

# HOCHTEMPERATUR-WÄRMESPEICHER

Nina HACK<sup>1\*</sup>, Dr.-Ing. Simon UNZ<sup>2</sup>, Tobias REICH<sup>3\*</sup>,

Prof. Dr.-Ing. Michael BECKMANN<sup>4</sup>

## Einleitung, Motivation

Hochtemperatur-Wärmespeicher sind vielseitig einsetzbar:

Zum einen können sie bei der Speicherung thermischer Energie aus Industrieprozessen zu einer Verbesserung der Effizienz und der Stabilisierung von Prozessbedingungen von industriellen Hochtemperaturprozessen eingesetzt werden. Das Prinzip des Regenerators zur Speicherung sensibler Wärme ist bekannt und wird beispielsweise bei der Winderhitzung zur Stahlerzeugung seit dem 19. Jahrhundert eingesetzt [1, p. 1591 f.]. Heutzutage sind Anwendungen für die verschiedensten industriellen Hochtemperatur-Prozesse denkbar.

Zum anderen können Wärmespeicher auch in Prozessketten zur Speicherung elektrischer Energie eingesetzt werden. Die Hintergründe zur Notwendigkeit der Speicherung elektrischer Energie mit zunehmendem Anteil fluktuierender Einspeisung sowie einen Überblick über verschiedenste Speichertechnologien sind in der Literatur diskutiert (z.B. [2, 3]). Ein Beispiel für eine Strom-Wärme-Strom Speicherkette sind Thermopotentialspeicher (Englisch: Pumped thermal electricity storages), bei denen ein Hochtemperatur-Wärmespeicher auf hohem Druckniveau und ein Niedertemperatur-Wärmespeicher auf geringem Druckniveau benötigt wird [4, 5, 6]. Der Speicherprozesswirkungsgrad ist dabei umso höher, je höher das vorliegende thermodynamische Potential ist, weshalb auch für diese Anwendung Speichermaterialien für besonders hohe Temperaturen gefragt sind.

Dieser Beitrag beschränkt sich auf sensible Hochtemperatur-Wärmespeicher nach dem Regeneratorprinzip. Andere Wärmespeicherarten wie latente oder thermochemische Speicher werden in der Literatur behandelt und sind nicht Gegenstand dieser Untersuchung.

## Herausforderung

Für eine erfolgreiche und sinnvolle Auslegung eines sensiblen Hochtemperatur-Wärmespeichers im großtechnischen Maßstab ist die Kenntnis der Be- und Entladecharakteristik entscheidend. Dabei sind die Temperaturprofile des Speichermaterials bzw. des Arbeitsfluides entlang des Strömungsweges für unterschiedliche Lade- und Entladeleistungen von hohem Interesse. In diesem Beitrag werden hierzu experimentelle Untersuchungen mit keramischen Wabenkörpern als Speichermaterial im kleinen Maßstab experimentell untersucht. Dabei werden zwei Materialien getestet und verschiedene Parametervariationen durchgeführt. Die gewonnenen experimentellen Daten können unabhängig von der genauen Anwendung des Wärmespeichers (z.B. Industrieprozess oder Strom-Wärme-Strom-Speicherprozess) genutzt werden.

## Beschreibung der Versuchsanlage

In der Versuchsanlage werden keramische Wabenkörper als Wärmespeicher untersucht. Insgesamt werden acht Wabenkörper mit den jeweiligen Abmessungen Breite x Länge x Tiefe von 150 mm x 300 mm x 150 mm in einen Stahlbehälter eingebaut. Jedes Steinsegment beinhaltet  $50 \times 50 = 2.500$  quadratische Kanäle mit einer Kantenlänge von je 2,4 mm. Die Wandstärke der inneren Stege beträgt 0,55 mm. In der Versuchsanlage sind die acht Wabenkörper in zwei Ebenen mit je vier Wabenkörpern übereinander angeordnet. Dadurch können 10.000 Kanäle parallel durchströmt werden.

---

<sup>1, 2, 4</sup> Technische Universität Dresden, Institut für Verfahrenstechnik und Umwelttechnik, Professur für Energieverfahrenstechnik, 01062 Dresden; Fax: +49351-463-37753, <https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/ifvu/evt>

<sup>1</sup> [nina.hack@tu-dresden.de](mailto:nina.hack@tu-dresden.de), Tel.: +49351-463-37684

<sup>2</sup> [simon.unz@tu-dresden.de](mailto:simon.unz@tu-dresden.de), Tel.: +49351-463-33832

<sup>3</sup> [tobias.reich@mailbox.tu-dresden.de](mailto:tobias.reich@mailbox.tu-dresden.de), Student Technische Universität Dresden

<sup>4</sup> [michael.beckmann@tu-dresden.de](mailto:michael.beckmann@tu-dresden.de), Tel.: +49351-463-34493

Das Gesamtpaket der eingebauten Wabenkörper hat die Abmaße von 300 mm x 600 mm x 300 mm (siehe Abbildung 3). Der entsprechend aufgebaute Versuchsstand ist in Abbildung 1 als Foto und in Abbildung 2 als Schnittzeichnung dargestellt. Auf die Zeichnung der einzelnen Strömungskanäle wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet.

