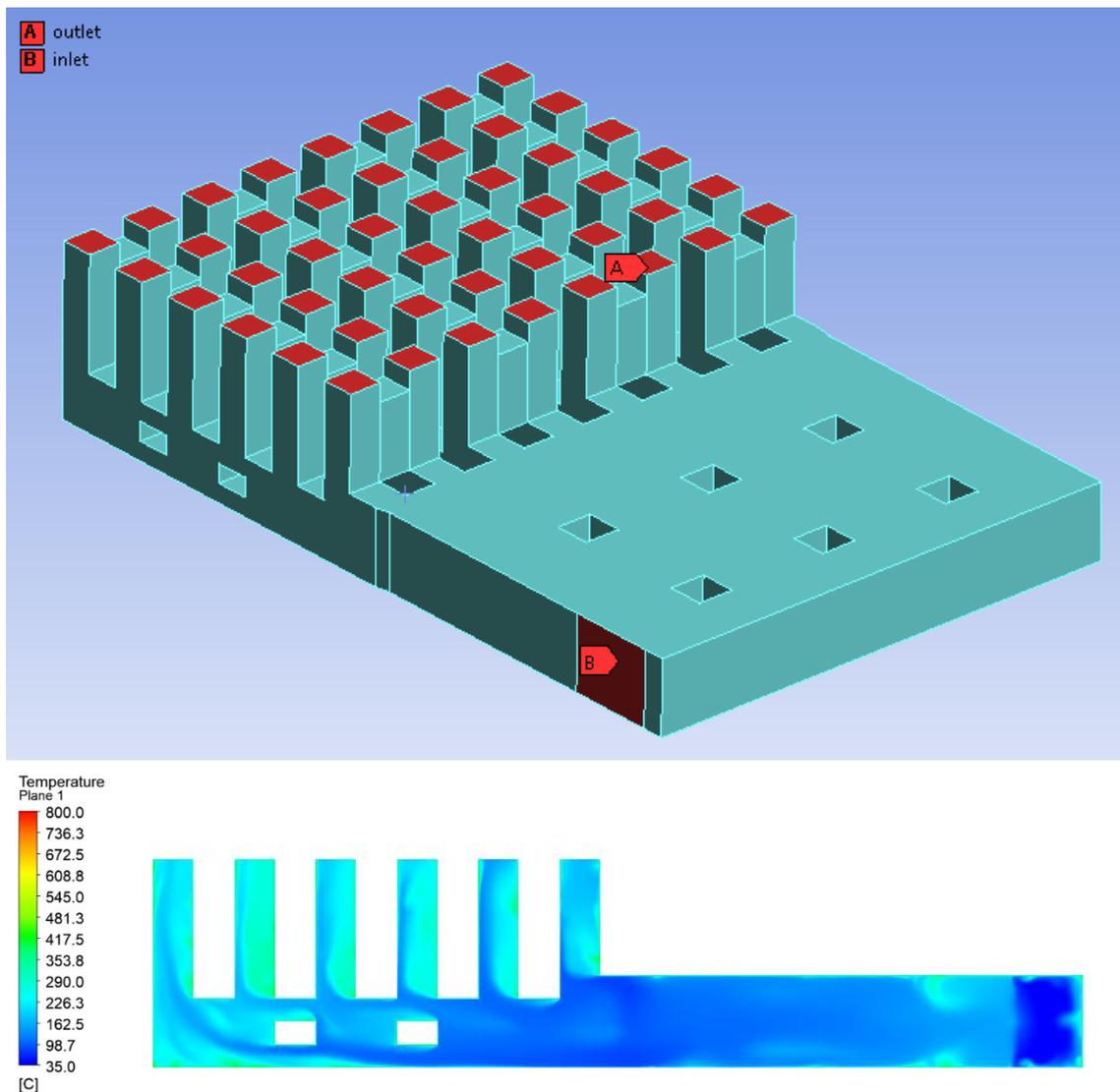


Abbildung 6: Darstellung der CFD Modellgeometrie und des Temperaturprofils aus der stationären Simulation des Luftverteilers.

Die Eintrittstemperatur beim Kern- und Luftsammlermodell ist von der Austrittstemperatur des vorgeschalteten Luftverteiler- bzw. Kernmodells abhängig, da das Arbeitsmedium (Luft) sich beim Durchströmen der Teilmodelle aufheizt.

Es folgt eine kurze Zusammenfassung der Simulationseinstellungen für die Simulation in Ansys Fluent:

1. Stationärer gekoppelter Gleichungslöser
2. Turbulenzmodell  $k-\omega$ -sst
3. Aktive Energiegleichung
4. Detailliertes Rechengitter mit aufgelöster Randschicht ( $y^+ \approx 1$ )
5. Randbedingungen:
  - Konstante Stein (Wand-)Temperatur  $T_{sp}$
  - Massenstrom  $\dot{m}_{in}$  und Temperatur  $T_{in}$  des Arbeitsmediums

