

Simulative Untersuchungen der thermischen Be- und Entladungsprozesse eines sensiblen Hochtemperaturwärmespeichers

Manuela RICHTER¹, Sergej HERZOG², Prof. Dr.-Ing. Stefan LECHNER³
Institut für Thermodynamik, Energieverfahrenstechnik und Systemanalyse (THESA)
der Technischen Hochschule Mittelhessen (THM)

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 13FH163IN6 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Kurzfassung:

Die Erforschung und Entwicklung von neuartigen Speichersystemen ist durch den Ausbau der Erneuerbaren Energien unabdingbar. Besonders Konzepte, die eine Sektorenkopplung sowie die Bereitstellung von Regelenergie abdecken, sorgen für ein sicheres und stabiles Netz. Im Rahmen eines Forschungsprojektes wird am Zentrum für Energietechnik und Energiemanagement (etem.THM) sowie dem THESA-Institut der THM ein solches Speichersystem konzipiert und erbaut. Die vorliegende Arbeit stellt die simulativen Untersuchungen des Hochtemperatur-wärmespeichers, welche auf der Graphentheorie basieren, sowie deren Ergebnisse und Auswirkungen auf das Projekt vor.

Keywords: Hochtemperaturwärmespeicher, Graphentheorie, Simulation, thermisches Netzwerk

1 Motivation, Fragestellung und Herangehensweise

Aufgrund der fluktuierenden und nicht bedarfsgerechten Einspeisung der Erneuerbare-Energien (EE)-Anlagen ins Stromnetz steigt der Bedarf an Regelenergie zur Sicherstellung der Netzsicherheit und -stabilität. In Zuge dessen ist die Forschung und Entwicklung von Speichersystemen in den Fokus der Aufmerksamkeit gerückt [1]. Insbesondere Hochtemperaturspeicher sind Gegenstand diverser Forschungsvorhaben [2, 3], so auch an der Technischen Hochschule Mittelhessen (THM). Im Forschungsprojekt High-T-Stor wird ein Speichersystem bestehend aus einem sensiblen Hochtemperaturwärmespeicher sowie einer Rückverstromungseinheit erforscht, wobei das System in der Lage ist, sehr flexibel Überschussstrom zu speichern und zudem in hohem Maße Regelenergie bereitzustellen. Diese Abhandlung konzentriert sich auf den Hochtemperaturwärmespeicher sowie dessen Verhalten bei Be- und Entladung, welches zunächst Einfluss auf die Konstruktion des Speichers und anschließend auf die Betriebsstrategie des gesamten Systems hat. Von zentraler Bedeutung ist hierbei die zeitabhängige Temperaturverteilung im Wärmespeicher,

¹ Jungautorin. E-Mail: manuela.richter@me.thm.de, Tel.: +49-641-3092194, Web: www.thm.de/thesa Adresse: Wiesenstraße 14, 35390 Gießen

² Jungautor. E-Mail: sergej.herzog@me.thm.de, Tel.: +49-641-3092185, Web: www.thm.de/thesa Adresse: Wiesenstraße 14, 35390 Gießen

³ E-Mail: stefan.lechner@me.thm.de, Tel.: +49-641-3092116, Web: www.thm.de/thesa Adresse: Wiesenstraße 14, 35390 Gießen

welche den aktuellen Beladezustand (engl. State of Charge, SOC) angibt und somit ein entscheidendes Kriterium für die Funktionsfähigkeit des Speichersystems darstellt. Die Frage lautet daher: Wie laufen die dynamischen Wärmeübertragungsvorgänge bei der Be- und Entladung des keramischen Energiespeichers ab und welche Verbesserungspotentiale hinsichtlich dessen Geometrie und Betriebsweise lassen sich daraus ableiten?

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde diese Frage in zwei (Teil-) Fragen aufgegliedert. Zu Beginn des Projektes standen die geometrischen Parameter des Wärmespeichers im Vordergrund, da eine Demonstrationsanlage geplant werden musste. Hierfür wurden in zwei voneinander unabhängigen Modellen die Beladung sowie Entladung untersucht. Mittels dieser simulativen Untersuchungen wurde zunächst eine Machbarkeitsstudie in Form einer Parameterstudie durchgeführt und daraus folgend konstruktive Randparameter festgelegt.

Die Frage der Betriebsstrategie ist für die Nutzung der Demonstrationsanlage von Interesse, weshalb die ersten Modelle zusammengeführt und an die reale Geometrie sowie die verwendeten Speichermaterialien angepasst werden. Mit diesem Modell soll untersucht und vorausgesagt werden, wie sich der Speicher in der Realität verhält und welche regelungstechnischen Varianten beim Betrieb der Demonstrationsanlage vorteilhaft sind. Mit den Messdaten der Demonstrationsanlage erfolgt die Validierung und/oder Optimierung des Modelles.

2 Sensibler Hochtemperaturwärmespeicher

2.1 Forschungsprojekt

Der in dieser Abhandlung betrachtete sensible Hochtemperaturwärmespeicher ist Teil eines Speichersystems, welches im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projektes „Sektorenübergreifender Hochtemperaturspeicher zum Ausgleich volatiler erneuerbarer Stromerzeugung (High-T-Stor)“ [4] entwickelt und gebaut wird. Das Projekt wird am Zentrum für Energietechnik und Energiemanagement der Technischen Hochschule Mittelhessen (etem.THM) durchgeführt.

2.2 Speicherkonzept

Grundlage des Speicherkonzeptes [5] ist die Wandlung elektrischen Stromes mittels elektrothermischer Verfahren in sensible Wärme und eine Rückwandlung der sensiblen Wärme in elektrischen Strom durch eine Rückverstromung mit Wärmekraftmaschinen, siehe Abbildung 1.

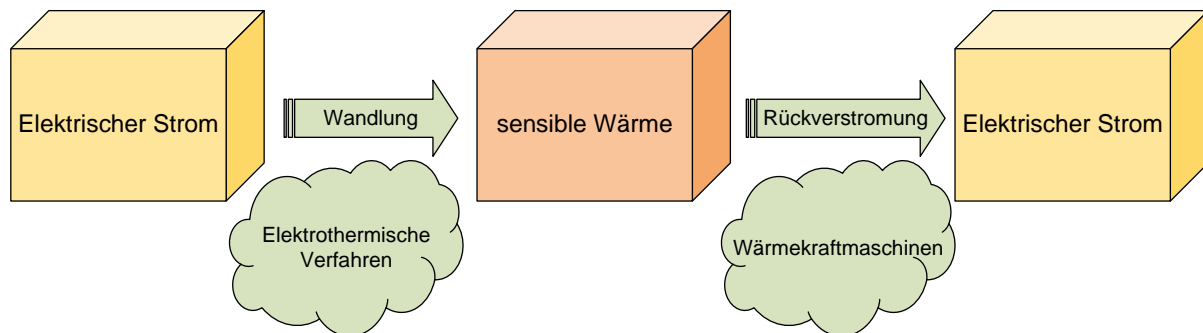


Abbildung 1 Allgemeines Speicherkonzept

Die direkte Wandlung von elektrischer in thermische Energie erfolgt durch die Verwendung elektrischer Heizelemente, welche in horizontalen Kanälen derart in den Speicher integriert sind, dass sie über Strahlung das keramische Speichermaterial erwärmen. Hierbei wird durch die Werkstoffwahl ein Temperaturniveau oberhalb 1000 °C ermöglicht, sodass die eingespeicherte sensible Wärme ein hohes Exergieniveau aufweist.