Das Speichermaterial wird mit Luft, welche elektrisch vorgewärmt werden kann, be- bzw. entladen. Die Luftmenge wird über eine Frequenzregelung der Gebläsedrehzahl eingestellt. Zur Bestimmung des tatsächlichen Massestroms wird eine Messblende eingesetzt. Dabei wird der gemessene Wirkdruck mit der vorliegenden Luftfeuchte, der jeweiligen Temperatur und des erzeugten Förderdruckes nach DIN EN ISO 5167 umgerechnet.

Direkt am Eintritt in die Versuchsanlage (unten) ist der elektrische Luftvorwärmer angebracht. Dem Luftvorwärmer können sowohl Zielwerttemperaturen für die Erwärmung / Abkühlung, als auch variable Heizraten regelungstechnisch vorgegeben werden. Oberhalb des Luftvorwärmers wird die Luft mittels eines Übergangsstückes vom kreisförmigen Rohrquerschnitt auf die quadratische Wabenkörperabmessung bei gleichzeitiger Querschnittserweiterung unter einem Öffnungswinkel von 40° auf die einzelnen Kanäle des Wärmespeichers verteilt. Am Austritt der Versuchsanlage verhindert ein Zugbegrenzer die Beeinflussung der Strömung durch die Abgasleitung. Der Hohlraum zwischen dem Wabenkörper-Wärmespeicher und der Behälterwand ist mit Isolierwolle ausgekleidet. Die übereinander liegenden Speichersteine sind für eine optimierte Durchströmung fluchtend fixiert.



Abbildung 1: Versuchsstand

Der Luftvorwärmer beschränkt die experimentellen Untersuchungen auf maximale Lufttemperaturen von 800 °C am Eintritt. Das Speichermaterial kann bei deutlich höheren Temperaturen von etwa bis zu 1.200 °C eingesetzt werden [7].

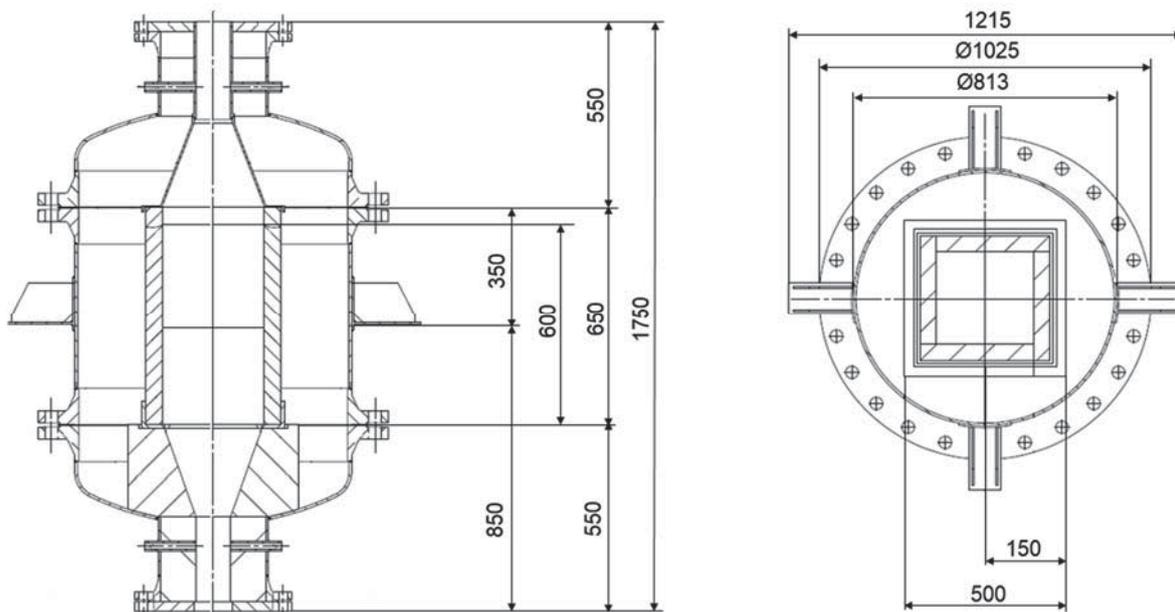


Abbildung 2: Schnittzeichnungen der Gesamtapparatur (links: vertikal, rechts: horizontal)

Die Eigenschaften der verwendeten keramischen Speichermaterialien sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Die darin aufgeführte Speicherdichte der verwendeten Wabenkörper je Volumeneinheit ist für eine Beladung auf 800 °C nach Gleichung (1) berechnet:

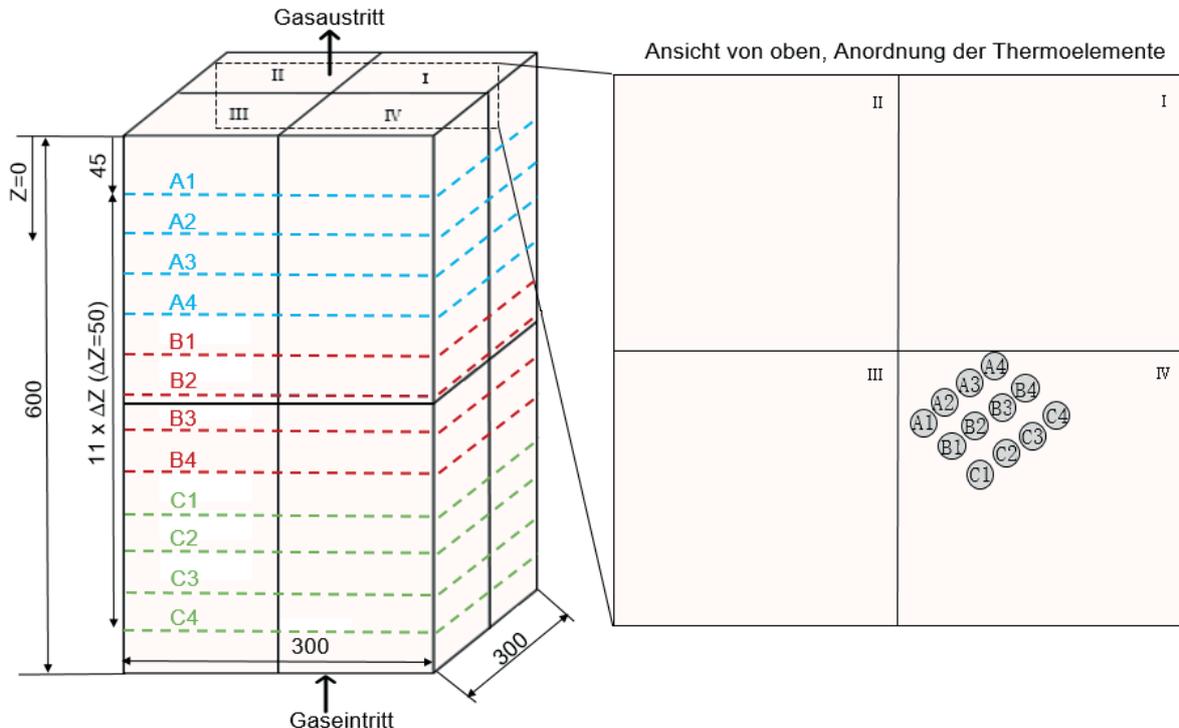
$$\text{Speicherdichte} = \frac{m_{\text{Wabenkörper}} * c_{\text{Wabenkörper}} * (\vartheta_{\text{Ziel}} - \vartheta_{\text{Umgebung}})}{V_{\text{Wabenkörper}}} \quad (1)$$

**Tabelle 1: Eigenschaften von Tonerdeporzellan (C130) und Cordierit (C520), nach [7].**

Werte bezogen auf das Festmaterial (F) und betrachtet für jeweils einen Wabenkörper (W) mit den räumlichen Abmaßen von Breite x Länge x Tiefe = [150 x 300 x 150] mm<sup>3</sup> und 2.500 quadratischen Kanälen (Breite je 2,4 mm).

| Material | (F)-Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]<br>(W)-Masse [kg] | Kapazität c (F)-[J/(kg*K)]<br>(W)- [kJ/K] | Oberfläche (F)- [m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ]<br>(W)- [m <sup>2</sup> ] | Wärmeleitfähigkeit λ [W/m*K] | Speicherdichte bei Erwärmung auf 800 °C [MJ/m <sup>3</sup> ] |
|----------|---|---|---|------------------------------|--|
| C130 (F) | 2700  | 877                                       | 1090  | 2,1                          | 669  |
| C130 (W) | 6,6   | 5,788                                     | 7,4   |                              |  |
| C520 (F) | 2000  | 810                                       | 1090  | 1,9                          | 468  |
| C520 (W) | 5,0   | 4,050                                     | 7,4   |                              |  |

Über die Versuchszeit hinweg werden die Temperaturverläufe am Eintritt, Austritt und entsprechend Abbildung 3 in zwölf Ebenen des Wärmespeichers mit Hilfe von Typ K-Thermoelementen erfasst. Die Thermoelemente in den Wabenkörpern füllen jeweils einen Strömungskanal fast vollständig aus. Sie werden von oben in verschiedene Kanäle bis auf Höhe der entsprechenden Messebene eingeführt (siehe Abbildung 4). Zusätzlich wird der Druckverlust zwischen Ein – und Austritt der Wabenkörper durch eine Differenzdruckmessung aufgezeichnet.