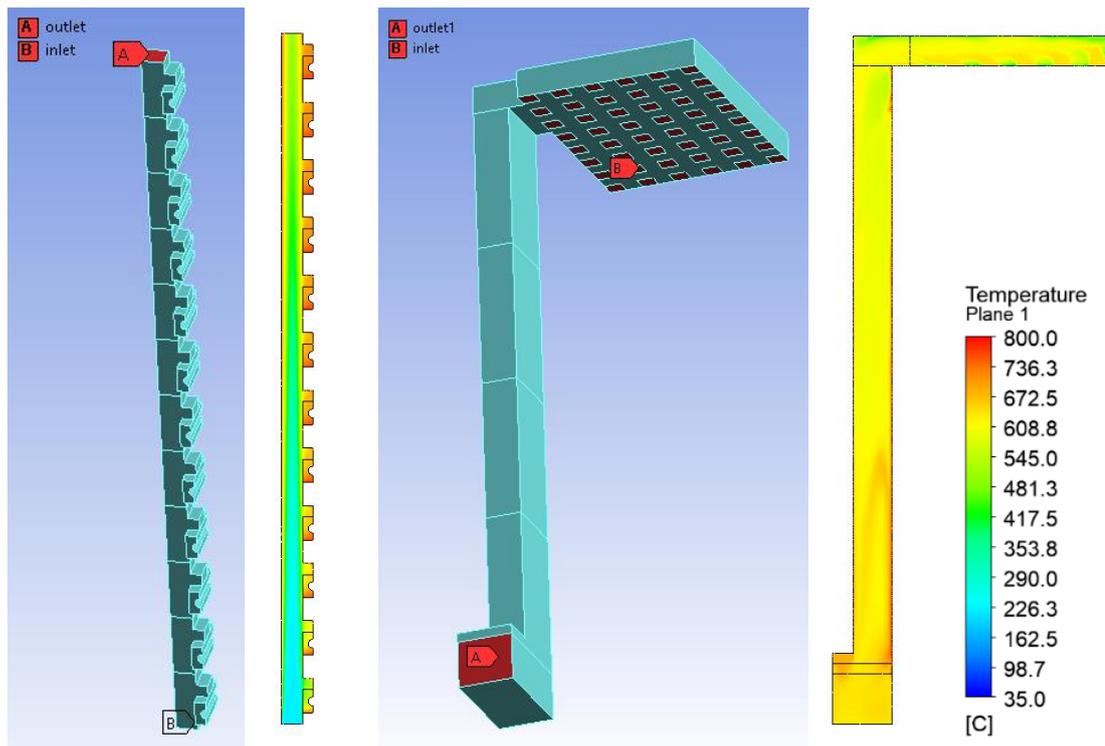


Abbildung 7: Darstellung der Modell Geometrien und des Temperaturprofile aus der stationären Simulation des Speicherkern-Minimalmodells (Links) und des Luftsammlers inklusive Kaminzug (Rechts).

Die Teilmodelle unterscheiden sich bei den Simulationseinstellungen nur in der Eintrittstemperatur des Arbeitsmediums und der Wandtemperaturen. Die Eintrittstemperatur in das erste Modell (den Luftverteiler) sowie alle Wandtemperaturen entstammen Messwerten aus den Experimenten.

Ziel der Simulationen ist es, einen mittleren Wärmeübergangskoeffizienten für die vier Bereiche Luftverteiler, Kern, Luftsammler und Kaminzug zu ermitteln. Dieser kann nicht direkt aus Fluent exportiert werden. Aus den Ergebnissen der mittleren Wärmestromdichte der Wand innerhalb und der mittleren Lufttemperatur am Austritt des jeweiligen Teilabschnittes kann zusammen mit den bekannten Wand- und Eintrittstemperaturen der Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha = \dot{q}_{konv} / \Delta T_m$  bestimmt werden. Dabei ist  $\dot{q}_{konv}$  die konvektive Wärmestromdichte von der Wand zum Fluid und  $\Delta T_m$  das logarithmische Mittel zwischen der mittleren Fluid Eintritts-, Austritts- und Wandtemperatur.

### 3.2 Abstrahierte Modellierung als thermisches Netzwerk

Die frei zugängliche Modellierungssprache Modelica wird seit 1996 von der Modelica Association weiterentwickelt [18]. Die Modelle lassen sich mit Parametern und Gleichungen beschreiben (akausale Modellierung) und weisen eine objektorientierte Struktur auf. Für die Modellierung von Systemen bietet Modelica eine große Auswahl an Systembibliotheken mit Teilmodellen für bestimmte physikalische Bereiche. Für das Gesamtmodell in dieser Arbeit wird lediglich auf die Modelica Standard Library sowie eigene Modelle zurückgegriffen. Die Modellierung und Simulation erfolgt in der ebenfalls frei zugänglichen Software OpenModelica [19]. Während der Simulation überführt der integrierte Compiler das Modell in ein mathematisches Gleichungssystem, was zunächst symbolisch manipuliert und vereinfacht

wird. Anschließend wird das System aus algebraischen und gewöhnlichen Differentialgleichungen über numerische Methoden wie dem hier verwendeten DASSL-Algorithmus gelöst [20].

### 3.2.1 Komponenten

Das Gesamtmodell des Hochtemperaturspeichers bildet ein thermisches Netz, bestehend aus konduktiven, konvektiven, strahlenden und kapazitiven Leitungen. Die Kopplung der jeweiligen Modelle erfolgt über HeatPorts (■ thermische Konnektoren) und FluidPorts (● Strömungskonnektoren). Die Flussgrößen (Erhaltungsgrößen), welche in einen Konnektor ein- und ausströmen, werden in Summe Null gesetzt. Für den HeatPort gilt die Bilanz der Wärmeströme  $\sum \dot{Q}_i = 0 \text{ W}$ , für den FluidPort gilt die Bilanz der Wärmekapazitätsströme  $\sum \dot{C}_i = \sum \dot{m}_i \cdot c_p = 0 \text{ W/K}$ . Die Potentialgröße beider Konnektoren bildet die Temperatur  $T$ .

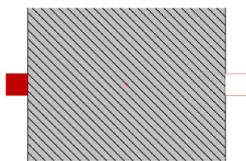


Abbildung 8:  
Einfache Wärmeleitung

Die einfache Wärmeleitung beschreibt den Wärmestrom zwischen zwei Punkten mit den Temperaturen  $T_1$  und  $T_2$  mit dem Abstand  $s$  in einem homogenen Festkörper mit konstanter Querschnittsfläche  $A$  (senkrecht zum Wärmefluss) und Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ .

$$\dot{Q}_{1 \rightarrow 2} = \lambda(T) \cdot \frac{A}{s} \cdot (T_1 - T_2) \quad (4)$$

Die Wärmeleitfähigkeit lässt sich als temperaturabhängige Funktion (Polynom des 4ten Grades) beschreiben.

$$\lambda(T) = A \cdot T^4 + B \cdot T^3 + C \cdot T^2 + D \cdot T + E \quad (5)$$

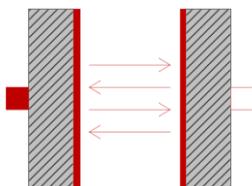


Abbildung 9:  
Wärmestrahlung

Im Bereich der Heizelemente erfolgt die Wärmeübertragung überwiegend durch Wärmestrahlung. Die Leistung ergibt sich aus der vierten Potenz der Temperaturen  $T_1$  und  $T_2$ , der strahlenden Oberfläche  $A$ , der Stefan-Boltzmann-Konstanten  $\sigma$  und den Emissionskoeffizienten  $\epsilon_1$  und  $\epsilon_2$ .

$$\dot{Q}_{1 \rightarrow 2} = \sigma \cdot \epsilon_1 \cdot \epsilon_2 \cdot A \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (6)$$

Die gesamte Speicherkapazität des HTS setzt sich aus mehreren thermischen Kapazitäten  $C = m \cdot c_p$  mit der homogenen Temperatur  $T$  zusammen. Der Wärmestrom in die Kapazität entspricht der Änderung der inneren Energie der Kapazität.

$$\dot{Q} = C \cdot \dot{T} \quad (7)$$

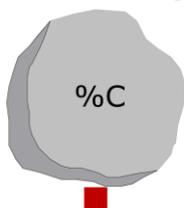


Abbildung 10:  
Thermische Kapazität

Über die Differenzialgleichung lässt sich die thermische Trägheit des Systems abbilden. Zur Lösung wird entweder die Starttemperatur der Kapazität  $T_{Start}$  oder die zeitliche Änderung der Starttemperatur  $\dot{T}_{Start}$  definiert.