Zum Zwecke der Entladung weist der Speicher weiterhin vertikale Strömungskanäle auf, durch die ein Fluid (vorzugsweise Luft) strömt und sich dabei durch Konvektion erwärmt. Das so erwärmte Fluid tritt dann in den Rückverstromungsprozess ein und wird durch die inverse Anordnung der Turbine unter Abgabe von Energie von Umgebungsdruck auf Unterdruck entspannt. Dieses Verfahrensprinzip ermöglicht, dass die Speichereinheit bei Umgebungsdruck betrieben werden kann und somit als druckloser Behälter ausführbar ist.

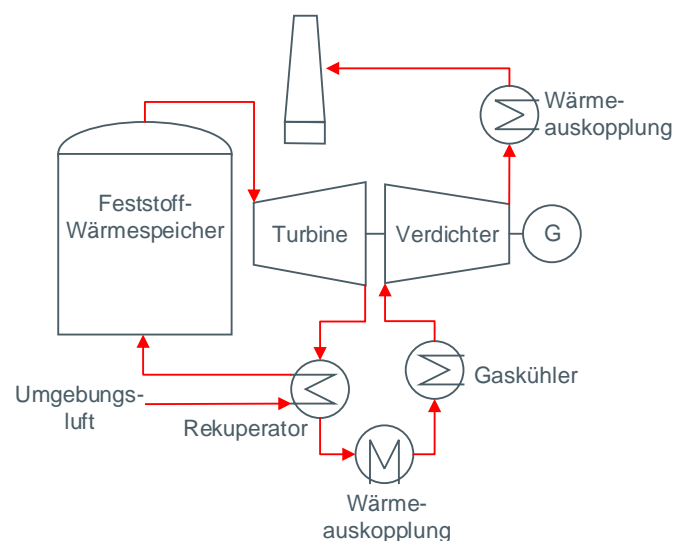


Abbildung 2 Speichersystem

Über einen Rekuperator wird eine Wärmerückgewinnung zwischen heißem Strom (Arbeitsmedium, welches aus der Turbine austritt) und kaltem Strom (Arbeitsmedium, dass in den Speicher strömt) sichergestellt. Neben der Rückumwandlung in elektrische Energie ermöglicht das Speichersystem durch Wärmeauskopplung auch die Einspeisung in Fern- und Nahwärmenetze.

2.3 Demonstrationsanlage

Die aufgebaute Demonstrationsanlage umfasst ein gesamtes Speichervolumen inklusive Isolierung von rund 65 m³, darin verbaut sind 18 Tonnen Speichermaterial, welches auf eine Speichertemperatur von 1000 °C aufgewärmt wird. Eine Begrenzung auf maximal 1000 °C ist dem Isolationsmaterial geschuldet, das Speichermaterial kann höhere Temperaturen aushalten. Die Beladung erfolgt durch 48 Heizelemente mit einer jeweiligen Leistung von 6,5 kW, sodass der Speicher eine Gesamtleistung von 312 kW und eine nutzbare Speicherkapazität, bezogen auf den Betriebsfall (Pendelbetrieb zwischen 500 °C und 1050°C), von rund 3300 kWh aufweist. Die gesamte Kapazität, bezogen auf die Temperaturdifferenz zwischen Umgebung und maximaler Speichertemperatur, beträgt 6200 kWh.

Entladen wird der Speicher über 48 Entladungskanäle mit einer Wärmeübertragungsfläche von rund 90 m².

3 Modell und Simulation

3.1 Modellierungsgrundlagen

Durch die Modellierung soll das dynamische Verhalten des Speichers im Falle der Beladung sowie der Entladung untersucht werden. Hierbei ist es im Zuge der Modellierung sowie deren Beschreibung vorteilhaft, den Speicher als ein technisches System aufzufassen. Dieses besteht im Allgemeinen aus verschiedenen untereinander verknüpften Komponenten und ist aufgrund der Systemgrenzen gegenüber der Umgebung abgegrenzt, kann jedoch mit dieser über die Beschreibung der Randbedingungen wechselwirken [6].

Allen Modellen liegt der Zweck der Ermittlung der zeitlichen und örtlichen Temperaturverteilung des betrachteten Systems zu Grunde. Hierbei ist sowohl die Temperaturverteilung des Festkörpers sowie des Fluids von Interesse.

Dieses Temperaturfeld wird über partielle Differentialgleichungen, die die Wärmeübertragung infolge Leitung, Konvektion und Strahlung beschreiben, sowie den vorliegenden Randbedingungen beschrieben. Die Lösung partieller Differentialgleichungen bedingt komplexe mathematische oder numerische Methoden [7], weshalb eine Überführung in eine gewöhnliche Differentialgleichung durch Diskretisierung einer der Variablen angewandt wird. Bei der Modellierung eines realen technischen Systems ist die Ortsdiskretisierung vorteilhaft, sodass in dem hier betrachteten System der Speicher in Inkremente mit finiten Volumina unterteilt wird. Des Weiteren wird angenommen, dass sämtliche Zustandsgrößen, die dieses finite Volumen beschreiben, in dessen Schwerpunkt konzentriert sind. Ein solches System wird System mit konzentrierten Parametern genannt und das Verfahren als Methode der Blockkapazität [7] beschrieben. Die Unterteilung des Gesamtsystems in finite Volumina teilt dieses in eine entsprechende Anzahl von Zellen, welche in der Graphentheorie als Knoten bezeichnet werden [8, 9]. Bei Problemen der Wärmeübertragung, bei denen Wärmeübertragungsflächen von zentraler Bedeutung sind, ist eine Aufteilung des Systems in Volumina mit gleicher Kantenlänge in allen Dimensionen, sprich Würfel, günstig, da so die Wärmeübertragungsflächen richtungsunabhängig sind.

