

## Schlussbericht

### VORHABENBEZEICHNUNG:

Verbundprojekt: Energieeffizientes Fahren 2014 - 2. Projektphase (EFA2014/2)

Teilvorhaben: Thermomanagement für Elektrofahrzeuge - Latentwärmespeicher

### ZUWENDUNGSEMPFÄNGER:

Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V.  
(ZAE Bayern)  
Bereich Energiespeicherung  
Walther-Meissner-Straße 6  
85748 Garching

### KOOPERATIONSPARTNER:

BMW AG  
Continental Automotive GmbH  
REO AG  
Valeo

### FÖRDERKENNZEICHEN:

16N11950

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

### LAUFZEIT DES VORHABENS:

01.04.2012 bis 31.03.2014

Verlängerung bis 30.06.2014

### AUTOREN:

Dr. Stefan Hiebler  
Simon Pöllinger

Gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung  
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.



## Inhalt

<b>1</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Einführung</b>	<b>8</b>
2.1	Einbettung in das Gesamtprojekt	8
2.2	Arbeitspaket 5.2. Integriertes Thermomanagementsystem	9
2.3	Stand der Wissenschaft und Technik	9
2.4	Ziel des Teilvorhabens	10
2.5	Aufgabenstellung	10
<b>3</b>	<b>Projektorganisation</b>	<b>11</b>
3.1	Projektpartner und Lieferanten	11
3.2	Zeit und Kostenplanung	11
3.3	Arbeitsplan	11
3.3.1	Meilenstein 1: "Funktionsfähiges PCM"	12
3.3.2	Meilenstein 2: "Konzept Speicher"	12
<b>4</b>	<b>TAP 1 Festlegung der Randbedingungen für den Latentwärmespeicher (LWS)</b>	<b>13</b>
<b>5</b>	<b>TAP 2 Simulation</b>	<b>14</b>
5.1	Systemsimulation	14
5.2	Thermische Komponentensimulation	15
<b>6</b>	<b>TAP 3: Suche nach möglichen PCM</b>	<b>19</b>
6.1	Ziel	19
6.2	Ergebnisse	19
<b>7</b>	<b>TAP 4: Auswahl geeigneter PCM</b>	<b>20</b>
<b>8</b>	<b>TAP 5: Test und Vermessung des PCM</b>	<b>21</b>
8.1	Ziel	21
8.2	Methodik	21
8.2.1	DSC-Messungen	21
8.2.2	T-History-Messungen	22



8.2.3	Dichtemessungen .....	22
8.2.4	Korrosionsuntersuchungen.....	22
8.2.5	Zyklisierung .....	23
8.3	Ergebnisse.....	23
8.3.1	Eigenschaften des Phasenwechsels .....	23
8.3.2	Dichtemessungen .....	26
8.3.3	Korrosionsuntersuchungen.....	27
8.3.4	Zyklisierung .....	28
<b>9</b>	<b>TAP 6: Funktionskonzept für den Speicher .....</b>	<b>30</b>
<b>10</b>	<b>TAP 7: Vorversuche Funktionskonzept .....</b>	<b>31</b>
10.1	Compoundierung .....	31
10.2	Vorversuche für die Ladezustandsbestimmung.....	32
<b>11</b>	<b>TAP 8: Auslegung Speicher .....</b>	<b>36</b>
11.1	Kapazität.....	36
11.2	Leistung .....	38
11.3	Literatur .....	41
<b>12</b>	<b>TAP 9: 1. Funktionsmuster: Konstruktion .....</b>	<b>41</b>
<b>13</b>	<b>TAP 10 : 1. Funktionsmuster: Bau.....</b>	<b>42</b>
<b>14</b>	<b>TAP 11: 1. Funktionsmuster: Test/Auswertung .....</b>	<b>43</b>
14.1	Ziel.....	43
14.2	Methodik.....	43
14.2.1	Teststand und Messstrategie .....	43
14.2.2	Ablauf und variable Parameter der Versuche .....	45
14.3	Ergebnisse.....	46
14.3.1	Vermessung und mechanisches Versagen des ersten Funktionsmusters .....	46
14.3.2	Systematische thermische Vermessung des zweiten Funktionsmusters .....	48
	Repräsentativer Ladeversuch .....	48
	Repräsentativer Entladeversuch .....	50
	Charakteristische thermische Kenngrößen.....	52
	Vergleich mit Simulationsergebnissen .....	53



<b>15</b>	<b>TAP 12: Integriertes Funktionsmuster .....</b>	<b>54</b>
<b>16</b>	<b>TAP 13: Bericht/Dokumentation .....</b>	<b>54</b>
<b>17</b>	<b>Nutzen, Verwertbarkeit des Ergebnisses .....</b>	<b>55</b>
<b>18</b>	<b>Forschungsergebnisse Dritter .....</b>	<b>55</b>
<b>19</b>	<b>Durchgeführte Arbeiten im Rahmen von Aus- und Weiterbildung</b>	<b>55</b>
<b>20</b>	<b>Veröffentlichungen.....</b>	<b>55</b>
	<b>Anhang .....</b>	<b>56</b>
A	Vergleich von Hexadecan und RT18HC.....	56
B	Ergebnisse aus den Messungen am Teststand.....	57



## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Erstes Modell des Latentwärmespeichers (LHS) in einem Test-Setting in Dymola ...	14
Abbildung 2: Einbindung des zweiten Modells in ein Test-Setting .....	15
Abbildung 3: Vereinfachte Geometrie für die 2D-Simulation eines Latentwärmespeichers mit Plattenwärmeübertrager .....	16
Abbildung 4: Typische Simulationsergebnisse für den Verlauf der Fluid-Austrittstemperatur (links) und des Anteils geschmolzenen PCMs (rechts) für einen Schmelzvorgang.....	17
Abbildung 5: Links: Temperaturverteilung in Fluid und PCM zu einem Zeitpunkt während des Schmelzvorgangs. Die transparente Ebene markiert die nominelle Schmelztemperatur des PCM. Rechts: Verlauf der Phasenfront im PCM für verschiedene Zeitschritte.....	18
Abbildung 6: Auszug aus der Liste der Materialien mit Schmelztemperaturen im Bereich 0 °C - 20 °C .....	20
Abbildung 7: Enthalpiekurven der DSC-Messungen für die PCM-Kandidaten des Herstellers Entropy Solutions.....	24
Abbildung 8: Enthalpiekurven der DSC-Messungen für die PCM-Kandidaten des Herstellers Rubitherm.....	24
Abbildung 9: Enthalpiekurven für PureTemp23 aus T-History-Messungen .....	25
Abbildung 10: Gemessene Dichten im flüssigen Zustand für PureTemp-Produkte.....	26
Abbildung 11: Gemessene Dichten im flüssigen Zustand ausgewählter Rubitherm-Produkte .....	27
Abbildung 12: Idealisierter Verlauf der Dichte von PureTemp23.....	27
Abbildung 13: Ergebnisse der Zyklisierung von PureTemp23 im DSC-Instrument.....	29
Abbildung 14: Enthalpiekurven von PureTemp23 aus DSC-Messungen vor und nach dem Zyklisieren in der Zyklisierapparatur.....	29
Abbildung 15: Multiport-Extrusion des Herstellers Hydro Aluminium Precision Tubing Tønder a.s. ....	30
Abbildung 16: Schematische Darstellung der Speicherkonstruktion mit Multiport-Extrusions .....	31
Abbildung 17: Temperatur- und Druckverlauf des Langzeitversuchs zur Ladezustandsbestimmung .....	33
Abbildung 18: Innendruck im Testbehälter aufgetragen über der Wandtemperatur für die Heiz- und Kühlphase des Langzeitversuchs.....	34
Abbildung 19: Normierte linearisierte Druck- und Enthalpiekurve .....	35
Abbildung 20: Vorhersage des Anstiegs des Innendrucks bei der Erwärmung des Speichers für verschiedene Befüllungsgrade. Zusätzlich aufgetragen ist die rechnerische Druckänderung alleine aufgrund der Erwärmung der Luft. Ausgangspunkt für die Berechnungen ist ein auf 5 °C temperierter Speicher.....	37
Abbildung 21: Simulationsergebnisse zu Leistung beim Laden der Konfiguration mit 10 MPE von 0 °C auf 50 °C.....	39



Abbildung 22: Simulationsergebnisse zu Leistung beim Laden der Konfiguration mit 15 MPE von 0 °C auf 50 °C .....	39
Abbildung 23: Vergleich der Leistung mit Compound und reinem PCM .....	40
Abbildung 24: Vereinfachtes Anlagenschema des am ZAE Bayern zur Vermessung der Funktionsmuster eingesetzten Teststands .....	44
Abbildung 25: Verlauf von Temperaturen und Innendruck beim Aufheizen des ersten Funktionsmusters in mehreren Temperaurstufen bis zum mechanischen Versagen bei 80 °C .....	47
Abbildung 26: Vergrößerung aus dem Abbildung 25 im Bereich des Zeitpunkts des mechanischen Versagens des ersten Funktionsmusters .....	47
Abbildung 27: Gemessene Temperaturen während eines Ladeversuchs bei einem Volumenstrom des Wärmeträgerfluids von 4 l/min .....	48
Abbildung 28: Thermische Leistung und eingespeicherte Wärmemenge entsprechend den Temperaturen aus Abbildung 27 .....	49
Abbildung 29: Gemessene Temperaturen während eines Entladeversuchs bei einem Volumenstrom des Wärmeträgerfluids von 4 l/min .....	51
Abbildung 30: Thermische Leistung und entladene Wärmemenge entsprechend den Temperaturen aus Abbildung 29 .....	51
Abbildung 31: Übersicht der thermischen Speicherkapazität des zweiten Funktionsmusters bei verschiedenen Versuchsbedingungen. $\Delta T$ ist die Differenz zwischen Start- und Endtemperatur; Q der Betrag der eingespeicherten bzw. entnommenen Wärmemenge. ....	52
Abbildung 32: Vergleich der Austrittstemperatur-Ergebnisse aus Simulationen mit Messergebnissen eines repräsentativen Heizversuchs .....	53
Abbildung 33: Vergleich der Austrittstemperatur-Ergebnisse aus Simulationen mit Messergebnissen eines repräsentativen Kühlversuchs .....	54

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Gemessene Dichten im festen Zustand .....	26
Tabelle 2: Ergebnisse der Korrosionsversuche nach etwa 100 Tagen. Negative Werte entsprechen einer Massenzunahme der Metallprobe. ....	28
Tabelle 3: Berechnete Kapazität für verschiedene MPE-Abzahlen und Temperaturspreizungen bei einem Befüllungsgrad von 0,8 .....	37
Tabelle 4: Berechnete und eingesetzte Werte für die Wärmeübergangskoeffizienten $\alpha$ bei den Konfigurationen mit 10 und 15 MPE .....	38
Tabelle 5: Versuchsparameter für die systematische thermische Vermessung des zweiten Funktionsmusters .....	46



## 1 Zusammenfassung

Ziel des Teilvorhabens war die Entwicklung eines Latentwärmespeichers für den Einsatz in einem Elektrofahrzeug. Integriert in das von den Projektpartnern entwickelte Thermomanagementsystem sollte er zur Einsparung elektrischer Energie und zur Steigerung der Reichweite des Fahrzeugs beitragen.

In einer umfangreichen Recherche wurden 115 potenzielle Materialien mit einem Schmelzpunkt zwischen 0 °C und 20 °C gefunden. Für den Bereich 50 °C bis 80 °C wurden 149 Materialien gefunden. Für die Materialien wurden soweit verfügbar relevante Stoffdaten für eine spätere Bewertung zusammengestellt. Für den nachträglich als Einsatzbereich definierten Bereich 15 °C bis 25 °C wurden 10 vielversprechende Materialkandidaten von zwei Herstellern für die thermische Charakterisierung am ZAE Bayern ausgewählt. In einem Vergleich der Messergebnisse wurde das Material PureTemp23 mit einem Schmelzpunkt von etwa 23°C als Favorit für den Einsatz im Latentwärmespeicher identifiziert. Das PCM (Phase Change Material, Phasenwechselmaterial) ist ein organisches Material und weist eine maximale Speicherkapazität von 250 J/g im Bereich zwischen 5 °C und 35 °C auf. In Langzeitversuchen konnte gezeigt werden, dass das Material nicht korrosiv gegenüber Aluminium und Edelstahl ist. Weiter wurde gezeigt, dass das Material auch nach über 300 Schmelz- und Erstarrungszyklen seine Schmelzenthalpie und seinen Schmelzpunkt beibehält.

Für den Latentwärmespeicher wurde ein Funktionskonzept erstellt, das den Ansprüchen und Randbedingungen des integrierten Thermomanagements gerecht wird. Basierend auf Aluminiumprofilen mit vielen Einzelkanälen, sogenannten Multiport-Extrusions, wurde eine Wärmeübertragerstruktur entwickelt. Durch eine parallele Anordnung der flachen Profile erlaubt das Konzept ein gleichmäßiges Be- und Entladen des Speichers bei hoher Leistung. Das Funktionskonzept berücksichtigt insbesondere die Volumenänderung des PCM beim Phasenwechsel und den daraus resultierenden Druckanstieg im PCM. Zusätzlich sieht es den Einsatz eines Drucksensors für die Abschätzung des Ladezustands vor. Zu diesem Vorgehen wurden Versuche an einem Funktionsmodell durchgeführt. Sie zeigten, dass die Ladezustandsbestimmung über den Druck prinzipiell möglich ist. Allerdings wurde festgestellt, dass PureTemp23 einen zweistufigen Phasenwechsel ausweist, der die Umrechnung der Druckdaten in einen exakten Ladezustand stark erschwert. Teil des Funktionskonzepts ist auch, dem PCM Graphit zuzufügen, um dessen Wärmeleitfähigkeit zu erhöhen. So kann die thermische Leistung des Speichers verbessert werden. Die Materialuntersuchungen wurden mit dem PCM-Graphit-Compound wiederholt. Es konnte gezeigt werden, dass sich die Materialeigenschaften durch die Compoundierung kaum veränderten. Lediglich die maximale Speicherkapazität wurde leicht reduziert.

Aufgrund der strengen geometrischen Randbedingungen war der Spielraum bei der Speicherauslegung bezüglich Kapazität stark eingeschränkt. Als Design-Vorgabe wurde festgelegt, eine möglichst hohe Kapazität zu erzielen. Zur Auslegung bezüglich Leistung erfolgte mit Hilfe eines am ZAE Bayern erstellten, auf der Finite-Differenzen-Methode basierenden Simulationstools. Die Simulationsergebnisse zeigten, dass Leistungen bis über 10 kW möglich sind.

Das Funktionskonzept wurde auf Basis der Auslegungsrechnungen in die Konstruktion eines Funktionsmusters umgesetzt. Das mit der Fertigung der Muster beauftragte Unternehmen optimierte die Konstruktion bezüglich Druckfestigkeit und Fertigungstauglichkeit. Insgesamt wurden drei Funktionsmuster gefertigt. Da fertigungsbedingte Schäden bei den Tests der Speicher auftraten, wurden Optimierungen an der Konstruktion vorgenommen.

Die Funktionsmuster wurden am ZAE Bayern an einem Teststand thermisch vermessen und getestet. Es konnte gezeigt werden, dass die thermische Leistung die Ergebnisse der Simulationsrechnungen



sogar übertrafen. Die gemessene Leistung, bezogen auf die Differenz zwischen der Eintrittstemperatur des Wärmeträgerfluids und der Schmelztemperatur des PCM, beträgt bei einem Volumenstrom von 4 l/min 0,2 kW/K und bei 8 l/min 0,3 kW/K. Für den latenten Anteil der Kapazität wurden 0,38 kWh gemessen. Der sensible Anteil hängt von der Temperaturspreizung beim Be- und Entladen ab und beträgt 0,013kWh/K. Bei einer Spreizung von z.B. 20 K ergibt sich also insgesamt eine Kapazität von etwa 0,64 kWh.

Es wurde also ein Latentwärmespeicher entwickelt und getestet, der in Anbetracht der gegebenen Bauraumbegrenzungen eine hohe Speicherkapazität und zum Teil sehr hohe Leistung bereitstellt. Die Funktionsfähigkeit des Speicherkonzepts konnte in Laborversuchen erfolgreich getestet werden.

## 2 Einführung

### 2.1 Einbettung in das Gesamtprojekt

Das Projekt „Energieeffizientes Fahren 2014 (EFA 2014) – Phase 2“ adressiert innovative Konzepte zur Reduzierung des Energieverbrauchs von Kraftfahrzeugen. Anders als in der ersten Projektphase konzentriert sich die zweite Phase dabei auf die Energieeinsparung in der Elektromobilität. Das Projekt setzt zwei wesentliche Schwerpunkte, um den Energiebedarf des Elektrofahrzeugs zu reduzieren:

- Ausstattung des Fahrzeugs und des Fahrers mit Wissen über die vorausliegende Fahrstrecke mit dem Ziel eines vorausschauenden Betriebs von Fahrzeugsystemen sowie einer vorausschauenden Fahrweise und Routenwahl.
- Effizienzoptimierung der Fahrzeugsysteme und Architekturen durch innovative Maßnahmen mit dem Ziel, den vorausschauenden Betriebs- und Fahrstrategien optimale Voraussetzungen auf Komponentenebene beiseite zu stellen.