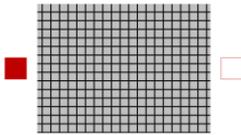


Abbildung 11:  
Kapazitive Wärmeleitung

Die thermische Modellierung von dickwandigen Körpern erfordert die Berücksichtigung der konduktiven und kapazitiven Widerstände. Das Modell der kapazitiven Wärmeleitung beinhaltet eine Reihenschaltung aus  $n$  Kapazitäten und  $n + 1$  Wärmeleitungen, siehe Abbildung 12. Die Zellanzahl  $n$  kann je nach Genauigkeit frei gewählt werden.

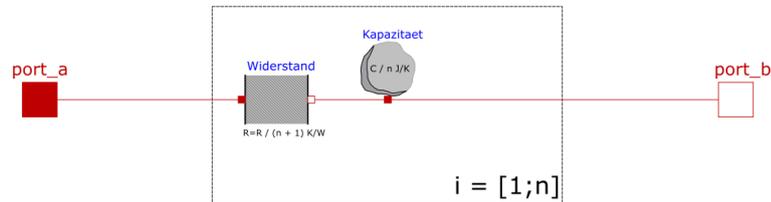


Abbildung 12: Modell der kapazitiven Wärmeleitung

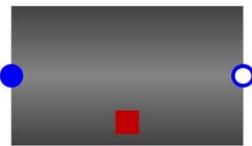


Abbildung 13:  
Strömungskanal

Die Wärmeübertragung vom Speichermaterial an die Luft erfolgt über Konvektion an den Wänden der Strömungskanäle. Es gilt die stationäre Energiebilanz

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{Festkörper} \rightarrow \text{Luft}} &= \dot{Q}_{1 \rightarrow 2} \\ &= \dot{C}_{\text{Luft}} \cdot (T_{\text{Luft, Austritt}} - T_{\text{Luft, Eintritt}}) \end{aligned} \quad (8)$$

Die dimensionslose Änderung der Lufttemperatur wird über die Betriebscharakteristik  $\Phi$  beschrieben.

$$\Phi = \frac{T_{\text{Luft, Austritt}} - T_{\text{Luft, Eintritt}}}{T_{\text{HeatPort}} - T_{\text{Luft, Eintritt}}} \quad (9)$$

Mit der Annahme, dass sich das Temperaturprofil der Luft entlang der Strömungsrichtung parallel zum Temperaturprofil des Festkörpers ausbreitet, gilt  $\Phi = \frac{\alpha \cdot A}{\dot{C}_{\text{Luft}} + \alpha \cdot A}$  [21]. Der Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$  und die Wärmeübertragerfläche  $A$  werden als Parameter vorgegeben.



Abbildung 14:  
Elektrisches Heizelement

Die Heizelemente wandeln den elektrischen Strom  $P_{el}$  über ohmsche Widerstände in Wärme um. Wird die thermische Kapazität der Heizelemente vernachlässigt gilt die Energiebilanz

$$\dot{Q}_{\text{Heizelement}} = -P_{el} \quad (10)$$

### 3.2.2 Parametrisierung Gesamtmodell

In Abbildung 15 ist das thermische Modell des HTS312 abgebildet. Die eintretende Luft passiert zunächst den Luftverteiler, der thermisch an die Isolierung des Luftvertailers ( $R_{\text{Iso\_Luftverteiler}}$ ), den HeatPort des Bodens ( $Q_{\text{Boden}}$ ) und die kapazitive Wärmeleitung zwischen dem Luftverteiler und der ersten Kernschicht ( $R_{\text{Kern\_Luftverteiler}}$ ) gekoppelt ist. Der Kernbereich enthält die Heizzonen, die Strömungskanäle und den wesentlichen Anteil der Gesamtspeicherkapazität. Die Diskretisierung des Kernbereiches (innerhalb des gestrichelten Rechtecks) erfolgt in der Höhe in 12 physikalisch identischen Ebenen. Die einzelnen Ebenen sind über eine Wärmeleitung ( $R_{\text{Kernschicht}}$ ) thermisch miteinander gekoppelt.