Die Verknüpfung der Zellen/Knoten erfolgt über Kanten. Ein Graph besteht aus einer definierten Menge an Knoten und Kanten, wobei es keine alleinstehenden Kantenenden oder

Kanten geben darf [10]. Weitere wichtige Begriffe der Graphentheorie sind *Adjazenz* und *Inzidenz*:

„Zwei Knoten, die durch eine Kante verbunden sind, oder zwei Kanten, die einen gemeinsamen Knoten besitzen, nennt man *benachbart* oder *adjazent*. Gehört ein Knoten zu einer Kante, so nennen wir die beiden *inzident*.“ [10]

Ziel des mathematischen Modelles ist die Berechnung des zeitabhängigen Temperaturverlaufes der einzelnen Zellen bzw. Knoten. Die gesuchte zeitliche Temperaturänderung eines Knotens ist abhängig von der zeitlichen Änderung seiner inneren Energie. Die mathematische Formulierung der zeitlichen Temperaturänderung ist abhängig vom Zelltyp (Solid- oder Fluidzelle), sodass zweierlei Bilanzgleichungen aufzustellen sind.

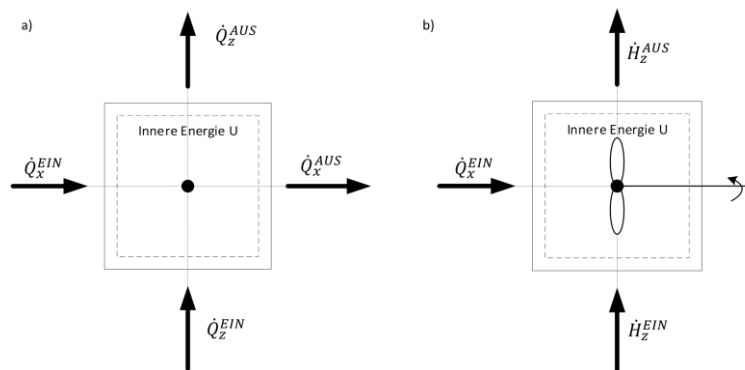


Abbildung 3 zweidimensionale Bilanzierung der Zellen: a) Solidzelle b) Fluidzelle

Festkörperzellen ändern ihre innere Energie gemäß Gleichung (1) über die Bilanzierung der ein- und austretenden Wärmeströme, siehe Abbildung 3a.

$$\frac{dU}{dt} = \sum \dot{Q}_{Ein} - \sum \dot{Q}_{Aus} \quad (1)$$

Besteht, wie im Falle des Speichers, ein technisches System nicht nur aus einem Festkörper, sondern weist es auch Bereiche auf, in denen ein Medium strömt, so muss Gleichung (1) angepasst werden. Fluidzellen können in diesem Zuge als kontinuierlich betriebene Rührkessel [11] angesehen werden, in die Enthalpieströme eintreten, vermischt werden und anschließend mit der homogenen Temperatur des Rührkessels austreten. Gleichung (2) ergibt sich somit aus Gleichung (1) mit der Annahme, dass in die Zelle Enthalpieströme ein- und wieder austreten und Wärmeströme nur ein- aber nicht wieder austreten, siehe Abbildung 3b.

$$\frac{dU}{dt} = \sum \dot{H}_{Ein} - \sum \dot{H}_{Aus} + \sum \dot{Q}_{Ein} \quad (2)$$

Die Art der auftretenden Wärmeströme ist vom Kantentyp abhängig. So tritt zwischen zwei Solidzellen Wärmeleitung, zwischen einer Solid- und einer Fluidzelle Konvektion auf. Zwischen Fluidzellen hingegen treten keine Wärmeströme auf, sondern lediglich Enthalpieströme in Strömungsrichtung, sodass die Durchströmung des Speichers durch eine Rührkesselkaskade beschrieben [12] wird.

Das technische System kann in diesem Anwendungsfall als thermisches Netzwerk [6] aufgefasst werden, bei dem die Formulierung, Darstellung und Berechnung der Differentialgleichungen durch Matrizen vorteilhaft ist [6, 12–14].

Die das System beschreibende Matrizen können grundlegend in drei Kategorien eingeteilt werden: Knoten-Matrix, Kanten-Matrix und gekoppelte Matrix. Knoten- und Kanten-Matrix sind dabei symmetrische Diagonalmatrizen mit der Dimension $[n_{\text{Knoten}} \times n_{\text{Knoten}}]$ bzw. $[n_{\text{Kanten}} \times n_{\text{Kanten}}]$. Gekoppelte Matrizen sind hingegen weder symmetrisch noch allein auf der Diagonalen besetzt, sondern weisen eine Dimension von $[n_{\text{Knoten}} \times n_{\text{Kanten}}]$ oder $[n_{\text{Kanten}} \times n_{\text{Knoten}}]$ auf. Sie beschreiben wie Knoten und Kanten miteinander verbunden sind und werden entsprechend entweder als Inzidenz- oder Adjazenzmatrix oder allgemein als Kopplungsmatrix bezeichnet.

Vorteilhaft ist, dass so die Bilanzgleichungen systematisiert aufgestellt werden können, da sich die Kopplungsmatrizen direkt aus der Struktur des Systems ableiten lassen. Temperaturen und Eingangsgrößen werden als Vektoren $[n_{\text{Knoten}} \times 1]$ beschrieben.

Zu den Knoten-Matrizen gehören die Kapazitäts- und die Kapazitätsstrommatrix, deren Diagonalelemente die jeweiligen Kapazitäten bzw. Kapazitätsströme enthalten.

$$\underline{\underline{C}} = \begin{bmatrix} C_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & C_{n_{\text{Knoten}}} \end{bmatrix} \text{ bzw. } \underline{\underline{\dot{C}}} = \begin{bmatrix} \dot{C}_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \dot{C}_{n_{\text{Knoten}}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Analog aufgebaut sind die Kanten-Matrizen, welche die Leitungswerte der einzelnen Wärmeströme enthalten, wobei die Leitungswerte in Form reziproker Transportwiderstände formuliert werden:

$$\dot{Q}_{\text{Leitung}} = \frac{\lambda}{s} \cdot A \cdot \Delta T = R_{\lambda A} \cdot \Delta T \quad (4)$$

$$\dot{Q}_{\text{Konvektion}} = \alpha \cdot A \cdot \Delta T = R_{\alpha A} \cdot \Delta T \quad (5)$$

$$\dot{Q}_{\text{Strahlung}} = c_{12} \cdot A_1 \cdot (T_1^4 - T_2^4) = R_R \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (6)$$

Aufgrund der unterschiedlichen Temperaturgewichtung ist es erforderlich zwei Leitwertmatrizen aufzustellen, eine Matrix für Leitung und Konvektion ($\underline{\underline{L_C}}$) sowie eine Matrix für die Strahlung ($\underline{\underline{L_R}}$).