#### Effiziente Systeme, Komponenten und Architekturen

Die innovativen Dienste und Funktionen zur vorausschauenden Reduktion des Energiebedarfs werden begleitet von der Konzeption eines Architekturbaukastens in der Elektromobilität.

Ein vorausschauendes Wärmemanagement von Elektrofahrzeugen wird durch die Entwicklung eines hochintegrierten Thermomanagementsystems verfolgt, das die Vorgaben der Betriebsstrategie umsetzen kann.

#### Integration der Maßnahmen und Umsetzung in Demonstratoren

Ein wesentliches Ziel des Projektes war die Darstellung eines möglichst großen Anteils der Innovationen im realen Elektrofahrzeug. Hierzu sollen drei Elektrofahrzeuge als Demonstratoren aufgebaut werden, in denen Aspekte wie die Vernetzung des Fahrzeugs mit der Verkehrsleitzentrale, Hinweise zu effizienten Fahrstrategien, das integrierte Thermomanagement oder auch intelligentes Licht dargestellt werden. Außerdem dienen die Demonstratorfahrzeuge der Validierung der Energieeinsparpotenziale im realen Verkehr.

Der Teil des Projektes, über dessen Ergebnisse in diesem Bericht berichtet wird, bezieht sich auf den Punkt der Effizienzoptimierung der Fahrzeugsysteme und der Entwicklung eines hochintegrierten Thermomanagementsystems. Speziell war die Entwicklung eines Latentwärmespeichers für das integrierte Thermomanagementsystem Inhalt des Projektes.





## 2.2 Arbeitspaket 5.2. Integriertes Thermomanagementsystem

Das Arbeitspaket AP5 „Innovative Systeme, Komponenten und Architekturen“ beinhaltet effizienzsteigernde Maßnahmen auf Hardware-Ebene. Es geht um die Konzeption und Umsetzung von besonders energiesparenden Systemen (Sensoren und Aktoren) und deren geschickte Vernetzung in einer Architektur mit dem Ziel eines energieoptimalen Antriebsstrangs und elektrischen Bordnetzes.

Das Arbeitspaket 5.2 beinhaltet die Entwicklung eines innovativen Thermomanagementsystems, das die Funktionen Kühlen und Heizen sowohl für Antriebskomponenten als auch für den Fahrzeuginnenraum in einem Modul vereint. Das System zeichnet sich außerdem dadurch aus, dass es elektrische Energie, die der Elektromotor beim Bremsen erzeugt, direkt in nutzbare Wärme umwandeln kann, ohne die Energie im elektrischen Energiespeicher zwischenspeichern zu müssen. Dafür verfügt das System neben einem Bremswiderstand über einen separaten Latentwärmespeicher. Der Wärmespeicher kann in Kombination mit dem Bremswiderstand auch über Netzstrom geladen werden. Die so konservierte Wärmeenergie kann im Wärmespeicher über lange Zeit gespeichert werden um dann während der Fahrt zur Beheizung des Innenraums oder, falls notwendig, der Batterie verwendet werden.

Die Möglichkeit der thermischen Speicherung und Nutzung von Bremsenergie ist unabhängig von dem Batterieladezustand und stellt ein Alleinstellungsmerkmal dieses Entwurfs dar. Die Bremsleistung kann als Nutzwärme eingesetzt werden. Das System ermöglicht es, Fahrgastzelle und Batterie auch während der Aufladephase vorzuheizen, entweder durch Nutzung von Verlustwärme oder durch gezielte Erwärmung mit Wärmeenergie aus dem Wärmespeicher. Das Vorkühlen der Fahrgastzelle und die Übertragung von im System vorhandener Restwärme in einen nächsten Fahrzyklus mittels eines Wärmespeichers werden ebenfalls in Betracht gezogen.

Abschließend soll, soweit möglich, das integrierte System unter realen Bedingungen in einem Fahrzeug getestet werden.

## 2.3 Stand der Wissenschaft und Technik

Auf dem Gebiet der Architektur- und Komponentenentwicklung besteht im Elektrofahrzeug dringender Handlungsbedarf. Die bereits erwähnten Nebenverbraucher Heizung, Kühlung und Beleuchtung sind derzeit nur in einer für konventionelle Fahrzeuge optimierten Form vorhanden. Energieeinsparungen haben in diesem Bereich bisher eine eher untergeordnete Rolle gespielt, da ihr Energieverbrauch im Vergleich zum Verbrennungsmotor entweder verhältnismäßig klein war oder die Abwärme der Antriebskomponenten zum Heizen des Fahrzeugs ausreichte.

Bisher wurden Latentwärmespeicher im Automobil, wenn überhaupt, nur zu Speicherung von relativ geringen Mengen an (Ab-)Wärme während der Stillstandszeiten des Fahrzeuges genutzt, um den Motor beim darauf folgenden Kaltstart vorzuwärmen. Dadurch sollte der Schadstoffausstoß des Verbrennungsmotors verringert und der Komfort bzw. die Sicherheit der Insassen durch eine schneller ansprechenden Heizung des Fahrzeugs erhöht werden. Hierzu gab es in den 1980-iger und 90-iger Jahren einiges an Forschungsarbeiten. Zur Marktreife und Einsatz in Fahrzeugen haben es nur sehr wenige Latentwärmespeicher gebracht, z.B. ein optionaler Latentwärmespeicher in der 5-er Modellreihe von BMW. Auch dieses Modell ist inzwischen wieder vom Markt verschwunden.



Aktuelle Entwicklungen zu Latentwärmespeichern im Automobil zielen auf eine kurzzeitige Pufferung von Klimaanlage während kurzer Stopps, z.B. an Ampeln, ab, um den Komfort während dieser kurzen Fahrtunterbrechungen zu erhöhen. Dazu werden nur sehr geringe Mengen an Kälte über nur sehr kurze Zeitdauern gespeichert.

Die hier verfolgte Anwendung, Speicherung von Abwärme eines Elektrofahrzeugs bzw. von mit Strom aus der Steckdose elektrisch erzeugter Wärme zum Heizen des Fahrzeugs während der Fahrt, erfordert andere Speichertemperaturen, -kapazitäten und Lade-/ Entladeleistungen.

Dies erforderte eine komplette Neuentwicklung, die mit großem Forschungsaufwand hinsichtlich Speichermaterialien, deren Verträglichkeit mit Konstruktionswerkstoffen und einem neuen Konzept des Speicheraufbaus verbunden ist.

Aufgrund der sich stark von früheren bzw. aktuellen Arbeiten unterscheidenden Einsatzzwecks, sind frühere bzw. andere aktuelle Arbeiten nur sehr eingeschränkt auf den neuen Anwendungsfall übertragbar und die damals gemachten Patente stellten, soweit sie überhaupt noch Bestand haben, kaum Einschränkungen für eine Ergebnisverwertung dar.

## 2.4 Ziel des Teilvorhabens

Das Ziel des Teilvorhabens war es, einen Latentwärmespeicher für ein Integriertes Thermomanagement für Elektrofahrzeuge zu entwickeln. Aufgabe des Speichers sollte es sein, in unterschiedlichen Fahrsituationen als Wärmequelle oder –senke zu fungieren und so die zeitliche Diskrepanz zwischen Wärmebedarf und –produktion auszugleichen. Als Wärmelieferant für das Laden des Speichers sollten Abwärmequellen im Fahrzeug, wie z.B. der Bremswiderstand dienen. Zusätzlich sollte die Möglichkeit bestehen, den Speicher über elektrische Beheizung zu beladen, wenn das Fahrzeug im Stillstand an das Stromnetz angeschlossen ist. Die gespeicherte Wärme sollte zu Beheizung von Fahrzeugkomponenten und der Fahrgastzelle während der Fahrt sowie zur Vorkonditionierung im Stillstand verwendet werden.

## 2.5 Aufgabenstellung

Die Parameter für die Auslegung und Entwicklung eines Latentwärmespeichers sind stark abhängig von den Randbedingungen des geplanten Anwendungsfalls. In Zusammenarbeit mit den Projektpartnern sollten die für die Entwicklung des Speichers relevanten Parameter aus der Planung des thermischen Gesamtsystems abgeleitet werden.

Auf Basis dieser Randbedingungen sollten PCM für den Einsatz im Speicher ausgewählt und ausführlich auf ihre Tauglichkeit für den angestrebten Betrieb getestet werden. Als Ergebnis dieser Untersuchungen sollte ein Material identifiziert werden, dass im weiteren Verlauf des Projektes eingesetzt werden sollte.

Weiterhin sollte ein Funktionskonzept für den Speicher erarbeitet werden, dass die Anforderungen des Gesamtsystems an die thermische Leistungscharakteristik erfüllen und Lösungen für konstruktive Probleme enthalten sollte. Das Konzept sollte in einem Funktionsmuster umgesetzt werden, dass zur in einem Teststand am ZAE Bayern getestet und thermisch charakterisiert werden sollte. Zur Charakterisierung des Gesamtsystems sollte das Muster in einen Systemteststand integriert werden.

Ein weiteres Ziel war es, den Speicher zu einem Prototyp weiterzuentwickeln und in das Thermomanagementsystem eines Versuchsfahrzeugs zu integrieren. Als Voraussetzung dafür wurde allerdings festgelegt, dass ein sicherer Betrieb des Fahrzeugs gewährleistet werden kann. Aufgrund des hohen Aufwands dieses Entwicklungsschrittes wurde die Realisierung dieser Aufgabe im Rahmen des Projektes in der Vorhabensbeschreibung als optional formuliert.



Das integrierte Thermomanagementsystem sollte in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern in einer numerischen Systemsimulation untersucht werden. Dazu sollte vom ZAE Bayern ein Konzept für die Modellierung des Latentwärmespeichers erstellt werden.

## 3 Projektorganisation

### 3.1 Projektpartner und Lieferanten

Projektpartner im Arbeitspaket 5.2 „Integriertes Thermomanagement“

- Continental Automotive GmbH, D-93055 Regensburg (Leitung des Arbeitspakets)
- BMW AG, 80788 München
- Valeo Klimasysteme GmbH, D-96476 Bad Rodach
- REO ELEKTRONIK AG, D-42657 Solingen,
- ZAE Bayern

Lieferanten des ZAE Bayern

- Entropy Solutions, Inc., US-55441 Plymouth MN, [www.puretemp.com](http://www.puretemp.com), lieferte das im Projekt eingesetzte Phasenwechselmaterial.
- SGL CARBON, D-86400 Meitingen, [www.sglcarbon.de](http://www.sglcarbon.de), stellte das eingesetzte Graphit zu Verfügung
- Hydro Aluminium Precision Tubing Tønder a.s., DK-6270 Tønder, [www.hydro.com/precisiontubing](http://www.hydro.com/precisiontubing), stellte die für den Speicherbau eingesetzten Multiport-Extrusions zu Verfügung.
- Der CES Modelshop der Continental Automotive GmbH, D-61184 Karben, <http://www.continental-corporation.com>, überarbeitete die am ZAE Bayern erstellten CAD-Konstruktionen und fertigte die Funktionsmuster.

### 3.2 Zeit und Kostenplanung

Die geplante Laufzeit des Gesamtprojekts betrug 24 Monate. Das Projekt wurde kostenneutral um 13 % auf 27 Monate verlängert.

Die Kosten des Teilvorhabens waren mit 303.000,00 € kalkuliert, abgerechnet wurden 304.628,14 €, 0,5 % mehr als veranschlagt.

### 3.3 Arbeitsplan

Entsprechend der Aufgabenstellung aus Abschnitt 2.5 wurde das Teilvorhaben in 12 Teilarbeitspakete (TAP) gegliedert. Zusätzlich wurden zwei Meilensteine festgelegt, die entscheidende Zwischenergebnisse des Entwicklungsprozesses definieren.



TAP 1	Festlegung der Randbedingungen für LWS
TAP 2	Simulation
TAP 3	Suche nach möglichen PCM
TAP 4	Auswahl geeigneter PCM
TAP 5	Test und Vermessung des PCM
	Meilenstein 1: "Funktionsfähiges PCM"
TAP 6	Funktionskonzept für Speicher
TAP 7	Vorversuche Funktionskonzept
TAP 8	Auslegung Speicher
	Meilenstein 2: "Konzept Speicher"
TAP 9	Integriertes Funktionsmuster: Konstruktion
TAP 10	Integriertes Funktionsmuster: Bau
TAP 11	Integriertes Funktionsmuster: Test/Auswertung
TAP 12	Vehicle Prototype

Zu Beginn der Projektlaufzeit wurde das Ziel formuliert, möglichst früh mit den Tests des Integrierten Thermomanagements im realen Demonstrationsfahrzeug zu beginnen. Um dementsprechend schnell einen Speicher zu realisieren, der in das Fahrzeug integriert werden kann, wurde festgelegt, dass entgegen der ursprünglichen Planung schon das erste Funktionsmuster soweit möglich so entworfen und gebaut werden sollte, dass es den Anforderungen des Einbaus im Fahrzeug gerecht wird. Dementsprechend wurde das TAP 12 aufgelöst und die Arbeitsinhalte in die TAB 9 bis 11 integriert.

### 3.3.1 Meilenstein 1: "Funktionsfähiges PCM"

Die in der Teilvorhabensbeschreibung definierte Fragestellung des ersten Meilensteins lautet:

„Ist ein für die Anwendung funktionsfähiges Latentwärmespeichermaterial (PCM) identifiziert worden?“

Die Anforderungen der Funktionsfähigkeit sollten im TAP 1 definiert werden. Zum einen sollte die Schmelztemperatur des PCM um maximal 10 K von der geforderten Schmelztemperatur abweichen. Zum andern musste die minimal notwendige Speicherdichte erreicht werden. Zusätzlich sollte das Material ein reproduzierbares Phasenwechselverhalten zeigen.

### 3.3.2 Meilenstein 2: "Konzept Speicher"

Die zu diesem Meilenstein gehörende Fragestellung lautet:

„Ist ein umsetzbares Funktionskonzept für den Latentwärmespeicher vorhanden?“

Auch für diesen Meilenstein sind die im TAP 1 definierten Randbedingungen grundlegend. Das Funktionskonzept sollte zuverlässig die geforderte thermische Leistung und Speicherkapazität bereitstellen und die festgelegte Mindestanzahl an Ladezyklen ohne Funktions- und



Leistungseinschränkung überdauern. Zum einen bedeutete dies, dass das Speichermaterial zyklusstabil sein musste, zum anderen, dass keine irreversiblen Verformungen des Speichers durch Volumenänderungen des PCM während des Phasenwechsel auftreten durften.

Dieser Meilenstein fällt mit den Meilensteinen D und E der Gesamtvorhabensbeschreibung zusammen und stellte einen Abbruchmeilenstein nach der Hälfte der ursprünglichen Projektlaufzeit dar.

#### **4 TAP 1 Festlegung der Randbedingungen für den Latentwärmespeicher (LWS)**

Ziel dieses Arbeitspaketes war es, aus den Gegebenheiten und Anforderungen des Teilprojektes „Integriertes Funktionsmuster“ die Randbedingungen für die Entwicklung des Latentwärmespeichers abzuleiten. Zum einen sollten die Anforderungen an das Speichermaterial definiert werden, die Grundlage für die Auswahl der Materialkandidaten sein sollten. Zum anderen sollten die Randbedingungen für die Speicherkonstruktion bezüglich Funktionalität und Integrationsfähigkeit ermittelt werden. Konkret sollten die Speichertemperatur, die thermische Leistung und Kapazität des Speichers sowie die maximalen geometrischen Maße der Konstruktion festgelegt werden. Weiterhin sollten die Eigenschaften des Kühlmittelkreislaufs im Fahrzeug und die maximale Einsatztemperatur in Erfahrung gebracht werden.

Zu Beginn des Projektes wurden von den Projektpartnern zwei mögliche Temperaturbereiche für den Latentwärmespeicher diskutiert. Als Niedertemperatur wurde der Bereich 0 °C bis 20 °C, als Hochtemperatur der Bereich 50 °C bis 80 °C definiert. Im weiteren Projektverlauf wurden die Arbeiten auf die Niedertemperatur fokussiert und der Temperaturbereich auf Wunsch der Projektpartner auf 15 °C bis 25 °C korrigiert. Damit sollte der effiziente Einsatz der Wärmepumpentechnologie im Thermomanagement ermöglicht werden. Da im der Bauraum im Fahrzeug und damit die maximale Größe des Speichers die absolute Speicherkapazität stark begrenzt, wurde als eine der wichtigsten Eigenschaften des PCM eine möglichst hohe volumenbezogene Speicherdichte festgelegt. Da frühzeitig der Einsatz eines metallischen Werkstoffs beschlossen wurde, war eine notwendige weitere Eigenschaft des PCM eine gute Verträglichkeit mit dieser Materialklasse.

Ursprünglich war geplant, dass aus dem vom Projektpartner durchgeführten Simulationen des gesamten Thermomanagementsystems die optimale Kapazität und Leistungscharakteristik des Speichers abgeleitet wird. Im Projektverlauf wurde festgelegt, dass der Speicher in der Mulde für das Reifenflickset in Kofferraum des Versuchsfahrzeug platziert werden sollte. Daraus ergab sich eine starke Limitierung der Außenmaße des Speichers und damit der maximal erreichbaren Speicherkapazität. Konkret wurde aus der Bauraumplanung für den Speicher (inklusive Isolation) eine maximale Grundfläche von 130 mm x 460 mm ermittelt. Für die maximale Höhe des Speichers wurde auf 500 mm begrenzt. Aus diesen Randbedingungen wurde für die Entwicklung des Speichers das Ziel abgeleitet, den vorhandenen Bauraum möglichst vollständig auszunutzen und die sowohl die Kapazität als auch die Leistung zu maximieren.

