

Entwicklung und experimentelle Untersuchung von thermischen Energiespeichern auf Basis von Feststoffen zur alternativen Wärmeversorgung in batterieelektrischen Fahrzeugen

V. Dreißigacker¹, J. Haunstetter¹, S. Belik¹

Deutsches Zentrum für Luft- u. Raumfahrt (DLR)

Pfaffenwaldring 38-40, D-70569 Stuttgart

¹Institut für Technische Thermodynamik

Tel. +49-(0)711/6862-449, Email: volker.dreissigacker@dlr.de



1. Hintergrund

Nationale wie internationale Verpflichtungen zum Klimaschutz erfordern in unterschiedlichsten Sektoren Steigerungen der Effizienz sowie CO₂ reduzierende Maßnahmen. Speziell im bodengebundenen Verkehrsbereich eröffnet hierbei die verstärkte Elektrifizierung von Fahrzeugen zusammen mit dem Ausbau erneuerbarer Energiequellen vielfältige Potentiale zur Reduktion von Emissionen. Technologische und ökonomische Fortschritte beispielsweise bei der Batterieentwicklung fördern dabei die Attraktivität der Elektromobilität, erfordern aber weitere Maßnahmen zur Steigerung der Akzeptanz vor allem hinsichtlich effektiver Reichweite. Ein zentraler Ansatz zur Steigerung der Reichweite basiert auf der Reduktion elektrischer Batteriekapazitäten zur Bereitstellung von Wärme oder Kälte durch die Nutzung effizienter bzw. alternativer Thermomanagement-Konzepte. Speziell an kalten Jahreszeiten lassen sich so Reichweitenverluste von bis zu 50 % zur Beheizung des Innenraums [1-3] vermeiden.

Ein innovativer Konzeptansatz hierzu beruht auf der Integration von elektrisch beheizten thermischen Energiespeichern, die zur Wärmeversorgung von batterieelektrischen Fahrzeugen anstatt heutiger PTC-Elemente (Positive Temperature Coefficient) genutzt werden. Derartige thermische Speichertechnologien sind seit mehreren Jahrzehnten kommerzielle Lösungen in unterschiedlichsten Industrien [4, 5] bzw. zentrale Elemente in F&E-basierten großmaßstäblichen elektrischen Speichersystemen [6, 7]. Grundprinzip dabei ist es durch einen zeitlich entkoppelten Betrieb Wärme aufzunehmen (Beladephase) bzw. abzugeben (Entladephase), um dadurch eine verbesserte systemische Flexibilität und Effizienz zu erzielen [8]. In Abhängigkeit der Anwendungen, Medien, Temperaturniveaus oder systemischen Anforderungen eignen sich dazu sensible, latente oder thermochemisch basierte thermische Energiespeicher.

Übertragungen derartiger Konzepte auf den Verkehrsbereich finden sich im Wesentlichen zu latenten [9-11] und thermochemisch basierten thermischen Energiespeichern [12]. Der erfolgreiche Einsatz von thermischen Energiespeichern im Verkehrsbereich – besonders bei batterieelektrischen Fahrzeugen – erfordert dabei im Vergleich zu großmaßstäblichen Anwendungen deutliche Verbesserungen vor allem hinsichtlich thermischer Speicherdichte und spezifischer Be-/Entladeleistung. Ersteres lässt sich durch die Nutzung von Hochtemperatur-Wärme, Phasenwechsel- oder Reaktionen Enthalpien erreichen, Letzteres durch hohe spezifische elektrische Beladeleistungen, einen hohen Wärmetransport (konduktiv und/oder konvektiv) sowie durch ausreichend hohe wärmeübertragende Flächen. Ein vielversprechender Ansatz hierbei, der beide Anforderungen erfüllt, basiert auf der Nutzung von elektrisch beheizten Feststoff-Wärmespeichern (Regeneratoren) [13, 14]. Während der Beladung des thermischen Speichersystems wird Hochtemperatur-Wärme durch eine leistungsstarke Widerstandsheizung erzeugt, im Feststoff effizient gespeichert und während der Entladung zur Temperierung des Innenraums durch einen Bypass auf definiertem Temperaturniveau wieder zur Verfügung gestellt.

Derartige Feststoff-Wärmespeicher sind unter anderem Schwerpunkt von F&E-Arbeiten im Rahmen des DLR-Projekts Next Generation Car (NGC). Ziel dabei ist es Speichersysteme auszuarbeiten, die im Vergleich zu heutigen batteriegespeisten Heizsystemen höhere oder vergleichbare Speicherdichten und damit innovative sowie kosteneffiziente Lösungen zur Wärmeversorgung erlauben. Idee derartiger Konzepte dabei ist es - parallel zur Beladung der Batterie - Hochtemperaturwärme elektrisch zu erzeugen (Power-to-Heat), im thermischen Energiespeicher effizient zu speichern und bei Bedarf durch ein Bypass-Konzept auf definiertem Temperaturniveau bereitzustellen. Der aktuelle Stand der Entwicklungsarbeiten sowie die daraus abgeleiteten Optimierungspotentiale werden im Folgenden vorgestellt und dienen als Grundlage für die zukünftige Entwicklung eines Prototyps.