**Abbildung 3: Anordnung der Thermoelemente in den Wärmespeichersegmenten**

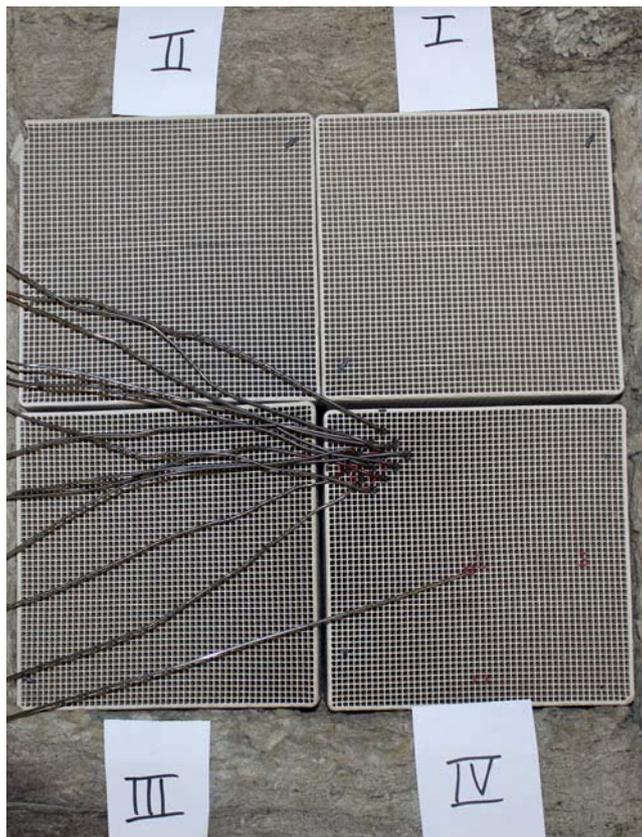


Abbildung 4: Foto der Thermoelementanordnung von oben

### Parametervariationen

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Parameter Massestrom, Heizrate des Luftvorwärmers und maximale Gas-Eintrittstemperatur variiert. Die eingestellten Werte sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Überblick über die Parametervariationen und die durchgeführten Experimente

| Versuchsparameter                                    | Variationsstufen  | Experimentell untersuchte Parameterkombinationen   |
|--|---|--|
| Frequenz des Gebläses<br>(Luftmassenstrom)           | 20 Hz (~ 40 kg/h)<br>29 Hz (~ 67 kg/h)<br>38 Hz (~ 92 kg/h) | 600 °C / 20 Hz / 20 K/min (*)<br>600 °C / 29 Hz / 20 K/min<br>600 °C / 38 Hz / 20 K/min<br>800 °C / 29 Hz / 20 K/min<br>800 °C / 29 Hz / 30 K/min<br>800 °C / 29 Hz / 40 K/min<br>800 °C / 29 Hz / 50 K/min<br><br>(*) als Beispiel in Abbildung 5 |
| Maximale Gas-Eintrittstemperatur<br>(Zieltemperatur) | 600 °C<br>800 °C  |  |
| Heizrate des Luftvorwärmers                          | 20 K/min<br>30 K/min<br>40 K/min<br>50 K/min                |  |

Durch die unterschiedlichen Masseströme und Gas-Eintrittstemperaturen spannt sich eine Matrix für die daraus resultierenden maximalen Input-Leistungen während der Beladung des Wärmespeichers auf. Diese berechnen sich nach Gleichung (2) und sind in Tabelle 3 aufgelistet.

$$P_{el,Input,max} = \Delta \dot{H}_{Luft} = \dot{m}_{Luft} * c_{p,mLuft} * (\vartheta_{Ziel} - \vartheta_{Umgebung}) \quad (2)$$

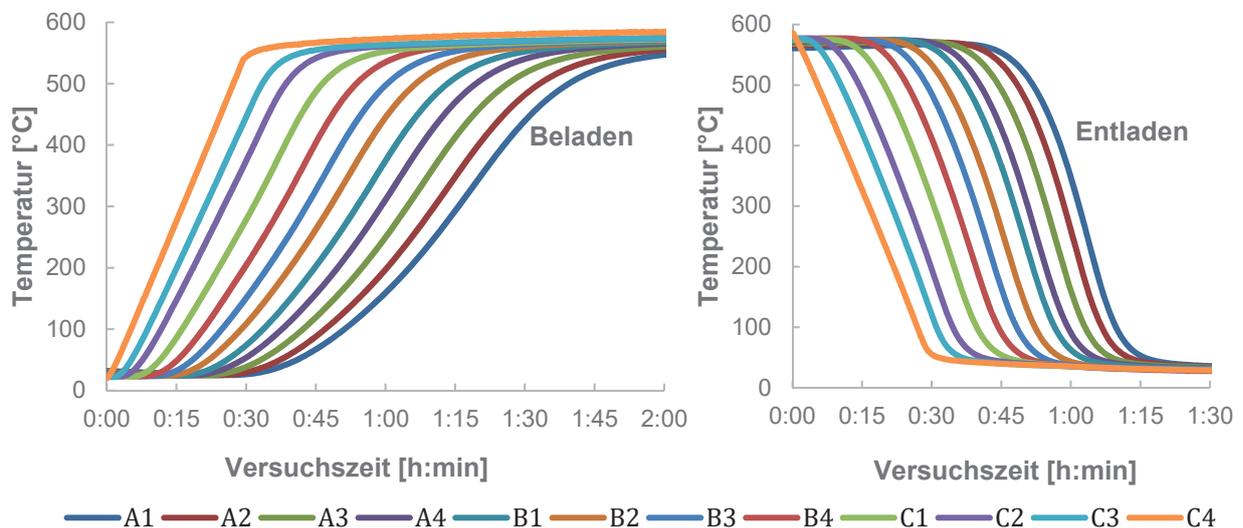
**Tabelle 3: Realisierte maximale Input-Leistungen beim Beladen des Wärmespeichers**

| Luftmassenstrom [kg/h] \ Zieltemperatur [°C] | 40             | 67      | 92             |
|--|----------------|---------|----------------|
| 600  | 6,8 kW         | 11,4 kW | 15,7 kW        |
| 800  | (kein Versuch) | 15,7 kW | (kein Versuch) |

### Experimentelle Ergebnisse

Beispielhaft für die experimentellen Ergebnisse werden hier die Temperaturverläufe für einen Versuch mit Cordierit (C520) mit 600 °C Zieltemperatur, 40 kg/h Luftmassenstrom und 20 K/min Aufheiz- bzw. Abkühlrate des Luftvorwärmers vorgestellt. Abbildung 5 zeigt den Verlauf der zwölf Ebenen im Wärmespeicher beim Be- und Entladen.