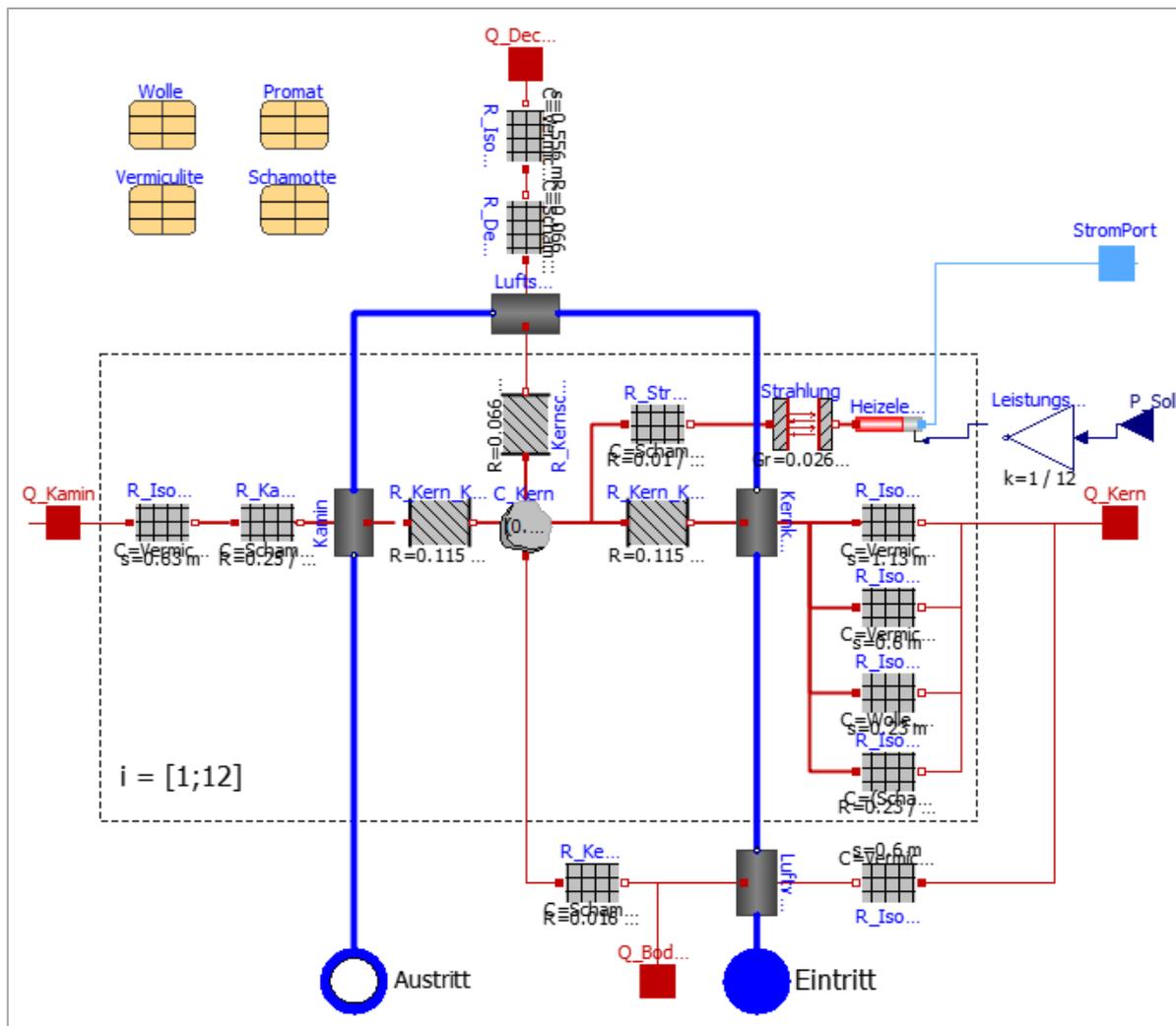


Abbildung 15: Darstellung des Speichermodells „HTS312“ aus OpenModelica.

Die Heizelemente stellen das Power-To-Heat-Element des Hochtemperaturspeichers dar. Innerhalb der Komponente wird der Strom über den elektrischen Anschluss (StromPort) in Wärme gewandelt. Der HeatPort der Heizelemente ist an das Strahlungsmodell gekoppelt, welches wiederum über eine kapazitive Wärmeleitung mit der Kernkapazität verbunden ist.

Innerhalb des Kerns wird die Luft über den Kernkanal aufgewärmt und durch den Luftsammler in den Kamin geleitet. Der Kamin ist ebenfalls in 12 Zonen diskretisiert und über einen thermischen Widerstand ( $R_{\text{Kern\_Kamin}}$ ) an die Kernkapazität gekoppelt. Die Wärmeverluste des Speichers werden an vier Knotenpunkten (Boden, Kern, Kamin und Decke) zusammengefasst. Die Verluste ergeben sich über die angrenzenden Isolier- und Mauerschichten, welche als Reihenschaltung und Parallelschaltung von kapazitiven Widerständen modelliert werden.

Zur Simulation des Speichersystems wird das Modell „HTS312“ mit den erforderlichen Randbedingungen verknüpft, siehe Abbildung 16. Am Luftertritt wird die Temperatur und der Wärmekapazitätsstrom definiert. Bei dem Luftaustritt des HTS werden die Wärmeverluste und die Kapazität der Rohrleitung (Rohrleitung\_Austritt) mitberücksichtigt, bevor die Temperatur am Systemaustritt gemessen wird.

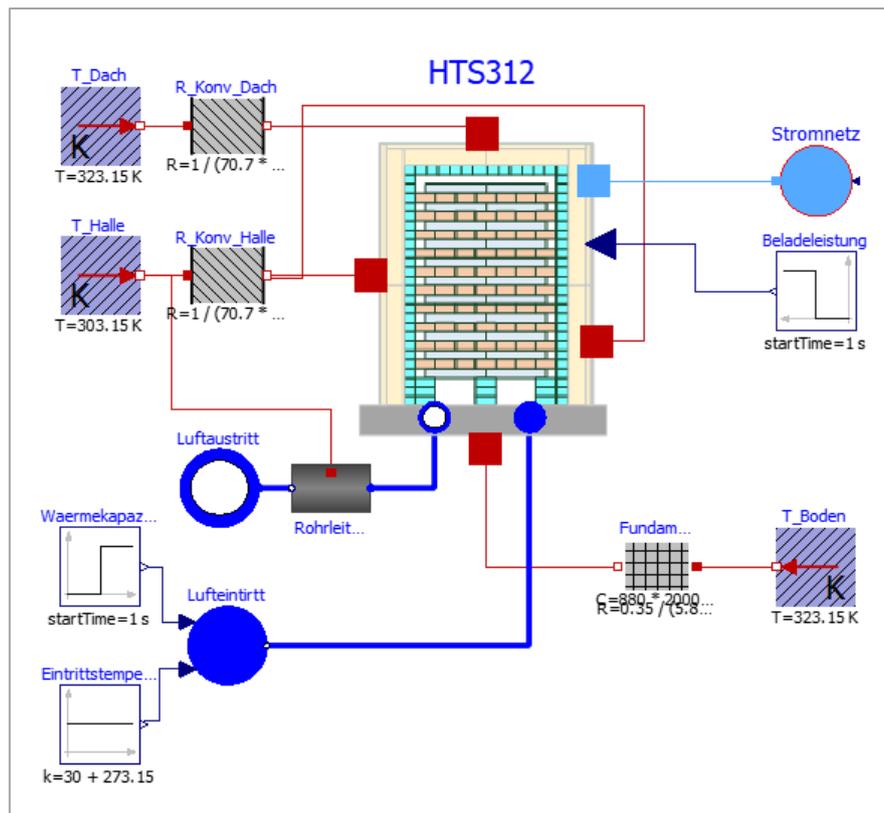


Abbildung 16: Darstellung des übergeordneten simulationsfähigen Modells mit Randbedingungen für den „HTS312“.

Die Wärmeverluste des HTS, welche über die Isolierung an die Umgebung übertragen werden, sind jeweils über einen thermischen Widerstand an die Referenztemperatur gekoppelt. Über eine Wärmeleitung können die äußeren Widerstände der Seitenflächen von Kern und Kamin modelliert werden, wobei anstelle des Quotienten aus Wärmeleitfähigkeit und Schichtdicke der Wärmeübergangskoeffizient berücksichtigt wird. Für die vertikale bzw. horizontale Fläche wurde ein Wärmeübergangskoeffizient von  $7,7 \text{ W/m}^2\text{K}$  bzw.  $9,2 \text{ W/m}^2\text{K}$  ermittelt [22]. Das Fundament des HTS, welches das Bindeglied zwischen Luftsammler und Hallenboden bildet, wird über eine kapazitive Wärmeleitung dargestellt.

Die elektrische Beladeleistung wird über eine äußere Funktion vorgegeben. Die eingespeiste Wirkleistung wird dabei dem Stromnetz entnommen, wodurch das Gesamtmodell energetisch bilanziert werden kann.