2. Aktueller Stand der Entwicklungsarbeiten

Bisher betrachtete Konzepte für Feststoff basierte thermische Energiespeicher (TES) erfordern Hochtemperaturlösungen, um hohe systemische Speicherdichten zu erzielen. Die hierzu notwendige Wärme wird – parallel zur Beladung der Batterie - durch eine elektrische Beheizung erzeugt und innerhalb des Speichermedium gespeichert. Je nach Speichertyp, geometrischen, materialspezifischen oder systemischen Anforderungen ist hierbei ein breites kommerzielles Spektrum an widerstandsbasierten elektrischen Heizsystemen verfügbar, wobei Temperaturen von bis zu 1400 °C erreicht werden [15].

Idee ist es nun die während der Fahrt (Entladeperiode) zur Beheizung der Fahrzeugkabine notwendige thermische Energie durch Zumischung von kalter Umgebungsluft (T_U) mit der aus dem Speicher austretenden heißen Luft ($T_{F,out}$) zu erreichen. Der kalte Bypassstrom wird dabei so geregelt, dass sich trotz eines Temperaturabfalls der aus dem Speicher austretenden Luft eine konstante Mischtemperatur (T_{mix}) auf definiertem Temperaturniveau (z. B. 60 °C) einstellt.

Eine schematische Darstellung für einen Feststoff basierten thermischen Energiespeicher [13] wird in Abbildung 1 gezeigt.

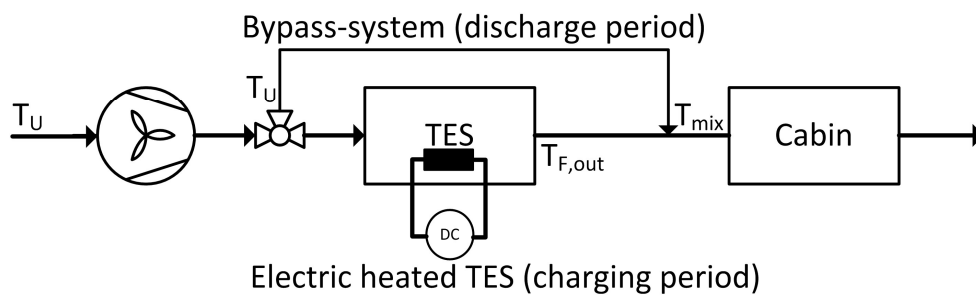


Abbildung 1: thermisches Speichersystem zur Wärmeversorgung batterieelektrischer Fahrzeuge

Derartige Lösungen von thermischen Energiespeichern verdeutlichen das Potential zur Reichweitensteigerung durch einen reduzierten Heizbedarf der vorhandenen Batteriekapazitäten. Die Nutzung solcher Systeme erfordert dabei allerdings vergleichbare oder höhere systemische Speicherdichten im Vergleich zur Batterie und damit Hochtemperatur basierte thermische Energiespeicher.

Die hier im Rahmen der Studie zu Grund gelegten zentralen Spezifikationen sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

| \dot{Q} [kW] | T_{mix} [°C] | τ [h] | Δp [mbar] | T_w [°C] |
|----------------|----------------|------------|-------------------|------------|
| 5 | 60 | 0.5 | 10 | 60 |

Tabelle 1: zentrale Spezifikationen zur Dimensionierung des thermischen Speichersystems

Die dargelegten zentralen Prozessspezifikationen hinsichtlich zu erzielender thermischer Entladeleistung \dot{Q} , zeitlich konstanter Mischtemperatur (T_{mix}), Entladedauer (τ) sowie maximal zulässigem Druckverlust (Δp) basieren auf Anforderungen zur Wärmeversorgung der Fahrzeugkabine in batterieelektrischen Fahrzeugen sowie auf sicherheitstechnischen Restriktionen hinsichtlich maximal zulässiger Oberflächentemperatur (T_w).

Als favorisiertes Inventarmaterial werden hier Al_2O_3 bzw. SiC basierte Keramiken zu Grunde gelegt, die im Vergleich zu metallischen Werkstoffen hohe gravimetrische Speicherdichten und hohe Betriebstemperaturen erlauben. Derartige Keramiken sind als kommerzielles Produkt in unterschiedlichsten Hochtemperatur-Anwendungen mit einem breiten Spektrum an geometrischen Spezifikationen durch unterschiedliche Herstellungsverfahren verfügbar.



Abbildung 2: kommerzielle Produkte keramischer Inventarsteine (z. B. Wabenkörper)

2.1. Theoretische Ergebnisse: Speicherinventar

Ein Fokus der Untersuchungen umfassen Entwurfsberechnungen zum Speicherinventar, das eine hohe Effizienz und hohe Speicherausnutzung beim thermischen Entladevorgang aufweist und somit die Grundlagen für hohe systemische Speicherdichten ermöglicht. Anhand eindimensionaler instationärer Modellgleichungen (Porositätsmodell), einer implementierten Bypass-Steuerung und den in Tabelle 1 dargestellten Spezifikationen wurden iterative Variationsstudien zu den relevanten geometrischen Größen – der spezifischen Oberfläche (a_v), dem Hohlraum (ϵ) und dem Längen-zu-Durchmesser Verhältnis (L/D) – und zur Starttemperatur (Annahme: homogenes Temperaturprofil am Ende der elektrothermischen Beladung) durchgeführt und bewertet.

Für eine exemplarische Entwurfslösung bei einer Starttemperatur von 700 °C werden die zentralen Temperaturverläufe während des Entladevorgangs in Abbildung 3 dargestellt.