Kopplungsmatrizen stellen im Netzwerk die Verbindungen zwischen den Knoten und Kanten dar, mathematisch sorgen sie dafür, die Matrixdimensionen bei der Berechnung einander anzupassen. Die Kopplungsmatrix $\underline{\underline{K}}$ in der Dimension $[n_{\text{Knoten}} \times n_{\text{Kanten}}]$ beschreibt, ob ein Knoten Ausgangspunkt (-1) oder Endpunkt (+1) einer Kante ist, alle weiteren Elemente sind null. Für ein einfaches lineares System, wie in Abbildung 4 dargestellt, ergibt sich die folgende Kopplungsmatrix $\underline{\underline{K}}$:

$$\underline{\underline{K}} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ +1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & +1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & +1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & +1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

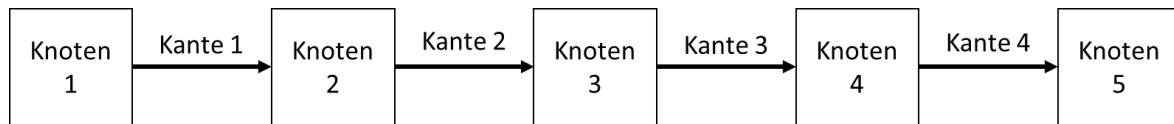


Abbildung 4 Lineares Knoten-Kanten-Modell

Die zeitliche Temperaturänderung infolge einer Beladung durch Strahlung unter Einbezug der Leitung innerhalb des Festkörpers lässt sich demnach wie folgt darstellen:

$$\frac{dT}{dt} = \underline{C}^{-1} \cdot \underline{K} \cdot \left(\underline{-L}_C \right) \cdot \underline{K}^T \cdot \underline{T} + \underline{C}^{-1} \cdot \underline{K} \cdot \left(\underline{-L}_R \right) \cdot \underline{K}^T \cdot \underline{T}^4 + \underline{C}^{-1} \cdot \underline{I}_1 \quad (8)$$

Analog erfolgt die Beschreibung der zeitlichen Temperaturänderung bei der Entladung, wobei der Strahlungsterm entfällt. Anstelle dessen wird innerhalb der Leitwertmatrix $\left(\underline{L}_C \right)$ der konvektive Anteil berücksichtigt und zusätzlich der Term zur Beschreibung des Enthalpietransportes $\left(\underline{\dot{C}} \cdot \left(\underline{S} - \underline{E} \right) \cdot \underline{T} \right)$ [6] hinzugefügt.

$$\frac{dT}{dt} = \underline{C}^{-1} \cdot \underline{K} \cdot \left(\underline{-L}_C \right) \cdot \underline{K}^T \cdot \underline{T} + \underline{C}^{-1} \cdot \underline{\dot{C}} \cdot \left(\underline{S} - \underline{E} \right) \cdot \underline{T} + \underline{C}^{-1} \cdot \underline{I}_1 + \underline{C}^{-1} \cdot \underline{\dot{C}} \cdot \underline{I}_2 \cdot T^{EIN} \quad (9)$$

In Gleichung (9) beschreibt die Strukturmatrix \underline{S} die Knoten mit Eingängen von Wärmekapazitätsströmen. Durch Subtraktion der Einheitsmatrix \underline{E} wird zunächst jedem Knoten ein Ausgang eines Wärmekapazitätsstromes zugeordnet, was über Multiplikation mit der Wärmekapazitätsstrommatrix $\underline{\dot{C}}$ ausgeglichen wird [6].

In Gleichung (8) sowie in Gleichung (9) werden die äußeren Randbedingungen über einen allgemeinen Inputvektor $\left(\underline{I}_1 \right)$ respektive über eintretende Enthalpieströme $\left(\underline{\dot{C}} \cdot \underline{I}_2 \cdot T^{EIN} \right)$ mitberücksichtigt.

Durch das Prinzip der Superposition werden beide Teilmodelle zum Gesamtmodell zusammengefügt.

Die Lösung des Differentialgleichungssystems erfolgt über explizite numerische Verfahren, wie dem expliziten Euler-Verfahren oder dem vierstufigen Runge-Kutta-Verfahren.

3.2 Modelle zur Parameterbestimmung

3.2.1 Beladungsmodell

Aufbau

Für die Simulation der Beladung wurde zur Vereinfachung der Beladungskanal in ein zylindrisches Schichtmodell überführt (siehe Abbildung 5), sodass aus einem dreidimensionalen Konstrukt ein quasi-eindimensionales Abbild entsteht. Durch das zylindrische Schichtmodell ist es möglich, die Wärmeübertragung allein in Abhängigkeit einer Ortskoordinate, dem Radius, zu beschreiben.

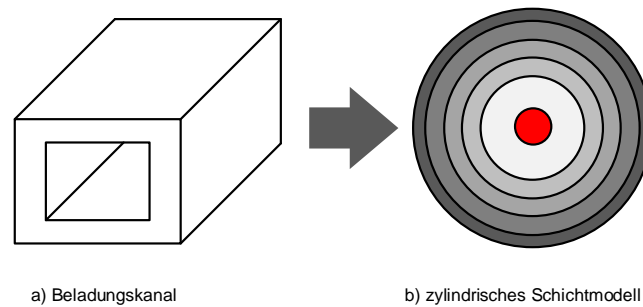


Abbildung 5 Überführung des Beladungskanales in ein zylindrisches Schichtmodell

Bei der Überführung in das Schichtmodell sind die charakteristischen Größen des Beladungskanales (Masse und Strahlungsfläche) konstant zu halten. Das Schichtmodell ist unterteilt in 6 Knoten und 5 Kanten gemäß der Darstellung in Abbildung 6.

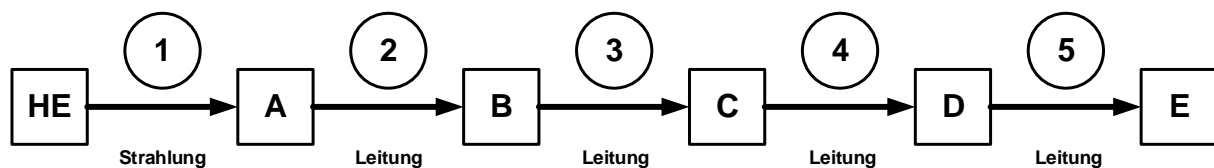


Abbildung 6 Graphenmodell der Beladung

Das Heizelement (Knoten HE) ist über Strahlung (Kante 1) mit der Oberfläche (Knoten A), der Strahlungsfläche, verbunden. Ab Kante 2 wird das Festkörperverhalten simuliert. Da die Betrachtung des Heizelementes instationär erfolgt, weist dieses auch eine eigene Kapazität auf und der Inputvektor der Eingangsgrößen enthält die elektrische Leistung, mit der das Heizelement betrieben wird. Durch Knoten E kann entweder ein Teil des Festkörpers oder die Umgebung dargestellt werden, sodass Wärmeverluste betrachtet werden können.