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Versuchsreihe Beladung

Bei dem Beladungsversuch wurde der Speicher nach ausreichender Abkühlphase bei Umgebungstemperatur (ca.  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ ) in Betrieb genommen, sodass eine homogene Temperatur im gesamten Speicher angenommen werden kann. Während der Beladung wurden die Heizelemente bei voller Leistung (ca.  $312 \text{ kW}$ ) betrieben. Nach  $4,5 \text{ h}$  Beladungszeit sind im experimentellen Aufbau Heizelemente aufgrund eines Defektes ausgefallen und somit wurde

die Auswertung auf diesen Zeitraum begrenzt. Da eine Reparatur eine lange Abkühlphase zur Folge hat, wurden die folgenden Versuche mit der reduzierten Anzahl fortgesetzt. Bei der Gegenüberstellung werden sowohl die Thermoelemente in den vier Messzonen (gemittelt) als auch die zwölf Thermoelemente in der unmittelbaren Nähe der Heizelemente herangezogen.

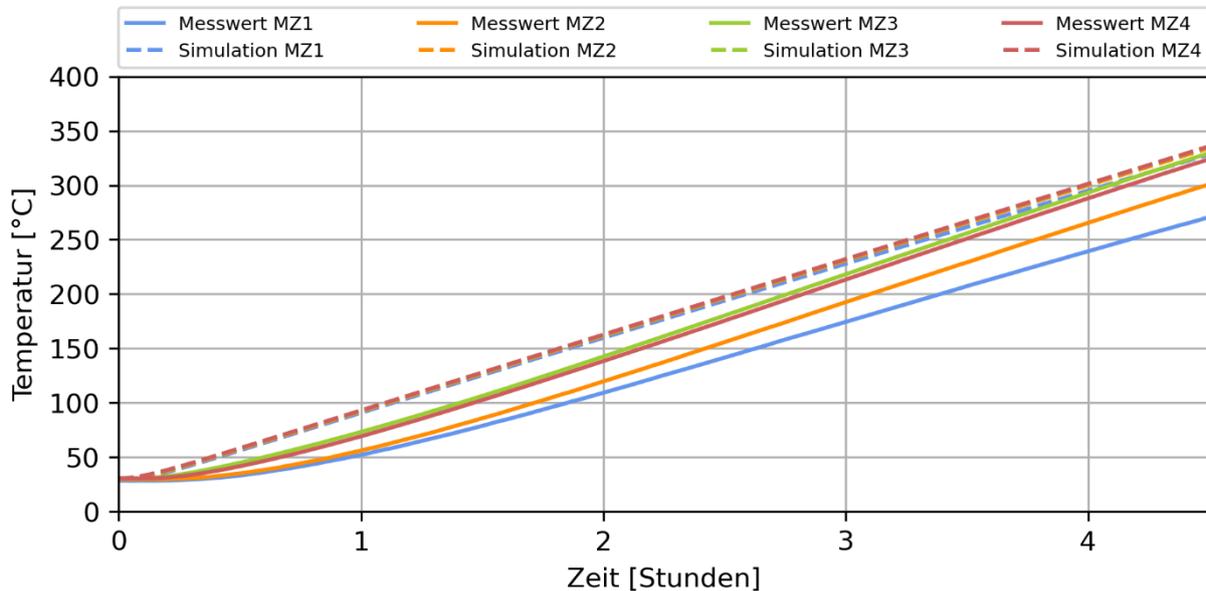


Abbildung 17: Gegenüberstellung der Messwerte und Simulationsergebnisse in den Messzonen beim Beladungsversuch.

Abbildung 17 zeigt die Aufheizung der vier Messzonen im Speicherkern. Die Simulation zeigt in der ersten halben Stunde eine kürzere Verzögerung als die Messungen. Die Messzonen spreizen sich im Verlauf des Experiments ebenfalls weiter auf. Die Steigung der mittleren Temperaturen stimmen qualitativ gut überein.

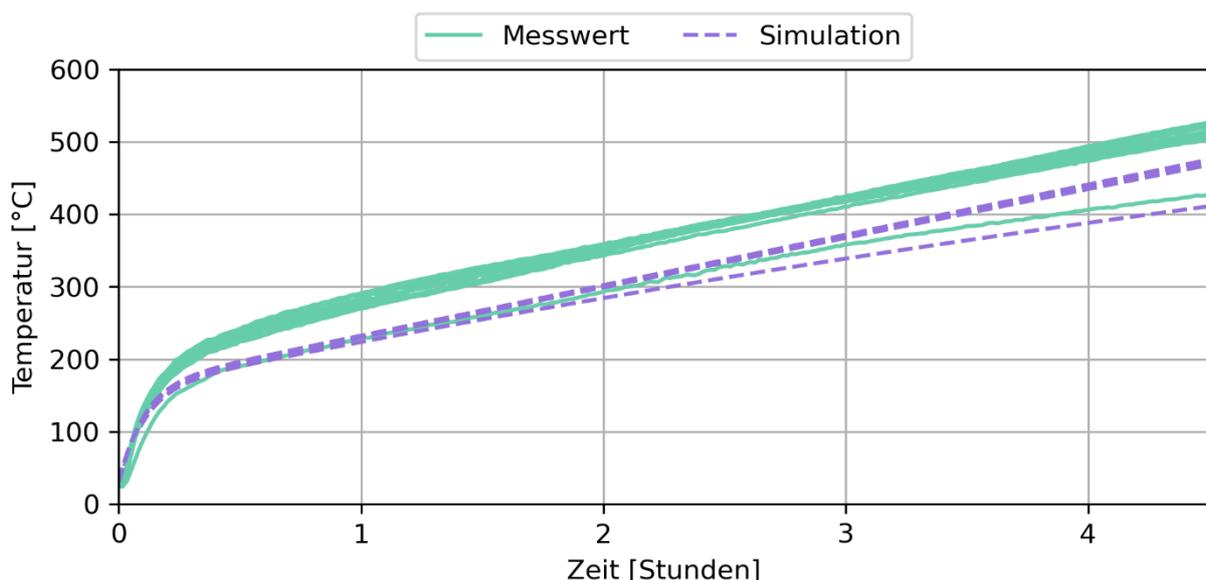


Abbildung 18: Gegenüberstellung der Messwerte und Simulationsergebnisse im Bereich der Heizelemente beim Beladungsversuch.

In Abbildung 18 ist das Aufheizverhalten der ersten Steinschicht an den Heizelementen dargestellt. Es ist erkennbar, dass die Ergebnisse des Modells deutlich unter den Messwerten liegen, jedoch stimmen beide Aufheizverhalten in ihrem qualitativen Verlauf überein.

## 4.2 Versuchsreihe Entladung

Für den Entladungsversuch wurde der Speicher mit einem Sollwert von 1000 °C aufgeheizt und für eine möglichst homogene Durchheizung drei Tage auf Temperatur gehalten. Da der Beladungsregler eine interne Hysterese von 50 K aufweist wurden im Mittel ca. 950 °C erreicht.