Durch thermische Verluste zwischen dem Luftvorwärmer und dem Eintritt in die Wabenkörper kann die am Luftvorwärmer vorgegebene Zieltemperatur nicht ganz erreicht werden. Bei dem beispielhaft gezeigten Versuch nähert sich die von der Strömung zuerst erreichte Ebene (C4) einer Temperatur von ca. 585 °C an. Wie zu erwarten ist, wird der Abstand zur Zieltemperatur der weiter entfernten Ebenen etwas größer.



**Abbildung 5: Temperaturverläufe für das Beladen und Entladen des Wärmespeichers**

Für die Beladung ist hier besonders charakteristisch zu erkennen, dass mit zunehmendem Abstand zum Gaseintritt die S-Krümmung der Temperaturkurven stark zunimmt. Dieser Effekt ist bei der Entladung durch die Vergrößerung der Kurvenradien zwischen 500 und 600 °C und unter 100 °C in Ansätzen ebenfalls zu erkennen. Jedoch kommt es bei der Entladung für jede Ebene zu einer annähernden Entladedauer von ca. 30 min. Beim Beladen wird die C4-Ebene ebenfalls innerhalb von ca. 30 min durchgewärmt. Hingegen nimmt die Beladedauer mit zunehmender Entfernung vom Gaseintritt deutlich zu. Für die Erwärmung der A1-Ebene wird beispielsweise über das doppelte dieser Zeit (ca. 75 min)

benötigt. Die zeitliche Verzögerung bei der Erwärmung der entfernteren Ebenen wird auf Wärmeverluste während des Beladevorgangs zurückgeführt, denn zu Beginn der Beladung befindet sich die Versuchsanlage inklusive Isoliermaterial und Mantel auf Umgebungstemperatur.

Um die Be- und Entladezeiten der unterschiedlichen Versuche vergleichen zu können, werden diese hier wie folgt berechnet: Die Beladezeit wird nach Gleichung (3) mit dem Wert der Versuchszeit ( $t_{\text{Versuch}}$ ) definiert, bei dem sich auch die oberste messtechnisch erfasste Ebene A1 auf 90 % der Zieltemperatur ( $\vartheta_{\text{Ziel}} = 600^{\circ}\text{C}$ ) erwärmt hat. Für das Entladen wird analog dazu die Entladezeit nach Gleichung (4) bestimmt. D. h. die Entladezeit entspricht der Versuchszeit, zu der sich die Ebene A1 auf 10% der beim Beladen eingestellten Zieltemperatur abgekühlt hat. Die unterschiedlichen Be- und Entladezeiten sind für alle Versuche in Tabelle 4 gegenübergestellt.

$$\text{Beladezeit} = t_{\text{Versuch}}(\vartheta_{\text{Ebene A1}} = 0,9 * \vartheta_{\text{Ziel}}) = t_{\text{Versuch}}(\vartheta_{\text{Ebene A1}} = 540^{\circ}\text{C}) \quad (3)$$

$$\text{Entladezeit} = t_{\text{Versuch}}(\vartheta_{\text{Ebene A1}} = \vartheta_{\text{Ziel}} - 0,9 * \vartheta_{\text{Ziel}}) = t_{\text{Versuch}}(\vartheta_{\text{Ebene A1}} = 60^{\circ}\text{C}) \quad (4)$$

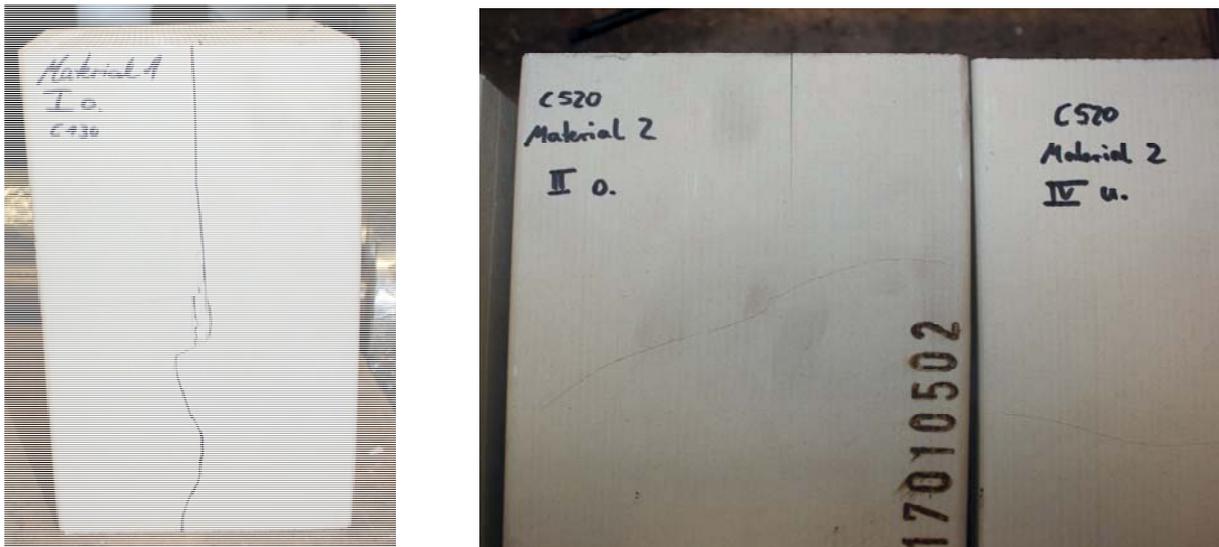
**Tabelle 4: Auswirkung verschiedener Luftmassenströme und Heizraten auf die Be- und Entladezeiten für C520**