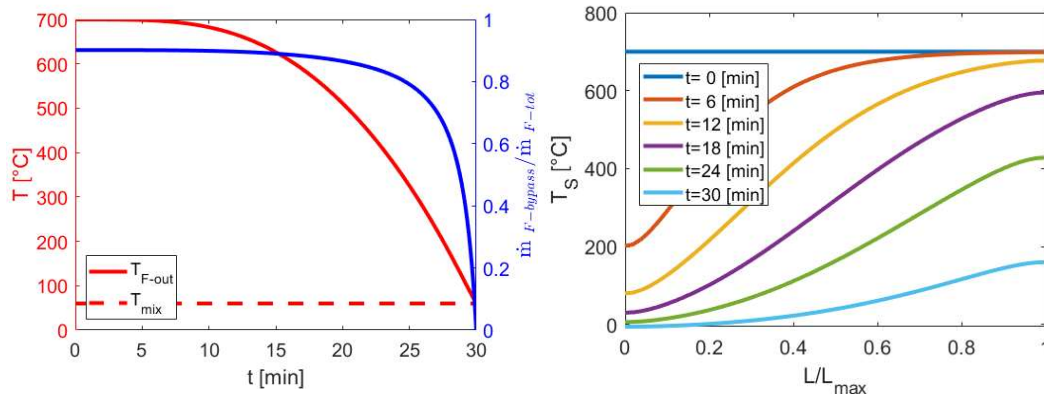


Abbildung 3: zeitlicher Verlauf der Speicheraustritts- (T_{F-out}) und Mischtemperatur (T_{mix}) – Bild links; örtlich normierte Temperaturprofile des Speicherinventars (T_s) – Bild rechts

Zu Beginn der Entladung wird der Feststoff-Wärmespeicher mit einem Massenstromanteil von 10 % durchströmt, wobei sich TES-Austrittstemperaturen von ca. 700 °C einstellen. Um über die gesamte Zeit mit zunehmenden TES-Temperaturabfall (T_{F-out}) die spezifizierete konstante Temperatur (T_{mix}) von 60 °C zu erreichen ist eine stärkere Durchströmung des Feststoff-Wärmespeichers im Verlauf der Entladung notwendig (blaue Kurve). Parallel dazu zeigt das Speicherinventar (T_s) einen Temperaturabfall über die (normierte) Speicherlänge. Deutlich wird auch, dass Wärmemengen im Speicherinventar am Ende der Entladung bei ca. 100 °C (Mittelwert) verbleiben und somit nicht die gesamte Kapazität genutzt werden kann. Dieses Verhältnis aus tatsächlich zur maximal möglich entladenen Wärme – der sogenannte Speichernutzungsgrad η_{store} – eignet sich als dimensionslose Größe zur Bewertung der geometrieabhängigen Effizienz derartiger Speichertechnologien.

Zentrale Ergebnisse zur resultierenden Speicherausnutzung auf Basis der durchgeführten breiten Variationsstudien für einen SiC-basierten Inventarwerkstoff werden in Abbildung 4 dargestellt.

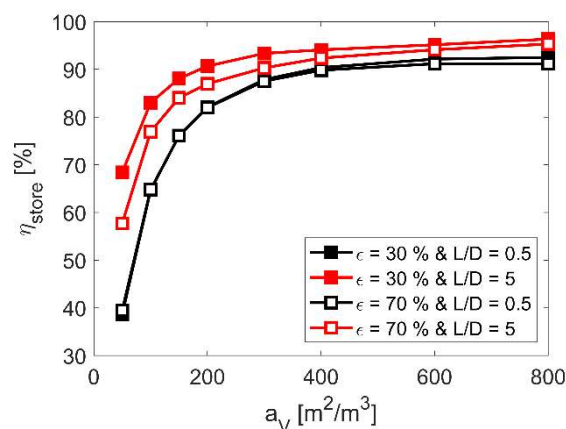


Abbildung 4: Speichernutzungsgrad (η_{store}) in Abh. der spezifischen Oberfläche (a_v), Hohlraums (ϵ), Längen-zu-Durchmesser-Verhältnis (L/D) bei einer exempla. Starttemperatur von 700 °C und eines SiC-basierten Inventarwerkstoffs

Die Ergebnisse zeigen, dass mit zunehmender spezifischer Oberfläche eine signifikant höhere Speicherausnutzung erreicht wird. Bei ausreichend hohen spezifischen Oberflächen lässt sich eine weitere moderate Verbesserung der Speicherausnutzung durch höhere L/D-Verhältnis aufgrund erhöhter Wärmeübergangskoeffizienten erzielen. Ein geringer Einfluss auf die Speicherausnutzung zeigt der Hohlraum. So erhöht sich zwar mit geringerem Hohlraum die Strömungsgeschwindigkeit und damit der konvektive Wärmeübergang, gleichzeitig reduziert sich aber die Verweildauer des Fluids und somit der Zeitraum zum Wärmetransport. Die hier dargestellten Zusammenhänge verdeutlichen, dass Inventarkörper mit ausreichend hohen spezifischen Oberflächen ($> 200 \text{ m}^2/\text{m}^3$) notwendig sind. Wabenkörperartige Inventarsteine mit spezifischen Oberflächen von mehr als $1000 \text{ m}^2/\text{m}^3$ erfüllen diese Anforderungen und bilden daher die Basis derartiger thermischer Speichersysteme.