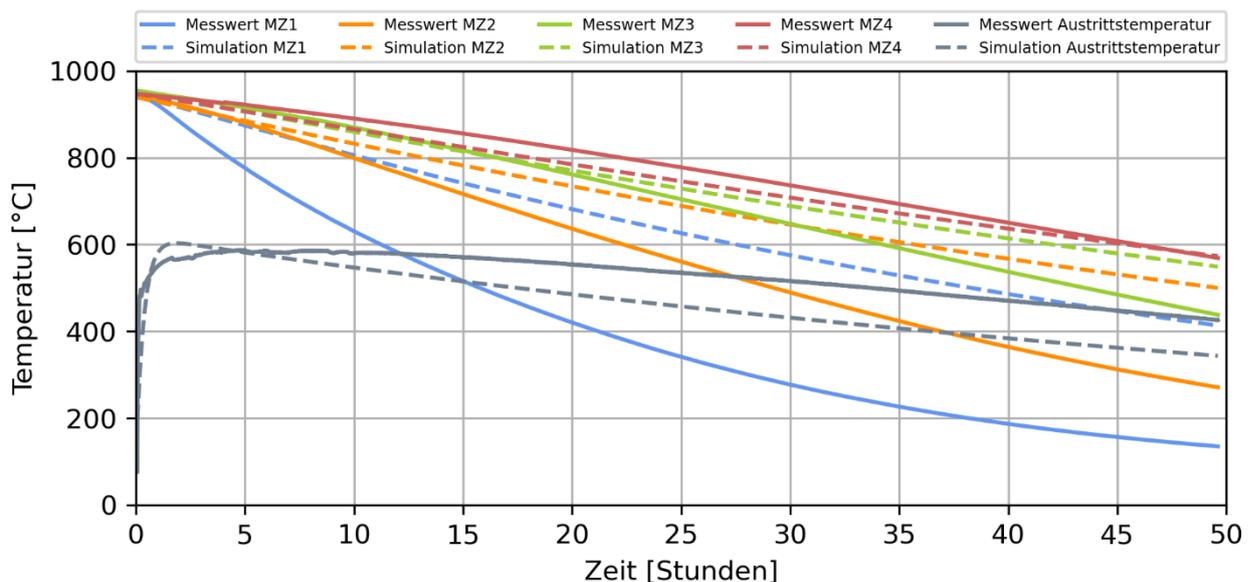


Abbildung 19: Gegenüberstellung der Messwerte und Simulationsergebnisse in den Messzonen sowie der Austrittstemperatur beim Entladungsversuch.

Anschließend wurde der Speicher mit einem Massenstrom von ca. 0,133 kg/s über einen Zeitraum von fast 50 h entladen. Zur Auswertung wurden die mittleren Temperaturen in den vier Messzonen sowie die Austrittstemperatur des Heißgases herangezogen.

Abbildung 19 zeigt den charakteristischen Entladungsverlauf des Speichers. Die Messung weist im Vergleich zur Simulation eine deutlich größere Spreizung zwischen den Messzonen auf. Besonders die unteren Zonen entladen sich deutlich schneller als im Modell. Die Austrittstemperatur weicht im Betrag ab, aber kann das qualitative Verhalten wiedergeben.

## 4.3 Versuchsreihe Stillstand

Vor Beginn des Stillstandsversuches wurde der Speicher auf 550 °C aufgeheizt. Bedingt durch die oben erwähnte Regelung hat sich eine Temperaturschichtung von ca. 400 – 550 °C eingestellt. Nach einer Durchheizzeit wurde der Speicher abgestellt und die mittleren Temperaturen der Messzonen über einen Zeitraum von 19 Tagen ausgewertet.

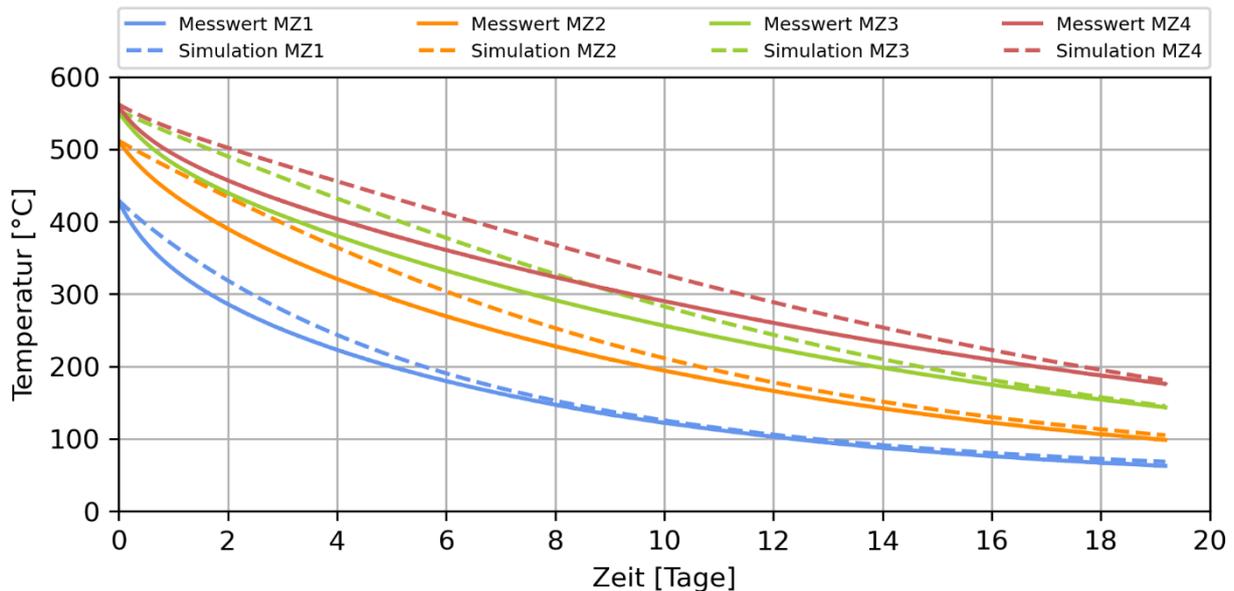


Abbildung 20: Gegenüberstellung der Messwerte und Simulationsergebnisse in den Messzonen beim Stillstandsversuch.

