



Auszüge aus dem Projekt LatHe.Go

Einsatz von metallischen Latentwärmespeichern in Fahrzeugen der Kategorie „Mover“



Dokumenteigenschaften

Titel	Auszüge aus dem Projekt LatHe.Go – Einsatz von metallischen Latentwärmespeichern in Fahrzeugen der Kategorie „Mover“
Institut	DLR Institut für Materialphysik im Weltraum, DLR Institut für Fahrzeugkonzepte, Access e.V.
Beteiligte	A. J. Rawson, C. Villada, W. Kraft, T. Bähr, H. A. Gröbbel, F. Kargl, N. Navarrete, F. Nees, V. Stahl, P. Vetter
Datum	März 31, 2023
Version	1.0

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	5
2. Ermittlung der fahrzeugspezifischen Anforderungen an das Speichersystem	6
3. Experimentelle Charakterisierung und Bewertung ausgewählter metallischer Phasenwechselmaterialien (mPCM) sowie potentieller Einhausungsmaterialien	8
3.1. Experimentelle Charakterisierung und Bewertung ausgewählter mPCM	8
3.2. Kontaktwiderstandbestimmung mPCM/Einhausung fest-fest & flüssig-fest mittels LFA	9
3.3. Langzeit und Zykliversuche zur Wechselwirkung mPCM und Einhausung	10
4. Entwicklung Speichersystem	13
4.1. Grobdimensionierung	13
4.2. Konstruktive Abbildung des Speicherkonzepts	13
5. Thermophysikalische Einflüsse auf Speicherkonzept und -betrieb (Simulation)	16
5.1. Aufgabenstellung und Ziele	16
5.2. Darstellung der Simulationsmodelle	16
5.3. Mechanische Simulationsergebnisse - Verformung des Containers	17
6. Funktionsmusterbau und Laboruntersuchungen	20
6.1. Aufbau Speichersystem	20
6.2. Integration in den Prüfstand	21
6.3. Sensorik	23
7. Zusammenfassung	27

Danksagung	28
Abbildungsverzeichnis	28
Tabellenverzeichnis	29
Abkürzungsverzeichnis	29
Literaturverzeichnis	30

1. Einleitung

Batterieelektrische Fahrzeugsysteme erzeugen nur wenig Abwärme, die zur Beheizung des Innenraums genutzt werden kann. Die hierfür benötigte Energie muss daher zusätzlich bereitgestellt werden. In kalten Regionen hat der damit einhergehende erhöhte Heizenergiebedarf bei der Nutzung von elektrischen Heizsystemen Reichweitenverluste von bis zu 50 % zur Folge [1]. Durch den Einsatz eines thermischen Speichersystems kann die Wärme während des Ladevorgangs gespeichert und während der Fahrt kontrolliert an den Innenraum zur Beheizung abgegeben werden. Diese Lösung ist besonders für den Einsatz in batterieelektrischen Bussen interessant [2]. Aufgrund ihrer hohen Energiedichte und guten Wärmeleitfähigkeit sind metallische Phasenwechselmaterialien (mPCM) interessante Kandidaten für ein solches Speichersystem [3]. Im Vergleich zu Batteriesystemen sind thermische Speichersysteme auf Basis von mPCMs potenziell kompakter, leichter und kosteneffizienter.

In dem vorausgegangenen Projekt „THS-Bus“ wurde erstmalig das Potenzial Thermischer Hochleistungsspeicher (THS) auf Basis metallischer Phasenwechselmaterialien für den Einsatz als Innenraumheizsystem in batterieelektrischen Bussen demonstriert [4]. Anhand eines Funktionsmusters im Labormaßstab konnten bereits erste wichtige Leistungskennwerte, insbesondere für die thermische Entladung, gesammelt werden [5,6].

Im Rahmen des Forschungsprojekts LatHe.Go wird der Einsatz metallischer Latentwärmespeicher in Fahrzeugen der Kategorie „People Mover“ genauer untersucht. Das Projekt mündet in der Entwicklung eines Funktionsmusters im anwendungsnahen Maßstab.

Der vorliegende Bericht bietet einen Auszug wichtiger Inhalte des Forschungsprojekts. Hierbei handelt es sich um selektierte Auszüge bislang unveröffentlichter Projektdokumentationen. Projektergebnisse zur thermischen Modellierung des Fahrzeugsystems wurden bereits veröffentlicht [7].

Die Kooperationspartner im Forschungsprojekt LatHe.Go waren:

- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR):
 - Institut für Materialphysik im Weltraum
 - Institut für Fahrzeugkonzepte
- Access e.V
- TLK Energy GmbH

Durch das Forschungsprojekt wird ein wichtiger Beitrag zur effizienten, klimaschonenden und ökologischen Entwicklung der zukünftigen Mobilität geleistet.

2. Ermittlung der fahrzeugspezifischen Anforderungen an das Speichersystem

Zur Definition des Betriebsszenarios wurde auf Daten aus dem bereits abgeschlossenen „Reallabor Schorndorf“ zurückgegriffen, bei dem das DLR-Institut für Fahrzeugkonzepte mitgewirkt hat [8]. Innerhalb des Projektes wurde der Einsatz sog. Rufbusse, die an Wochenenden den regulären Linienfahrplan ersetzen, in realer Einsatzumgebung untersucht.

Das Projekt eignet sich dabei besonders als Grundlage für die im LatHe.Go – Projekt untersuchten Kleinbusse. Als Fahrzeuge kamen Kleinbusse zum Einsatz, welche von der Beförderungskapazität in etwa einem Mover – Fahrzeugkonzept entsprechen. Für den regulären Linienbetrieb wurden hingegen konventionelle 12 m – Busse eingesetzt.

In diesem Kapitel werden die auf Basis der Daten zum Betrieb des regulären Linienbusses sowie des Bedarfsbusses abgeleiteten Betriebsszenarien dargestellt. Eine Unterteilung erfolgt dabei zwischen Betriebsszenarien mit „Übernachtladung“ sowie Betriebsszenarien mit „Gelegenheitsladung“.

Bei den Betriebsszenarien „Übernachtladung“ erfolgt eine einmalige Beladung des Speichers über die Nachtstunden hinweg. Die während dieses Zeitraums zugeführte Energiemenge dient anschließend zur Beheizung des Fahrzeuginnenraumes über den kompletten Betriebstag hinweg, ohne zusätzliche Zwischenladung. Szenarien, die mit „Übernachtladen / Gelegenheitsladen“ bezeichnet sind, bilden eine Kombination aus beiden Szenarien. Hier erfolgt sowohl eine Beladung über die Nachtstunden hinweg als auch innerhalb der Standzeiten zwischen zwei Linienumläufen.

Übernachtladen

Abbildung 1 zeigt das Szenario „Übernachtladen“ auf Basis des regulären Linienverkehrs. Dieses gilt für beide betrachteten Linien 242 und 247. Die Standzeit über Nacht zum Laden beträgt dabei ca. 4 h, der Fahrbetrieb über den Tag hinweg ca. 20 h.

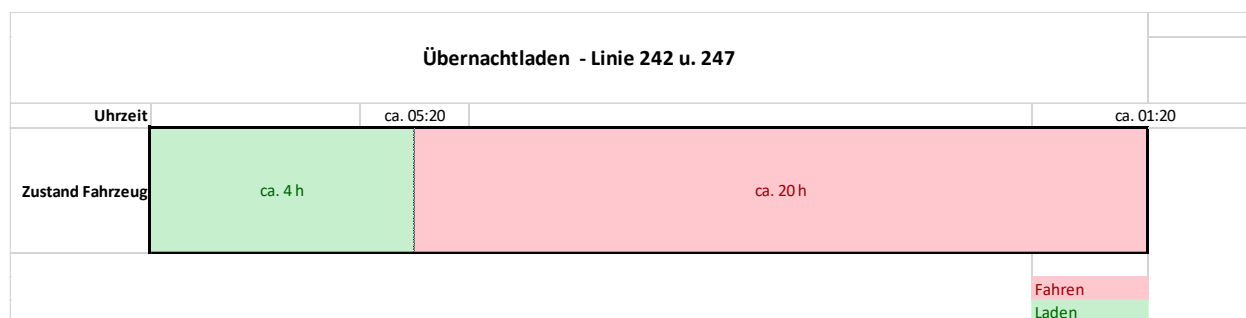


Abbildung 1: Abgeleitetes Betriebsszenario „Nachtladen“ auf Basis des regulären Linienbetriebs von Linie 242 und Linie 247.

Übernachtladen / Gelegenheitsladen

Das Szenario „Übernachtladen / Gelegenheitsladen“ für die Linie 242 ist in Abbildung 2 dargestellt. Nachts steht hier erneut eine mögliche Ladedauer von ca. 4 h zur Verfügung. Anschließend erfolgt ein Fahrbetrieb von ca. 1 h 48 min, in der keine Zwischenladung möglich ist. Im Zeitraum von 7:11 Uhr bis ca. 22:11 Uhr tritt ein Wechsel zwischen Standzeit (ca. 8 min) und Fahrbetrieb (ca. 22 min) auf. Insgesamt wiederholt sich diese Abfolge 30-mal. Zum Ende des Betriebsszenarios wechseln sich eine Standzeit von ca. 38 min mit einer Fahrdauer von ca. 22 min ab. Auch dieser Turnus wiederholt sich, insgesamt 3-mal.

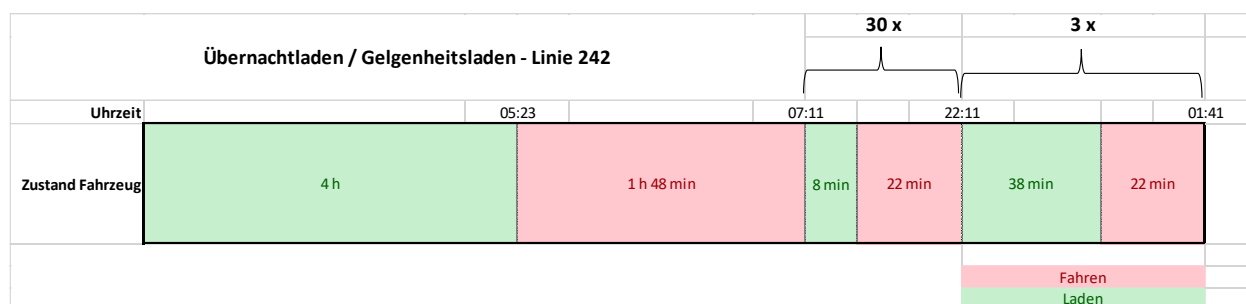


Abbildung 2: Abgeleitetes Betriebsszenario „Gelegenheitsladen“ auf Basis des regulären Linienbetriebs von Linie 242.