Simulationsergebnisse

Mit der Simulation wurde zunächst untersucht, inwieweit sich die elektrische Leistung auf den Temperaturverlauf auswirkt. Hierbei wurden zwei potenzielle Betriebszustände betrachtet: Im ersten Fall weist der Speicher eine Temperatur von 20 °C auf, sodass das Aufheizverhalten bei Inbetriebnahme oder nach Wartung simuliert wird (Abbildung 7). Im zweiten Fall weist der Speicher eine Temperatur von 500 °C, sodass das Aufheizverhalten nach einem Entladungszyklus (Betriebsfall) simuliert wird (Abbildung 8). Mit diesen beiden Simulationen soll eine Heizelementleistung festgelegt werden. In einer dritten Simulation wird der Einfluss der Strahlungsfläche, die die Strahlung empfängt, untersucht (

Abbildung 9).

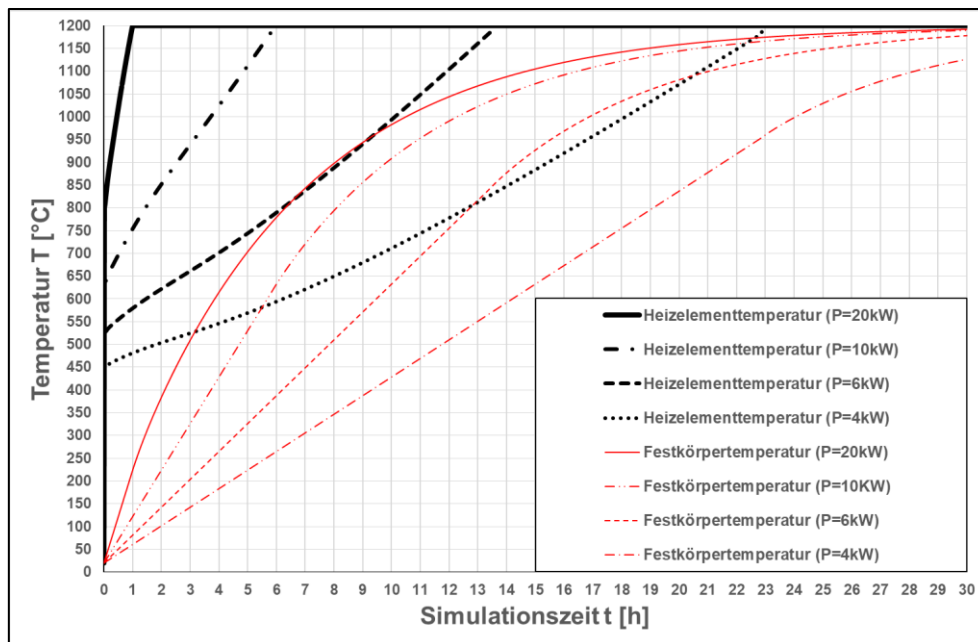


Abbildung 7 Temperaturverlauf bei der Beladung in Abhängigkeit der elektrischen Leistung (Inbetriebnahme)

In Abbildung 7 wird ersichtlich, dass mit zunehmender elektrischer Leistung der zeitliche Temperaturanstieg sowohl im Hezelement wie im Festkörper stärker ausgeprägt ist. Bei kleinen elektrischen Leistungen erfolgt der Temperaturanstieg im Festkörper nahezu linear, wohingegen bei großen elektrischen Leistungen eine deutliche Krümmung der Kurven zu erkennen ist. Eine Verdopplung der elektrischen Leistung, von 10 kW auf 20 kW, wirkt sich weniger stark aus wie die Erhöhung von 4 kW auf 6 kW. Mit Zunahme der elektrischen Leistung erreicht die Temperatur des Hezelementes in kürzerer Zeit seinen Maximalwert.

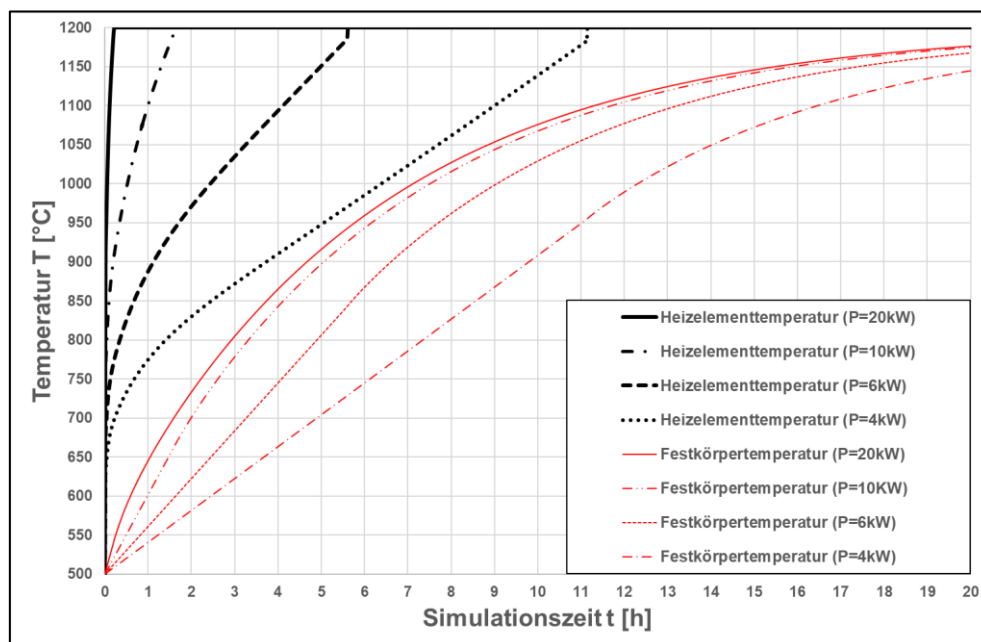


Abbildung 8 Temperaturverlauf bei der Beladung in Abhängigkeit der elektrischen Leistung (Betriebsfall)

Der Einfluss der elektrischen Leistung auf die zeitliche Entwicklung der Festkörpertemperatur verringert sich gegenüber dem Fall der Inbetriebnahme (Abbildung 7) im Betriebsfall (Abbildung 8) merklich. Der Unterschied zwischen 10 kW und 20 kW an elektrischer Leistung ist nur noch marginal, und bereits eine elektrische Leistung von 6 kW weist den nahezu selben Kurvenverlauf auf. Trotz der höheren Starttemperatur weisen die Heizelemente, mit Ausnahme des Heizelementes bei 20 kW, ein signifikantes instationäres Verhalten auf.