Die realen Wärmeverluste des HTS312 waren spürbar höher als in der Projektierung vorausgerechnet. Dieser Umstand war einer zunächst noch fehlenden Temperaturabhängigkeit des anhand der Datenblätter ermittelten Wärmeleitkoeffizienten der verwendeten Isoliermaterialien geschuldet. Der charakteristische Verlauf der Abkühlung (s. Abbildung 20) wird nach der Anpassung besonders in den unteren Zonen gut wiedergegeben. Die oberen Zonen zeigen im Versuch ein stäteres Abkühlverhalten, als es das Modell wiedergibt. Am Ende des Stillstandes sind Modell und Experiment nahezu deckungsgleich.

## 4.4 Fehlerbetrachtung

### 4.4.1 Simulationen

Im Bereich von numerischen Strömungssimulationen wie auch bei den abstrahierten Modelica-Simulationen sind mehrere Fehlerquellen aufzuzeigen [17]:

- Diskretisierungsfehler
- Iterationsfehler
- Modellfehler

Diskretisierungsfehler beschreiben eine Abweichung, die durch die Diskretisierung der Modellgleichungen zu einem algebraischen Gleichungssystem entsteht. Sie nehmen mit Verfeinerung des Rechengitters bis zu einem Minimum ab. Deswegen werden Sensitivitätsanalysen durchgeführt, um diese möglichst klein zu halten. Dabei wird das Rechengitter von einem groben Startpunkt aus schrittweise verfeinert, bis die Änderung des benötigten Parameters vernachlässigbar wird. In diesem Fall wird beispielhaft die Austrittstemperatur aus dem Modell und die übertragene Leistung an das Fluid dazu betrachtet. Wie man in Abbildung 21 sieht, verändern sie sich ab einer Zellenzahl von  $1,28 \cdot 10^7$  nicht mehr wesentlich. Somit sind die Ergebnisse netzunabhängig.

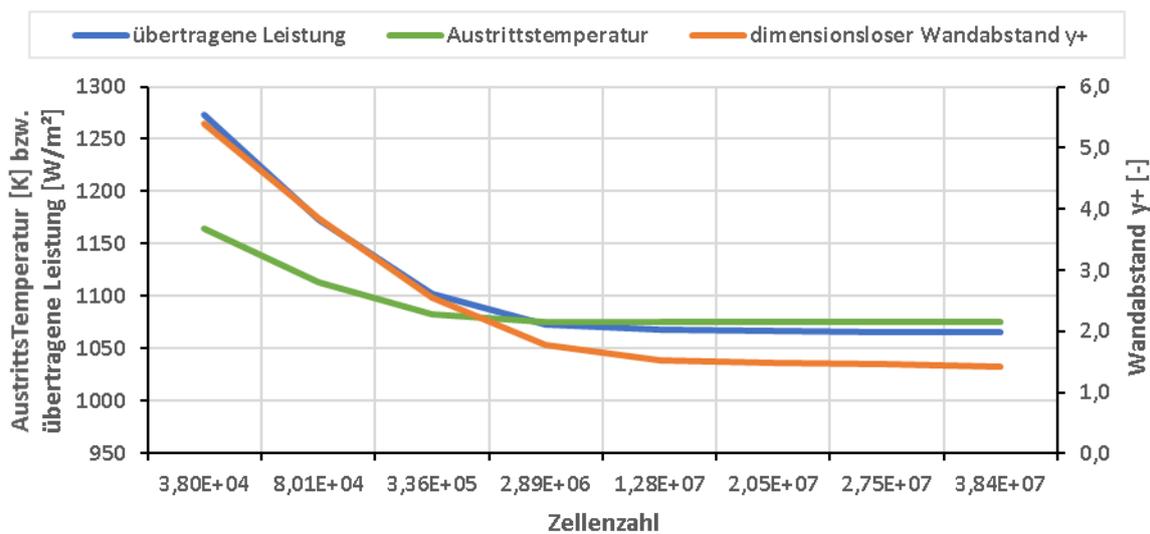


Abbildung 21: Sensitivitätsanalyse für den stationären Entladungsfall im Kernbereich.

Unter Iterationsfehlern versteht man bei CFD-Simulationen die Abbruchfehler der Approximationen am Ende der Iterationen eines Zeitschrittes. Sie hängen von der Anzahl an gespeicherten Nachkommastellen ab und können vernachlässigt werden, wenn die Residuen der maßgebenden Gleichungen klein genug ausfallen. Da diese nie null werden, werden eine Konvergenzgrenzen gesetzt, die dafür sorgen, dass Iterationsfehler klein genug ausfallen [17].

Modellfehler entstehen durch Vereinfachung bei der Modellierung und Annahmen von unbekanntem Gegebenheiten. Dazu gehören geometrische Vereinfachungen oder die Reduktion der Stoffwerte auf temperaturunabhängige Eigenschaften.

Die Einteilung des Speicherkerns innerhalb des Modelica-Modells zeigt im Vergleich zur CFD nur eine grobe Abbildung der realen Struktur des HTS. Die Kernkapazitäten sowie die wärmeübertragenden Flächen können das Temperaturprofil nur abschnittsweise annähern, was zu maßgebenden Fehlerquellen bei der Berechnung der Wärmeströme führen kann.

#### 4.4.2 Messungen

Zu den Fehlern bei Messungen gehören die Messabweichung, früher auch Messfehler genannt. Sie treten infolge von Messgeräteabweichungen, dem Messverfahren, der Umgebung und dem Verhältnis des instationären Verhaltens des Messinstrumentes im Vergleich zu dem des gemessenen Prozesses.

Die Massenstrommessung ist eine mögliche Fehlerquelle bei der Bewertung der Entladungsversuche, da der Massenstrom, wie in Kapitel 2.3 erwähnt, nur indirekt bestimmt werden kann.

In diesem speziellen Fall gehört auch die unbekannt Position der Thermoelemente dazu. Es kann wie in jedem Messaufbau nur eine endliche Anzahl an Punkten im Speicher gemessen und ausgewertet werden. Da im Speicher ein großer Temperaturgradient innerhalb der Messzonen herrscht und die Position der Thermoelemente vermutlich nicht repräsentativ ist, ist anzunehmen, dass der Fehler vom mittleren Messwert zu einem tatsächlich repräsentativen Mittelwert des Speichers deutlich größer ausfällt als durch die anderen möglichen

Fehlerquellen. So herrscht innerhalb jeder Messzone zu Beginn des Entladungsversuchs bereits eine Temperaturdifferenz von ca. 50 K zwischen den einzelnen TE. Aus diesem Grund wird hier auf die Bestimmung der Messabweichung verzichtet.

## 5 Fazit und Ausblick

Die Validierung der drei betrachteten Speicherphasen liefert detaillierte Erkenntnisse zur Güte der Berechnung der instationären thermischen Vorgänge innerhalb des HTS. Trotz der bekannten Modell- und Messfehler zeigen die Ergebnisse eine qualitative Übereinstimmung mit den Messdaten.