Das Szenario „Übernachtladen / Gelegenheitsladen“ für die Linie 247 ist in Abbildung 3 dargestellt. Auch hier beträgt die Standzeit über Nacht 4 h. Es schließt sich eine Fahrdauer von ca. 2 h 22 min bis ca. 7:41 Uhr an.

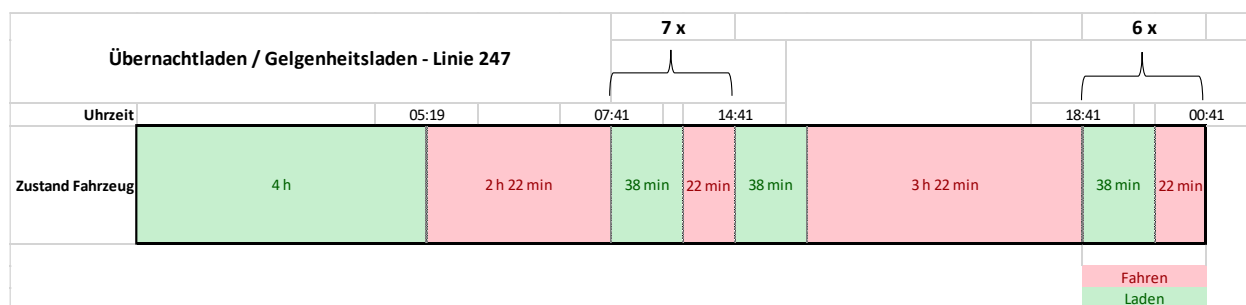


Abbildung 3: Abgeleitetes Betriebsszenario „Gelegenheitsladen“ auf Basis des regulären Linienbetriebs von Linie 247.

Anschließend wiederholt sich ein Wechsel aus ca. 38 min Standzeit und 22 min Fahrzeit bis ca. 14:41 Uhr insgesamt 7-mal. Nach einer anschließenden Standzeit von 38 min erfolgt eine Fahrperiode von 3 h 22 min. Den Abschluss des Betriebsszenarios bildet erneut ein Wechsel aus 38 min Standzeit und 22 min Fahrzeit, der sich insgesamt 6-mal wiederholt.

Im weiteren Verlauf wurde dabei das Szenario „Übernacht- Gelegenheitsladen Linie 247“ für die weiteren Betrachtungen ausgewählt.

3. Experimentelle Charakterisierung und Bewertung ausgewählter metallischer Phasenwechselmaterialien (mPCM) sowie potentieller Einhausungsmaterialien

3.1. Experimentelle Charakterisierung und Bewertung ausgewählter mPCM

Von sechs potentiell geeigneten mPCMs wurden Cu–67% Mg, Al–25%Cu–6%Si und Al–12.5%Si für die experimentelle Charakterisierung ausgewählt. Die Zusammensetzung ist in Massenprozent angegeben. Die fundamentalen Materialeigenschaften, die charakterisiert wurden, wurden so gewählt, dass die Energie- und Leistungsdichte eines thermischen Speichersystems berechnet werden konnte.

Der Schmelzpunkt, die Wärmekapazität, die Schmelzenthalpie und die Temperaturleitfähigkeit der drei Legierungen wurden mit einer Kombination aus Differential Scanning Calorimetry (DSC) und Light Flash Analysis (LFA) bestimmt. DSC- und LFA-Instrumente sind beide am Institut für Materialphysik im Weltraum in der DLR-Einrichtung in Köln verfügbar. Diese Eigenschaften sind für die Auslegung des Speichervolumens und des Wärmeübertragungssystems eines Speichersystems wichtig. Die Wärmekapazität C_p , Temperaturleitfähigkeit α , Dichte ρ und Wärmeleitfähigkeit k wurden mit einer Polynomfunktion unter Verwendung der folgenden Gleichungen modelliert. Die Ergebnisse dieser Analyse werden wie folgt zusammengefasst:

Tabelle 1: Übersicht der gemessenen Schmelzpunkte und Schmelzenthalpien.

mPCM	Schmelzpunkt °C	Abweichung K	Schmelzenthalpie kJ/kg	Abweichung kJ/kg
MgCu	492.34	2.81	251.83	8.09
AlCuSi	521.50	1.35	380.27	18.55
AlSi	579.51	1.61	478.59	31.11

$$\text{Wärmekapazität: } C_p(T) = \begin{cases} a + bT + cT^2 + dT^3 & \text{for } T_{\text{solid,low}} < T \leq T_{\text{solid,high}} \\ e + fT & \text{for } T_{\text{liquid,low}} < T \leq T_{\text{liquid,high}} \end{cases}$$

Tabelle 2: Übersicht über Koeffizienten, Gültigkeitsbereiche und Standardfehler von Wärmekapazitätsmodellen im festen Zustand.

mPCM	Koeffizienten für den festen Zustand				Gültigkeitsbereich K	95% Konfidenzintervall kJ/kgK
	a	b	c	d		
MgCu	0.41	2.20×10^{-3}	-3.58×10^{-6}	2.08×10^{-9}	273-733	0.013
AlCuSi	-0.86	8.70×10^{-3}	-1.58×10^{-5}	1.01×10^{-8}	273-773	0.033
AlSi	-0.36	6.33×10^{-3}	-1.12×10^{-5}	7.23×10^{-9}	273-843	0.049

Tabelle 3: Übersicht über Koeffizienten, Gültigkeitsbereiche und Standardfehler von Wärmekapazitätsmodellen im flüssigen Zustand.

mPCM	Koeffizienten für den flüssigen Zustand		Gültigkeitsbereich K	95% Konfidenzintervall kJ/kgK
	e	f		
MgCu	3.19	-2.52×10^{-3}	808-830	0.033
AlCuSi	1.90	-9.99×10^{-4}	873-930	0.027
AlSi	7.98	-7.45×10^{-3}	913-930	0.118

$$\text{Temperaturleitfähigkeit: } \alpha(T) = \begin{cases} a + bT + cT^2 & \text{for } T_{\text{solid,low}} < T \leq T_{\text{solid,high}} \\ d + eT & \text{for } T_{\text{liquid,low}} < T \leq T_{\text{liquid,high}} \end{cases}$$

Tabelle 4: Übersicht über Koeffizienten, Gültigkeitsbereiche und Standardfehler der Temperaturleitfähigkeit.

mPCM	Koeffizienten für den festen Zustand			Gültigkeitsbereich K	Koeffizienten für den flüssigen Zustand		Gültigkeitsbereich K	95% Konfidenzintervall mm ² /s
	a	b	c		d	e		
MgCu	68.39	-2.297 x 10 ⁻³	0	300-720	22.74	0	750-800	12.7
AlCuSi	47.2	2.95 x 10 ⁻²	-4.23 x 10 ⁻⁵	300-780	-23.9	4.78 x 10 ⁻²	810-920	3.8
AlSi	70.5	2.975 x 10 ⁻²	-5.370 x 10 ⁻⁵	300-830	22.15	1.31 x 10 ⁻³	850-1000	8.9

$$\text{Dichte: } \rho(T) = \begin{cases} a + bT & \text{for } T \leq T_m \\ c + dT & \text{for } T > T_m \end{cases}$$

Tabelle 5: Übersicht über Koeffizienten und Gültigkeitsbereiche der Dichte.

mPCM	Koeffizienten für den festen Zustand		Gültigkeitsbereich K	Koeffizienten für den flüssigen Zustand		Gültigkeitsbereich K
	a	b		c	d	
MgCu	2214.8	-0.14	300 – 765	2010.3	-0.079	765 - 1000
AlCuSi	3393.7	-0.1688	300 – 794	3297.5	-0.3025	794 - 1000
AlSi	2700.3	-0.1774	300 – 852	2642.5	-0.2415	852 - 1000

$$\text{Wärmeleitfähigkeit: } k(T) = \begin{cases} a + bT & \text{for } T_{\text{solid,low}} < T \leq T_{\text{solid,high}} \\ c & \text{for } T_{\text{liquid,low}} < T \leq T_{\text{liquid,high}} \end{cases}$$

Tabelle 6: Übersicht über Koeffizienten, Gültigkeitsbereiche und Standardfehler der Wärmeleitfähigkeit.

mPCM	Koeffizienten für den festen Zustand		Gültigkeitsbereich K	Koeffizienten für den flüssigen Zustand	Gültigkeitsbereich K
	a	b		c	
MgCu	113.3	0.0217	300-720	45.4	750 - 800
AlCuSi	84.5	0.0847	300-780	55.5	810 - 920
AlSi	127.5	0.0749	300-830	66.5	850 - 1000

Für die Entwicklung des Speichersystems zur Anwendung in einem batterieelektrischen Kleinbus im Rahmen dieses Projekts wurde Al-12.5%Si als mPCM ausgewählt.

3.2. Kontaktwiderstandbestimmung mPCM/Einhausung fest-fest & flüssig-fest mittels LFA

Der thermische Kontaktwiderstand R_c zwischen der Einhausung und dem mPCM ist für die Ladung und Entladung des Wärmespeichers von Bedeutung. Die Abhängigkeit des Kontaktwiderstandes von der Temperatur und der Oberflächenrauigkeit wurde mittels LFA gemessen. Die potenzielle Einwirkung von

mehreren Schmelz-/Erstarrungszyklen wurde auch untersucht. Für diese Versuche wurde Al-12.5%Si als mPCM und Aluminiumoxid und S304 mit Aluminiumoxidbeschichtung als Einhausungsmaterial ausgewählt. Es wurde eine Abhängigkeit des thermischen Kontaktwiderstands von der Temperatur festgestellt. Im festen Zustand nimmt er mit steigender Temperatur ab, und ein zusätzlicher erheblicher Rückgang tritt auf, wenn das mPCM geschmolzen ist.