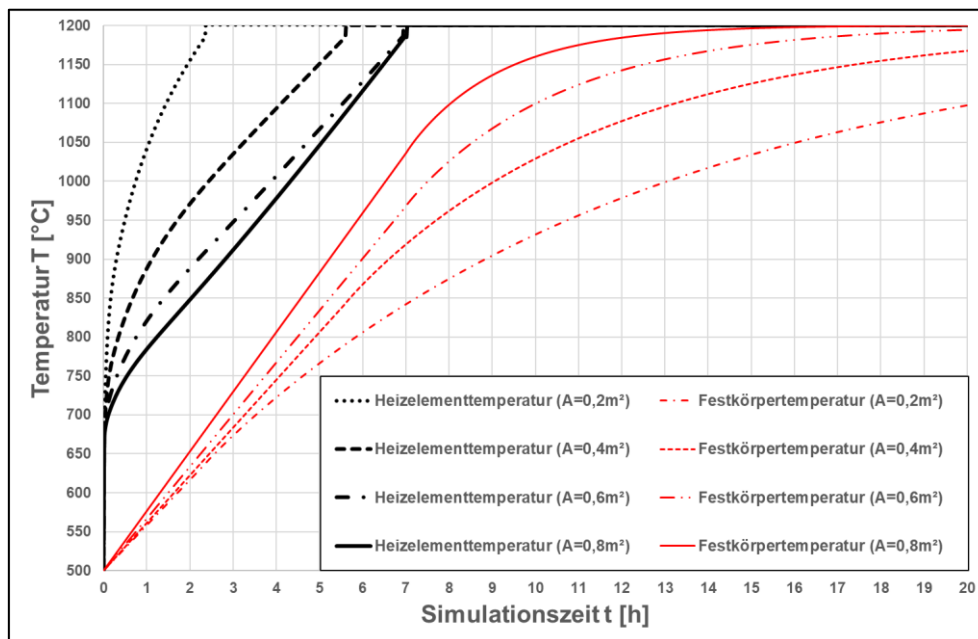


Abbildung 9 Temperaturverlauf bei der Beladung in Abhängigkeit der Bestrahlungsfläche (Betriebsfall)

Die Vergrößerung der Strahlungsfläche (Abbildung 9) bewirkt, dass die Festkörpertemperaturen zunächst linear ansteigen und sich dann asymptotisch der maximalen Temperatur annähern und im Falle einer Strahlungsfläche von 0,8 m² diese sogar erreicht. Weiterhin sorgt eine vergrößerte Strahlungsfläche dafür, dass das Heizelement die maximale Temperatur langsamer erreicht.

Fazit

Die simulativen Untersuchungen legen nahe, dass die elektrische Heizleistung im Gegensatz zur Wärmeübertragung innerhalb des Festkörpers sowie zur Strahlungsfläche nur einen geringen Einfluss auf das Beladeverhalten aufweist. Je höher die elektrische Leistung, desto schneller erreicht das Heizelement seine maximale Temperatur, außer bei größer werdenden Strahlungsflächen. Für die Konstruktion konnte herausgearbeitet werden, dass geringe Schichtdicken sowie große Wärmeübertragungsflächen des keramischen Materials und eine erhöhte Anzahl von Heizelementen mit reduzierter Leistung sinnvoll sind. Für die Materialwahl muss ein Kompromiss zwischen Temperaturbeständigkeit, spezifischer Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit und Investitionskosten gefunden werden.

3.2.2 Entladungsmodell

Aufbau

Bei der Simulation der Entladung ist neben der Temperaturverteilung innerhalb des Festkörpers auch die Temperaturentwicklung des Fluids von Interesse. Die simulativen Untersuchungen sollen Aufschluss über das Entladungsverhalten bezüglich der der Strömung zur Verfügung stehenden Querschnittsfläche geben. Aufgrund der beiden unterschiedlichen Temperaturverläufe, im Festkörper vor allem in der Ebene und im Fluid in der Vertikalen, ist es von Nöten, dass das Modell dies abbildet. Eine Vereinfachung wie im Beladungsmodell ist nicht möglich, von daher wird im Entladungsmodell ein Strömungskanal dreidimensional betrachtet und in würfelfartige finite Volumina zerlegt. Aus Symmetriegründen kann anstelle eines Strömungskanales ein Viertel von diesem betrachtet werden, siehe Abbildung 10.

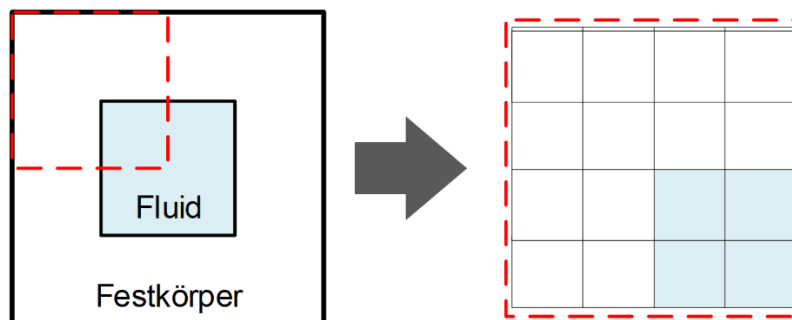


Abbildung 10 Ortsdiskrete Aufteilung im Entladungsmodell

Da mit der vorgestellten Methode keine Auflösung der Strömung möglich ist, werden die einzelnen Fluidzellen zu einer zusammengefasst. Im Sinne der Modellgrundlagen entsteht so pro Ebene ein idealer, kontinuierlich betriebener Rührkessel, in den mehrere konvektive Wärmeströme eintreten. Die daraus folgende Rührkesselkaskade umfasst Rührkessel entsprechend der Schichtanzahl des Modelles.

Simulationsergebnisse

In Bezug auf den Einfluss des Strömungsquerschnittes, welcher wiederum äquivalent zum Quadrat der Kanalbreite ist, wurde die zeitliche Änderung der Luftaustrittstemperatur sowie die örtliche Temperaturverteilung entlang der Speicherhöhe untersucht. Unter der Annahme, dass die Grundfläche des Speichers konstant ist, führt eine Verringerung der Kanalbreite zu einer Erhöhung der Kanalanzahl.

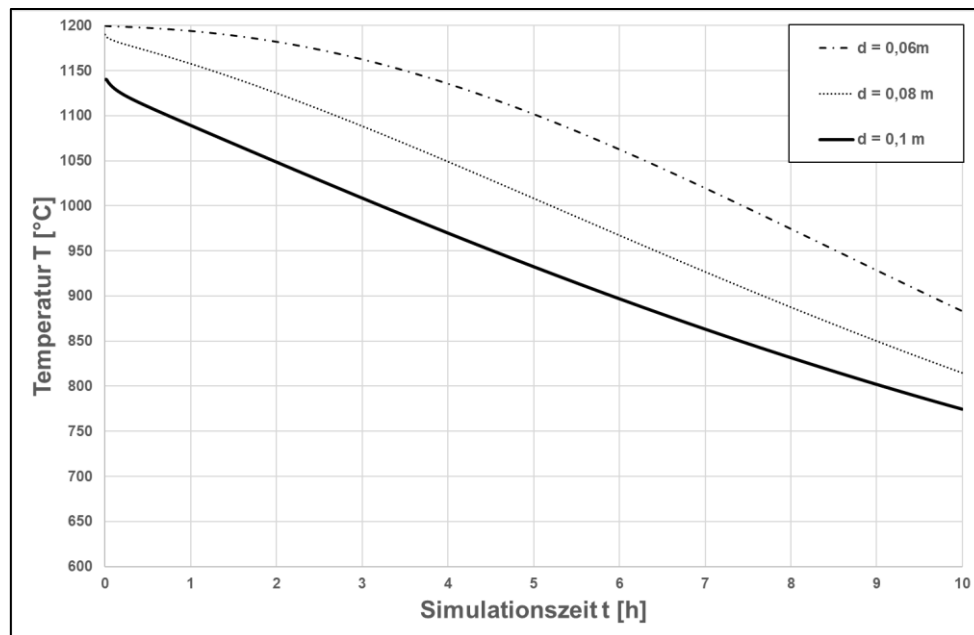


Abbildung 11 Temperaturverlauf der Luft bei Entladung in Abhängigkeit der Kanalbreite