Von den Projektpartnern wurde angegeben, dass alle Komponenten im Fahrzeug, also auch der Latentwärmespeicher, Temperaturen bis 90 °C standhalten müssen. Diese Anforderung musste also an alle Materialien des Speichers gestellt werden.

Für die Parameter des Fluidkreises wurden die Daten des ActiveE angenommen. Als Kühlmittel wurde ein 1:1-Mischung aus Wasser und Glysantin festgelegt. Für den Volumenstrom des Fluids wurden Werte zwischen 2 l/min und 16 l/min erwartet.



## 5 TAP 2 Simulation

Im Teilprojekt war eine Gesamtsystemsimulation des Integrierten Thermomanagements vorgesehen. Ziel dabei war unter anderem die Abstimmung der eingesetzten Komponenten und die Entwicklung von Betriebsstrategien. Vom ZAE Bayern sollte dazu ein numerisches Modell des Latentwärmespeichers beigesteuert werden. Um den Rechenaufwand der Systemsimulationen gering zu halten, sollte das Modell stark vereinfacht sein. Aus der Systemsimulation gewonnene Eckdaten zur optimalen Kapazität und Leistungscharakteristik des Speichers sollten in detaillierte thermische Einzelsimulationen der Komponente einfließen. Diese Simulationen nach der Finite-Differenzen- oder der Finite-Elemente-Methode sollten zur Auslegung des Speichers und Erarbeitung von Detaillösungen eingesetzt werden.

### 5.1 Systemsimulation

Die Gesamtsimulation des Integrierten Thermomanagementsystems wurde vom Projektpartner Conti mit Dymola durchgeführt. Diese kommerzielle Simulationsumgebung basiert auf der Modelliersprache Modelica. Das am ZAE Bayern entwickelte Speichermodell beruht auf den Erfahrungen mit Systemsimulationen in vorangegangenen Arbeiten. Die komplexe Geometrie des Speichers wurde stark vereinfacht und in einem 1D-Modell abgebildet. Da Systemsimulationen zum Teil schon vor der Auslegung des Speichers durchgeführt wurden, wurde das Modell nur grob parametrisiert. Die von Conti eingesetzten Dymola-Bibliotheken standen während der Projektlaufzeit am ZAE Bayern nicht zur Verfügung. Daher wurde das Modell von Conti vor Einbindung in die Gesamtsimulation entsprechend angepasst.

Die erste Version des Modells umfasste sowohl die Modellierung des Wärmeübergangs vom Fluid auf das PCM als auch die des thermischen Verhaltens des Speichermaterials. Das PCM im Speicher wird dabei als homogener Block betrachtet, der von einer von einer Seite beheizt oder gekühlt wird. Der Zusammenhang zwischen Energieinhalt und Temperatur des PCM wird in einer stetigen Funktion mathematisch beschrieben. Da das PCM als homogen angesehen wird, kann der aktuelle Zustand des Speichers über einen einzigen Temperaturwert angegeben werden. Die aktuell zwischen PCM und Wärmeträgerfluid übertragene Leistung wird über den Number-of-Transfer-Units-Ansatz aus den Fluidtemperaturen und der Speichertemperatur berechnet. Da die aktuell übertragene Leistung der Ableitung des Energieinhalts nach der Zeit entspricht, wird das Gleichungssystem durch eine Differential-algebraische Gleichung geschlossen.

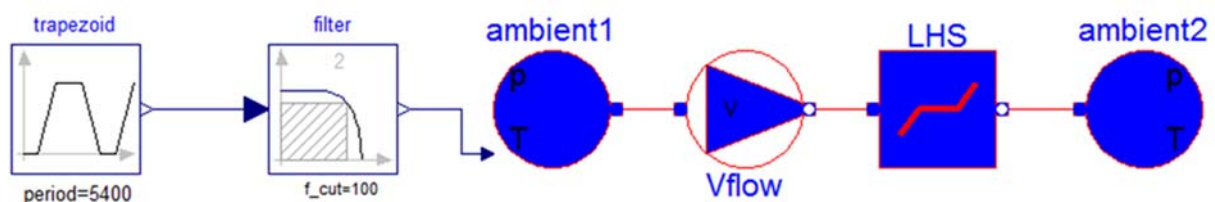


Abbildung 1: Erstes Modell des Latentwärmespeichers (LHS) in einem Test-Setting in Dymola

Im am ZAE Bayern aufgebauten Test-Setting (Abbildung 1) wurde das Modell erfolgreich getestet. Bei den Simulationen mit dem von Conti angepassten Modell kam es zu Problem. Daher wurde das Modell soweit vereinfacht, dass es nur noch die thermischen Eigenschaften des PCM abbildet. Die Enthalpiekurve des PCM, also der Zusammenhang zwischen Temperatur und Energieinhalt wird durch eine Arkustangens-Funktion angenähert. Der Speicher wird durch einen Satz von sechs

Parametern beschrieben. Über einen thermischen Widerstand wird das Modell an ein beheiztes Rohrelement gekoppelt. Der Widerstand und das Rohr können als vorgefertigte Komponenten den entsprechenden Bibliotheken entnommen werden. Das Rohrelement beinhaltet die Gleichungen für die Berechnung des Wärmeaustauschs mit dem Fluid. Der Widerstand beschreibt die Wärmeleitung zwischen dem Rohr und dem PCM.

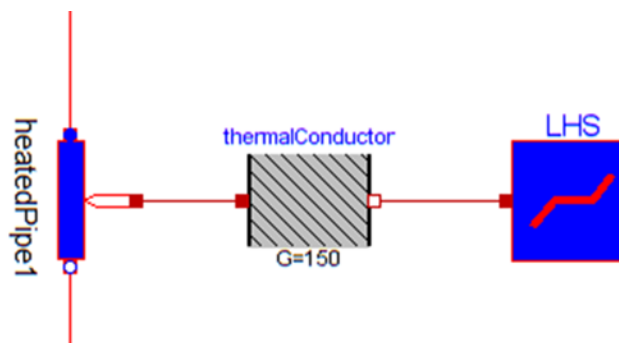


Abbildung 2: Einbindung des zweiten Modells in ein Test-Setting

Die zweite Version des Modells konnte erfolgreich in die Gesamtsimulation eingebunden werden. Im Verlauf der Simulationsarbeiten wurde festgestellt, dass im Vorfeld keine genauen Angaben zur benötigten Leistungsfähigkeit des Speichers abgeleitet werden konnten. Ursache dafür war vor allem, dass in diesem Zeitraum die möglichen Einsatzszenarien noch nicht festgelegt werden konnten. Für deren Definition waren genauere Untersuchungen des Gesamtsystems notwendig. Daher wurden nur grobe Vorgaben für den Speicher festgelegt, um sein Energieeinsparpotenzial demonstrieren und abschätzen zu können. Der Speicher kann in einer folgenden Produktentwicklung genauer an das System angepasst werden.

## 5.2 Thermische Komponentensimulation

Es wurden zwei Varianten der Komponentensimulation in Betracht gezogen. Die erste Variante sah Finite-Elemente-Simulationen mit dem Programm COMSOL Multiphysics vor. Die zu Projektbeginn aktuelle Programmversion enthielt keine dedizierte Methode für die Simulation des Fest-flüssig-Phasenwechsels. In der Literatur werden Ansätze beschrieben, bei denen die Aufnahme der Schmelzenthalpie durch eine Modifizierung der spezifischen Wärmekapazität des Materials modelliert wird. Dazu wird der  $c_p$ -Wert im Temperaturbereich um den Schmelzpunkt stark erhöht. Ein großer Nachteil dieses Verfahrens ist, dass bei ungünstiger Vorgabe von Raum- und Zeitauflösung der Simulation der  $c_p$ -Peak teilweise übersprungen wird. Dies kann zu großen Diskrepanzen in der globalen Energiebilanz des simulierten Problems führen.

COMSOL bietet viele Features, die das Erstellen und Auswerten von Physiksimulationen stark vereinfachen. Dazu gehören die graphische Benutzeroberfläche zum Erstellen von Geometrien und Rechennetzen sowie Tools zum schnellen Aufbereiten und Visualisieren der Ergebnisse. Um die Problem der oben beschriebenen  $c_p$ -Methode zu umgehen, wurde eine Implementierung der sogenannten Enthalpie-Methode in COMSOL realisiert. Bei dieser Methode wird die Differenzialgleichung, die den Wärmetransport beschreibt, nicht wie üblicherweise in Ableitungen der Temperatur sondern in Ableitung der Enthalpie beschrieben. Dies hat zur Folge, dass in COMSOL nicht eine bestehende Differenzialgleichung angepasst werden konnte, sondern vollständig

neue Gleichungen und Randbedingungen formuliert werden mussten. Die Implementierung der Methode lieferte vielversprechende und konsistente Ergebnisse. Allerdings zeigte sich, dass oft Probleme mit der Stabilität der Solver auftraten. Der zeitliche Aufwand, diese Probleme vollständig zu beseitigen, wurde als zu groß für den Projektrahmen eingeschätzt.

Die zweite im Projekt eingesetzte Variante der Komponentensimulation war eine Umsetzung der Finite-Differenzen-Methode in Matlab. In früheren Projekten wurden bereits ähnliche Simulationen am ZAE Bayern durchgeführt, so dass auf bestehendes Wissen und Routinen zurückgegriffen werden konnte. Anhand von Messdaten, zum Beispiel aus dem Projekt SolarHeatCool+PCM (FKZ 03296050), konnte die Simulationsmethodik validiert werden. Aus dem Vergleich der Mess- und Simulationsergebnisse wurde ersichtlich, dass besonders die Wahl des Wärmeübergangskoeffizienten zwischen dem Fluid und der Wärmeübertragerstruktur in der Simulation kritisch ist und im Vorfeld genauer Untersuchungen bedarf.

Kern der Simulationen ist die oben erwähnte Enthalpie-Methode. Da neben der Diskretisierung der Differenzialgleichung und der Randbedingungen sowie der Lösungsalgorithmen sämtliche Eingangsdaten (Geometrie / Rechenetz, Materialdatenmodelle, Startwerte,...) manuell programmiert werden müssen, ist der Bedien- und Anpassungsaufwand verglichen mit COMSOL sehr hoch. Generell ist daher mit dieser Methodik nur die Simulation vereinfachter Geometrien möglich. Dafür liefert sie stabile, physikalisch konsistente Lösungen und realitätsnahe Abbildung des PCM-Verhaltens. Da aufgrund der geschilderten Probleme der Einsatz von COMSOL für die Auslegungssimulationen nicht möglich war, wurde der Ansatz über die selbstprogrammierte Modellierung fortgeführt.

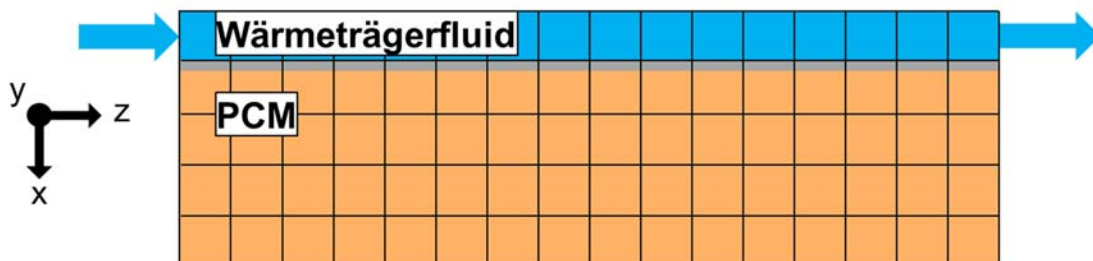


Abbildung 3: Vereinfachte Geometrie für die 2D-Simulation eines Latentwärmespeichers mit Plattenwärmeübertrager

Im Matlab-Modell wurde ein repräsentativer Ausschnitt eines Latentwärmespeichers mit Wärmeübertragerstruktur abgebildet. Der Wärmeübertrager wurde als Plattengeometrie angenommen. Eine ausführlichere Beschreibung der Speicherstruktur findet sich in Abschnitt 9. In Abbildung 3 ist die Geometrie schematisch dargestellt. Das PCM bildet einen Quader, der auf allen Seiten thermisch isoliert ist. Lediglich auf einer Seite steht er über die Wand des Plattenwärmeübertragers mit dem Wärmeträgerfluid in thermischen Kontakt. Das Fluid strömt in z-Richtung am PCM vorbei. Da sich die Struktur in y-Richtung nicht verändert und der Speicher an den x-z-Flächen als ideal isoliert betrachtet wird, kann die Geometrie auf ein 2D-Problem in x und z reduziert werden. Über die Geometrie wird ein orthogonales Rechengitter gelegt. Wie in Abbildung 3 angedeutet, wird das Fluid nur in z-Richtung unterteilt. Die Wärmeübertragerwand ist sehr dünn und hat eine vergleichsweise hohe Wärmeleitfähigkeit. Ihre Speicherfähigkeit und ihr thermischer Widerstand sind vernachlässigbar gering und werden in der Simulation nicht berücksichtigt.



Beim eingesetzten Finite-Differenzen-Verfahren wird vereinfachend angenommen, dass der Mittelpunkt einer Zelle des Rechengitters die Eigenschaften und Zustände des Materials der gesamten Zelle repräsentiert. Der momentane Wärmestrom zwischen den Zellen wird dann aus den jeweiligen Temperaturdifferenzen und thermischen Widerständen berechnet. Im Hauptprogramm der Simulation werden für jeden Zeitschritt folgenden Schritte durchgeführt:

1. Berechnung der Wärmeströme zwischen den Zellen aus den Temperaturdifferenzen
2. Änderung der Enthalpiewerte der Zellen entsprechend der im aktuellen Zeitschritt übertragenen Wärmemengen
3. Berechnung der Temperaturen der Zellen im nächsten Zeitschritt aus den aktualisierten Enthalpiewerten

Nach jedem Zeitschritt wird das Fluid dem vorgegebenen Volumenstrom und der Zellengröße entsprechend in Strömungsrichtung verschoben. Das Modell bietet die Möglichkeit, Zeitreihen für die Eintrittstemperatur des Fluids vorzugeben. So können Simulationen mit real gemessenen Randbedingungen durchgeführt werden, was eine verbesserte Vergleichbarkeit von Simulations- und Versuchsergebnissen ermöglicht. Das Modell wurde um eine rudimentäre Abbildung von Wasserkästen oder Sammlerstrukturen sowie Zu- und Ablaufschläuchen erweitert. Desweiteren kann die thermische Masse der Behälterkonstruktion berücksichtigt werden.

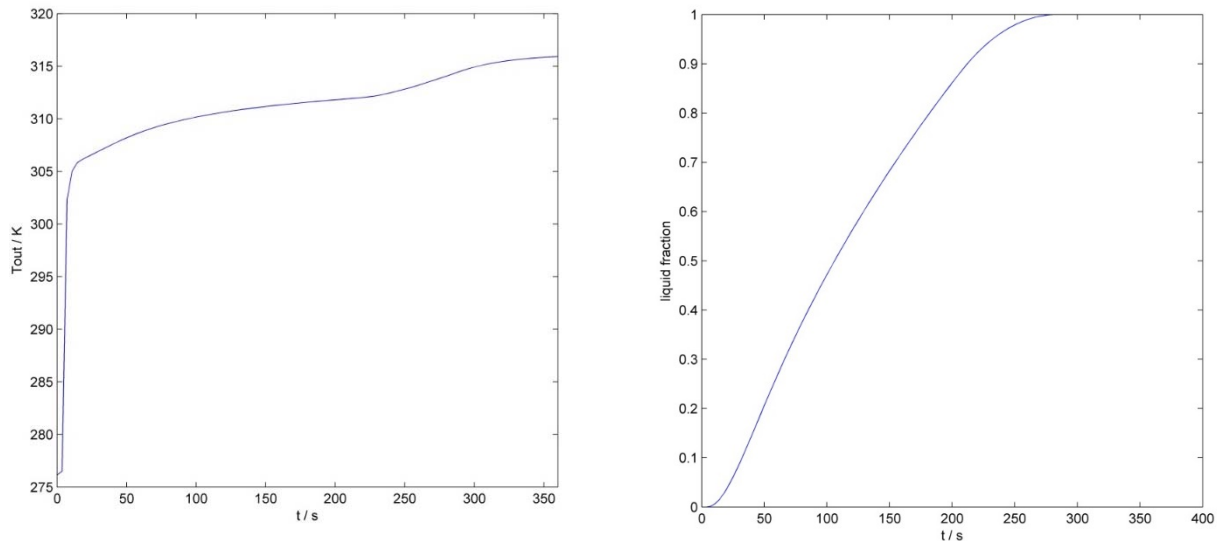


Abbildung 4: Typische Simulationsergebnisse für den Verlauf der Fluid-Austrittstemperatur (links) und des Anteils geschmolzenen PCMs (rechts) für einen Schmelzvorgang

Für die thermische Auslegung des Speichers wurden nur Varianten der in Abbildung 3 dargestellte vereinfachte Geometrie von PCM und dem Fluid im Wärmeübertrager simuliert. Bei diesen Simulationen wurde die Starttemperatur für die gesamte Geometrie auf den selben Startwert gesetzt. Die Eintrittstemperatur des Fluids wurde im ersten Zeitschritt auf einen davon abweichenden Wert gesetzt und dann nicht mehr verändert. In der Abbildung 4 sind exemplarische Ergebnisse für Simulationen von Schmelzvorgängen dargestellt. Die Austrittstemperatur steigt zu Beginn der Simulation stark an. Dieser Effekt rührt von der Tatsache her, dass das kühle Fluid, das sich anfangs im Speicher befindet, durch das wärmere aus dem Speicher verdrängt wird. Sobald das warme Fluid

den Auslass erreicht hat, verläuft der Temperaturanstieg wesentlich flacher und flacht auch weiter ab. In diesem Zeitabschnitt der Simulation findet der Hauptteil des Phasenwechsels im PCM statt. Sobald das PCM nahezu vollständig aufgeschmolzen ist (vgl. Abbildung rechts) steigt die Austrittstemperatur kurzzeitig wieder stärker an und nähert sich dann asymptotisch dem Endwert an. Da die thermische Leistung des Speichers bei konstanten Massenstrom proportional zu Differenz zwischen Ein- und Austrittstemperatur ist und die Eintrittstemperatur konstant gehalten wird, hat die Leistungskurve den gleichen Verlauf wie die der Austrittstemperatur.