| Versuchsbedingungen              | Beladezeit [min] | Entladezeit [min] | Differenz [min] | Relative Abweichung der Differenz bezogen auf die Entladezeit [%] | $\Sigma$ Belade- & Entladezeit [min] |
|----------------------------------|------------------|-------------------|-----------------|---|--------------------------------------|
| 600 °C / <b>20 Hz</b> / 20 K/min | 119              | 73                | 46              | 63  | 192                                  |
| 600 °C / <b>29 Hz</b> / 20 K/min | 73               | 57                | 16              | 28  | 130                                  |
| 600 °C / <b>38 Hz</b> / 20 K/min | 60               | 50                | 10              | 20  | 110                                  |
| 800 °C / 29 Hz / <b>20 K/min</b> | 108              | 69                | 39              | 57  | 177                                  |
| 800 °C / 29 Hz / <b>30 K/min</b> | 100              | 67                | 33              | 49  | 167                                  |
| 800 °C / 29 Hz / <b>40 K/min</b> | 99               | 60                | 39              | 65  | 159                                  |
| 800 °C / 29 Hz / <b>50 K/min</b> | 92               | 56                | 36              | 64  | 148                                  |

Aus den ermittelten Be- und Entladezeiten der Versuchsanlage lässt sich erkennen, dass tendenziell die Abweichung zwischen Be- und Entladezeit, sowohl absolut als auch relativ zur Entladezeit, mit zunehmendem Massestrom und damit zunehmender Be- bzw. Entladeleistung geringer werden. Dies ist sehr gut an den Versuchen mit konstanter Heizrate (erste drei Zeilen in Tabelle 4) zu erkennen. Das bedeutet, dass der starke Verzögerungseffekt beim Beladen abnimmt je höher der Massestrom ist. Da in Abbildung 5 ein Versuch mit minimalem Massestrom gezeigt wird, ist darin die zeitliche Verzögerung in der Beladung am stärksten ausgeprägt und dadurch besonders gut zu erkennen. Dieser Zusammenhang erklärt sich logisch aus der höheren Verlustwärmemenge bei längeren Versuchszeiten, welche bei geringerem Massestrom und somit bei geringerer Beladeleistung auftreten.

Im unteren Teil der Tabelle 4 ist der Massestrom (Frequenz) konstant und die Heizrate wird erhöht. Dies führt erwartungsgemäß ebenso zu einer Verkürzung der Be- und Entladedauer. Die Differenz zwischen Be- und Entladezeit nimmt tendenziell ebenfalls ab, da auch hier durch geringere Beladezeiten die Verlustwärmemenge dabei geringer ist. Die Unregelmäßigkeit der Differenz zwischen Be- und Entladezeit ab 40 K/min kann durch veränderte Durchströmungsbedingungen begründet werden, die durch zunehmend auftretende Risse im Material ab dieser Heizrate herbeigeführt werden können.

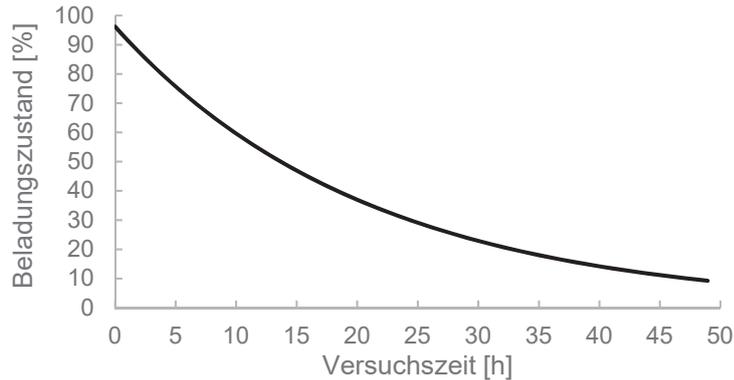
In Abbildung 6 wird der Einfluss der Heizratenvariation auf die keramischen Wabenkörper veranschaulicht. Sobald die Heizrate auf über 20 K/min angehoben wurde, waren erste Splitterbefunde bei der Routine-Demontage des Luftvorwärmers nach jedem Versuch zu beobachten. Um absolut gleiche Bedingungen an beiden Materialien vorliegen zu haben, wurden in einer Versuchsreihe beide Materialien gleichzeitig nebeneinander eingesetzt. Dabei zeigte sich, dass die Wabenkörper aus Tonerdeporzellan nach der Versuchsreihe mit einer Steigerung der Heizrate bis auf 50 K/min durchgehende Brüche und einen Materialversatz um 1-3 mm aufwiesen. Die Cordierit-Wabenkörper waren nach solch hohen Heizraten zwar ebenfalls gesprungen, zeigten jedoch nur dünne Haarrisse ohne Versatz auf. Dieses Ergebnis ist aufgrund der etwas höheren Temperaturwechselbeständigkeit von Cordierit nachvollziehbar. Trotz der besseren physikalischen Eigenschaften von Tonerdeporzellan (höhere Speicherkapazität und höhere Wärmeleitfähigkeit) ist bei hohen Aufheizraten des Speichermaterials in jedem Fall Cordierit auf Grund der deutlich geringeren Bruchneigung vorzuziehen.