Die zeitliche Entwicklung der Luftaustrittstemperatur ist in Abbildung 11 dargestellt. Es ist erkennbar, dass unabhängig der gewählten Kanalbreite die Luftaustrittstemperatur bei konstantem Massenstrom zeitlich nicht konstant ist. Mit Verkleinerung der Kanalbreite erhöht sich das Temperaturniveau der Luft am Speicheraustritt, dies ist unter anderem auch darauf zurückzuführen, dass sich trotz geringerer Wärmeübertragungsfläche pro Kanal über die Erhöhung der Kanalanzahl die gesamte Wärmeübertragungsfläche erhöht. Zusätzlich verringert sich bei kleinen Kanalbreiten die Linearität des Kurvenverlaufes.

Neben der zeitlichen Entwicklung der Luftaustrittstemperatur ist auch der örtliche Verlauf der Lufttemperatur innerhalb des Speichers von Interesse. Hierbei werden zwei explizite Zeitpunkte (Beginn und Ende der Entladung) betrachtet. Weiterhin wird der örtliche Temperaturverlauf des Festkörpers, sowohl vertikal wie horizontal, am Ende der Entladung betrachtet. Dies dient dazu, Aussagen über eine potenzielle Temperaturschichtung zu erhalten.

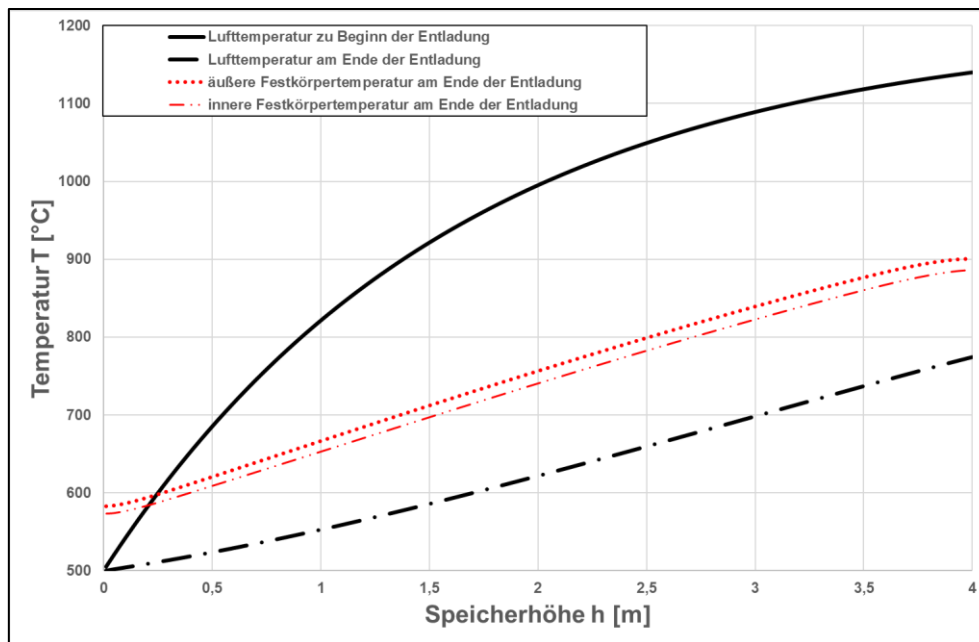


Abbildung 12 Temperaturverlauf bei einer Kanalbreite von $d=0,1\text{m}$

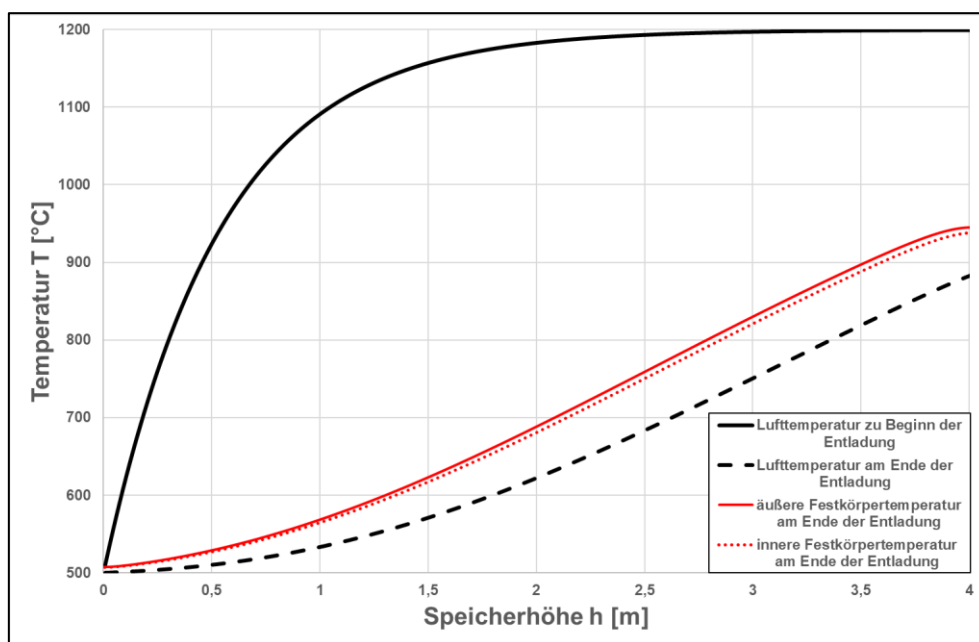


Abbildung 13 Temperaturverlauf bei einer Kanalbreite von $d=0,06\text{m}$

Beim Vergleich der beiden Abbildungen (Abbildung 12 und Abbildung 13) ist erkennbar, dass bei kleinerer Kanalbreite sämtliche Temperaturen eine größere Differenz zwischen Speicherein- und -austritt aufweisen. Bezogen auf die Festkörpertemperatur ist demnach eine Temperaturschichtung entlang der Speicherhöhe erkennbar. Bei einer Kanalbreite von $d=0,06\text{ m}$ wird bereits in einer Speicherhöhe von $2,5\text{ m}$ die maximale Temperatur erreicht, welche wiederum bei einer Kanalbreite von $d=0,1\text{ m}$ nicht erreicht wird.