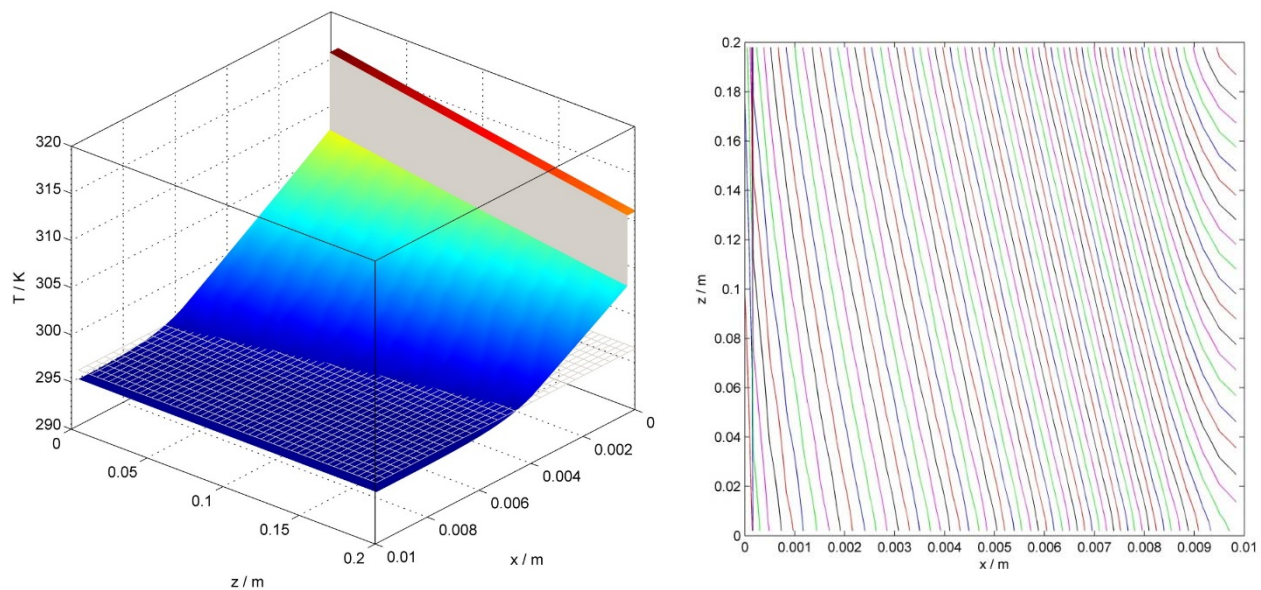


Abbildung 5: Links: Temperaturverteilung in Fluid und PCM zu einem Zeitpunkt während des Schmelzvorgangs. Die transparente Ebene markiert die nominelle Schmelztemperatur des PCM. Rechts: Verlauf der Phasenfront im PCM für verschiedene Zeitschritte

Für jeden Zeitschritt können die Temperatur- und Enthalpieverteilungen in der gesamten simulierten Geometrie ausgegeben werden. Daraus lassen sich Position und Verlauf der Phasengrenze ermitteln. In Abbildung 5 links entspricht die aktuelle Phasengrenze der Schnittkurve zwischen der Temperaturfläche und der Schmelztemperaturebene.

Das Modell wurde primär für die thermische Auslegung und Leistungsdimensionierung des Speichers eingesetzt. Im weiteren Verlauf wurden Vergleichssimulationen zu den Messungen am Teststand durchgeführt. Ziel dabei war, das Modell zu validieren und zu optimieren. So wurde das Modell um die Möglichkeit erweitert, die Sammlerstrukturen mit zu berücksichtigen. Dadurch können Rückvermischungseffekte mit abgebildet werden, die in realen Speichern den Verlauf der Austrittstemperatur mit beeinflussen. Der Werkstoff des Speichers trägt mit seiner Wärmekapazität zur Speicherkapazität bei. Dieser Beitrag wurde im optimierten Modell ebenfalls berücksichtigt.



## 6 TAP 3: Suche nach möglichen PCM

### 6.1 Ziel

Als Basis für die Auswahl des im Speicher eingesetzten PCM sollte eine Datenbank der Materialien mit einer Phasenwechseltemperatur im unter TAP 1 definierten Temperaturbereich erstellt werden. In einer umfassenden Recherche sollten die entsprechenden auf dem Markt verfügbaren PCM zusammengetragen werden. Zusätzlich sollte in Materialdatenbanken und in der Fachliteratur nach weiteren Materialien gesucht werden, die von ihren Eigenschaften her für den Einsatz im Projekt geeignet sind.

### 6.2 Ergebnisse

Wie in Abschnitt 4 beschrieben, wurden zu Beginn des Projektes zwei mögliche Bereiche für die Speichertemperatur festgelegt. Dementsprechend wurde je eine Liste mit Materialien mit einer Schmelztemperatur zwischen 0 °C und 20 °C und zwischen 50 °C und 80 °C erstellt. Für den niedrigen Temperaturbereich wurden 57 kommerziell erhältliche PCM und 58 weitere Materialien gefunden. Für den hohen Temperaturbereich wurden 73 kommerzielle und 76 weitere Materialien gefunden.

Für jedes Material in den Listen wurden neben der Schmelztemperatur, soweit verfügbar, weitere Daten für die spätere Bewertung zusammengestellt:

- Die Schmelzenthalpie eines PCM begrenzt maßgeblich die maximale Speicherkapazität, die bei Einsatz in einem Latentwärmespeicher erzielt werden kann.
- Die Materialklasse eines PCM liefert Hinweise auf weitere Stoffeigenschaften. Besonders wichtig ist diese Information bei Materialien, für die wenige Daten verfügbar sind. Hierbei wird zwischen den beiden großen Hauptklassen organischer und anorganischer Materialien unterschieden.
- Über die Dichte kann die gewichtsbezogenen in die volumenbezogene Schmelzenthalpie umgerechnet werden. Besonders bei der Speicherauslegung für Applikationen, bei denen der Bauraum begrenzt ist, ist die Information über die volumenbezogene Enthalpie wichtig.
- Die Wärmeleitfähigkeit eines PCM hat einen starken Einfluss auf die thermische Leistung.
- Die Wärmekapazität im festen sowie im flüssigen Zustand gibt an, wieviel Energie im Material bei Temperaturen außerhalb des Schmelzbereichs gespeichert werden kann.
- Die maximale Einsatztemperatur eines PCM begrenzt die Anwendungsmöglichkeiten. Grund für einen beschränkten Einsatztemperaturbereich kann zum Beispiel das Auftreten thermischer Zersetzung sein.
- Daten zu Gesundheits- und Umweltgefährdung liefern frühzeitig Informationen zur Einschränkung der Einsatzbereiche von PCM.



AK	T <sub>m</sub> /°C	T <sub>min</sub>	T <sub>max</sub>	Δh/J·g <sup>-1</sup>	Δh <sub>res,q</sub> /J·g <sup>-1</sup>	Δh/kJ·l <sup>-1</sup>	Δh <sub>res,q</sub> /kJ·l <sup>-1</sup>	Kategorie	Unterkategorie	Material	Formel	Hersteller	ρ <sub>fest</sub> /kg·l <sup>-1</sup>
43	15,8			221,5				organisch	Mischung	Octadecan Hexadecan 75/25			
44	20,1			252				organisch	Alkan	Octadecan	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>16</sub> CH <sub>3</sub>		
45	19,2			207				organisch	Alkan	Tech Grade Octadecan	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>16</sub> CH <sub>3</sub>		
46	13,4			129				organisch	Alken	1,2-Octadecen	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>14</sub> CH=CH <sub>2</sub>		
47	18			198,7				organisch	Zuckeralkohol	Glycerin	HOCH <sub>2</sub> CH(OH)CH <sub>2</sub> OH		
48	15,2			202				organisch	Aldehyd	Octanal	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>14</sub> CHO		
49	11			205				organisch	Alkohol	1-Decanol	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>9</sub> OH		
50	7							organisch	Alkohol	Decanol	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>9</sub> OH		
51	15							organisch	Alkohol	Undecanol	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>10</sub> OH		
52	17,5			188,5		156		organisch	Alkohol	Dodecanol	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>11</sub> OH		
53	8			247				organisch	Carbonsäure	Methansäure (Ameisensäure)	HCOOH		
54	17			187				organisch	Carbonsäure	Ethansäure (Essigsäure)	CH <sub>3</sub> CO <sub>2</sub> H		
55	16,5			148		134		organisch	Carbonsäure	Octansäure (Caprylsäure)	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>7</sub> COOH		0,981
56	12,5							organisch	Carbonsäure	Nonansäure (Pelargonsäure)	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>8</sub> COOH		
57	13,5 - 16,3							organisch	Carbonsäure	cis-9-Octadecensäure (Ölsäure)	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>7</sub> CH=CH(CH <sub>2</sub> ) <sub>7</sub> COOH		
58	19,1			132				organisch	Mischung	Caprin-, Laurinsäure 61,5/38,5%			
59	4			129,6						Witco 85010-1		Witco	
60	12,3			197,3						Witco K-51		Witco	
61	15,6			153						Witco 45A 85010-150/50		Witco	
62	19,8			199,8						Witco K-61		Witco	
63	7	0	15	126		177		Salzhydrat		ClimSel C7		Climator	1,4
64	10,5	0	15	126		180		Salzhydrat		ClimSel C10		Climator	1,4
65	3			225				organisch		A3		EPS Ltd.	
66	4			227				organisch		A4		EPS Ltd.	
67	7			120				organisch		E7		EPS Ltd.	
68	8			140				organisch		E8		EPS Ltd.	
69	8			220				organisch		A8		EPS Ltd.	
70	10			140				organisch		E10		EPS Ltd.	

Abbildung 6: Auszug aus der Liste der Materialien mit Schmelztemperaturen im Bereich 0 °C - 20 °C

Aufgrund der Vielzahl der gefundenen Materialien ist in Abbildung 6 nur ein exemplarischer Auszug der im Bereich 0 °C – 20 °C gefundenen Materialien dargestellt.

Der im weiteren Projektverlauf endgültig festgelegte Bereich für die Schmelztemperatur des PCM war 15 – 25 °C. Für diesen Bereich würden vorrangig kommerziell verfügbare Materialien in Betracht gezogen.

## 7 TAP 4: Auswahl geeigneter PCM

Auf Basis der in TAP 3 zusammengetragenen Daten sollten die gefundenen Materialien bewertet und die vielversprechendsten Kandidaten identifiziert werden. Materialien, die als gesundheits- oder stark umweltgefährdend eingestuft werden, wurden von vornherein ausgeschlossen, da die Gefahr der mechanischen Beschädigung des Speichers und des Austritts von PCM bei automobilen Anwendungen besonders hoch ist.

Als mögliche Werkstoffe für die Konstruktion des Speichergehäuses und des internen Wärmeübertragers wurde frühzeitig Aluminium oder Edelstrahl festgelegt. Salzhydrate, die größte Gruppe der anorganischen PCM, zeigen meist eine starke Korrosivität gegenüber diesen Metallen. Eine weitere negative Eigenschaft der Materialien dieser Klasse ist die oft sehr ausgeprägte Unterkühlungsneigung. Da die in der Recherche gefundenen anorganischen PCM keine deutlich höhere Speicherkapazität erwarten lassen rechtfertigen die Nachteile den mit deren Einsatz verbundenen Aufwand nicht.

Im Temperaturbereich 15 °C bis 25 °C wurden gute kommerzielle PCM gefunden. Kein Kandidat aus den weiteren Materialien ließ signifikant bessere Eigenschaften bei einfacherer Anwendung erwarten. Dauer wurden in der Auswahl nur gut verfügbare kommerzielle PCM berücksichtigt.

Als Ergebnis des Bewertungsprozesses konnten insgesamt neun organische PCM von zwei Herstellern als Kandidaten für den Einsatz im Speicher bzw. die Untersuchung und Charakterisierung am ZAE Bayern identifiziert werden. Von Entropie Solutions Inc., USA, wurden die Produkte PureTemp15, 18, 20, 23, 24 und 25 ausgewählt. Die Zahl im Produktnamen steht dabei für den nominellen Schmelzpunkt in Grad Celsius. Diese PCM sind laut Herstellerangaben Derivate von



Fettsäuren aus regenerativen Quellen. Die Produkte des zweiten Herstellers, Rubitherm Technologies GmbH, sind Paraffine und deren Mischungen. Ausgewählt wurden die Produkte RT18HC, RT21, RT22HC und RT25HC. Die Zahl im Produktnamen gibt hier ebenfalls die ungefähre Schmelztemperatur des Materials an. Das Kürzel HC weist auf eine im Vergleich mit den übrigen Produkten hohe Speicherkapazität (engl.: high capacity) hin. Dabei handelt es sich um sehr reine n-Alkane mit nur einer Länge der Ketten. Da die Produktion reiner Alkan aufwändig ist, ist für die Materialien ein vergleichsweise hoher Preis zu erwarten.

## 8 TAP 5: Test und Vermessung des PCM

### 8.1 Ziel

Die PCM, die in der Recherche und Bewertung in TAP 3 und 4 als Kandidaten für den Einsatz im Speicher ausgewählt wurden, sollten am ZAE Bayern untersucht und charakterisiert werden. Als Ergebnis der Untersuchungen sollte das Material, das für die Anwendung unter den betrachteten Gesichtspunkten am besten geeignet ist, identifiziert werden. Bei thermischen Vermessungen sollten die spezifischen Schmelzenthalpien und Schmelztemperaturen bestimmt werden. Für die Umrechnung der gemessenen, massebezogenen Enthalpie in eine volumenbezogene Enthalpie muss die Dichte des Materials bestimmt werden. Weitere Materialeigenschaften, die im Labor untersucht werden sollten, sind thermische Zyklusstabilität, Unterkühlungsneigung und Korrosionsverhalten.

Einige dieser Materialdaten werden herstellereitig angegeben oder lassen sich in der Fachliteratur finden. Um eine einheitliche Datenbasis bei Bewertung der Kandidaten zu haben, wurden diese Größen ebenfalls am ZAE Bayern nachgemessen.

### 8.2 Methodik

#### 8.2.1 DSC-Messungen

Die DSC-Methode (Differential Scanning Calorimetry) ist eine häufig eingesetzte Methode zur Bestimmung der Phasenwechselenthalpie und des Schmelztemperaturbereichs von PCM. Zur Vermessung der Materialkandidaten wurde ein Wärmestrom-DSC-Instrument Q2000 der Firma TA Instruments eingesetzt. Bei den Messungen wurden eloxierte Aluminiumtiegel mit einem Volumen von etwa 40  $\mu\text{l}$  eingesetzt, die nach dem Einfüllen der jeweiligen Probe hermetisch verschlossen wurden. Die Messzelle wurde kontinuierlich mit einem Stickstoffstrom von 50 ml/min gespült. Mit der Präzisionswaage XS 205 DU von Mettler-Toledo wurde die eingefüllte Probenmasse mit einer Genauigkeit von 0,01 mg bestimmt.

Das DSC-Instrument wurde mit Indium kalibriert und die Genauigkeit der Kalibration mit weiteren Messungen validiert. Die Temperaturkalibration wurde mit Gallium, Biphenyl und destilliertem Wasser überprüft, wobei die Abweichung der Messerwerte von den Literaturwerten kleiner als der geforderte Grenzwert  $\delta T = 0,1 \text{ K}$  war. Die Enthalpiekalibration wurde ebenfalls mit destilliertem Wasser validiert. Hierbei lag die Abweichung wiederum unterhalb des Grenzwertes ( $\delta \Delta h < 1 \%$ ). Aufgrund der langjährigen Erfahrung der Arbeitsgruppe und der Teilnahme unter anderem am DSC-Ringtest im Rahmen von IEA SHC Task 42 / ECES Annex 24 kann bei den Messungen der Enthalpie von einer Genauigkeit von kleiner  $\pm 5 \%$  ausgegangen werden.

Für die Auswertung und Darstellung der Messergebnisse wurde jeweils der zweite Heiz- und Kühlzyklus verwendet.