Hinsichtlich des Einflusses der Rauheit der mPCM-Oberfläche und der thermischen Zyklen gab es bei den Aluminiumoxid-Tiegeltests keine erkennbaren Unterschiede. Sowohl raue als auch glatte Proben verhielten sich während der fünf Zyklen ähnlich, und die festgestellten Unterschiede können auf die Messunsicherheit zurückgeführt werden. Ein größerer Unterschied zwischen dem thermischen Kontaktwiderstand von rauhen und glatten Al-12.5%Si-Pellets wurde bei dem mit Aluminiumoxid beschichteten Stahl S304 festgestellt. Wie zu erwarten war, wurde für die raue Probe ein etwas höherer thermischer Kontaktwiderstand gemessen.

Außerdem war der thermische Kontaktwiderstand zwischen den aluminiumoxidbeschichteten Stahliegeln und dem mPCM höher als zwischen den Aluminiumoxidtiegeln und dem mPCM. Eine Erklärung hierfür ist, dass der Effekt eines zweiten thermischen Kontaktwiderstands zwischen dem Stahl und der Beschichtung im ersten System zu berücksichtigen ist. Eine Zusammenfassung der aus den Messungen abgeleiteten Anpassungsgleichungen ist in Tabelle 7 zu finden.

$$\text{Thermischer Kontaktwiderstand: } R_c(T) = \begin{cases} a + bT & \text{for } T \leq T_m \\ c + dT & \text{for } T > T_m \end{cases}$$

Tabelle 7: Übersicht über Koeffizienten und Gültigkeitsbereiche des spezifischen thermischen Kontaktwiderstands.

mPCM/ Einhausung		Koeffizienten für den festen Zustand		Gültigkeitsbereich K	Koeffizienten für den flüssigen Zustand		Gültigkeitsbereich K
		a	b		c	d	
Al-Si/ Aluminiumoxid	Rau	1.403×10^{-3}	-1.117×10^{-6}	300-820	-4.638×10^{-4}	7.398×10^{-7}	870-920
	Glatt	1.344×10^{-3}	-8.857×10^{-7}		-1.104×10^{-3}	1.536×10^{-6}	
Al-Si/ S304 Stahl mit Aluminiumoxid- beschichtung	Rau	3.001×10^{-3}	-2.539×10^{-6}	300-820	-1.287×10^{-3}	1.878×10^{-6}	870-920
	Glatt	2.495×10^{-3}	-2.182×10^{-6}		-8.679×10^{-4}	1.315×10^{-6}	

3.3. Langzeit und Zyklerversuche zur Wechselwirkung mPCM und Einhausung

Mit Hilfe von statischen Hochtemperatur-Langzeitreaktionsexperimente lassen sich Hinweise auf die Kompatibilität der mPCMs mit verschiedenen Gehäusematerialien geben. Am Institut für Materialphysik im Weltraum des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt in Köln steht ein speziell angefertigter Reaktionsofen zur Verfügung. Die prozessierten Proben wurden zunächst durch visuelle Inspektion analysiert,

z. B. Veränderungen der Farbe oder der Oberfläche, Massenänderung und Adhäsion des mPCMs am Tiegel. Die Querschnitte der Proben wurden anschließend mit Rasterelektronenmikroskopie (REM) und Energiedispersiver Röntgen Spektrometrie (EDX) analysiert. Die Ergebnisse der durchgeführten Experimente sind in Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8: Ergebnisse der Langzeitversuche zur Wechselwirkung mPCM und Einhausung.

Einhausung	Mg - 33 wt.% Cu	Al - 25.4% Cu - 6.1% Si	Al - 12.5% Si
Aluminiumoxid	2 Wochen 550 °C Keine Reaktion beobachtet	2 Wochen 600 °C Keine Reaktion beobachtet	2 Wochen 650 °C Keine Reaktion beobachtet
Graphit	2 Wochen 550 °C Keine Reaktion beobachtet	2 Wochen 600 °C Keine Reaktion beobachtet	2 Wochen 650 °C Keine Reaktion beobachtet
Eisen	2 Wochen 550 °C Keine Reaktion beobachtet	2 Wochen 600 °C Bedeutende Reaktion beobachtet	2 Wochen 650 °C Bedeutende Reaktion beobachtet
Edelstahl 304	2 Wochen 550 °C Geringe Reaktion beobachtet	2 Wochen 600 °C Bedeutende Reaktion beobachtet	2 Wochen 650 °C Bedeutende Reaktion beobachtet
Edelstahl 314	2 Wochen 550 °C Geringe Reaktion beobachtet	2 Wochen 600 °C Bedeutende Reaktion beobachtet	2 Wochen 650 °C Bedeutende Reaktion beobachtet

Der zweite Teil dieses Arbeitspakets bezieht sich auf Zyklerversuche. Die Wirkung von thermischen Zyklen in der Reaktion zwischen mPCM und Einhausungsmaterial wurde für die Kombinationen von Al-12.5%Si mit S304 Stahl, Aluminiumoxid und S304 Stahl mit Aluminiumoxidbeschichtung bestimmt.

Der Reaktionsofen wurde aufgerüstet, um ermittelte Temperatur-Zeit-Zyklen zu programmieren. Laut Simulationen ist die höchste Temperatur in einem durchschnittlichen Wintertageszyklus circa 610 °C und es werden maximale Heiz- und Kühlleistungen von +22 °C/min und -5 °C/min erreicht. Entsprechend dem Gelegenheitsladenbetriebsszenario, wurde ein Zyklus entworfen, welcher die Zeitspanne darstellt, in der sich das Fahrzeug in einem normalen Arbeitstagesregime befindet. Hierbei wechseln sich jeweils 8 Stunden Prozesszeit im Fahrmodus (laden-entladen) mit 16 Stunden im Parkmodus (laden und Ladung halten) ab. Dieser Zyklus wurde bis zu einer Gesamtzeit von 72 Std. im geschmolzenen Zustand wiederholt, um die Ergebnisse mit den 72-stündigen statischen Reaktionsversuchen zu vergleichen. Abbildung 4 stellt den sich daraus ergebenden Zyklus, mit 60-Schmelz-/Erstarrungszyklen zwischen 540 und 610 °C, dar.

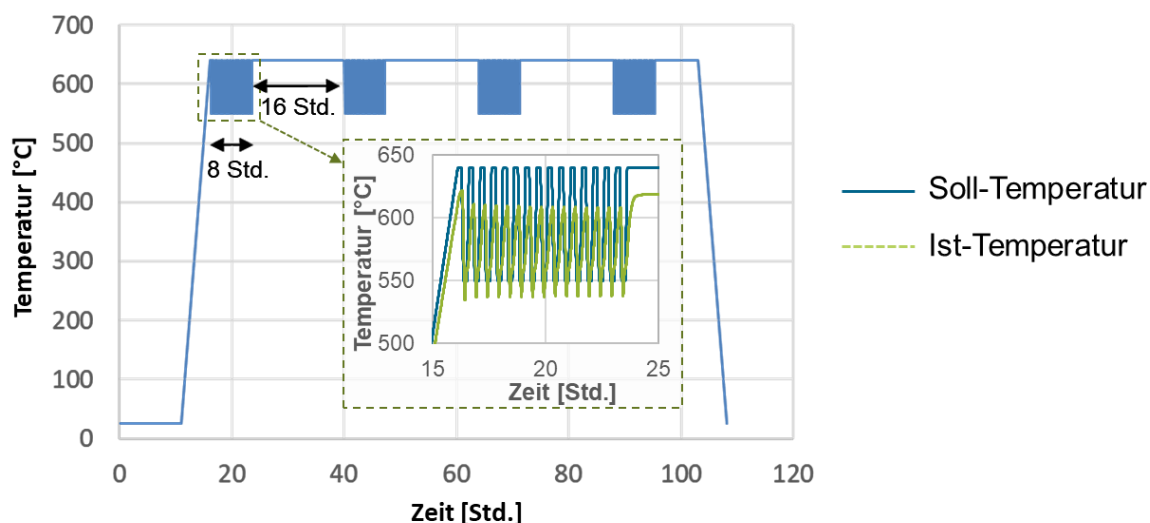


Abbildung 4: Entwurf der Zyklierversuche.

Auch in dem hier vorgestellten Zyklierversuch, zeigt der Stahltiegel eine bedeutende Reaktion mit dem mPCM. SEM-EDX-Analysen zeigten Diffusion von Elementen aus dem Stahl, wie Fe und Cr und Ni. Angesichts der starken Reaktion wird der Stahl 304 als Einhausungsmaterial für Al-12.5%Si für das betrachtete Anwendungsszenario nicht empfohlen. Aluminiumoxid- und beschichtete Stahltiegel reagieren dagegen nicht mit mPCM. Keine Gewichtsänderung des mPCMs oder des Tiegels wurde gemessen und keine Reaktion war erkennbar. Deshalb wird die Beschichtung von S304 mit Aluminiumoxid für die Einhausung von Al-12.5%Si empfohlen und in diesem Projekt zur Speicherentwicklung herangezogen.

Tabelle 9: Ergebnisse mit den 72-stündigen Zyklen Reaktionsversuchen.

Einhausung / mPCM	Edelstahl 304	Alumina	Al ₂ O ₃ /Edelstahl 304
AlSi	60 Schmelz-/Erstarrungszyklen 540 > T < 610°C Bedeutende Reaktion beobachtet	60 Schmelz-/Erstarrungszyklen 540 > T < 610°C Keine Reaktion beobachtet	60 Schmelz-/Erstarrungszyklen 540 > T < 610°C Keine Reaktion beobachtet

4. Entwicklung Speichersystem

4.1. Grobdimensionierung

Zu Beginn des Arbeitspakets und als Grundlage für die spätere detaillierte Auslegung der einzelnen Teilkomponenten erfolgte eine Grobdimensionierung des Speichersystems auf Basis der vorher definierten Betriebsszenarien. Hierfür wurde durch TLK Energy GmbH der Heizleistungsbedarf auf Basis einer Fahrzeugkabinenmodellierung ermittelt [7]. Zunächst wurden die benötigten elektrischen Ladeleistungen sowie Heizleistungen bestimmt und diese ins Verhältnis zur Speicherkapazität gesetzt. Gleichzeitig wurden sowohl für die Be- als auch Entladung spezifische Leistungsfähigkeiten angenommen und hieraus benötigte Flächen zur Be- und Entladung abgeleitet. Zusammen mit dem Wissen über die benötigte Speicherkapazität konnten hieraus bei Annahme einer quadratischen Grundfläche Verhältnisse der Seitenlänge zur Höhe des mPCMs abgeleitet werden.