Die Temperaturdifferenz innerhalb einer Ebene, sprich zwischen innen und außen am Kanal liegenden Zellen, verkleinert sich proportional mit der Kanalbreite.

Fazit

Eine kleine Kanalbreite wirkt sich positiv auf die örtliche und zeitliche Entwicklung der charakteristischen Temperaturen aus. So ist zum einen die Luftaustrittstemperatur höher und zum anderen weist die Festkörpertemperatur eine stärkere Schichtung auf. Je höher die Luftaustrittstemperatur desto effizienter ist der nachgeschaltete Rückverstromungsprozess. Eine Temperaturschichtung innerhalb des Festkörpers ermöglicht eine gezielte (Nach-)Beladung einzelner Ebenen.

3.3 Modell für Betriebsstrategie

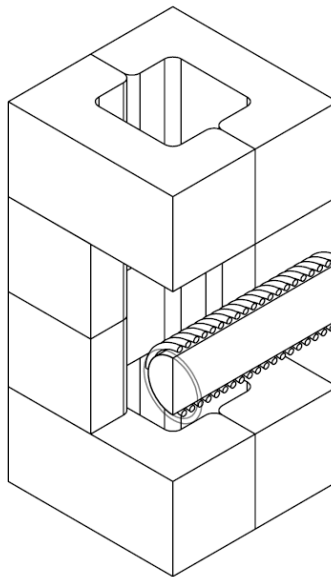


Abbildung 14 Zusammenführung des Belade- und Strömungskanales

Für das Modell für die Betriebsstrategie sind die beiden oben erläuterten Modelle zusammenzuführen, sowohl hinsichtlich ihrer Geometrie wie auch ihrer mathematischen Beschreibung. Letzteres ist aufgrund der bereits erwähnten Gültigkeit des Prinzips der Superposition relativ einfach zu gestalten. Bezüglich der geometrischen Zusammenführung und der damit verbundenen Beschreibung des technischen Systems, ist die reale Speichergeometrie ausschlaggebend. In dieser kreuzen sich Strömungs- und Beladungskanal, siehe Abbildung 14. Dabei wird angenommen, dass sich die Luft nur innerhalb des Strömungskanales bewegt und somit der Beladungskanal „luftfrei“ ist.

4 Fazit und Ausblick

Mit den simulativen Untersuchungen konnte aufgezeigt werden, dass das Speicherkonzept umsetzbar ist. Darüber hinaus konnten durch die Untersuchungen konstruktive Randparameter bestimmt werden, welche Einfluss auf die Konstruktion sowie den Aufbau der Demonstrationsanlage hatten. So wurden in dieser 48 Heizelemente mit jeweils einer elektrischen Heizleistung von 6,5 kW installiert und die Strömungskanäle weisen eine Kanalbreite von 115 mm auf.

Durch den theoretischen Nachweis einer Temperaturschichtung innerhalb des Speichers, wurde die Ansteuerung der Heizelemente so ausgeführt, dass eine Beladung pro Ebene möglich ist. Hieraus folgt, dass eine zielgerichtete teilweise Beladung des Speichers möglich ist.

Die Validierung des Modelles wird über zukünftige experimentelle Untersuchungen an der Demonstrationsanlage ermöglicht.

Literatur

- [1] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE: *Forschung & Innovation : Speicher*. URL <https://www.energieforschung.de/forschung-und-innovation/speicher> – Überprüfungsdatum 2019-01-30
- [2] SIEMENS AG: *Siemens stellt Wärmespeicher für Windenergie vor*. URL <https://www.siemens.com/press/de/pressemitteilungen/?press=/de/pressemitteilungen/2016/windpower-renewables/pr2016090419wpde.htm> – Überprüfungsdatum 2019-01-30
- [3] ZEITUNG FÜR KOMMUNALE WIRTSCHAFT: *RWE testet Speichersystem von Carbonclean*. URL <https://www.zfk.de/energie/strom/artikel/rwe-testet-speichersystem-von-carbonclean-2018-10-18/> – Überprüfungsdatum 2019-01-30
- [4] TECHNISCHE HOCHSCHULE MITTELHESSEN. URL <https://www.thm.de/etem/forschung/projekte/drittmittelprojekte/laufende-projekte/high-tstor.html>
- [5] HERZOG, S. ; LECHNER, S. ; ALTENSEN, R.: *Hochtemperatur-Stromspeicher* (10. Internationale Energiewirtschaftstagung IEWT). Wien, Februar 2017
- [6] KUNZ, Gerald: *Dynamische Simulation eingeschwungener thermischer Zustände von Druckgießformen*. Dresden, Technische Universität Dresden, Fakultät Maschinenwesen. Dissertation. 2013
- [7] POLIFKE, Wolfgang ; KOPITZ, Jan: *Wärmeübertragung : Grundlagen, analytische und numerische Methoden*. 2. aktual. Aufl. München u.a : Pearson Studium, 2009 (Always learning)
- [8] BOSSEL, Hartmut: *Simulation dynamischer Systeme : Grundwissen, Methoden, Programme*. Wiesbaden, s.l. : Vieweg+Teubner Verlag, 1989
- [9] STRANG, Gilbert: *Wissenschaftliches Rechnen*. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010 (Springer-Lehrbuch Masterclass)
- [10] KRISCHKE, André ; RÖPCKE, Helge: *Graphen und Netzwerktheorie : Grundlagen - Methoden - Anwendungen ; mit 137 Bildern und zahlreichen Beispielen*. München : FachbuchverlagLeipzig im Carl Hanser Verlag, 2015 (Quantitative Methoden)
- [11] SCHWISTER, Karl ; LEVEN, Volker: *Verfahrenstechnik für Ingenieure : Lehr- und Übungsbuch*. 2., aktualisierte Aufl., [elektronische Ressource]. München : Fachbuchverl. Leipzig im Carl Hanser Verl., 2014

- [12] SCHULZE, Tobias: *Gleichungsorientierte Modellierung der Wärme- und Stoffübertragungsprozesse in Verdunstungskühltürmen*. Dresden, Technische Universität Dresden, Fakultät Maschinenwesen. Dissertation. 2015
- [13] MÖLLER, Torben ; STRELOW, Olaf: *Ein Matrix-Berechnungsmodell zur Simulation und schnellen Berechnung der mittleren Temperaturdifferenz mehrgängiger Kreuzstrom-Plattenwärmeübertrager*. In: *Forschung im Ingenieurwesen* 81 (2017), Nr. 4, S. 357–369
– Überprüfungsdatum 2019-01-14
- [14] STRELOW, Olaf: *Allgemeines Berechnungsmodell für Wärmeübertragerschaltungen*