**Abbildung 6: Riss-/Bruchbildung der Keramiken (links: Tonerdeporzellan C130, rechts: Cordierit C520)**

Zusätzlich zu den Be- und Entladeversuchen wird die Selbstentladung des Wärmespeichers in der Versuchsanlage untersucht. Hierzu wird der Speicher nach Erreichen der Beladezeit für weitere ca. 2 h heiß durchströmt, so dass sich in allen Ebenen des Speichers annähernd die Zieltemperatur von hier 600 °C einstellt und so dass sich auch das Isoliermaterial erwärmt hat. Anschließend wird der Gaseintritt des Speichers abgesperrt, so dass keine (natürliche) Durchströmung des Speichers erfolgt. Ab diesem Zeitpunkt wird die Selbstentladung durch die radialen Verluste an die Umgebung beobachtet. Gemäß Abbildung 7 fällt dadurch die Kerntemperatur des Speichers (Ebene B2) auf 50 % der Zieltemperatur nach 13 h, auf 30 % nach 23 h und auf 10 % (entspricht der Entladung nach Gleichung (4)) nach etwas über 2 Tagen (49 h). Der Beladungszustand ist dabei so definiert, dass der Speicher zu 100 % beladen ist, wenn er sich komplett auf der Zieltemperatur (hier 600 °C) befindet. Zeitaufgelöst wird der Beladungszustand hier vereinfachend mit der Kerntemperatur der Versuchsanlage bezogen auf die Zieltemperatur nach Gleichung (5) berechnet.

$$\text{Beladungszustand } (t_{\text{versuch}}) = \frac{\vartheta_{\text{Ebene B2}}(t_{\text{versuch}})}{\vartheta_{\text{Ziel}}} * 100 \% = \frac{\vartheta_{\text{Ebene B2}}(t_{\text{versuch}})}{600 \text{ } ^\circ\text{C}} * 100 \% \quad (5)$$



**Abbildung 7: Ergebnisse zur Selbstentladung der Versuchsanlage**

Durch die geringe Speichermasse in der Versuchsanlage und das damit verbundene hohe Oberflächen- zu Volumenverhältnis, welches eine schnelle Entladung stark begünstigt, werden hier relativ kurze Zeiträume für die Selbstentladung ermittelt. Demnach ist der hier untersuchte Wärmespeicher in den Bereich der Kurzzeitspeicherung mit nur wenigen Stunden reiner Haltezeit einzuordnen. Für eine reale Speicheranlage nach dem hier vorgestellten Prinzip wird ein Vielfaches an Speichermaterial (Faktor  $10^2$  -  $10^5$ ) eingesetzt, so dass sowohl das Oberflächen- zu Volumenverhältnis als auch die damit verbundenen Wärmeverluste deutlich verkleinert werden. Dadurch kann sich das Einsatzspektrum dieses Speichertyps auf längere Haltezeiten erweitern.

## Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung der experimentellen Untersuchungen:

In einer Versuchsanlage im kleinen Maßstab werden keramische Wabenkörper aus Tonerdeporzellan C130 und Cordierit C520 als sensible Wärmespeicher untersucht. Die Be- und Entladung erfolgt dabei mit Luft, welche ggf. elektrisch auf bis zu 800 °C vorgewärmt wird. Tonerdeporzellan weist physikalische Eigenschaften auf, die aus thermischer Sicht für den Einsatz als Speichermaterial besser geeignet sind. Jedoch ist bei Aufheizraten über 20 K/min mit verstärkter Rissbildung bei Tonerdeporzellan zu rechnen. Cordierit zeigt sich als deutlich stabiler, wobei auch hier Haarrisse bei hohen Aufheizraten entstehen. Für die Anwendung in einem großtechnischen Speicher wird daher für einen langfristigen Betrieb Cordierit bei Aufheizraten bis 20 K/min empfohlen. In den Versuchsreihen werden die Parameter Luftmassenstrom und somit Be- bzw. Entladeleistung, Aufheiz- bzw. Abkühlrate der Luftvorwärmung und Maximaltemperatur untersucht. Zusätzlich zeigen Halteversuche die Selbstentladung der Versuchsanlage auf. Die experimentell gewonnenen Daten beinhalten vor allem die kontinuierlich erfasste orts aufgelöste Temperaturverteilung im Wabenkörper. Aufgrund der relativ großen Wärmeverluste in der Versuchsanlage aufgrund eines großen Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnisses, können diese Daten nicht eins-zu-eins auf einen großtechnischen Speicher übertragen werden. In der Auslegung eines großtechnischen Speichers auf Basis keramischer Wabenkörper muss daher das bessere (kleinere) Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis und die damit verbundenen geringeren Wärmeverluste berücksichtigt werden. Dies führt schließlich zu geringeren Beladezeiten bei großtechnischen Speichern im Vergleich zu den an dieser Versuchsanlage ermittelten Werten.