Die relevanten Kennzahlen des grobausgelegten Speicherkonzepts für das ausgewählte Betriebsszenario sind wie folgt:

Speicherkapazität Q :	18 kWh
El. Beladeleistung P_{el} :	27 kW
Verhältnis P_{el} / Q :	1,5
Entladeleistung Q_{dot} :	10 kW
Verhältnis Q_{dot} / Q :	0,56
Seitenverhältnis s / h :	5
Benötigte Grundfläche:	ca. 2500 cm ²

4.2. Konstruktive Abbildung des Speicherkonzepts

Nach der Adaption und Entwicklung der einzelnen Teilkomponenten des Speichersystems wurde ein komplettes Speichersystem entwickelt und konstruiert, welches die in der Dimensionierung ermittelte Speicherkapazität und Leistungsdaten erfüllt. Das entwickelte Speichersystem hat im Temperaturbereich von 350 °C – 650 °C eine Speicherkapazität von ca. 19,3 kWh. Die Nennleistung des Wärmeaustragssystems liegt bei ca. 10 kW, die Leistung der verbauten Heizpatronen des Wärmeeintragungssystems bei ca. 16 kW. Die Einhausung des Speichers besteht aus einem als Schweißkonstruktion ausgeführten Edelstahlrahmen, welcher mit Aluminiumoxid beschichtet wird. Als Bodenplatte der Einhausung werden mehrere Varianten vorgesehen. Einerseits kann eine mit Aluminiumoxid beschichtete Edelstahlplatte genutzt werden. Eine weitere Möglichkeit sind Kacheln aus einer Aluminiumoxidkeramik. Für die Versuche wurde jedoch zunächst eine Faserverbundkeramik mit Aluminiumoxidfasern und -matrix genutzt, da diese weniger zum thermischen

Verzug neigt als die beschichtete Edelstahlplatte und eine bessere Thermoschockbeständigkeit im Vergleich zu den Kacheln aus Aluminiumoxid bietet.

Das Wärmeeintragssystem (WES) und Wärmeaustragssystem (WAS) wurde als kombinierte Heiz- und Kühlplatte ausgeführt, welche mit Heizpatronen beheizt und mittels Umgebungsluft über erzwungene Konvektion entladen wird. Der hierfür entwickelte Luftwärmeübertrager wurde mittels einer „wavy-fin“ Rippenstruktur ausgeführt. Diese wurde in einem Vakuumofen mit der Heizplatte und einem unteren Deckblech verlötet. Die Designaustragsleistung beträgt ca. 10 kW bei einer Designtemperatur von 210 °C (Unterseite Heizplatte/Oberseite Wärmeübertrager). Für die Beheizung wurden zehn elektrische Heizpatronen (Türk+Hillinger) mit einem Durchmesser von 10 mm und einer Leistung von jeweils 2 kW ausgewählt.

Die Dämmung des Speichers wird aus einem mikroporösen Dämmstoff mehrteilig zur einfachen Montage ausgeführt.

In Abbildung 5 ist der Gesamtaufbau mit den Einzelkomponenten und dem zugehörigen Schichtaufbau exemplarisch dargestellt. Zur besseren Sichtbarkeit wurden Teile der Dämmung ausgeblendet sowie die Luftstrecke ab den Verbindungsstellen der Flansche nicht dargestellt. Wie bereits beschrieben, werden im Rahmen des Projekts verschiedene Bodenplattenvarianten untersucht, weshalb aus Übersichtsgründen nur eine Variante beispielhaft dargestellt wird. Abbildung 6 zeigt eine Darstellung des Gesamtaufbaus mit Luftzuführung und Luftabfuhr. Tabelle 10 gibt eine Übersicht über die Kenngrößen des entwickelten Funktionsmusters.

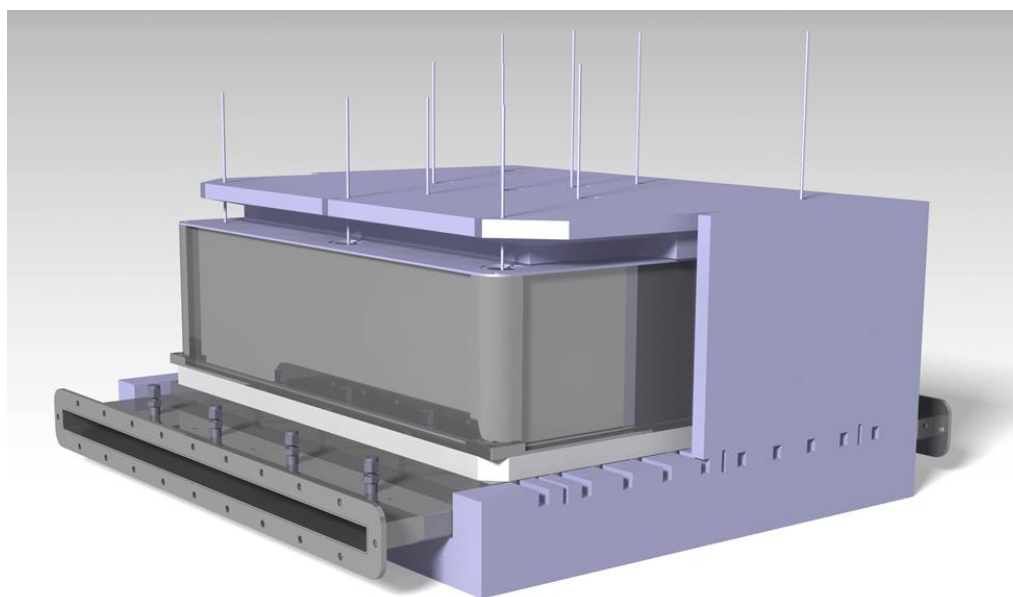


Abbildung 5: Darstellung des Gesamtaufbaus mit Einzelkomponenten und Schichtaufbau.

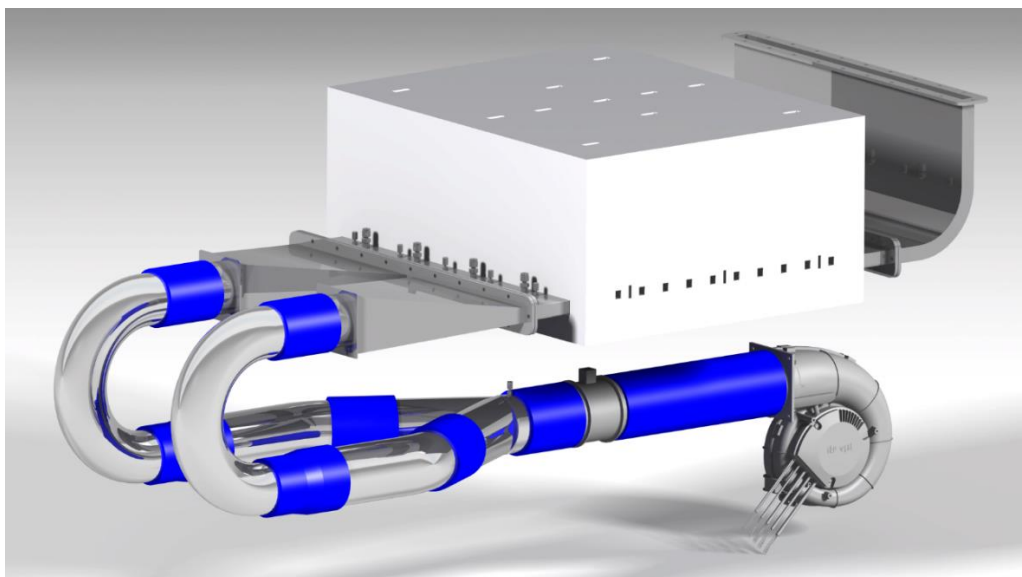


Abbildung 6: Darstellung des Gesamtaufbaus mit Luftzuführung und Luftabfuhr.

Tabelle 10: Kenngrößen des Funktionsmusters nach der Detailauslegung.

Kenngröße	Wert
Speicherkapazität	19,3 kWh (350 °C – 650 °C)
mPCM-Masse	68,5 kg
Abmaße ohne Dämmung	450x555x206 mm
Abmaße mit Dämmung	530x635x288 mm
Elektrische Beladeleistung	16 kW
Entladeleistung an Luft	10 kW (Nom. Power)

5. Thermophysikalische Einflüsse auf Speicherkonzept und -betrieb (Simulation)

5.1. Aufgabenstellung und Ziele

Mittels umfassender numerischer Simulation sollte das Verhalten des mPCM (Materialverhalten, thermische Flüsse, Strömungsverhalten, mechanisches Verhalten) dargestellt und verstanden werden, um Konstruktion und Auslegung des Speichers sowie die Übertragung des Konzepts auf weitere Anwendungen zu unterstützen.

Betriebsarten und Konzepte sollten virtuell durchgespielt werden, um die für die Anwendung des Prototyps beste Variante zu finden. Das Simulations-Gesamtmodell sollte hierbei so aufgebaut werden, dass, angepasst an die jeweilige Fragestellung, auch mit reduziertem Aufwand signifikante Antworten gefunden werden können.

5.2. Darstellung der Simulationsmodelle

Eingesetzte Simulationssoftware

Das thermische Verhalten des Wärmespeichers (Wärme- und Stoffflüsse) wurde mit der Software STAR-ccm+ berechnet, die mechanischen Fragestellungen mit der FE-Software Abaqus. Die Kopplung zwischen den Modellen besteht rechnerisch darin, dass Abaqus die berechneten Temperaturfelder von STAR-ccm+ als Input übernimmt. Technisch geschieht dies durch fortlaufendes Zwischenspeichern und Übertragen (Mapping) der Temperaturergebnisse vom ccm+ Netz auf das bereits bestehende Abaqus Netz.