Vergleichbare geometrieabhängige Charakteristiken mit geringfügigen Abweichungen zeigen sich auch bei den sonstig untersuchten keramischen Werkstoffen bzw. bei unterschiedlichen Starttemperaturen, wobei höhere Temperaturen mit einer materialspezifischen Zunahme der inventarbezogenen Speicherdichten verbunden sind.

2.2. Theoretische Ergebnisse: systemische Speicherdichten

Die im Inventar gespeicherte Hochtemperaturwärme erfordert eine thermische Dämmung des Speicherkörpers, die sich aus der maximal Speicher- und der in Tabelle 1 spezifizierten maximal zulässigen Oberflächentemperatur ($60 \text{ }^\circ\text{C}$) ergibt. Auf Basis stationärer Wärmebilanzgleichungen, einer exemplarisch ausgesuchten mikroporösen Wärmedämmung und den ermittelten Inventardimensionen wurden iterativ die notwendigen Isolationsdicken ermittelt.

Die daraus resultierenden systemischen Speicherdichten in Abhängigkeit der Starttemperatur (T_{max}) für einen SiC-basierten Inventarwerkstoff sind in Abbildung 5 dargestellt.

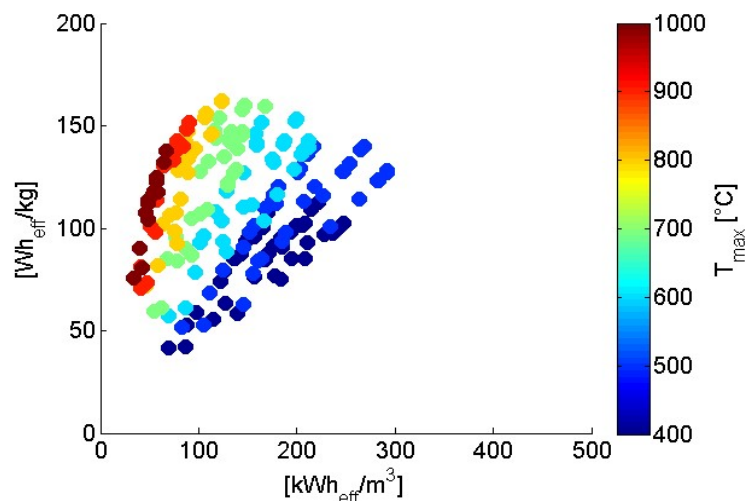


Abbildung 5: systemische gravimetrische und volumetrische Speicherdichte für einen SiC-basierten Inventarwerkstoff in Abhängigkeit der Starttemperatur (T_{max})

Man erkennt - bezogen auf eine Maximaltemperatur zu Beginn des Entladens (T_{max}) – eine große Bandbreite möglicher systemischer Speicherdichten. Grund hierfür sind die geometriespezifischen Variationsstudien zum Inventar und zum Innendurchmesser. Entwurfsoptionen mit geringen spezifischen Oberflächen und schlechtem Wärmetransport bedingen zur Einhaltung der Zielgrößen in Tabelle 1 deutlich höhere Speichermassen und führen dadurch zu einer geringeren thermischen Speicherausnutzung somit zu deutlich geringeren systemischen Energiedichten.

Deutlich wird zudem auch, dass sich mit zunehmender Maximaltemperatur höhere systemische gravimetrische und volumetrische Speicherdichten bis zu einem materialabhängigen Maximalwert ergeben. Dieses Verhalten resultiert aus höheren thermischen Speicherdichten (bezogen auf den Inventarkörper) mit steigender Maximaltemperatur und gleichzeitig zunehmenden Aufwand bei der Wärmedämmung zur Einhaltung der spezifizierten Oberflächentemperatur (T_w).

Auf Basis der dargelegten Entwurfsberechnungen und der angesetzten Spezifikationen werden in Tabelle 2 zentrale Ergebnisse für ausgewählte Speicherwerkstoffe hinsichtlich systemischer Speicherdichte, Inventargeometrie und Speichernutzungsgrad zusammengefasst.

| Inventarwerkstoff | SiC | Al ₂ O ₃ | NiCr80-20 |
|---|---------|--------------------------------|-----------|
| Systemische Speicherdichte [Wh/kg] | ~ 145 | ~ 155 | ~ 95 |
| Systemische Speicherdichte [kWh/m³] | ~ 190 | ~ 275 | ~ 300 |
| Spezifische Oberfläche [m²/m³] | > 200 | | |
| Hohlraum [%] | 20 - 40 | | |
| Speichernutzungsgrad [%] | 80 - 95 | | |

Tabelle 2: zentrale Ergebnisse für ausgewählte Inventarmaterialien bei Maximaltemperaturen (am Ende der elektrothermischen Beladung) von 600 – 800 °C

Ergänzend wurden Untersuchungen zum Beladeprozess (elektrothermische Beheizung des Speicherinventars) durchgeführt, wobei elektrothermische Modelle genutzt bzw. entwickelt wurden, die eine zeitliche und räumliche Abbildung des Erwärmungsvorgangs im Feststoffspeicher unter Berücksichtigung von thermischen Verlusten über die Isolation erlauben. Hierbei wurden als Beheizungsverfahren indirekte elektrische Widerstandserwärmungen konzeptionell untersucht, in denen der Wärmetransport über Wärmeleitung (Heizelemente), Konvektion oder Wärmestrahlung (Abbildung 6) auf das Speicherinventar erfolgt.