## 8.2.2 T-History-Messungen

Neben dem DSC-Instrument wurde ein T-History-Kalorimeter zur thermischen Vermessung der PCM eingesetzt. Das Gerät ist ein Eigenbau des ZAE Bayern, das Messungen mit Probengrößen von etwa 15 ml erlaubt. Die Kalibrierung erfolgte mit destilliertem Wasser und Kupfer.

Da die Proben gegenüber dem DSC um etwa den Faktor 1000 größer sind, lassen sich mit dem T-History-Gerät Messungen unter Bedingungen, die wesentlich näher an denen der geplanten Anwendung sind, durchführen. Das Auftreten volumenabhängiger Phänomene, wie Unterkühlung oder Phasenseparation, kann anhand der Messergebnisse wesentlich besser abgeschätzt werden. Dementsprechend unterscheiden sich die Enthalpiekurven aus DSC- und T-History-Messungen in ihrem Verlauf. Die absoluten gemessenen Enthalpiewerte sollten bei beiden Verfahren allerdings dieselben sein, vorausgesetzt die Proben nehmen beim Erstarren in beiden Geräten denselben Zustand ein.

## 8.2.3 Dichtemessungen

Die Dichte der PCM wurde sowohl im flüssigen als auch im festen Zustand gemessen. Für die Bestimmung der Dichte im flüssigen Zustand wurde ein Dichtemessgerät DMA 4500M von der Firma Anton Paar eingesetzt. Das Gerät wurde mit Luft und hochreinem Wasser kalibriert. Die Genauigkeit der Dichtemessung liegt bei  $\delta\rho = 0,00006 \text{ g/cm}^3$ . Die Temperatur, bei der die Dichte bestimmt wird, wird einer Genauigkeit von  $\delta T = 0,04 \text{ K}$  gemessen. Um ein Erstarren der Probe im Gerät zu vermeiden, wurden die Flüssigdichten bei Temperaturen von mehreren Kelvin über der nominellen Schmelztemperatur der jeweiligen Probe gemessen.

Für die Messung der Dichte im festen Zustand wurde die oben erwähnte Präzisionswaage XS 205 DU mit einem passenden Dichtebestimmungskit von Mettler-Toledo eingesetzt. Bei dem eingesetzten Messverfahren wird die das Gewicht des Probenkörpers in Luft und in einer Hilfsflüssigkeit bestimmt. Die Gewichts Differenz entspricht der Masse der beim Eintauchen verdrängten Flüssigkeit. Mit der bekannten Dichte der Flüssigkeit kann dann das verdrängte Volumen berechnet werden. Aus dem Volumen und dem Gewicht der Probe in Luft kann dann die gesuchte Dichte bestimmt werden.

Bei allen im Projekt durchgeführten Messungen wurde als Hilfsflüssigkeit destilliertes Wasser eingesetzt. Die Temperatur des Wasserbads wurde bei der Berechnung der Dichte berücksichtigt.

## 8.2.4 Korrosionsuntersuchungen

Die Korrosivität der PCM gegenüber den potenziellen Werkstoffen für das Speichergehäuse und die Wärmeübertragerstruktur wurde in Langzeitversuchen (Dauer etwa 100 Tage) untersucht. Als Probenkörper wurden Zuschnitte aus VA-1.4301 (Edelstahl) und Alu 99,5 (Reinaluminium) mit einer Masse von ca. 6 g bzw. 2 g verwendet. Die Proben wurden vor Versuchsbeginn in einem Ultraschallbad gereinigt und gewogen. Jede Probe wurde in ein mit PCM gefülltes Schnappdeckelglas gegeben. Die Gläser wurden wiederum verschlossen in ein Zentrifugenröhrchen mit Schraubverschluss gegeben, um das Eindringen von Wasser zu vermeiden. Die Proben wurden während der Versuchsdauer in einem Wasserbad auf 80 °C temperiert.

Nach dem Ende der Versuchsdauer wurden die Proben vorsichtig gereinigt und erneut gewogen. Aus der Änderung der Masse und der Oberfläche der Probe wurden die flächenbezogenen Korrosionsraten der verschiedenen PCM-Werkstoff-Kombinationen bestimmt.



## 8.2.5 Zyklisierung

Die Zyklusstabilität von PCM bei hohen Zyklenzahlen werden am ZAE Bayern mit einem DSC-Instrument DSC 204 Phoenix der Firma Netzsch untersucht. Dabei wird eine PCM-Probe von etwa 10 mg einige hundert Mal aufgeschmolzen und kristallisiert. Für jeden Schmelzvorgang werden die Enthalpieänderung der Probe in einem definierten Temperaturintervall sowie die Onset-Temperatur des Schmelzbereiches bestimmt. Für die Zyklisierungen im Rahmen des Projektes wurde für die Enthalpiebestimmung der Temperaurebereich 10 – 35 °C gewählt. Aus den Ergebnissen der Zykliversuche lassen sich Veränderungen der thermischen Eigenschaften bei wiederholtem Aufschmelzen und Kristallisieren des Materials ablesen. Für die Anwendung relevante Veränderungen wären eine Abnahme der Enthalpie und ein Absinken oder Ansteigen der Schmelztemperatur (repräsentiert durch die Onset-Temperatur).

Um die Auswirkungen wiederholter Phasenwechsel auf Proben mit anwendungsrelevantem Volumen untersuchen zu können, wurde am ZAE Bayern eine spezielle Zyklisierapparatur entwickelt. Auf Grund des mit 60 ml im Vergleich zum DSC wesentlich größeren Probenvolumens ist auch die Zeitdauer, die für einen Zyklus benötigt wird, erhöht. Im Allgemeinen ist die Anzahl der pro Probe durchgeführten Zyklenzahlen geringer, als bei DSC-Zyklisierungen. Die Zyklisierapparatur bietet die Möglichkeit, während der Zyklisierung den zeitlichen Temperaturverlauf an verschiedene Stellen im PCM zu messen und aufzuzeichnen. Veränderungen der thermischen Eigenschaften des Materials lassen sich durch Vergleichen dieser Verläufe aus verschiedenen Zyklen erkennen. Während und nach der Zyklisierung können kleine Proben des Materials aus der Apparatur entnommen und im DSC vermessen werden. Durch Vergleichen der Enthalpiekurven mit denen des Ausgangsmaterials lassen sich etwaige Veränderungen der Eigenschaften genauer charakterisieren.

## 8.3 Ergebnisse

### 8.3.1 Eigenschaften des Phasenwechsels

In Abbildung 7 sind die im DSC mit einer Heiz- bzw. Kühlrate von 2 K/min gemessenen Enthalpiekurven der PCM-Kandidaten des Herstellers PureTemp dargestellt. Alle Kurven wurden so normiert, dass sie bei 35 °C den Wert 0 J/g annehmen. Für die Normierung wird ein Wert im flüssigen Bereich gewählt, da der flüssige Zustand weniger von der thermischen Vorgeschichte abhängt, als ein fester Zustand. Der flüssige Zustand ist deshalb besser reproduzierbar. Die im Temperaturbereich 5 – 35 °C gespeicherte Enthalpie liegt für alle Materialien außer PureTemp23 zwischen 230 und 250 J/g. PureTemp23 weist in Übereinstimmung mit den Herstellerangaben mit 280 J/g eine deutlich höhere Enthalpie auf. Die Schmelz- bzw. Erstarrungsbereiche der Materialien sind vergleichsweise schmal. Die Heizkurve von PureTemp23 zeigt einen Knick bei etwa 21 °C, der auf einen zweistufigen Schmelzvorgang hinweist. Auch die Kühlkurve von PureTemp23 weist eine Unstetigkeit auf, die die Vermutung eines zweistufigen Phasenwechsels bestätigt. Alle Materialien zeigen eine leichte Unterkühlungsneigung. Die gemessenen Kristallisationstemperaturen liegen maximal 6 K unter der jeweiligen nominellen Schmelztemperatur.

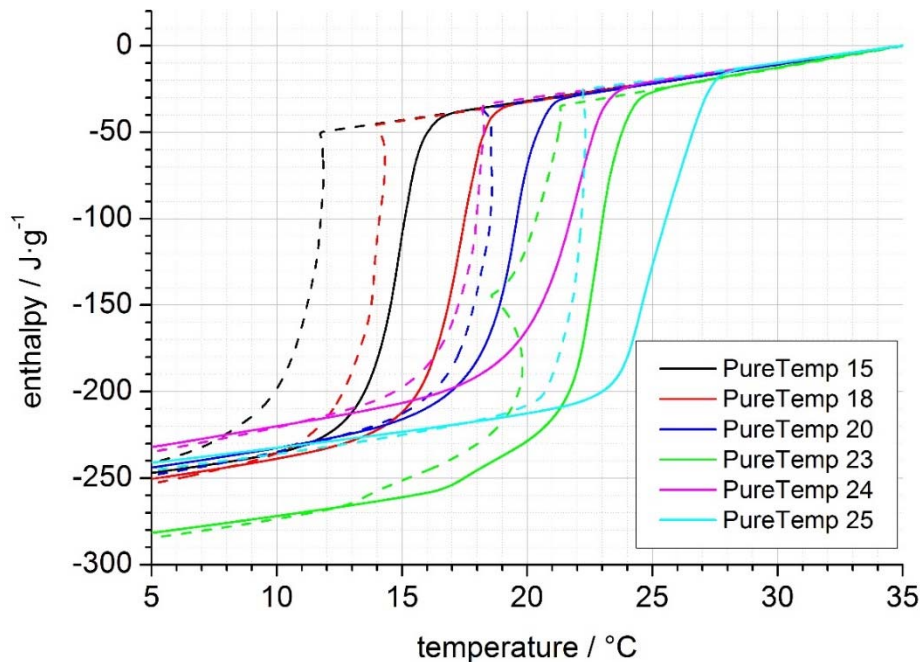


Abbildung 7: Enthalpiekurven der DSC-Messungen für die PCM-Kandidaten des Herstellers Entropy Solutions

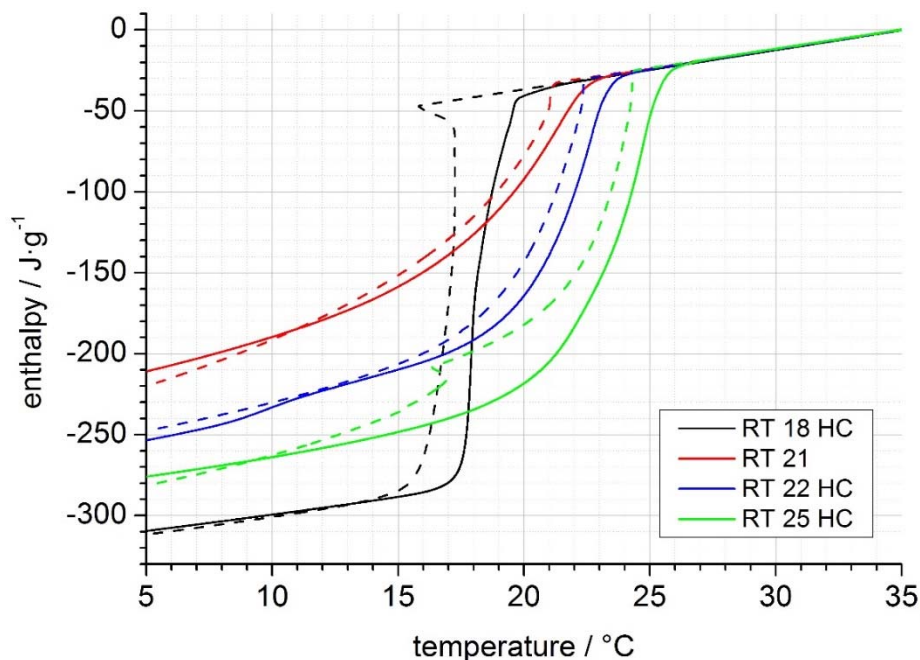


Abbildung 8: Enthalpiekurven der DSC-Messungen für die PCM-Kandidaten des Herstellers Rubitherm

Die spezifische Dichte der PureTemp-Materialien wird vom Hersteller mit 0,86 kg/l angegeben. Einer Ausnahme stellt wiederum PureTemp23 dar, für das eine Dichte von 0,83 kg/l angegeben wird. Trotz der geringeren Dichte ergibt sich für PureTemp23 mit 230 kJ/l auch die höchste volumenbezogene Enthalpieänderung im Bereich 5 – 35  $^{\circ}\text{C}$  unter den PureTemp-Kandidaten.

Die im DSC gemessenen Enthalpiekurven der ausgewählten Rubitherm-Produkte sind in Abbildung 8 dargestellt. Die Materialien mit Schmelztemperaturen ab 21  $^{\circ}\text{C}$  zeigen einem mit der Schmelztemperatur zunehmende Enthalpie im Bereich 5 – 35  $^{\circ}\text{C}$  (RT21: 210 J/g, RT22HC: 250 J/g,



RT25HC: 280 J/g). Die Schmelzbereiche dieser Materialien sind relativ breit. Die Unterkühlungsneigung ist sehr gering, sodass Heiz- und Kühlkurven kaum voneinander abweichen. Für RT18HC wurde mit 310 J/g unter allen PCM-Kandidaten die höchste Enthalpie im Bereich 5 – 35 °C gemessen. Der gemessene Schmelzbereich dieses Materials ist sehr schmal und die Unterkühlungsneigung vergleichsweise gering. Die Enthalpiekurve von RT18HC zeigt eine sehr große Übereinstimmung mit der von Hexadecan (siehe Diagramm im Anhang 20A). Da laut Herstellerangaben die RT-Produkte Alkane und deren Mischungen sind, kann davon ausgegangen werden, dass es sich bei RT18HC um sehr reines Hexadecan handelt.

Für RT18HC ergibt sich mit einer vom Hersteller mit 0,77 kg/l angegebenen spezifischen Dichte eine volumenbezogene Enthalpie im Bereich 5 - 35 °C von etwa 240 kJ/l. Der nächst höherer Wert unter den Rubitherm-Kandidaten errechnet sich mit 216 kJ/l für RT25HC (Dichte 0,77 kg/l).

Aus den Ergebnissen zur gewichts- sowie volumenbezogenen Enthalpie lassen sich PureTemp23 und RT18HC als Favoriten für den Einsatz im Speicher identifizieren. Nach Rücksprache mit den Projektpartnern wurde PureTemp23 auf Grund der um 5 K höheren Schmelztemperatur als bevorzugtes Material festgelegt, dass in weiteren Tests untersucht werden sollte.

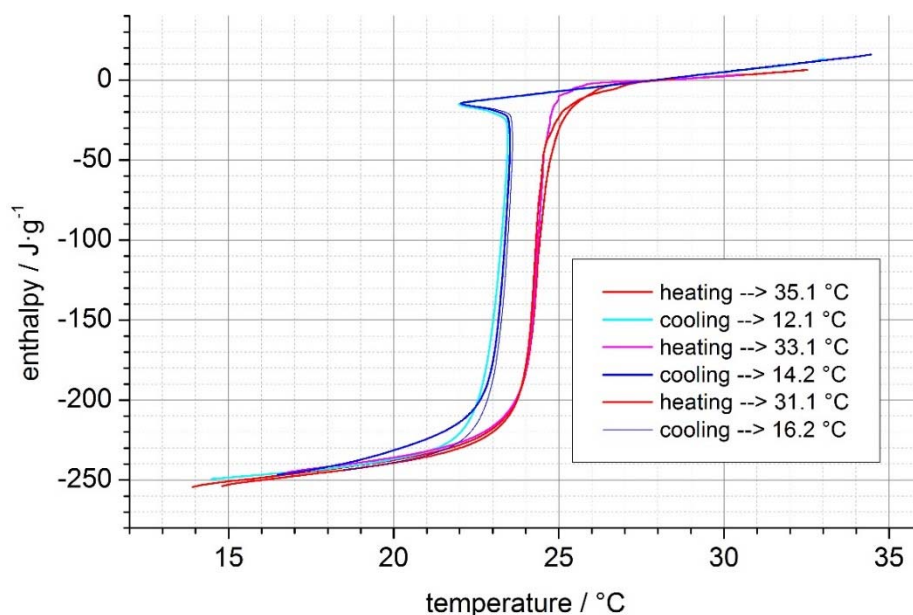


Abbildung 9: Enthalpiekurven für PureTemp23 aus T-History-Messungen

Um weitere Informationen über das Phasenwechselverhalten von PureTemp23 zu erhalten wurden T-History-Messungen durchgeführt. Die dabei bestimmte Enthalpiekurve ist in Abbildung 9 dargestellt. Das Material zeigt wie bei der DSC-Messung eine leichte Unterkühlungsneigung. Allerdings ist der Schmelzbereich wesentlich schmäler und der Unterschied zwischen den Heiz- und Kühlkurven geringer. Weder Heiz- noch Kühlkurven lassen einen Zweistufigkeit des Phasenwechsels erkennen. Diese Beobachtungen lassen sich auf das wesentlich größere Probenvolumen bei T-History-Messungen zurückführen. Daraus lässt sich ableiten, dass die im DSC beobachteten Effekte beim Einsatz des Materials in einem Speicher nicht oder nur stark abgeschwächt auftreten werden und keine Einschränkung der Funktionalität bewirken.