Ausblick:

Im nächsten Schritt ist nun der Vergleich mit einem Simulationswerkzeug geplant, mit dem die Belade-, Entlade- und Halteprozesse von Hochtemperatur-Wärmespeichern berechnet werden können. Das Simulationsprogramm kann nach erfolgreicher Validierung mit den hier vorgestellten experimentellen Daten als Werkzeug zur Online-Bilanzierung und zur Ermittlung eines optimierten Speichereinsatzes dienen. Hierfür ist es notwendig, dass die Berechnung in Echtzeit oder schneller von statten geht, so dass hier keine CFD-Methode eingesetzt werden kann. Hier ist ein einfaches Zellenmodell mit eindimensionaler Diskretisierung in Strömungsrichtung und der expliziten Berechnung in diskreten Zeitschritten vorgesehen, ähnlich wie auch in der Literatur zu finden ist (z.B. [8]). Der konvektive

Wärmeübergang kann nach den empirischen Nußelt-Gleichungen für durchströmte Kanäle ermittelt werden [1, p. 785 ff.]. Für den möglichen Anwendungsfall der Durchströmung des Speichers mit Abgas, welches hohe Mengen an strahlungsaktiven Gasen wie CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O enthält, kann der Wärmeübergang durch Gasstrahlung nach den Ansätzen von Kohlgrüber [9, 1, p. 1115 ff., 10, p. 589 ff.] im Berechnungsmodell berücksichtigt werden.

## Formelzeichen

### Lateinische Buchstaben

|                  |                |  |
|------------------|----------------|--|
| c                | J / (kg · K)   | Wärmekapazität (Festkörper)                        |
| c <sub>p,m</sub> | J / (kg · K)   | Spezifische isobare mittlere Wärmekapazität (Luft) |
| m                | kg             | Masse  |
| $\dot{m}$        | kg / s         | Massenstrom  |
| P                | J/s            | Leistung   |
| t                | s              | Zeit   |
| V                | m <sup>3</sup> | Volumen  |

### Griechische Buchstaben

|             |    |            |
|-------------|----|------------|
| $\vartheta$ | °C | Temperatur |
|-------------|----|------------|

## Danksagung

Hiermit bedanken sich die Autoren recht herzlich beim Projektpartner  
Nagel Ingenieurbau GmbH  
Schwarze Pumpe.



Großer Dank gilt auch den Fördermittelgebern:



Diese Maßnahme wird mitfinanziert durch Steuermittel auf Grundlage des von den Abgeordneten des Sächsischen Landtags beschlossenen Haushaltes.

## Literaturverzeichnis

- [1] Verein Deutscher Ingenieure, VDI-Wärmeatlas, 10. Hrsg., Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2013.
- [2] N. Hack, S. Unz und M. Beckmann, „Stand der Technik zur Umwandlung und Speicherung elektrischer Energie,“ *VGB PowerTech*, Nr. 4, pp. 45-52, 2014.
- [3] M. Sterner und I. Stadler, *Energiespeicher*, Berlin: Springer Vieweg, 2014.
- [4] T. Desrues, J. Ruer und J. Fourmigué, „A thermal energy storage process for large scale electric applications,“ *Applied Thermal Engineering*, Nr. 30, pp. 425-432, 2010.
- [5] C. Schulz, F. Jahns und S. Spieker, „Thermopotentialspeicher - Energiespeicher der Zukunft,“ in *Kraftwerkstechnik - Sichere und nachhaltige Energieversorgung - Band 3*, M. Beckmann und A. Hurtado, Hrsg., Neuruppin, TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2011, pp. 553-564.
- [6] A. White, P. Geoff und C. N. Karkides, „Thermodynamic analysis of pumped thermal electricity storage,“ *Applied Thermal Engineering*, pp. 291-298, 2013.
- [7] Porzellanfabrik Hermsdorf GmbH, „Produktinformation,“ [Online]. Available: <http://www.pofahermsdorf.de/fileadmin/templates/userfiles/datenblaetter/deutsch/Waermetauscher.pdf>. [Zugriff am 29.01.2018].
- [8] Z. Luo, C. Wang, G. Xiao, M. Ni und K. Cen, „Simulation and experimental study on honeycomb-ceramic thermal energy storage for solar thermal systems,“ *Applied Thermal Engineering*, Nr. 73, pp. 622- 628, 2014.
- [9] K. Kohlgrüber, „Formeln zur Berechnung des Emissionsgrades von CO<sub>2</sub>- und H<sub>2</sub>O-Gasstrahlung bei Industriöfen, Brennkammern und Wärmeaustauschern,“ *Gas wärme international*, Bd. 35, Nr. 8, pp. 412-417, 1986.
- [10] H. D. Baehr und K. Stephan, *Wärme- und Stoffübertragung*, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2010.