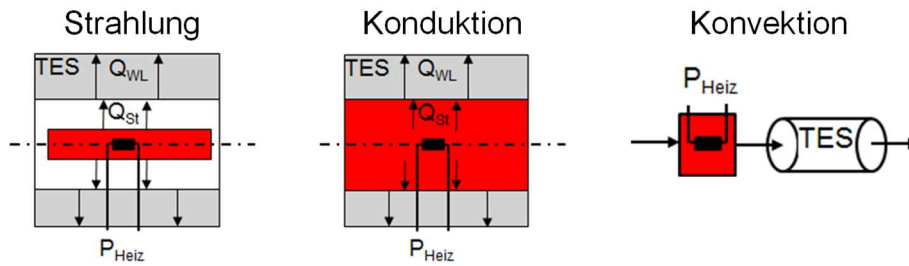


Abbildung 6: untersuchte Wärmetransportmechanismen bei der indirekten Widerstandserwärmung

Zur Identifikation von favorisierten Beheizungslösungen mit hoher Leistungsdichte während des Beladens wurden Entwurfslösungen gewählt, die sich aus den bereits dargestellten Variationsrechnungen zu den Geometrieparametern, den Heiztemperaturen und den Speichermaterialien mit hohen systemischen Speicherdichten ergaben (siehe Abbildung 5). Detaillierte Informationen hierzu sind in [14] beschrieben.

2.3. Experimentelle Ergebnisse

Ziel der Arbeit ist die Entwicklung, Aufbau und Vermessung eines Teststands mit integriertem Funktionsmuster eines elektrisch beheizten Feststoff-Wärmespeichers zur Bestätigung der Funktionalität und zur Identifizierung von limitierenden Einflussfaktoren.

Das aufgebaute Speichersystem umfasst ein Inconel-Heizkreuz, kostengünstige Mullit- bzw. SiC-basierte Wabenkörper (Funktionsmuster), eine konventionelle mikroporöse Wärmedämmung sowie konische Verteiler für eine gleichmäßige Anströmung des Speicherinventars. Als Speicherform wurden quaderförmige Wabenkörper gewählt, die über das Heizkreuz per Wärmeleitung indirekt beheizt werden. Zur dauerhaften Gewährleistung der hier angesetzten Zieltemperatur von 60 °C beim Entladen wurde die Bypass-Verschaltung integriert und über ein Ventil gesteuert. Zentrale Merkmale des Teststands sind in Abbildung 7 zusammengefasst.

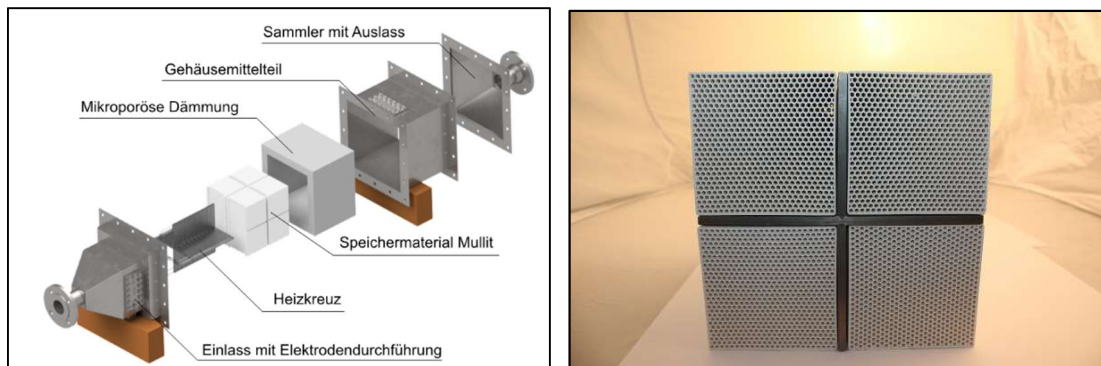




Abbildung 7: Explosionszeichnung des Laborteststand zum Hochtemperatur-Feststoffspeicher (Bild oben links); Heizkreuz mit Mullit-Wabenkörper (Bild oben-rechts); Laborteststand im DLR-Stuttgart (Bild unten)

Die Mullit bzw. SiC-basierten Wabenkörper weisen eine spezifische Oberfläche und einen Hohlraum von $755 \text{ m}^2/\text{m}^3$ und 56% bzw. von $175 \text{ m}^2/\text{m}^3$ und 46% sowie eine Masse von $7,8 \text{ kg}$ bzw. von $13,2 \text{ kg}$ auf. Das Heizkreuz erreicht maximale Heiztemperaturen von $900 \text{ }^\circ\text{C}$ bei einer Höchstleistung von 8 kW .

Auf Basis der experimentellen Ergebnisse wurden Validierungssimulationen mit dem instationären thermischen Porositätsmodell durchgeführt. Als Anfangsbedingung wurde eine homogene Starttemperatur des Speicherinventars vorgegeben, die sich als integraler Mittelwert des Temperaturprofils am Ende der elektrothermischen Beladung ergab. Exemplarisch werden in Abbildung 8 für eine Versuchsreihe (Luft-Eintritt: $20 \text{ }^\circ\text{C}$, Volumenstrom: $50 \text{ m}^3/\text{h}$, Starttemperatur: $500 \text{ }^\circ\text{C}$, Misch-Austrittstemperatur: $60 \text{ }^\circ\text{C}$) Validierungsergebnisse zur thermischen Entladung dargestellt.