Zwischenzeitliche Tests der (Gieß-)Simulationssoftware Magmasoft als Alternative zu STAR-ccm+ erbrachten keine Vorteile im Ergebnis, die mögliche Wahl der Inputbedingungen erwies sich sogar als weniger geeignet.

Speichergeometrie in den Simulationsrechnungen

Die Geometrie (Abmessungen, räumliche Gestaltung) des zu realisierenden Speichers ergab sich aus den Anforderungen, welche vom DLR Stuttgart beschrieben wurden und die Verhältnisse des experimentellen Prüfstands berücksichtigten. Ausgehend von einer geforderten Speicherkapazität von ca. 18 kWh wurde ein quaderförmiger Speicheraufbau mit einem mPCM-Körper von ca. 55x45x12 cm³ gewählt. Dieser ist von einem Container umhüllt, dessen Innenseite eine Beschichtung tragen kann. Die zylindrischen Heizstäbe unterhalb des mPCM sind integriert in eine separate Bodenplatte. Das Kühlsystem durch rechteckige Gaskanäle setzt unterhalb davon auf der vollen Bodenfläche schlüssig an. Umhüllt ist das System weiterhin allseits von einer Wärmedämmschicht, deren typische Dicke von einigen cm im Projektverlauf festgelegt wurde.

Für die mechanische Simulation in der Software Abaqus wurden Wärmedämmung und das Gas in den Kühlkanälen weggelassen, da davon auszugehen ist, dass diese Bauteile keiner wesentlichen thermischen Verformung unterliegen bzw. aufgrund ihres Charakters eines nicht festen Körpers keine Kraftwirkungen auf ihre Umgebung ausüben.

5.3. Mechanische Simulationsergebnisse - Verformung des Containers

Aus der Vielzahl an durchgeführten Einzelsimulationen zum thermischen und mechanischen Verhalten des Wärmespeichers seien hier die für die wichtigsten einzelnen Entscheidungen im Projekt relevanten Ergebnisse aufgeführt. Weitere Simulationsrechnungen sowie Einzelheiten zu Input und Ergebnissen wurden in den jährlichen Projekt-Zwischenberichten und Präsentationen auf den Projekttreffen ausgeführt.

Da die einzelnen Komponenten des Wärmespeichers (mPCM-Füllung, Container, Heizplatten, Kühlkanäle) aus unterschiedlichen Materialien unterschiedlicher Wärmedehnkoeffizienten bestehen und darüber hinaus die einzelnen Bauteile in verschiedenen Betriebszuständen auf deutlich unterschiedlichen Temperaturniveaus sind, führen diese Umstände im Speicherbetrieb zwangsläufig zu gegenläufigen Schrumpfungs- und Ausdehnungsprozessen und damit zu Ablösungs-, und Bi-Metall-ähnlichen Verformungseffekten. Neben der Fragestellung der Langzeitstabilität von z.B. der Umhüllung wurde als eine wichtige Fragestellung des Projekts adressiert, ob durch diese Effekte der Kontakt zwischen mPCM und Behälterboden (und damit zur Heizzone) davon beeinflusst wird. Dies wurde in entsprechenden thermo-mechanischen Simulationsrechnungen untersucht.

Aufgrund der Temperaturfelder beim Vorheizen vor dem Einfüllen des mPCM kann der Containerboden durchgewölbt sein, so dass, wenn das mPCM in dieser Form darauf erstarrt, sich bei der späteren Abkühlung und Umverformung eine Lücke (Gap) zwischen mPCM und Container bilden kann. Diese wiederum würde durch ihren erhöhten Wärmewiderstand das Wiederaufheizen der mPCM-Füllung beim typischen thermischen Beladen behindern. Darum wurden für die im Projektverlauf als zu realisierende Geometrie die Prozessschritte Aufheizen-Befüllen-Abkühlen in einem entsprechenden Modell thermisch und mechanisch gekoppelt simuliert und in einer systematischen Untersuchung die mögliche Höhe eines Gaps abgeschätzt. Dieser Ablauf ist nicht nur beim Befüllen zu erwarten, sondern auch beim regulären Speicherbetrieb nach jedem Wiedererstarren des mPCMs. Das grundsätzliche Ergebnis dieses Simulationsansatzes ist in Abbildung 7 und Abbildung 8 erläutert. Man sieht die Durchbiegung von mPCM und Behälterboden im Prozessverlauf sowie die zeitliche Entwicklung der Lücke zwischen Boden und mPCM.

Ergebnisbeispiel: möglicher Abstand zwischen PCM und Behälterboden

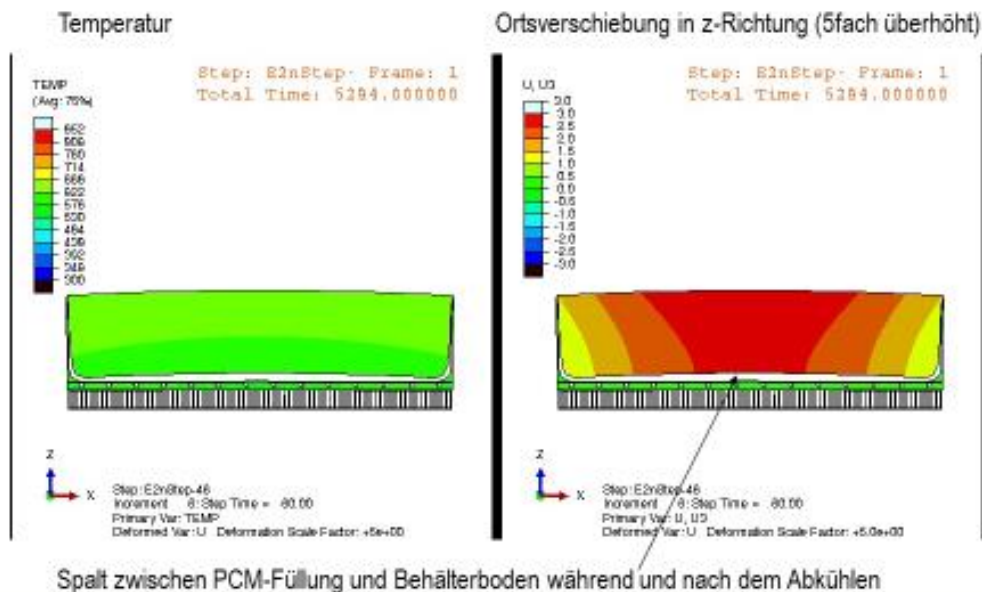


Abbildung 7: Verformung von mPCM und Behälter gemäß der gekoppelten Simulation.

Mechanische Simulation – Ergebnis

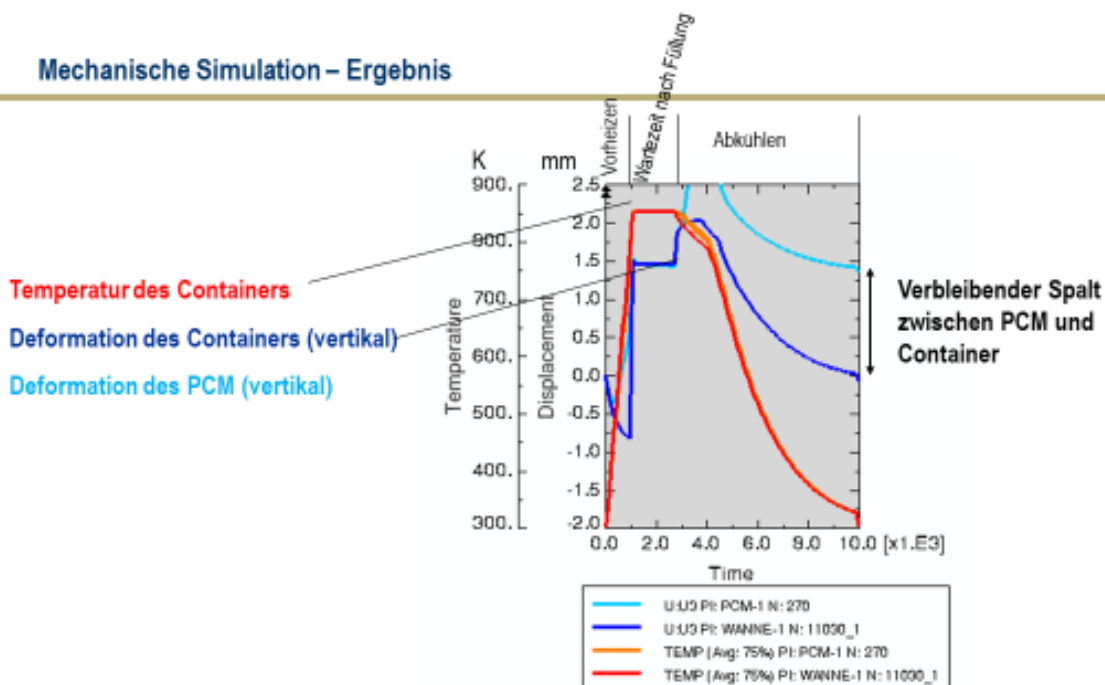


Abbildung 8: Zeitliche Entwicklung der berechneten Ortsverschiebung von mPCM-Unterseite und Behälterboden.

Die Simulationen wurden systematisch für verschiedene Materialpaarungen für Containerwanne, Heizplatte und Kühlkanäle sowie deren Fixation untereinander durchgeführt. Als zusätzliche Forderung wurde eine hohe Wärmeleitfähigkeit des Container- und Heizplattenmaterials benannt. Tabelle 11 zeigt einen Überblick über die getesteten Parametersätze.