### 8.3.2 Dichtemessungen

Die gemessenen Dichten der untersuchten Materialien im festen Zustand sind in Tabelle 1 wiedergegeben

Tabelle 1: Gemessene Dichten im festen Zustand

	PureTemp15	PureTemp18*	PureTemp20*	PureTemp23*	PureTemp24*	PureTemp25*	RT22HC*	RT25HC
$T / ^\circ\text{C}$	6,95	7,0	7,4	7,5	8,0	23	19,4	19,2
$\rho / \text{kg/l}$	0,92	0,92	0,90	0,89	0,88	0,93	0,775	0,79

\*: Mittelwert aus den Ergebnissen zweier Messungen

Die Dichte im flüssigen Zustand wurde bei verschiedenen Temperaturen bestimmt. Die gemessenen Werte für PureTemp-Materialien sind in Abbildung 10 und für Rubitherm-Materialien in Abbildung 11 dargestellt.

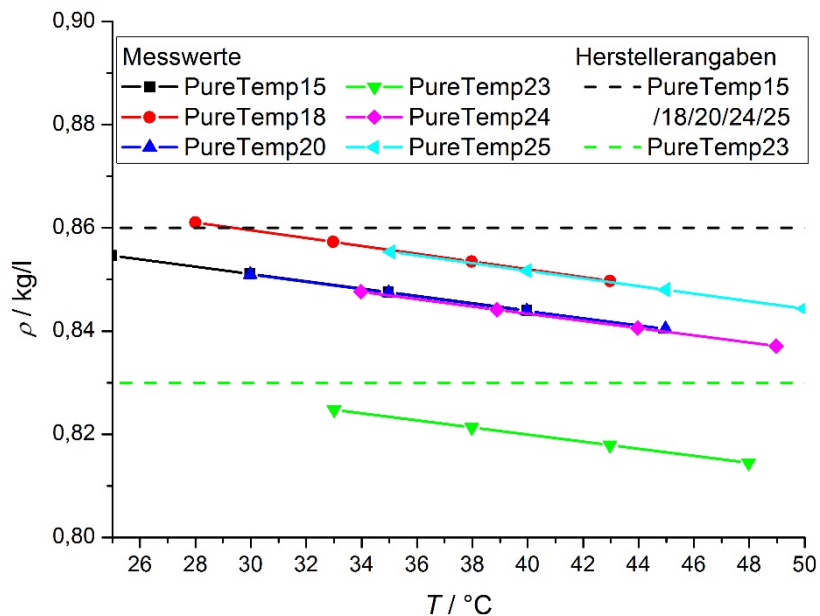


Abbildung 10: Gemessene Dichten im flüssigen Zustand für PureTemp-Produkte

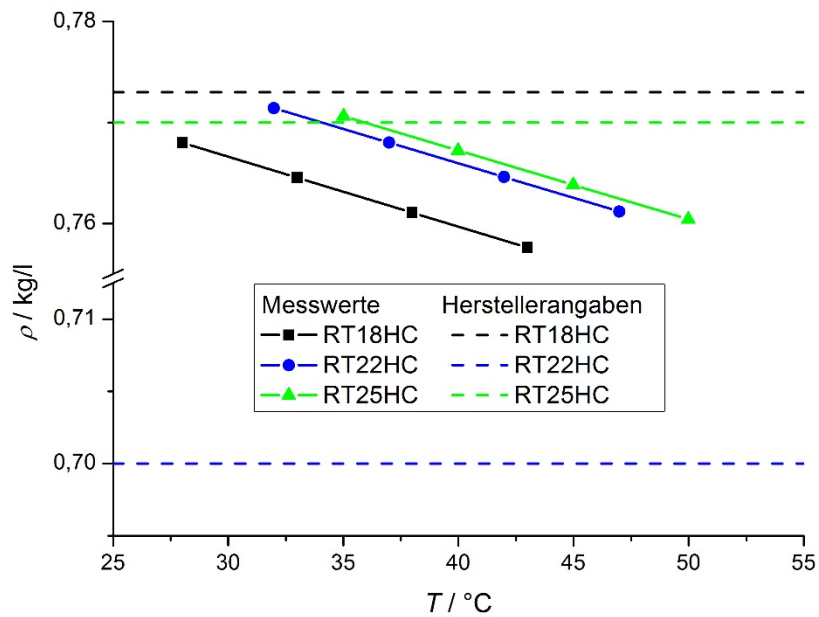


Abbildung 11: Gemessene Dichten im flüssigen Zustand ausgewählter Rubitherm-Produkte

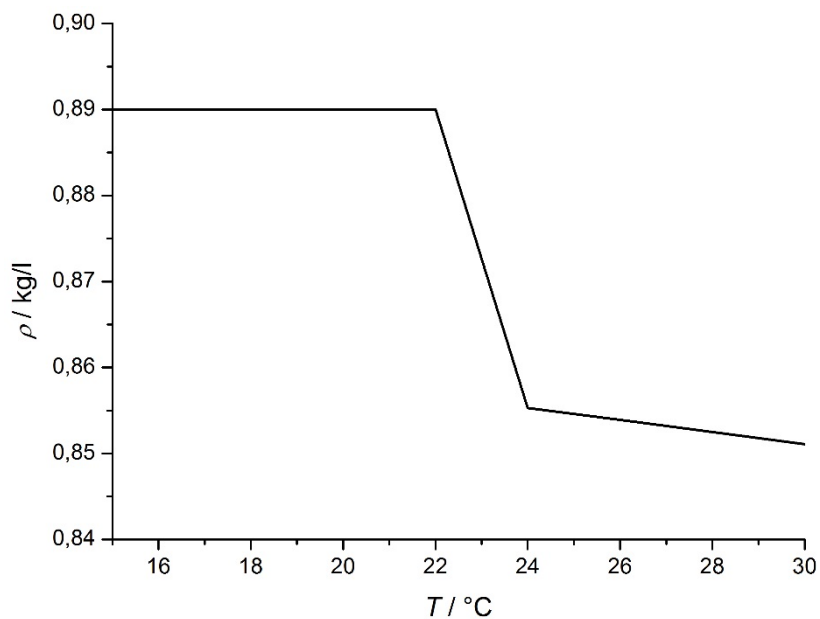


Abbildung 12: Idealisierter Verlauf der Dichte von PureTemp23

In Abbildung 12 ist der idealisierte Verlauf der Dichte von PureTemp23 dargestellt, der aus den oben vorgestellten Messwerten abgeleitet werden kann. Wird das feste PCM aufgeschmolzen und auf 30 °C erwärmt, steigt sein Volumen nach diesem Verlauf um 4,6 %.

### 8.3.3 Korrosionsuntersuchungen

Bei Paraffinen kann davon ausgegangen werden, dass keine Korrosivität gegenüber metallischen Werkstoffen besteht. Daher wurden die Korrosionsversuche nur mit PureTemp-Materialien durchgeführt. Neben dem als Favorit identifizierten PureTemp23 wurde die Korrosivität von PureTemp20 untersucht. In Tabelle 2 sind die gemessenen Korrosionsraten für die vier untersuchten



Materialkombinationen zusammengestellt. Die Werte sind Mittelwerte der Ergebnisse für jeweils drei Proben.

Tabelle 2: Ergebnisse der Korrosionsversuche nach etwa 100 Tagen. Negative Werte entsprechen einer Massenzunahme der Metallprobe.

Metallprobe	VA-1.4301		Alu 99,5		
	PCM	PureTemp20	PureTemp23	PureTemp20	PureTemp23
CR / g/(m <sup>2</sup> ·d)		0,0073	-0,0020	-0,2598	-0,0014
CR / mg/(cm <sup>2</sup> ·y)		0,265	-0,073	-9,482	-0,052

Bei allen Metallproben, die in PureTemp23 getestet wurden, wurde eine Gewichtszunahme gemessen. Die Gewichtsänderungen sind allerdings sehr gering, so dass davon ausgegangen werden kann, dass eine sehr gute Materialverträglichkeit zwischen PureTemp23 und VA-1.4301 sowie Alu 99,5 ausgegangen werden kann. Bei den VA-1.4301-Proben in PureTemp20 konnte eine leichte Gewichtsabnahme festgestellt werden, die aber keine starke Korrosivität bei dieser Materialkombination erkennen lässt. Die Aluminiumproben, die in PureTemp20 gegeben wurden, waren am Ende der Versuchsdauer vollständig mit einer matt weißen Schicht überzogen. Die vergleichsweise starke Gewichtszunahme der Metallproben weist darauf hin, dass es sich bei der Schicht um eine Ablagerung aus dem PCM handelt. Durch Reinigung in einem Ultraschallbad konnte die Schicht allerdings nicht vollständig entfernt werden.

Die Korrosionsversuche zeigen, dass der Favorit PureTemp23 für den Einsatz mit den Werkstoffen Edelstahl und Aluminium gut geeignet ist. Die Veränderungen der Proben in PureTemp20 konnten im Rahmen des Projektes nicht weiter untersucht werden.

#### 8.3.4 Zyklisierung

Das favorisierte Material PureTemp23 wurde im Netzsch-DSC über 300 mal zyklisiert. Aus der Abbildung 13 lässt sich ablesen, dass sich über die Versuchsdauer die Onset-Temperatur, die als signifikanter Wert des Schmelzvorgangs betrachtet wird, nicht verändert. Bei der Enthalpieänderung ist ein minimaler abnehmender Trend zu erkennen. Allerdings ist der Betrag, um den die Regressionsgerade bis zum letzten Messpunkt abnimmt, geringer als die Genauigkeit der Enthalpiebestimmung.

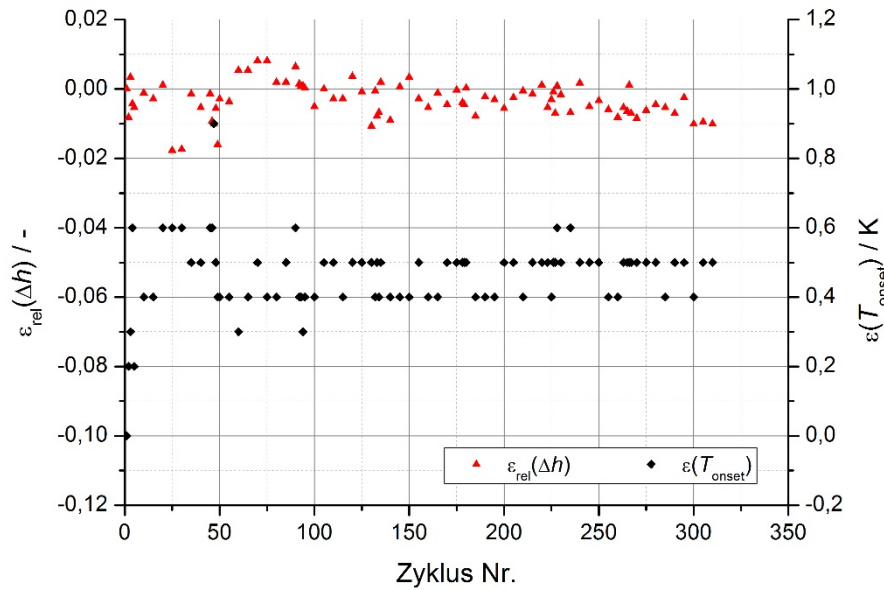


Abbildung 13: Ergebnisse der Zyklisierung von PureTemp23 im DSC-Instrument

Es ist zu beachten, dass das DSC-Gerät vor dem Zyklerversuch nicht kalibriert wurde, so dass nur eine Aussage über die relative Änderung der Größen gemacht werden kann. Da das Ziel dieses Versuchs lediglich die Bestimmung der Stabilität des Materials war, ist die Aussagekraft der Ergebnisse ausreichend.

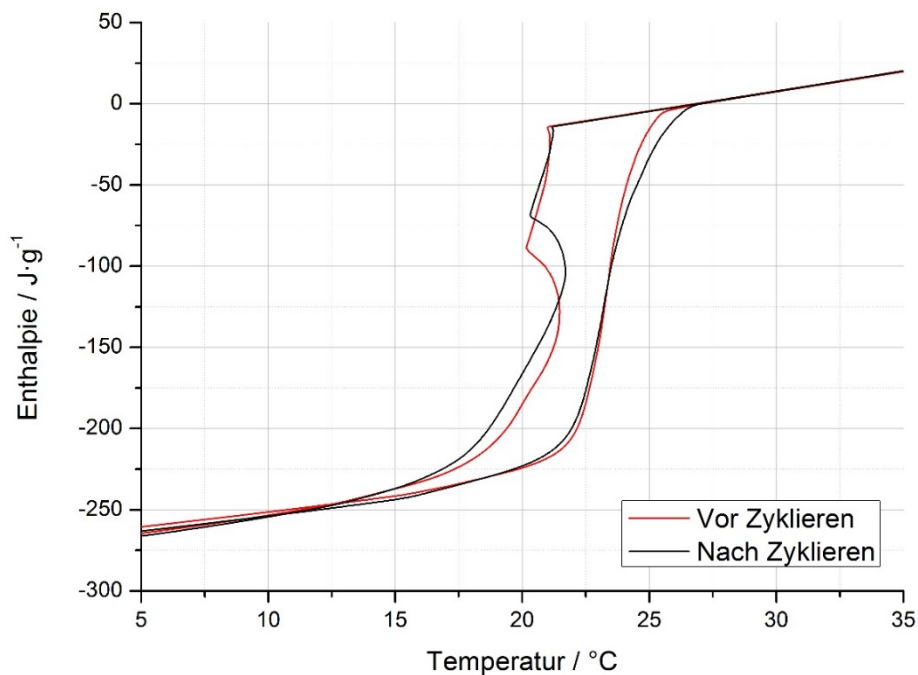


Abbildung 14: Enthalpiekurven von PureTemp23 aus DSC-Messungen vor und nach dem Zyklisieren in der Zyklierapparatur

In der Zyklierapparatur mit einem Probenvolumen von etwa 60 ml wurde PureTemp23 etwa 100 mal zwischen 3 °C und 43 °C zyklert. In Abbildung 14 sind die Enthalpiekurven von PureTemp23 aus DSC-Messungen vor und nach der Zyklierung dargestellt. Der Verlauf der Kurven sowie die absolute Enthalpieänderungen sind nach der Zyklierung annähernd unverändert. Die Zyklierung hat also keine Veränderung der relevanten thermischen Eigenschaften des Materials hervorgerufen.

## 9 TAP 6: Funktionskonzept für den Speicher

Latentwärmespeicher können als Direktkontakt-, Slurry-, Kapsel,- oder Wärmeübertrager-Systeme ausgeführt werden. Bei Direktkontaktsystemen kommt das PCM mit dem Wärmeübertragungsfluid in Berührung, was die Gefahr mit sich bringt, dass PCM aus dem Speicher ausgetragen wird. Das Risiko, dass weitere Komponenten im Fluidkreis mit PCM verunreinigt werden, kann bei Automotive-Anwendungen nicht eingegangen werden. Eine ähnliche Problematik ergibt sich bei Slurry-Systemen, bei denen das PCM gleichzeitig als Wärmeträgerfluid fungiert. Hierbei besteht die Gefahr, dass sich Feststoff an ungünstigen Stellen im System ablagert und z. B. eine Verstopfung der Verrohrung bewirkt. Die ersten beiden Varianten müssen also beim derzeitigen Forschungsstand für die Anwendung im Projekt ausgeschlossen werden. Kapsel-Systeme haben im Allgemeinen aufgrund des hohen Anteils an Verkapselungsmaterial geringe Speicherdichten. Zusätzlich besteht auch hier die Gefahr, dass durch Versagen einer der Kapseln, das komplette Fluidsystem mit PCM kontaminiert wird. Folglich wurde für den Speicher das Wärmeübertragerprinzip gewählt. Der Speicher wird dabei als PCM gefüllter Behälter konstruiert, in den eine Wärmeübertragerstruktur integriert ist. Über die Übertragungsflächen der Struktur wird Wärme vom Fluid auf das PCM (oder umgekehrt) übertragen.

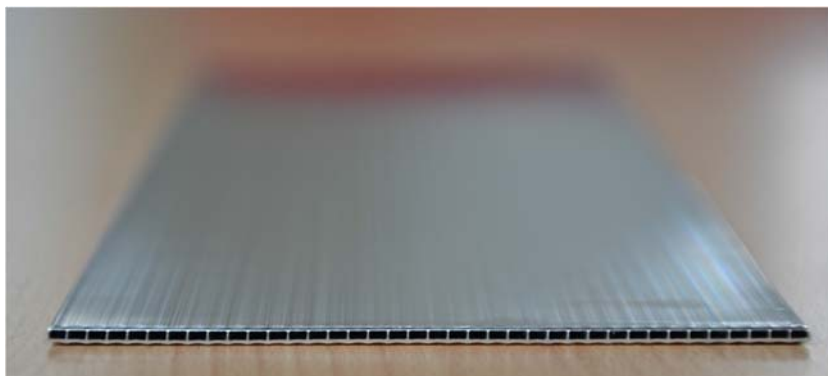


Abbildung 15: Multiport-Extrusion des Herstellers Hydro Aluminium Precision Tubing Tønder a.s.