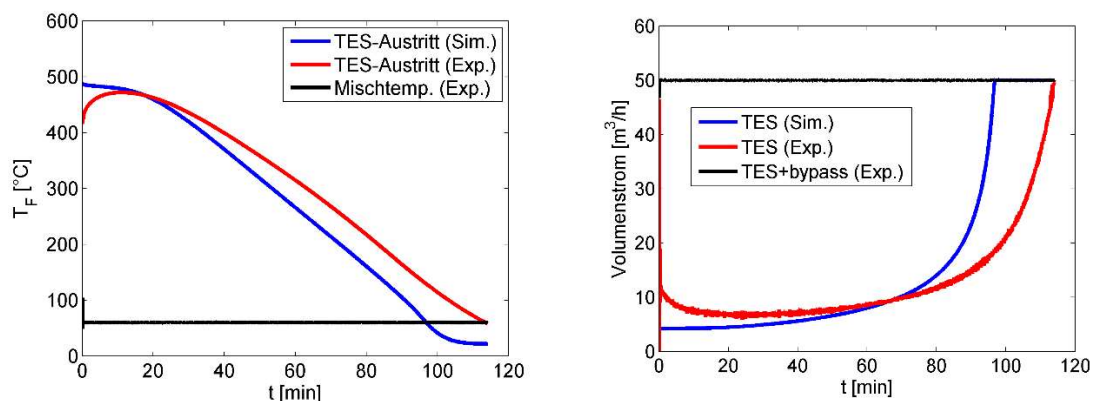


Abbildung 8: Entladetemperaturverläufe am Austritt des Feststoffspeichers und der Bypass geregelten Mischtemperatur (Bild links); Volumenstromverläufe während der Entladung (Bild rechts)

Die Graphiken in Abbildung 8 zeigen den zeitlichen Temperaturverlauf aus dem Speicherinventar (links) sowie den sich ergebenden Volumenstrom (rechts) durch das Speicherinventar. Man erkennt im Vergleich der experimentellen mit den simulativen Ergebnissen eine gute Übereinstimmung sowohl in der Größenordnung

als auch im Verlauf. Deutlich wird zudem, dass zur Einhaltung der spezifizierten konstanten Mischtemperatur von 60 °C über das Bypass-Konzept, der Abfall der Austrittstemperatur aus dem Speicherinventar durch einen höheren Volumenstrom kompensiert wird.

Die Simulationsergebnisse zeigen allerdings einen leicht höheren Temperaturabfall während der Entladung. Dies ist auf zusätzliche Speicherkapazitäten (Wärmedämmung) zurückzuführen, die bisher im Modell nicht berücksichtigt sind. Zusätzlich weisen die gemessenen Temperaturverläufe zu Beginn der Entladung ein Maximum auf. Dies ist auf Wärmeverluste (Strahlung) an den Enden des Speicherinventars zurückzuführen, die zu einer geringeren Temperatur an den Rändern des Wabenkörpers führen und sich durch den konvektiven Entladebetrieb in einem Temperaturmaximum widerspiegeln.

Analog zur thermischen Entladung wurden auch anhand der entwickelten Simulationsmodelle zur elektrothermischen Beladung Validierungsrechnungen durchgeführt. Für einen exemplarischen Versuch bei maximalen Heiztemperaturen von 900 °C werden in Abbildung 9 die gemessenen sowie berechneten zeitlichen Temperaturprofile dargestellt. Im Gegensatz zu den Messergebnissen während der thermischen Entladung wurden hier SiC-basierte Wabenkörper untersucht.

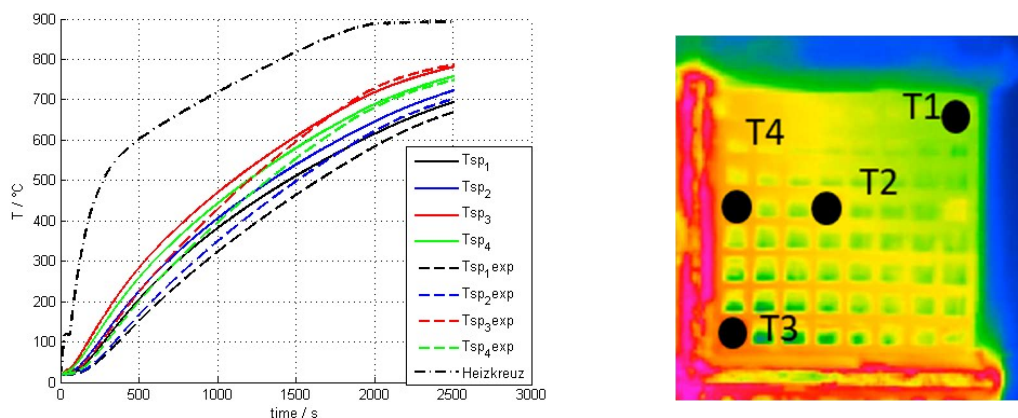


Abbildung 9: zeitliche Temperaturverläufe während der elektrothermischen Beladung von SiC-basierten Wabenkörper