Tabelle 11: Überblick über die getesteten Parametersätze.

code	Cntr. mat.	WES mat.	WAS mat.	Ctct Cntr./WES	Ctct WES/WAS	Δz Cntr. @Strt	Gap @End
1a	steel	steel	steel	fixed	fixed	1,2 mm	0,7 mm
1b	Ni alloy	Ni alloy	Ni alloy	fixed	fixed	0,8 mm	0,3 mm
1c	steel	Ni alloy	Ni alloy	fixed	fixed	3 mm	2,5 mm
1d	steel	steel	Ni alloy	fixed	fixed	3 mm	2,5 mm
2a	steel	steel	steel	„open in xy“	fixed	0,4 mm	0 mm
2b	Ni alloy	Ni alloy	Ni alloy	„open in xy“	fixed	0,4 mm	0 mm
2c	steel	Ni alloy	Ni alloy	„open in xy“	fixed	0,5 mm	0 mm
2d	steel	steel	Ni alloy	„open in xy“	fixed	1,5 mm	1 mm
3a	steel	steel	steel	fixed	„open in xy“	k.E.	
3b	Ni alloy	Ni alloy	Ni alloy	fixed	„open in xy“	1,0 mm	0,5 mm
3c	steel	Ni alloy	Ni alloy	fixed	„open in xy“	k.E.	
3d	steel	steel	Ni alloy	fixed	„open in xy“	1,8 mm	1,3 mm
4a	steel	steel	steel	„open in xy“	„open in xy“	0,5 mm	0 mm
4b	Ni alloy	Ni alloy	Ni alloy	„open in xy“	„open in xy“	0,5 mm	0 mm
4c	steel	Ni alloy	Ni alloy	„open in xy“	„open in xy“	0,6 mm	0,1 mm
4d	steel	steel	Ni alloy	„open in xy“	„open in xy“	0,5 mm	0 mm

Mit diesen Ergebnissen konnten die verschiedenen Material- und Fixationsmöglichkeiten bewertet werden. Als besonders erfolgversprechend wurden die Beispiele 2a, 2b und 2c identifiziert, bei dem Kühlkörper und Heizplatte aus einem Körper gefertigt werden können und die Fixation der Heiz- und Kühlkörper mit dem Container offen in der x-y-Ebene sein kann. Aus Kostengründen und aufgrund der Verfügbarkeit zum Zeitpunkt der Beschaffung wurde das Funktionsmuster nach Prinzip 2a gefertigt. Dabei bestehen alle Komponenten aus Edelstahl, was in der Simulation ebenfalls zu einer End-Lücke von 0 mm führte.

6. Funktionsmusterbau und Laboruntersuchungen

6.1. Aufbau Speichersystem

Tabelle 12 gibt eine Übersicht über die Massen und Wärmekapazitäten der einzelnen Komponenten des realisierten THS-Funktionsmusters. Insgesamt hat das Speichersystem (bis Schnittstelle der Flansche der Luftstrecke) eine Masse von ca. 134,9 kg. Die speicherbare Energiemenge im Temperaturbereich von 20 °C bis 650 °C beträgt ca. 28,6 kWh, im Temperaturbereich von 350 °C bis 650 °C ca. 19,3 kWh. Hieraus leiten sich Energiedichten ab von ca. 212,1 Wh/kg bzw. 143 Wh/kg. Das gesamte Volumen des Speichers beträgt ca. 99,2 l. Die volumetrische Energiedichte beträgt damit ca. 288,5 Wh/l bzw. 194,5 Wh/l.

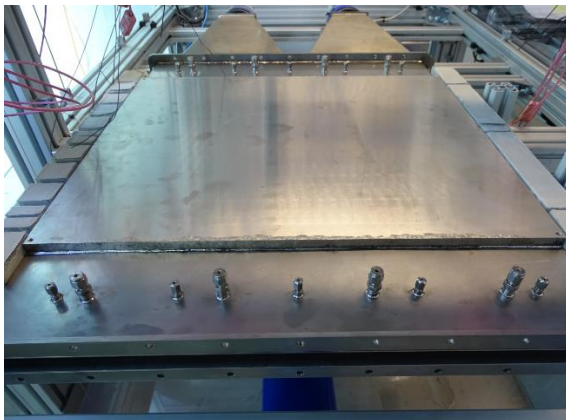
Tabelle 12: Übersicht über die Massen und Wärmekapazitäten der einzelnen Komponenten des THS.

Komponente	Material	Masse [kg]	Wärmekapazität 20 °C bis 650 °C [Wh]	Wärmekapazität 350 °C bis 650 °C [Wh]
Speichermaterial	AlSi12	68,47	21556,6	15780,4
Einhausung Seitenwände Substrat	1.4828	7,4	664	327,2
Einhausung Seitenwände Beschichtung	Al2O3	1,308	245,1	127,1
Einhausung Deckel (inkl. Abdeckungen)	1.4828	3,603	323,3	159,3
Einhausung Bodenplatte	Al2O3 Faserkeramik	0,942	176,5	91,5
Heizplatte (ohne WAS – Komponenten)	1.4828	26,238	2345,2	1160,3
WAS - Komponenten	1.4404	12,732	1285,2	649,1
Heizpatronen (2x mit TE, 8x ohne TE)	Edelstahl / MgO / CriNi	1,9	276,5	139
Wärmedämmung	Mikroporöses Dämmmaterial	12,334	1749	863,1
Summe		134,9	28621,4	19297

6.2. Integration in den Prüfstand

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Integration des Funktionsmusters in die Prüfstands-Infrastruktur während verschiedener Stadien. In der Reihenfolge von links oben nach rechts unten ist konkret folgendes zu sehen:

- Heiz-/Kühlplatte aufliegend auf Bodenplatte der Dämmung (Abbildung 9)
- Doppeldiffusor der Luftstrecke mit Anschlussstelle (Flansch) zur Heiz-/Kühlplatte (Abbildung 9)
- In Blöcken eingebrachtes Speichermaterial, aufliegend auf Al_2O_3 Faserkeramikplatte (Abbildung 10)
- Installierte Seitenwände der Einhausung (Abbildung 10)
- Draufsicht mPCM mit Einhausung; Die Bohrungslöcher im mPCM dienen der Aufnahme der Thermoelemente (Abbildung 11)
- Dämmung und Messtechnik; Die Thermoelemente entsprechen den rosafarbenen Anschlüssen (Abbildung 11)
- Dämmung, Messtechnik und Luftaustrittsführung (Abbildung 12)
- Prüfstands-Infrastruktur mit Verrohrung für Luftzufuhr (Abbildung 12)

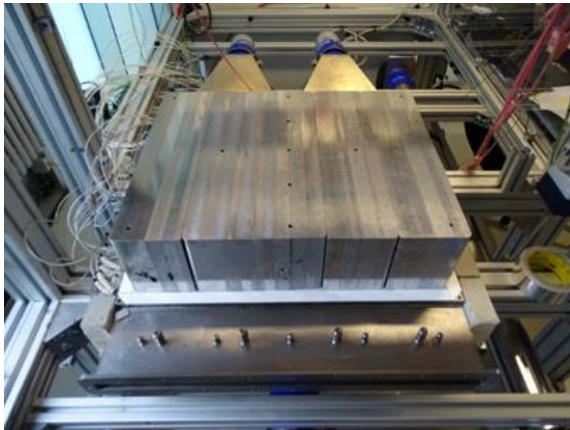


(a) Heiz-/Kühlplatte aufliegend auf Bodenplatte der Dämmung

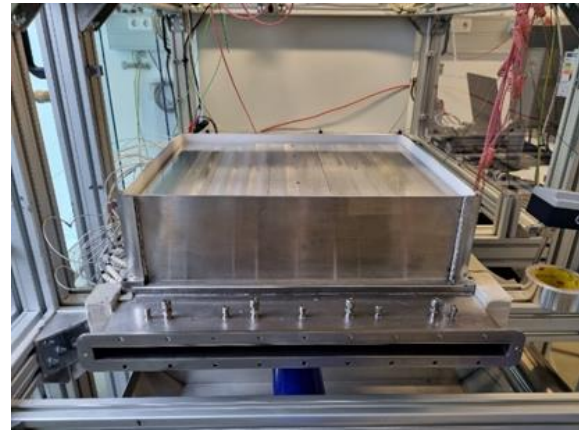


(b) Doppeldiffusor der Luftstrecke mit Anschlussstelle (Flansch) zur Heiz-/Kühlplatte

Abbildung 9: Heiz-/Kühlplatte mit Luftzuführung.

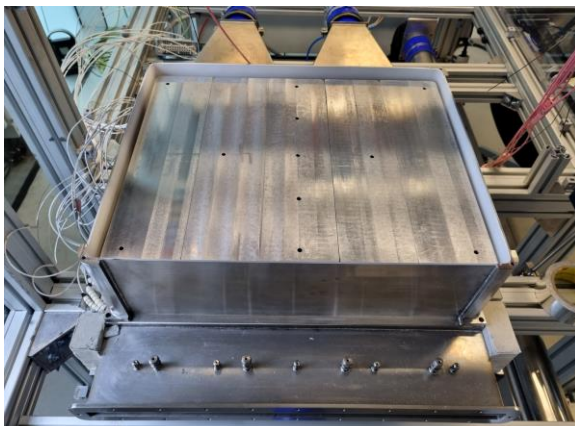


(a) In Blöcken eingebrachtes Speichermaterial, aufliegend auf Al_2O_3 Faserkeramikplatte

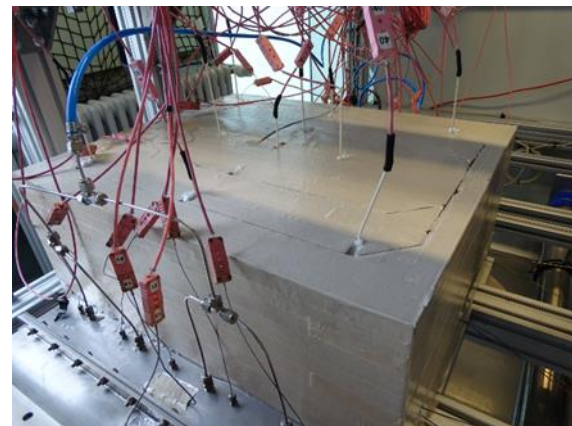


(b) Installierte Seitenwände der Einhausung

Abbildung 10: Speichermaterial und Einhausung.