Das entwickelte Funktionskonzept sieht für die Wärmeübertragung eine Konstruktion aus sogenannten Multiport-Extrusions (MPE, vgl. Abbildung 15) vor. Diese Aluminiumprofile bestehen aus mehreren nebeneinander angeordneten Einzelkanälen, die das Wärmeträgerfluid durch das PCM führen. Aufgrund der geringen Wandstärken und der großen Gesamtoberfläche lässt sich mit MPE ein guter Wärmeübergang und damit die Übertragung hoher thermischer Leistung zwischen den Medien realisieren. Im Funktionsmuster unterteilen die Profile den PCM-Behälter in mehrere hermetisch geschlossene Kammern (vgl. Abbildung 16). Das PCM in den Kammern steht so über je zwei Wände mit dem Fluid in thermischen Kontakt. Eine Ausnahme stellen die Kammern an den Rändern der Konstruktion dar. Um einen möglichst gleichmäßigen Phasenwechsel in gesamten Speicher



realisieren zu können werden die Randkammern nur halb so breit wie die restlichen Kammern ausgeführt.

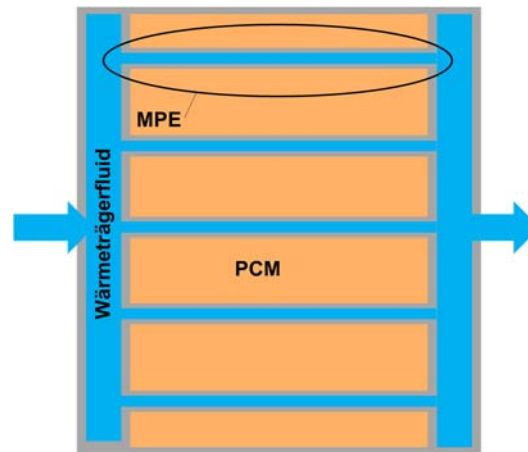


Abbildung 16: Schematische Darstellung der Speicherkonstruktion mit Multiport-Extrusions

Im PCM-Raum werden Luftkammern vorgesehen. Die Volumenänderung des PCM beim Phasenwechsel kann dann durch die Komprimierung der Luftpolster ausgeglichen werden, so dass der Innendruck des Speichers nicht im kritischen Maß ansteigt.

Idealisiert steigt der Druck in den Kammern ausgehend von einem vollständig entladenen Speicher linear oder zumindest monoton mit dem Anteil des aufgeschmolzenen PCM. Dieser Anteil ist wiederum ein Maß für den Ladezustand des Speichers sein. Theoretisch ist es also möglich, über den Speicherinnendruck den Ladezustand zu bestimmen. Das Funktionskonzept beinhaltet eine solche Ladezustandsbestimmung über Druckmessung.

In Abschnitt 7 wurde festgelegt, dass ein organisches PCM im Speicher zum Einsatz kommt. Im Allgemeinen weisen diese Materialien eine geringe Wärmeleitfähigkeit (Größenordnung  $0,2 \text{ W/(m K)}$ ) auf. Die thermische Leistung eines Latentwärmespeichers hängt, vor allem im teilladenen Zustand, stark von der Wärmeleitfähigkeit des Speichermaterials ab. Um die Leitfähigkeit organischer Materialien zu verbessern, kann ihnen ein gut wärmeleitendes Material zugegeben werden. Das entwickelte Funktionskonzept sieht vor, dass aus dem PCM und Graphitpulver ein Compound erstellt wird.

## 10 TAP 7: Vorversuche Funktionskonzept

### 10.1 Compoundierung

Teil der Vorversuche zum Funktionskonzept des Speichers war die Bestimmung des optimalen Verhältnisses von PureTemp23 und Graphit. Wird der Graphitanteil zu klein gewählt, bildet sich aufgrund der unterschiedlichen spezifischen Dichten der Komponenten über dem Compound eine Schicht aus reinem PCM. Im Speicher würde dies dazu führen, dass Teile des PCM thermisch nur sehr schlecht an das Fluid angekoppelt sind und der Phasenwechsel nicht homogen abläuft. Ein zu hoher Graphitanteil führt dazu, dass Teile des Graphits nicht mit PCM in Berührung sind. Das überschüssige Graphit trägt dann nicht zu einer Steigerung der thermischen Leistung bei und reduziert



den latenten Anteil der Speicherkapazität. Um das optimale Verhältnis zu bestimmen, wurden zunächst einige unterschiedliche Mischungen hergestellt. Davon ausgehend wurde das Verhältnis iterativ solange angepasst, bis sich gerade keine Schicht reinen PCMs über dem Compound ausbildete. Der so bestimmte ideale Graphitanteil beträgt 14 Gew.-%. Das verwendete Graphitpulver war Thermophit200 von SGL Carbon, das eine mittlere Korngröße von etwa 200  $\mu\text{m}$  besitzt.

Die Wärmeleitfähigkeiten des reinen PCM sowie des Compounds wurden mit einem ISOMET 2104 Heat Transfer Analyzer der Firma Applied Precision bestimmt. Im festen Zustand konnte eine Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit von etwa 0,2 auf 1,4 $^{\circ}\text{W}/(\text{m K})$  gemessen werden. Für das aufgeschmolzene Compound wurde ein mittlerer Wert von 2,8  $\text{W}/(\text{m K})$  gemessen.

Um Auswirkungen der Graphitzugabe auf die Materialeigenschaften (außer der Wärmeleitfähigkeit) ausschließen zu können, wurden die Versuche aus Abschnitt 8 mit dem Compound wiederholt. Bei der Präparation der DSC-Proben war es aufgrund der relativ großen Graphitpartikel schwierig, repräsentative Proben der Mischung zu erhalten. Im Mittel wurde eine gegenüber dem reinen PCM um 14,2 % reduzierte Schmelzenthalpie gemessen. Die Reduzierung entspricht etwa dem Graphitanteil. Die Schmelzenthalpie des PCM wird also nicht beeinträchtigt.

Zur Bewertung der Zyklusstabilität des Compounds wurden die aufgezeichneten Messsignale eines Temperatursensors der Zyklierapparatur verwendet. Der Sensor war bei den Messungen im PCM platziert, so dass er einen charakteristischen Temperaturverlauf im Material während eines Zyklus wiedergab. Dieser Verlauf wurde nach verschiedenen Zyklenzahlen mit dem des ersten Zyklus verglichen. Auch nach 140 Zyklen ergab sich keine Veränderung des Verlaufs, so dass das Compound im relevanten Temperaturbereich als zyklusstabil eingestuft werden kann. Auf eine zusätzliche Zyklierung im DSC-Gerät wurde verzichtet.

Für die Korrosionsuntersuchungen wurden analog zum beschriebenen Verfahren mit reinem PCM je drei Aluminium- und Edelstahlproben in das Compound gegeben und temperiert. Nach etwa 130 Tagen Versuchsdauer wurde für die Kombination Compound-Aluminium eine mittlere Korrosionsrate von 0,0004  $\text{g}/(\text{m}^2 \text{d})$  oder 0,014  $\text{mg}/(\text{cm}^2 \text{y})$  gemessen. Für die Kombination Compound-Edelstahl ergab sich ein Wert von 0,0001  $\text{g}/(\text{m}^2 \text{d})$  oder 0,003  $\text{mg}/(\text{cm}^2 \text{y})$ . Die Werte sind ähnlich klein wie die von reinem PureTemp23. Die Compoundierung hat also kaum Auswirkungen auf die Materialverträglichkeit des PCM.

Die Viskosität des aufgeschmolzenen Compounds war so groß, dass kein Proben im DMA 4500M appliziert werden konnten. Auch die für die Dichtebestimmung mittels Senkkörper war die Viskosität zu hoch, so dass die Messung der Dichte im aufgeschmolzenen Zustand nicht möglich war. Für das feste Compound wurde mit dem Dichtebestimmungskit der Präzisionswaage XS 205 DU eine Dichte von 0,999  $\text{kg}/\text{l}$  gemessen.

## 10.2 Vorversuche für die Ladezustandsbestimmung

Für die Vorversuche zur Bestimmung des Ladezustands über den Innendruck des Speichers wurde ein einfacher Versuchsaufbau erstellt. Dazu wurde ein hermetisch verschlossener zylindrischer Probenbehälter mit einem Durchmesser von 5 cm und einer Höhe von 20 cm aus Edelstahl gefertigt. In eine Bohrung in der Oberseite des Behälters konnte ein Drucksensor eingeschraubt werden. In den Behälter wurden etwa 276 g des Compounds gefüllt. Im festen Zustand nahm das Material etwa 70 % des Volumens des Zylinders ein. Nach dem Befüllen wurde der Behälter aufrecht in ein temperierbares Wasserbad gestellt und mit dem Drucksensor verschlossen, so dass der Druck im



Luftvolumen über dem Compound gemessen werden konnte. Je ein Temperatursensor wurde an der Außenwand des Behälters und frei im Wasserbad positioniert.

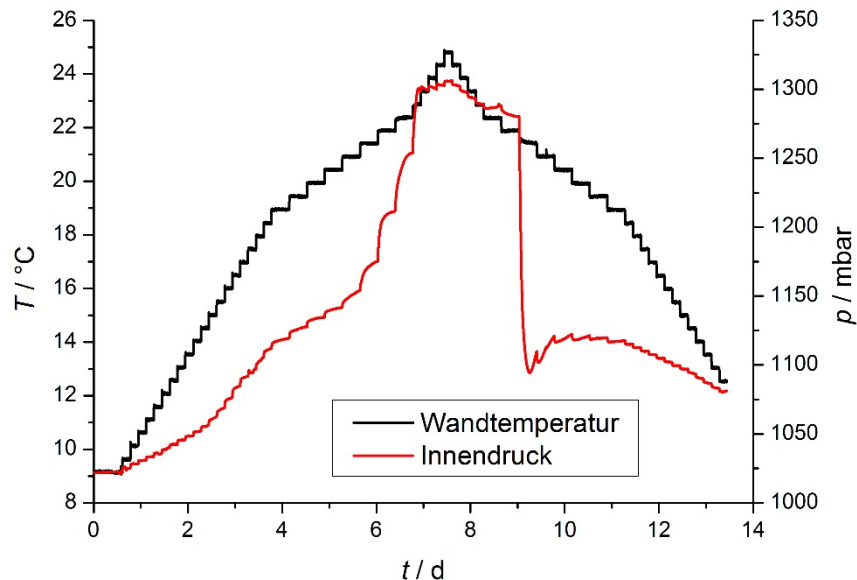


Abbildung 17: Temperatur- und Druckverlauf des Langzeitversuchs zur Ladezustandsbestimmung

In ersten Versuchen wurde das Wasserbad schrittweise erwärmt und abgekühlt. Dabei stellte sich heraus, dass es nach bestimmten Temperatursprüngen sehr lange dauerte, bis sich ein konstanter Innendruck einstellte. Daher wurde ein Langzeitversuch gestartet, bei dem die Temperatur in 0,5 K-Schritten von 9 °C auf 25 °C erhöht und wieder auf 12,5 °C abgesenkt wurde. Nach jedem Schritt wurde die Temperatur für vier, im Bereich zwischen 19 °C und 22,5 °C sogar für neun Stunden gehalten. Daraus ergab sich eine Messdauer von fast 14 Tagen.

In Abbildung 17 sind die Verläufe der Temperatur und des Drucks dargestellt. Aus dieser Auftragsung wird vor allem ersichtlich, dass die Druckänderung im Bereich der Schmelztemperatur vergleichsweise hoch ist. Beim Heizen verteilt sich der starke Druckanstieg auf mehrere Temperaurschritte. Der Großteil der Druckabnahme beim Kühlen findet im Schritt von 21,5 °C auf 21 °C statt. In diesem Schritt erstarrt das offensichtlich. Auffällig ist, dass nach diesem Schritt der Druck wieder ansteigt und erst ab etwa 19 °C wieder abnimmt. Zu erwarten wäre, dass sich das Volumen des PCM nach dem Erstarren weiter Reduziert und, der Druck weiter abnimmt. Offensichtlich beginnt aber ein zweiter Vorgang, das Volumen des PCM wieder ansteigen lässt. Dieser Vorgang dominiert die Druckkurve für etwa zwei Tage. Erst danach nimmt der Druck in vergleichbaren Maß ab, wie er beim Heizen im gleichen Temperaturbereich zunimmt.

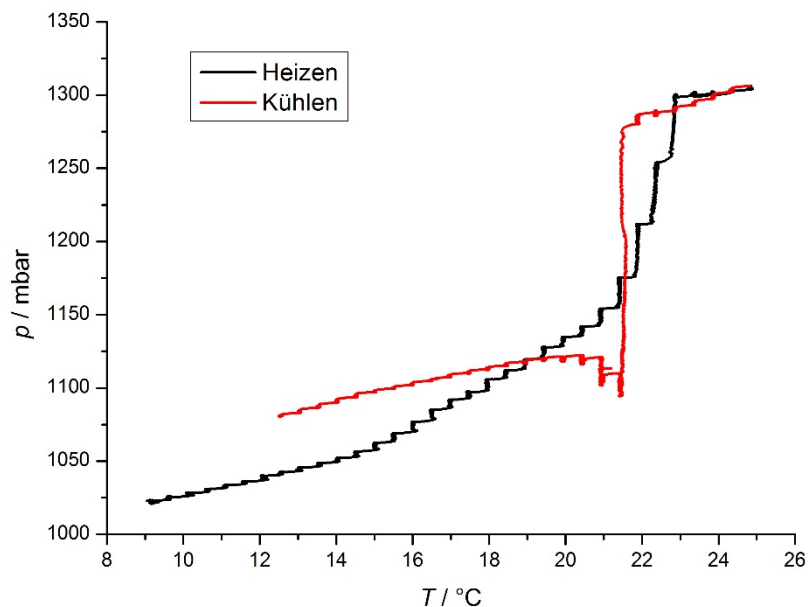


Abbildung 18: Innendruck im Testbehälter aufgetragen über der Wandtemperatur für die Heiz- und Kühlphase des Langzeitversuchs

In Abbildung 18 wird der Unterschied zwischen den Druckverläufen beim Heizen und Kühlen noch deutlicher. Beim Heizen können vier verschiedene Abschnitte unterschieden werden. Bei niedrigen und hohen Temperaturen nimmt der Druck vergleichsweise wenig mit der Temperatur zu, zwischen etwa 15 °C und 21 °C ist der Druckanstieg stärker. Ab 21 °C bis 23 °C ist der Druckanstieg am stärksten. Beim Kühlen ist die Druckänderung bei hohen Temperaturen ebenfalls nur schwach. Der sehr große Druckabfall während des Schritts von 22 °C auf 21,5 °C sowie der darauf folgende Anstieg sind auch in dieser Auftragung gut erkennbar.

Aus den Ergebnissen der DSC-Messungen des reinen PureTemp23 wurde der Schluss gezogen, dass der Phasenwechsel des Materials sowohl beim Schmelzen als auch beim Erstarren zweistufig abläuft (vgl. Abschnitt 8.3.2). Die Ergebnisse der Druckmessungen bestätigen diese Schlussfolgerung. Beim Heizen nimmt das Volumen schon ab 15 °C zu. Dies deutet auf eine Veränderung der molekularen Struktur, z.B. Umkristallisierung, des Feststoffes hin. Die starke Druckabnahme beim Kühlen erfolgt etwa 1 K unterhalb der nominellen Schmelztemperatur, was die Beobachtung einer leichten Unterkühlungsneigung des Materials bestätigt. Nach dem Schritt auf 21,5 °C sollte sich das gesamte Material im festen Zustand befinden. Dass sich das PCM trotz weiterer Reduzierung der Temperatur wieder ausdehnt, weist wiederum darauf hin, dass zwei verschiedene Konfigurationen des Materials im festen Zustand existieren. Weiter Untersuchungen zur Kristallstruktur des Materials waren im Rahmen des Projekts aufgrund der begrenzten Zeit und finanzieller Mittel nicht möglich.

Für die Bewertung des Ansatzes, den Ladezustand (State Of Charge, SOC) des Speichers aus dem Innendruck zu bestimmen, wurden nur die Daten der Heizphase des Langzeitversuchs verwendet. Wegen dem nicht monotonen Verlaufs des Drucks über der Temperatur waren die Werte aus der Kühlphase nicht verwendbar.

Ein Vergleich der Druckkurve mit der Enthalpiekurve aus der DSC-Messung zeigt, dass der größte Teil der Energie in den beiden mittleren Temperaturabschnitten gespeichert wird. Der einfachste Ansatz, den Ladezustand aus dem Innendruck des Speichers abzuschätzen, wäre, die in diesem

Bereich speicherbare Energie als Kapazität des Speichers zu definieren. Unter der Annahme, dass der Speicher bei ca. 1050 mbar (erster Knick in Abbildung 18) vollständig entladen und bei 1300 mbar (dritter Knick) beladen ist, lässt sich der Ladezustand als eine einfache Funktion des Drucks darstellen:

$$p < 1050 \text{ mbar} \rightarrow SOC = 0$$

$$1050 \text{ mbar} \leq p \leq 1300 \text{ mbar} \rightarrow SOC = \frac{p - 1050 \text{ mbar}}{250 \text{ mbar}}$$

$$1300 \text{ mbar} < p \rightarrow SOC = 1$$

Die einfache Variante geht von der Vereinfachung aus, dass immer nur kleine Teile des PCM nacheinander den vollständigen Phasenwechsel vollziehen. Geht man davon aus, dass das komplette Material im Speicher den Phasenwechsel gleichzeitig vollzieht, ändern sich Ladezustand und der Innendruck nicht mehr proportional. Die Verknüpfung zwischen den beiden Größen erfolgt dann über die Enthalpiekurve des PCM.