Auch hier ist zu erkennen, dass sich gute Übereinstimmung in den zeitlichen Temperaturverläufen zwischen den Mess- und Simulationsergebnissen ergeben. Trotz der hohen Wärmeleitfähigkeit des hier untersuchten SiC-basierten Wabenkörpers zeigen sich allerdings geringe/moderate effektive Heizleistungen. Dies ist einerseits auf hohe thermische Kontaktwiderstände zwischen dem Heizkreuz und der Wabe, andererseits auf längere Wärmetransportwege innerhalb der gitterartig strukturierten Wabe zurückzuführen. Geometrische Anpassungen hinsichtlich Heizflächen bzw. Maßnahmen zur Verringerung von Kontaktwiderständen sind daher bei diesem Beheizungsverfahren notwendig und u.a. Stand laufender Arbeiten.

Vergleichbare Ergebnisse haben sich auch bei den sonstigen Versuchsreihen gezeigt und bestätigen damit die Funktionalität von elektrisch beheizten Feststoff-Wärmespeicher zur Wärmeversorgung batterieelektrischer Fahrzeuge. Die durchgeführten experimentellen Versuchsreihen und Validierungssimulationen zeigen aber auch deutliche Optimierungspotentiale hinsichtlich systemischer Speicherdichte und effektiver elektrothermischer Beladeleistung. Im Folgenden werden die zentralen limitierenden Einflussfaktoren und die daraus abgeleiteten Verbesserungspotentiale dargestellt.

3. Optimierungspotentiale

Die durchgeführten experimentellen Versuchsreihen und Validierungssimulationen auf Basis der hier untersuchten keramischen Wabenkörper haben neben der Bestätigung der Funktionalität Optimierungspotentiale hinsichtlich systemischer Speicherdichte und Beladeleistung gezeigt. Im Folgenden werden daraus abgeleitete Verbesserungspotentiale stichpunktartig dargestellt.

Steigerung der systemischen Speicherdichte (u.a.)

- Alternative Wärmedämmkonzepte zur Reduktion der thermischen Isolationsdicken bei gleichzeitiger Einhaltung sicherheitstechnischer Restriktionen
- Nutzung des Abwärmepotentials
- Reduktion der Verteilergröße durch strömungstechnisch angepasste Inventarkörper

Steigerung der Beladeleistung (u.a.)

- Steigerung der effektiven Heizleistung durch geometrisch angepasste Designs
- Nutzung von industrienahen Höchsttemperatur Heizsystemen (bis 1400 °C) basierend auf offenen Heizdrahtlösungen (siehe Ofentechnik)
- Steigerung der effektiven Wärmeleitung im Feststoff durch radialstrukturierte Geometrien

Auf Grundlage der dargestellten Optimierungspotentiale wurden verbesserte Konzepte zur Steigerung der systemischen Speicherdichten ausgearbeitet und durch verbesserte Modelle – Berücksichtigung von Wärmestrahlung und zusätzlicher kapazitiver Subsysteme (Wärmedämmung) – untersucht. Erste Ergebnisse zu daraus resultierenden systemischen Speicherdichten für einen SiC basierten Wabenkörper werden in folgender Abbildung dargestellt.

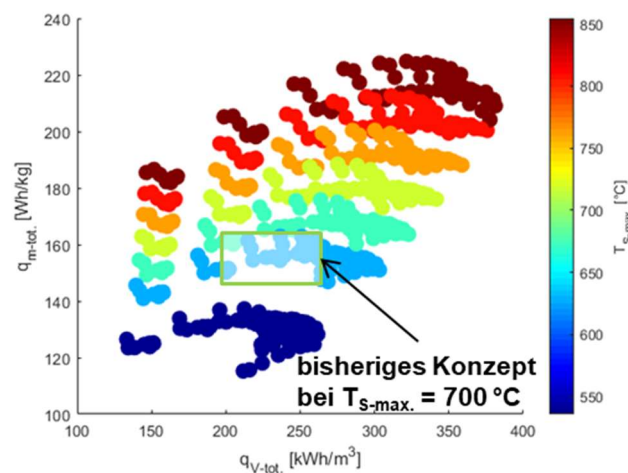


Abbildung 10: erste Ergebnisse zu weiterentwickelten Speicherkonzepten - systemische Speicherdichten für SiC basierten Inventarkörper

Die Ergebnisse zeigen, dass deutliche Steigerungen der systemischen Speicherdichten im Vergleich zu den bisherigen Entwurfslösungen vorhanden sind. Die erzielten Verbesserungen beruhen dabei auf angepassten Strömungspfaden des bisherigen externen Bypasses (siehe Abbildung 1) und auf weiterentwickelten Wärmedämmstrukturen, die eine Integration bisher ungenutzter Wärmemengen in der thermischen Isolation bzw. von Wärmeverlusten erlauben. Im Vergleich zu aktuellen Entwurfslösungen sind so Steigerungen der systemischen Speicherdichten auf ca. 230 Wh/kg bzw. 350 kWh/m³ für SiC-basierte Inventarwerkstoffe möglich. Weitere Verbesserungen lassen sich mit Al₂O₃-basierten Keramiken sowie alternativen und kommerziell verfügbaren mikroporösen Dämmmaterialien erreichen.