Das entwickelte Modell erlaubt eine schnelle und vor allem kostengünstige Untersuchung der Speichercharakteristiken durch die Anpassung verschiedenster Parameter, ohne zusätzliche experimentelle Versuchsreihen.

Aufbauend auf dem Modell kann der HTS in Hinsicht auf die Entladecharakteristik optimiert werden, um die Speicherkapazität möglichst gut ausnutzen zu können. Eine Maßnahme liegt in der Optimierung des internen Wärmeübergangs. Kleine Kanalabstände verringern die Wärmeleitwiderstände und erhöhen zugleich den Wärmeübergangskoeffizienten, was ebenfalls die Entladecharakteristik verbessert.

Die Weiterentwicklung des HTS bedarf einer Verbesserung der Wärmeverluste zur Umgebung. Die aktuellen Stillstandsversuche zeigen, dass sich die anfängliche Temperaturdifferenz bereits nach einer Woche halbiert, was in der Daueranwendung des Speichersystems mit hohen Kosten verbunden ist. Als Verbesserungsmöglichkeiten sind hierbei eine Optimierung der Isolierung und eine Minimierung der Hüllfläche durch eine höhere Packungsdichte im Speichermaterial zu nennen.

**Literatur**

- [1] TECHNISCHE HOCHSCHULE MITTELHESSEN: *Forschungsprojekt: EnEff:Stadt FlexQuartier Gießen*. URL <https://www.thm.de/etem/forschung/projekte/drittmittelprojekte/laufende-projekte/flexquartier.html>. - abgerufen am 28.07.2021
- [2] ZAKERI, BEHNAM; SYRI, SANNA: Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Bd. 42 (2015), S. 569–596
- [3] SIEMENS GAMESA RENEWABLE: *Electrical Thermal Energy Storage*. URL <https://www.siemensgamesa.com/products-and-services/hybrid-and-storage/thermal-energy-storage-with-etes>. - abgerufen am 28.07.2021
- [4] LECHNER, STEFAN; BEHLER, KLAUS; HOLY, FELIX; THÖLKEN, DANIEL; ASCHER, TORSTEN; VON DER GRÜN, FLORIAN; RICHTER, MANUELA: *Sektorenübergreifender Hochtemperaturspeicher zum Ausgleich volatiler erneuerbarer Stromerzeugung*. Gießen, 2020
- [5] RICHTER, MANUELA; HERZOG, SERGEJ; LECHNER, STEFAN: *Simulative Untersuchungen der thermischen Be- und Entladungsprozesse eines sensiblen Hochtemperaturwärmespeichers*. Wien, Austria, 2019, S. 16
- [6] GIL, ANTONI; MEDRANO, MARC; MARTORELL, INGRID; LÁZARO, ANA; DOLADO, PABLO; ZALBA, BELÉN; CABEZA, LUISA F.: State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1—Concepts, materials and modellization. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Bd. 14 (2010), Nr. 1, S. 31–55
- [7] KHARE, S.; DELL'AMICO, M.; KNIGHT, C.; MCGARRY, S.: Selection of materials for high temperature sensible energy storage. In: *Solar Energy Materials and Solar Cells* Bd. 115 (2013), S. 114–122
- [8] SINGH, HARMEET; SAINI, R.P.; SAINI, J.S.: A review on packed bed solar energy storage systems. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Bd. 14 (2010), Nr. 3, S. 1059–1069
- [9] ATTONATY, KEVIN; STOUFFS, PASCAL; POUVREAU, JÉRÔME; ORIOL, JEAN; DEYDIER, ALEXANDRE: Thermodynamic analysis of a 200 MWh electricity storage system based on high temperature thermal energy storage. In: *Energy* Bd. 172 (2019), S. 1132–1143
- [10] DUMONT, OLIVIER; FRATE, GUIDO FRANCESCO; PILLAI, ADITYA; LECOMPTE, STEVEN; DE PAEPE, MICHEL; LEMORT, VINCENT: Carnot battery technology: A state-of-the-art review. In: *Journal of Energy Storage* Bd. 32 (2020), S. 101756
- [11] STEVANOVIC, DRAGAN: High Temperature Energy Storage (HiTES) with Pebble Heater Technology and Gas Turbine. In: CHEN, X.; CAO, W. (Hrsg.): *Advancements in Energy Storage Technologies* : InTech, 2018 — ISBN 978-1-78923-054-3
- [12] ODENTHAL, CHRISTIAN: *Analyse und Demonstration des CellFlux-Speichersystems*. Stuttgart, Universität Stuttgart, 2015
- [13] SOLARINSTITUT JÜLICH: *Energy Storage Projects; TESS 2.0*. URL <https://www.fh-aachen.de/en/research/solar-institute-juelich/focus-areas/projects-energy-storage/>. - abgerufen am 28.07.2021
- [14] BENATO, ALBERTO; STOPPATO, ANNA: Energy and cost analysis of an Air Cycle used as prime mover of a Thermal Electricity Storage. In: *Journal of Energy Storage* Bd. 17 (2018), S. 29–46
- [15] BENATO, ALBERTO; STOPPATO, ANNA: Pumped Thermal Electricity Storage: A technology overview. In: *Thermal Science and Engineering Progress* Bd. 6 (2018), S. 301–315
- [16] ANSYS INC.: *ANSYS® Fluent Theory Guide 2021R2*. URL [https://ansyshelp.ansys.com/Views/Secured/corp/v212/en/pdf/Ansys\\_Fluent\\_Theory\\_Guide.pdf](https://ansyshelp.ansys.com/Views/Secured/corp/v212/en/pdf/Ansys_Fluent_Theory_Guide.pdf). - abgerufen am 09.08.2021
- [17] FERZIGER, JOEL H.; PERIĆ, MILOVAN; STREET, ROBERT L.: *Numerische Strömungsmechanik*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2020 — ISBN 978-3-662-46543-1

- [18] MODELICA ASSOCIATION ET.AL.: *The Modelica Association*. URL <https://modelica.org/>. - abgerufen am 09.08.2021-
- [19] OPEN SOURCE MODELICA CONSORTIUM (OSMC): *OpenModelica*. URL <https://openmodelica.org/>. - abgerufen am 09.08.2021-
- [20] PETZOLD, LINDA: A description of DASSL: A differential/algebraic system solver. In: *10th IMACS World Congress*, 1982
- [21] STRELOW, OLAF: Allgemeines Simulationsmodell für Thermische Regeneratoren. In: *THM Hochschulschriften* Bd. 20 (2021), S. 41
- [22] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: DIN EN 12831-1:2017, Energetische Bewertung von Gebäuden – Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast – Teil 1: Raumheizlast, Modul M3-3, Beuth Verlag GmbH (2017)