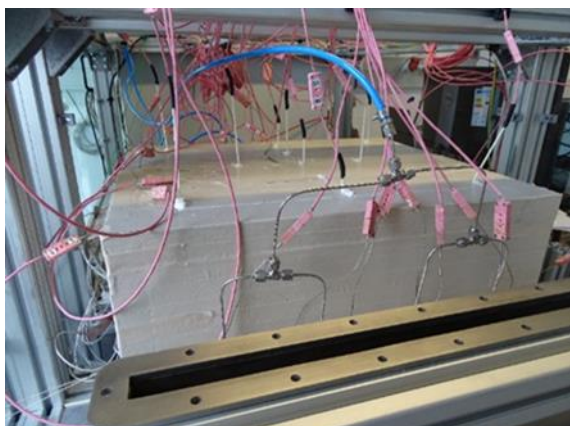


(a) Draufsicht mPCM mit Einhausung
(Bohrungslöcher im mPCM dienen der Aufnahme der Thermoelemente)

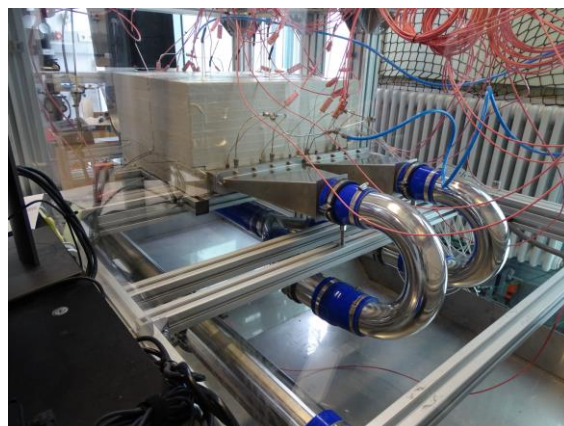


(b) Dämmung und Messtechnik (Thermoelemente entsprechen den rosafarbenen Anschlüssen)

Abbildung 11: Speichermaterial, Einhausung, Dämmung und Messtechnik.



(a) Dämmung, Messtechnik und Luftaustrittsführung



(b) Prüfstands-Infrastruktur mit Verrohrung für Luftzufuhr

Abbildung 12: Vollständig aufgebautes Funktionsmuster mit Dämmung und Messtechnik im Prüfstand.

6.3. Sensorik

Temperaturmessung

Insgesamt sind 48 Thermoelemente vom Typ N verbaut, die sich folgendermaßen auf die verschiedenen Subsysteme aufteilen:

- 15 x an und in der Luftstrecke (siehe Abbildung 13)
- 12 x in der Heizplatte (siehe Abbildung 14)
- 11 x im Speichermaterial (siehe Abbildung 15)
- 8 x an der Dämmung
- 1 x Umgebung

Darüber hinaus sind in zwei Heizpatronen jeweils ein Thermoelement vom Typ K direkt integriert.

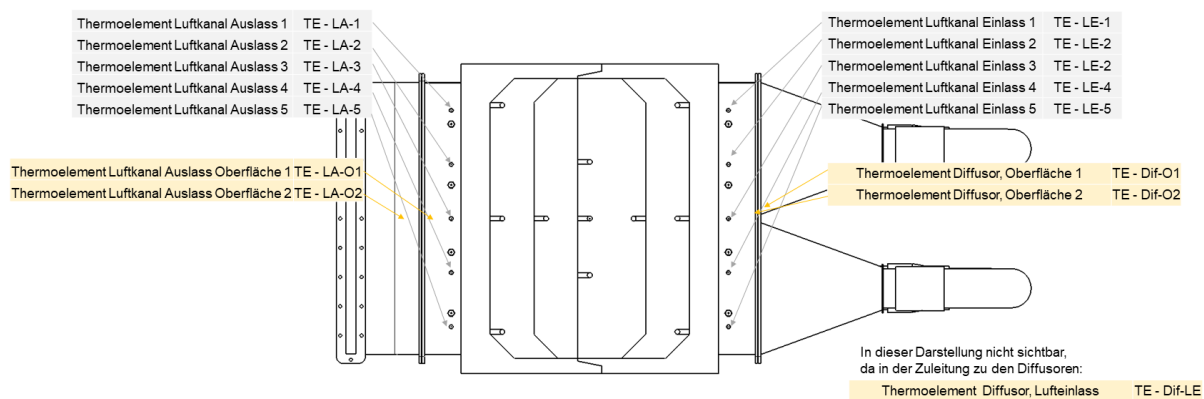


Abbildung 13: Temperaturmessstellen an und in der Luftstrecke in der Draufsicht.

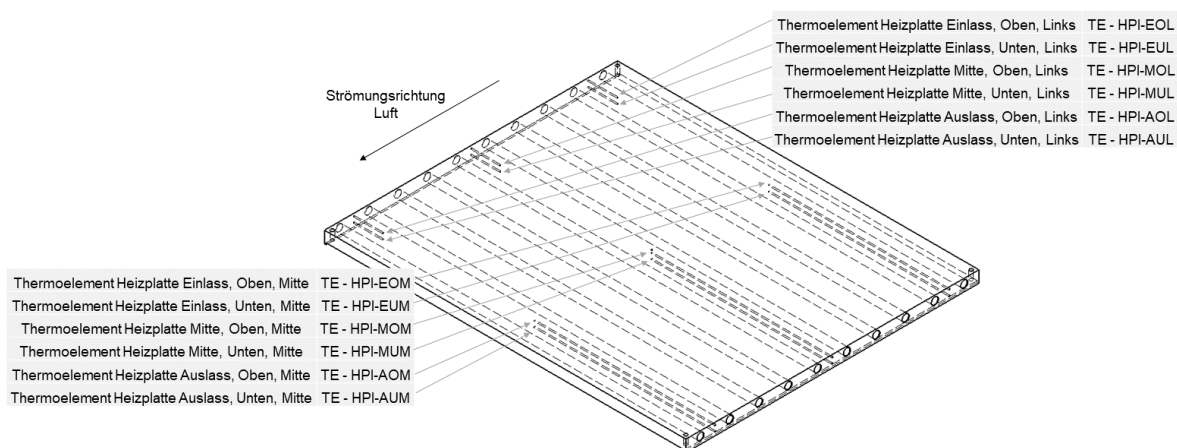


Abbildung 14: Temperaturmessstellen in der Heizplatte in der isometrischen Ansicht.

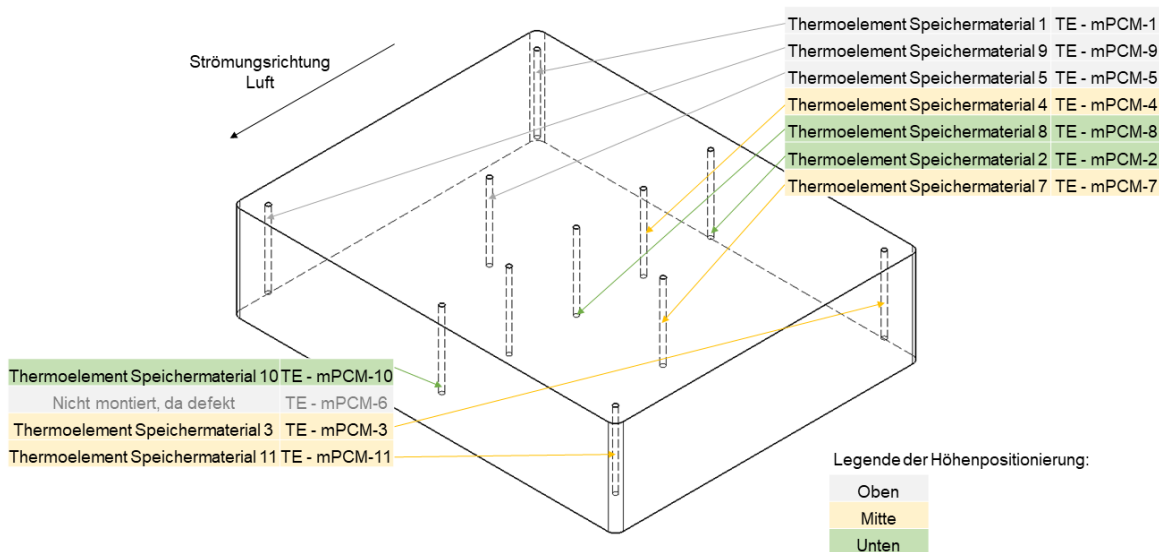


Abbildung 15: Temperaturmessstellen im Speichermaterial in der isometrischen Ansicht.

Die meisten Fühler sind Mantelthermoelemente mit 1,0 mm oder 1,5 mm Außendurchmesser und Inconel Mantel. Die Temperaturfühler im Speichermaterial sind Thermoelemente mit keramischem Schutzrohr (KER C 799) und 3 mm Außendurchmesser.

Die Kalibrierung der kompletten Temperaturmessstrecken vom Fühler bis zur Messdatenerfassung erfolgte mithilfe eines Referenzsystems bestehend aus einem Pt100-Fühler (bis 350 °C) bzw. Typ S Thermoelement (über 350 °C) und einem V710 Almemo Präzisionsdatenlogger V710. Die Ungenauigkeiten der Referenzfühler, die mit einem A/D-Wandler-Stecker ausgerüstet sind, sind in Abbildung 16 angegeben. Um die resultierenden Ungenauigkeiten der zu kalibrierenden Temperaturfühler zu erhalten, sollten 0,1 K addiert werden, resultierend aus kleinen Temperaturunterschieden zum Referenzfühler. Die verschiedenen Temperaturstufen an Prüfstands- und Referenzfühler wurden durch einen Kammerofen CWF 1200 von Carbolite Gero aufgebracht. Für eine höhere Genauigkeit kommt ein Temperaturhomogenisierungsblock (bis 350 °C aus Aluminium, darüber aus Aluminiumoxid) zum Einsatz.

Pt 100	
Temperatur / °C	Messunsicherheit / K
0	0,05
100	0,05
200	0,05
300	0,05
350	0,05

Typ S	
Temperatur / °C	Messunsicherheit / K
0	0,5
200	0,5
500	0,8
800	1,0
1100	1,5
1400	3,0

Abbildung 16: Messunsicherheit der Referenztemperaturfühler.