Parallel dazu wurden alternative Beheizungslösungen auf Grundlage industrienaher und vergleichbarer Hochtemperatur-Anwendungen (z. B. Ofentechnik) untersucht, die auf offenen Heizdrahtsystemen mit Heiztemperaturen von bis zu 1400 °C basieren. Erste Simulationsergebnisse bestätigen eine deutliche Steigerung der effektiven Heizleistung bei gleichzeitig geringeren Heizsystemdimensionen und versprechen somit kostengünstigere Lösungen sowie vielfältige Freiheitsgrade bei der konstruktiven Umsetzung.

4. Zusammenfassung

Der Einsatz von thermischen Energiespeichern eröffnet für batterieelektrische Fahrzeuge neue Pfade zur Wärmeversorgung und damit Reichweitenerhöhungen durch Reduktion von batterieelektrischer Kapazität. Effiziente Konzepte derartiger thermischer Speichersysteme basieren dabei auf elektrisch beheizten Hochtemperatur-Feststoffspeichern, die durch eine breite Auswahl an keramischen oder metallischen Speichermedien sowie leistungsstarken elektrischen Heizelementen effiziente und kostengünstige Lösungen ermöglichen.

Erste simulative Arbeiten bestätigen das Potential von derartigen thermischen Speichersystemen hohe systemische Speicherdichten und gleichzeitig eine lastflexible Wärmeversorgung batterieelektrischer Fahrzeuge zu erreichen. Die Ergebnisse zeigen, dass hohe Freiheitsgrade sowohl beim Speicherwerkstoff bzw. bei Geometrien, bei den Wärmedämmmaterialien und bei den Beheizungsverfahren vorhanden sind und industrienaher Lösungen genutzt werden können. Durch experimentelle Untersuchungen an ersten Funktionsmustern konnten erfolgreiche Validierungen der zentralen Subsysteme durchgeführt und Optimierungspotentiale identifiziert werden.

Aktuelle Arbeiten bestätigen, dass im Vergleich zu bisherigen Lösungen eine Steigerung der systemischen Speicherdichten auf 230 Wh/kg bzw. 350 kWh/m³ für SiC-basierte Inventarwerkstoffe möglich sind, gleichzeitig vorhandene Wärmeverluste deutlich verringert, zusätzliche betriebliche Flexibilität (Vorwärmkonzepte) sowie signifikante höhere effektive Heizleistungsdichten auf Grundlage industrienaher Lösungen erreicht werden. Die damit verbundenen Verbesserungen einhergehend mit konstruktiven Auslegungen sind Stand laufender Arbeiten und bilden die Grundlage für die prototypische Umsetzung der Technologie.

Literaturverzeichnis

- [1] H. Grossmann: Pkw – Klimatisierung – Physikalische Grundlagen und technische Umsetzung; Berlin Heidelberg: Springer, 2013.
- [2] C. Kuper, M. Hoh, G. Houchin-Miller, J. Fuhr: Thermal Management of Hybrid Vehicle Battery Systems; EVS24, Stavanger, Norway, 2009.

-
- [3] M. Jung, A. Kemle, T. Strauss, M. Wawzyniak: Innenraumheizung von Hybrid- und Elektrofahrzeugen; ATZ, 396-401, 2011.
 - [4] Heiligenstaedt, W: Wärmetechnische Rechnungen für Industrieöfen. 4. Aufl. Düsseldorf: Verl. Stahleisen, 1966
 - [5] Amelio M., Morrone P.: Numerical evaluation of the energetic performances of structured and random packed beds in regenerative thermal oxidizers. Applied Thermal Engineering 27, pp. 762–770, 2007
 - [6] V. Dreißigacker, S. Belik: System configurations and operational concepts for high efficient utilization of Power-to-Heat in A-CAES. Applied Sciences. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI); 2019.
 - [7] A. Benato, A. Stoppato: Pumped Thermal Electricity Storage: a technology overview; Thermal Science and Engineering Progress, 2018.
 - [8] R H. Turner: High temperature thermal energy storage; Philadelphia, Pa.: Franklin, 1978.
 - [9] A. Ugurlu, C. Gokcol: A review on thermal energy storage systems with phase change materials in vehicles; Electronic Journal of Vocational Colleges, 2012.
 - [10] W. Kraft, V. Stahl, P. Vetter: Thermal Storage Using Metallic Phase Change Materials for Bus Heating - State of the Art of Electric Buses and Requirements for the Storage System; Energies. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI).
 - [11] E. Korin, et al.: Improving cold-start functioning of catalytic converters by using phase-change materials; No. 980671. SAE Technical Paper, 1998.
 - [12] M. Dieterich, I. Bürger, M. Linder: Open and closed metal hydride system for high thermal power applications: preheating vehicle components; International Journal of Hydrogen Energy, 1–13., 2017.
 - [13] V. Dreißigacker, S. Belik: High temperature solid media thermal energy storage system with high effective storage densities for flexible heat supply in electric vehicles; Applied Thermal Engineering; DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.12; 2018.
 - [14] B. Sergej, V. Dreißigacker, M. Dieterich, W. Kraft: Next Generation Car Thermal energy storage systems: Power-to-Heat concept in solid media storage for high storage densities; EVS30 Proceedings, Stuttgart, Germany, 2017.
 - [15] <https://www.kanthal.com/en/products/materials-in-wire-and-strip-form/wire/list-of-alloys/list-of-fecral-alloys>