Massenstrommessung

Zur Massenstrommessung wurde eine Messsonde vom Typ Höntzsch TA 10 beschafft. Diese wird in ein Messrohr eingeschraubt und misst die Strömungsgeschwindigkeit im Zentrum der Messstrecke. Anschließend wird mittels eines Profilkoeffizienten der Massenstrom durch einen integrierten Messumformer berechnet. Der Sensor ist ab Werk kalibriert und wird mit einer Messgenauigkeit von 2 % vom Messwert + 0,02 m/s angegeben. Das Messrohr hat eine Länge von insgesamt 1,5 m wovon 2/3 stromaufwärts und 1/3 stromabwärts des Messquerschnitts liegen. Dies ist die maximale Messstrecke, welche in den Prüfstand eingebaut werden kann und sollte laut Herstellerangaben zur ausreichenden Ausbildung eines Strömungsprofils zur Massenstrommessung genügen.

Differenzdruckmessung

Zur Bestimmung des Druckverlusts über die Strömungslänge des WAS-Systems wird eine Differenzdruckmessung zwischen Messstellen am Ein- und Austritt, vor bzw. nach der Durchströmung der Wärmeübertrager-Struktur, vorgenommen. Als Differenzdruckmessgerät wird das Model KIMO C310 verwendet. Der Druck auf der Ein- und Austrittsseite wird hierbei über jeweils vier Messstellen quer zur Strömungsrichtung gemittelt, die gleichmäßig in Querrichtung über die Breite von 555 mm verteilt sind.

7. Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsprojekts LatHe.Go wurde der Einsatz von metallischen Latentwärmespeichern in Fahrzeugen der Kategorie „People Mover“ untersucht. Der vorliegende Bericht bietet einen Auszug wichtiger Inhalte des Projekts.

Zunächst wurde ein Betriebsszenario auf Basis des in der Vergangenheit durch das DLR begleitete Projekt „Reallabor Schorndorf“ abgeleitet. Die abgeleiteten Kenngrößen bilden zusammen mit dem ermittelten Heizleistungsbedarf die Grundlage aller weiteren Betrachtungen zum Speichersystem.

Im nächsten Schritt wurde die experimentelle Charakterisierung und Bewertung ausgewählter metallischer Phasenwechselmaterialien (mPCM) sowie potenzieller Einhausungsmaterialien durchgeführt. Es wurden drei mPCMs und sechs potenzielle Einhausungsmaterialien identifiziert. Die thermophysikalischen Eigenschaften wurden ermittelt. Die Kompatibilität wurde während thermischer und langfristiger Zyklusszenarien geprüft. Die gewählte Kombination bestand aus Al-12.5%Si als mPCM und Al₂O₃/Edelstahl als Einhausung.

Auf dieser Basis wurde eine Grobdimensionierung des Speichersystems durchgeführt und das Speichersystem mit seinen Teilkomponenten konstruktiv ausgelegt.

Mittels umfassender numerischer Simulation wurde das Verhalten des mPCM und die Verformung der Komponenten des Speichersystems simuliert. Es wurden verschiedene Material und Designvarianten bewertet und eine erfolgsversprechende Variante für die weitere Entwicklung ausgewählt.

Auf Basis der vorherigen Untersuchungen wurde ein Funktionsmuster im anwendungsnahen Maßstab entwickelt und im DLR-Labor am Institut für Fahrzeugkonzepte aufgebaut. Das Funktionsmuster basiert auf dem Speichermaterial Al-12.5%Si. Die Kapazität des Funktionsmusters beträgt ca. 19,3 kWh im Temperaturbereich von ca. 350 °C bis 650 °C bei einer Gesamtmasse von 134,9 kg und einem Volumen von 99,2 l. Die ausgeführte Beladeleistung betrug 16 kW und die Entladeleistung 10 kW.

Die vollumfängliche Durchführung der experimentellen Untersuchung des Funktionsmusters konnte nicht mehr im Rahmen des Projekts abgeschlossen werden.

Die Projektergebnisse liefern wichtige Erkenntnisse für die Entwicklung und den zukünftigen Einsatz von mPCM-Speichern in der Fahrzeuganwendung und sind damit ein wichtiger Beitrag zur effizienten, klimaschonenden und ökologischen Entwicklung der zukünftigen Mobilität.

Danksagung

Dieses Projekt wurde gefördert durch EFRE (Europäischer Fonds für regionale Entwicklung) Leitmarktwettbewerb NRW (Nordrhein-Westfalen) Mobilität.Logistik.

Fördernummer DLR EFRE-0801688;

Fördernummer Access e.V. EFRE-0801686;

Fördernummer TLK Energy GmbH EFRE-0801692



Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Abgeleitetes Betriebsszenario „Nachtladen“ auf Basis des regulären Linienbetriebs von Linie 242 und Linie 247.	6
Abbildung 2: Abgeleitetes Betriebsszenario „Gelegenheitsladen“ auf Basis des regulären Linienbetriebs von Linie 242.	7
Abbildung 3: Abgeleitetes Betriebsszenario „Gelegenheitsladen“ auf Basis des regulären Linienbetriebs von Linie 247.	7
Abbildung 4: Entwurf der Zykliversuche.	12
Abbildung 5: Darstellung des Gesamtaufbaus mit Einzelkomponenten und Schichtaufbau.	14
Abbildung 6: Darstellung des Gesamtaufbaus mit Luftzuführung und Luftabfuhr.	15
Abbildung 7: Verformung von mPCM und Behälter gemäß der gekoppelten Simulation.	18
Abbildung 8: Zeitliche Entwicklung der berechneten Ortsverschiebung von mPCM-Unterseite und Behälterboden.	18
Abbildung 9: Heiz-/Kühlplatte mit Luftzuführung.	21
Abbildung 10: Speichermaterial und Einhausung.	22
Abbildung 11: Speichermaterial, Einhausung, Dämmung und Messtechnik.	22
Abbildung 12: Vollständig aufgebautes Funktionsmuster mit Dämmung und Messtechnik im Prüfstand. ..	23
Abbildung 13: Temperaturmessstellen an und in der Luftstrecke in der Draufsicht.	24
Abbildung 14: Temperaturmessstellen in der Heizplatte in der isometrischen Ansicht.	24
Abbildung 15: Temperaturmessstellen im Speichermaterial in der isometrischen Ansicht.	25
Abbildung 16: Messunsicherheit der Referenztemperaturfühler.	25

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der gemessenen Schmelzpunkte und Schmelzenthalpien.....	8
Tabelle 2: Übersicht über Koeffizienten, Gültigkeitsbereiche und Standardfehler von Wärmekapazitätsmodellen im festen Zustand.	8
Tabelle 3: Übersicht über Koeffizienten, Gültigkeitsbereiche und Standardfehler von Wärmekapazitätsmodellen im flüssigen Zustand.	8
Tabelle 4: Übersicht über Koeffizienten, Gültigkeitsbereiche und Standardfehler der Temperaturleitfähigkeit.	9
Tabelle 5: Übersicht über Koeffizienten und Gültigkeitsbereiche der Dichte.	9
Tabelle 6: Übersicht über Koeffizienten, Gültigkeitsbereiche und Standardfehler der Wärmeleitfähigkeit.	9
Tabelle 7: Übersicht über Koeffizienten und Gültigkeitsbereiche des spezifischen thermischen Kontaktwiderstands.	10
Tabelle 8: Ergebnisse der Langzeitversuche zur Wechselwirkung mPCM und Einhausung.	11
Tabelle 9: Ergebnisse mit den 72-stündigen Zyklen Reaktionsversuchen.	12
Tabelle 10: Kenngrößen des Funktionsmusters nach der Detailauslegung.	15
Tabelle 11: Überblick über die getesteten Parametersätze.	19
Tabelle 12: Übersicht über die Massen und Wärmekapazitäten der einzelnen Komponenten des THS.	20

Abkürzungsverzeichnis

Al-12.5%Si	Aluminium-Silizium-Legierung
DSC	Differential Scanning Calorimetry
EDX	Energiedispersiver Röntgen Spektrometrie
LFA	Light Flash Analysis
mPCM	Metallic Phase Change Material
REM	Rasterelektronenmikroskopie
THS	Thermischer Hochleistungsspeicher
WAS	Wärmeaustragssystem
WES	Wärmeeintragssystem

Literaturverzeichnis

- [1] H. Großmann, Pkw-Klimatisierung, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2013.
- [2] 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* 13 (2020) 3023.
- [3] A.J. Rawson, W. Kraft, T. Gläsel, F. Kargl, Selection of compatible metallic phase change materials and containers for thermal storage applications, *Journal of Energy Storage* 32 (2020) 101927.
- [4] W. Kraft, V. Stahl, P. Vetter, F. Nees, H. Grübbel, Abschlussbericht Projekt "THS-Bus", 2022, <https://www.dlr.de/de/fk/forschung-transfer/projekte/alternative-energiewandler/thb-bus-thermische-hochleistungsspeicher-fuer-elektrobusse>.
- [5] F. Nees, A. Katourtzidis, W. Kraft, V. Stahl, P. Vetter, Experimental investigation of thermal discharge performance of a metallic latent thermal energy storage system, in: *Proceedings of the 8th World Congress on Mechanical, Chemical, and Material Engineering (MCM'22)*, 2022.
- [6] F. Nees, J. Feine, A. Katourtzidis, V. Stahl, W. Kraft, Heat extraction characteristics of a small scale metallic latent heat thermal energy storage system, *Proceedings of the 17th International Heat Transfer Conference* (2023).
- [7] V. Stahl, W. Kraft, F. Lanzerath, Computational modelling of thermal loads on a heat storage for battery electric buses over service life, *Proceedings of the 38th International Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS38) Goteborg, Sweden* (2025).
- [8] M. Brost, O. Deißer, L. Gebhardt, T. Steiner, K. Karnahl, A.-M. Ademeit, A. Brandies, T. Sippel, J. Velimsky, A. Müller, S. Beyer, F. Ulmer, Reallabor Schorndorf - Entwicklung und Erprobung eines bedarfsgerechten Bussystems (Projektbericht), 2019.