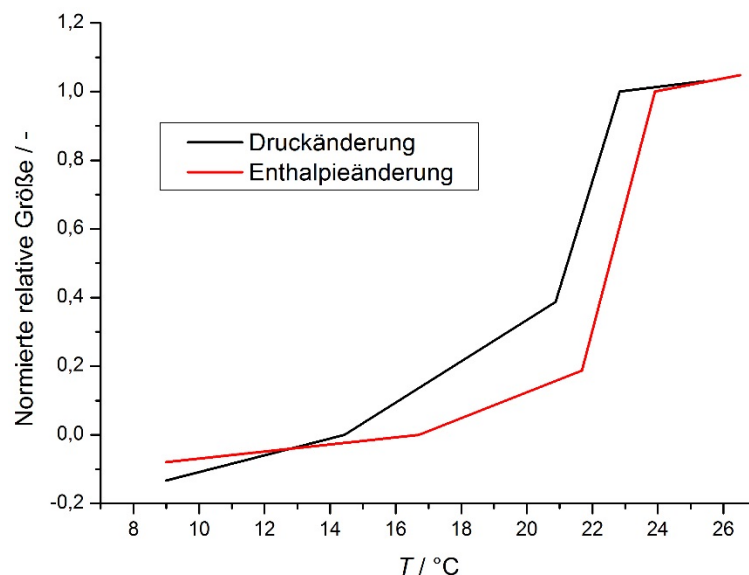


Abbildung 19: Normierte linearisierte Druck- und Enthalpiekurve

In Abbildung 19 sind die Heizkurven der Druck- sowie Enthalpiekurve in linearisierter und normierter Form dargestellt. Zur Linearisierung wurden die Kurven in den vier oben definierten Abschnitten jeweils durch Geraden angenähert. Von den Druckwerten wurde der Wert am ersten Knick abgezogen und die Resultate durch die Differenz der Werte am ersten und dritten Knick geteilt. Analog wurde mit der Enthalpiekurve aus der DSC-Messung verfahren. So wurde erreicht, dass die normierten Größen in den beiden mittleren Abschnitten die Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Unter den oben definierten Voraussetzungen und Annahmen entspricht der Verlauf der normierten Enthalpiekurve im Bereich zwischen erstem und drittem Knick dem Ladezustand des Speichers.

Der Vergleich zeigt, dass die Knicke in den Kurvenverläufen nicht bei den genau selben Temperaturwerten auftreten. Grund hierfür kann zum Beispiel die große Differenz in der Probengrößen oder die stark abweichende Heizrate bei der Messung der beiden Ausgangskurven sein. Lässt man diese Abweichung außer Acht, kann ähnlich wie beim ersten beschriebenen Verfahren ein



vereinfachter mathematischer Zusammenhang zwischen Innendruck und Ladezustand hergestellt werden. Im konkreten Fall finden zwischen dem ersten und zweiten Knick der Druckkurve etwa 39 % des gesamten Druckanstiegs zwischen dem ersten und dritten Knick statt. Zwischen dem ersten und zweiten Knick der Enthalpiekurve werden etwa 19 % der Gesamtkapazität des Speichers aufgenommen. Die daraus resultierende Ladezustandsberechnung lautet wie folgt:

$$p < 1053 \text{ mbar} \rightarrow SOC = 0$$

$$1053 \text{ mbar} \leq p \leq 1147 \text{ mbar} \rightarrow SOC = \frac{p - 1053 \text{ mbar}}{94 \text{ mbar}} \cdot 0,19$$

$$1147 \text{ mbar} \leq p \leq 1298 \text{ mbar} \rightarrow SOC = \frac{p - 1147 \text{ mbar}}{151 \text{ mbar}} \cdot 0,81 + 0,19$$

$$1298 \text{ mbar} < p \rightarrow SOC = 1$$

## 11 TAP 8: Auslegung Speicher

Eines der wichtigsten Ergebnisse aus dem TAP 1 (Abschnitt 4) war die Erkenntnis, dass der Fahrzeug zur Verfügung stehende Bauraum die limitierende und maßgeblichste Randbedingung für die Auslegung von Kapazität und Leistung sein würde. Daraus resultierte das Ziel, die Kapazität des Speichers durch optimaler Ausnutzung des Bauraums möglichst zu maximieren. Die thermische Leistung des Speichers sollte auf die Kapazität abgestimmt werden. Für eine überproportional hohe Leistung wäre viel Wärmeübertragerfläche und damit ein großes Volumen für den Wärmeübertrager nötig, was die Kapazität reduzieren würde. Eine im Verhältnis zur Kapazität kleine Leistung würde dazu führen, dass der Speicher nicht in praxisrelevanten Zeiträumen be- und entladen werden kann.

### 11.1 Kapazität

Die Kapazität des Speichers setzt sich aus mehreren Komponenten zusammen. Der Großteil wird durch die latente und sensible Speicherfähigkeit des PCM abgedeckt. Zusätzlich wird eine vergleichsweise geringe Wärmemenge sensibel im Graphit des Compounds gespeichert. Einen nicht unerheblichen Anteil der Speicherkapazität stellt die Wärmekapazität des Werkstoffes des Behälters und der Wärmeträgerstruktur dar. Auch das Wärmeträgerfluid, das sich zwischen Lade- und Entladephasen in der Wärmeübertragerstruktur befindet, speichert Wärme. Diese Wärme wird, anders als die übrigen Beiträge zur Kapazität, konvektiv, also durch den mechanischen Transport des Fluids, ge- und entladen.

Die maximalen Außenmaße des Speichers wurden in TAP 1 mit 130 mm x 460 mm x 500 mm identifiziert. Eine weitere Randbedingung entstand durch Abmaße der von Hydro zur Verfügung gestellten Multiport-Extrusions. Mit ihrer Breite von etwa 99 mm gaben sie die Tiefe der PCM-Kammern vor. Durch Isolation, Verrohrung von Vor- und Rücklauf so wie die Sammlerkonstruktionen der Wärmeübertragerstruktur wurde das vorhandene Bauvolumen weiter eingeschränkt. Die verbleibenden Freiheitsgrade waren dann die Anzahl der Kammern, in die das PCM-Volumen unterteilt wird, und der Befüllungsgrad der Kammern.

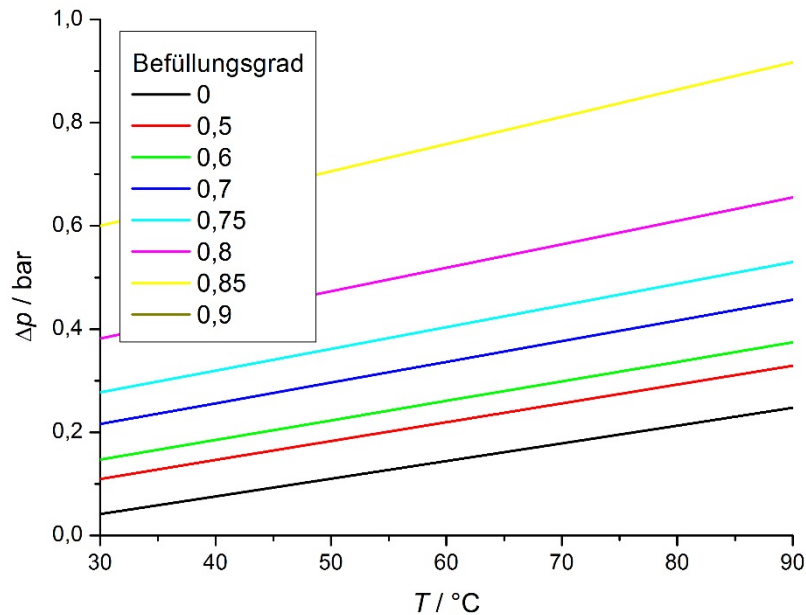


Abbildung 20: Vorhersage des Anstiegs des Innendrucks bei der Erwärmung des Speichers für verschiedene Befüllungsgrade. Zusätzlich aufgetragen ist die rechnerische Druckänderung alleine aufgrund der Erwärmung der Luft. Ausgangspunkt für die Berechnungen ist ein auf 5 °C temperierter Speicher.

Je größer der Befüllungsgrad ist, desto stärker ist auch der Anstieg des Innendrucks in den PCM-Kammern aufgrund der thermischen Ausdehnung und des Volumenanstiegs infolge des Phasenwechsels. Als maximal zulässiger Innendruck wurden 2,5 bar festgelegt. In Abbildung 20 sind die Ergebnisse für die Abschätzung des Anstiegs des Innendrucks dargestellt. Für die Berechnungen wurde davon ausgegangen, dass die Kammern mit dem Compound befüllt und dann bei 5 °C, also unterhalb der Schmelztemperatur des PCM, verschlossen werden. Die Angaben zum Befüllungsgrad beziehen sich auf den Zustand bei 5 °C. Bei einem Befüllungsgrad von 0,9 ergibt sich bei 90 °C ein Überdruck von ca. 1,8 bar bzw. ein Absolutdruck von 2,8 bar. Bei einem Befüllungsgrad von 0,85 bleibt der Druckanstieg im relevanten Temperaturbereich immer unter 1 bar, so dass die Vorgabe zum Maximaldruck eingehalten werden kann.

Tabelle 3: Berechnete Kapazität für verschiedene MPE-Abzahlen und Temperaturspreizungen bei einem Befüllungsgrad von 0,8

Anzahl MPE	Q <sub>18-28 °C</sub> / kWh	Q <sub>13-33 °C</sub> / kWh	Q <sub>0-46 °C</sub> / kWh
10	0,53	0,61	0,80
15	0,51	0,59	0,79
20	0,50	0,57	0,77

In Tabelle 3 sind berechnete Kapazitäten der für verschiedenen MPE-Anzahlen bei einem Befüllungsgrad von 0,8 wiedergegeben. Eine MPE-Anzahl von 16 bedeutet, dass das PCM in 17 Kammern aufgeteilt wird, von denen zwei Randkammern sind, die nur das halbe Volumen aufweisen.



Es ist zu erkennen, dass die Kapazität zwar mit zunehmender MPE-Anzahl abnimmt, allerdings sind die Unterschiede aufgrund des geringen Volumens der MPE relativ klein.

Der Tabelle ist auch zu entnehmen, dass die Kapazität stark von der betrachteten Temperaturspreizung abhängt. Werden die Grenzen von  $\pm 5$  K um den Schmelzpunkt von  $23$  °C auf  $\pm 23$  K verbreitert, bedeutet dies eine Zunahme der Kapazität um etwa 50 %. Der sensible Anteil der Speicherkapazität ist also vergleichsweise hoch. Bei der Konfiguration mit 16 MPE entfallen bei einer Spreizung von  $\pm 10$  K 0,048 kWh auf das die Wärmekapazität des Aluminiums, 0,019 kWh auf das Wärmeträgerfluid und 0,005 kWh auf das Graphit. Im PCM werden 0,445 kWh latent und 0,074 kWh sensibel gespeichert.

## 11.2 Leistung

Wie die Kapazität hängt die Leistung auch von der Geometrie des Speichers und der Wärmeträgerstruktur sowie von den betrachteten Temperaturen ab. Als zusätzlicher Faktor kommt der Volumenstrom des Wärmeträgerfluids hinzu. Zum einen beeinflusst er die Leistungscharakteristik durch die Geschwindigkeit des mechanischen Transports der Wärme entlang der Strömungsrichtung. Zum anderen hängt der Wärmeübergangskoeffizient zwischen Fluid und Wärmeübertragerfläche von der Strömungsgeschwindigkeit ab.

Tabelle 4: Berechnete und eingesetzte Werte für die Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  bei den Konfigurationen mit 10 und 15 MPE

Anzahl MPE	Volumenstrom / l/min	$\alpha$ / W/(m <sup>2</sup> K)		
		nach [Incropera und DeWitt 1996]	nach [Muzychka und Yovanovich 2004]	eingesetzter Wert
10	2	161	220	170
10	8	488	666	500
10	16	850	1180	900
15	2	116	158	650
15	8	353	481	380
15	16	615	838	130

Die Berechnung des Wärmeübergangs in den Mikrokanälen der MPE ist komplex und erfolgt über empirisch ermittelte Korrelationen. Die in der Literatur angegebenen Gleichungen gelten nur für spezielle Geometrien und Arbeitsmittel oder nur gering davon abweichende Konfigurationen. Für die Abschätzung der Leistung wurden in diesem Projekt die Berechnungen nach [Muzychka und Yovanovich 2004] sowie [Incropera und DeWitt 1996] eingesetzt. Die beiden Methoden liefern Ergebnisse in der gleichen Größenordnung. Für die Auslegung wurden aus den Ergebnissen pessimistisch abgeschätzte Werte eingesetzt. Die berechneten und eingesetzten Werte für verschiedene Volumenströme für die Konfigurationen mit 10 und 15 MPE sind in Tabelle 4



wiedergegeben. Betrachtungen der geometrischen Gegebenheiten zeigten, dass eine MPE-Zahl wesentlich größer als 15 nicht praktikabel ist. Der Abstand zwischen den MPE würde dann so gering werden, dass das Befüllen und Verschließen des Speichers nur mit sehr großem Aufwand möglich wäre.

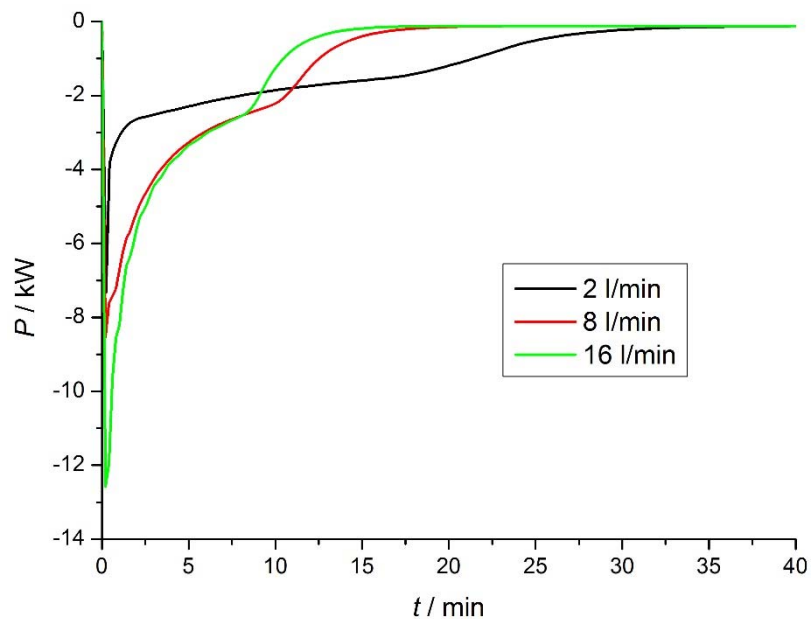


Abbildung 21: Simulationsergebnisse zu Leistung beim Laden der Konfiguration mit 10 MPE von 0 °C auf 50 °C

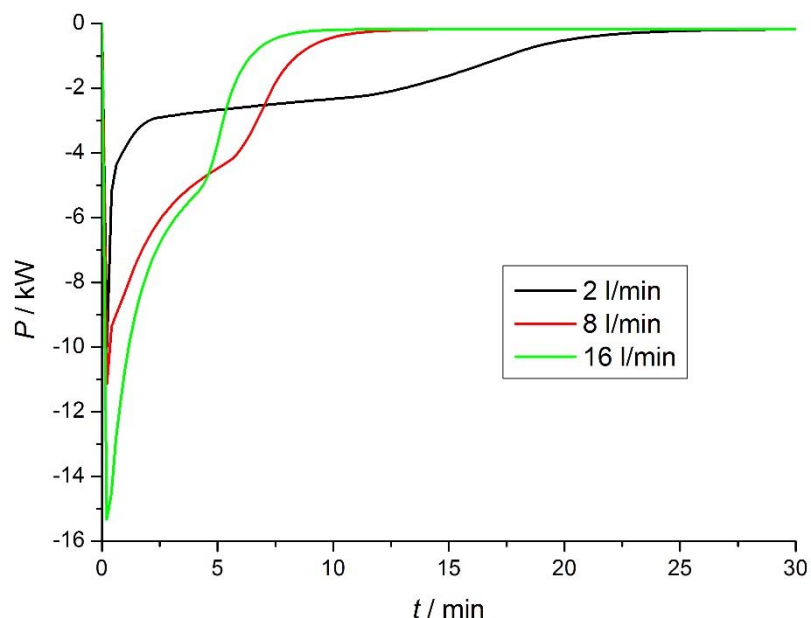


Abbildung 22: Simulationsergebnisse zu Leistung beim Laden der Konfiguration mit 15 MPE von 0 °C auf 50 °C

Zur Bestimmung der Leistungscharakteristik wurden Simulationen mit dem in Abschnitt 15 vorgestellten Matlab-Modell durchgeführt. Bei den Simulationen wurden die oben abgeschätzten

Wärmeübergangskoeffizienten verwendet. Die Simulationen wurden für 2, 8 und 16 l/min durchgeführt. In Abbildung 21 sind die Verläufe der Leistung beim Laden der Speicherkonfiguration mit 10 MPE von 0 °C auf 50 °C dargestellt. Die der generelle Verlauf der Kurven wurde bereits in Abschnitt 5.2 erläutert. Bei 2 l/min dauert der Phasenwechsel etwa 18 Minuten, nach knapp 35 Minuten ist der Speicher komplett geladen. Während dem Phasenwechsel liegt die Leistung im Mittel über 2 kW. Bei 16 l/min dauert der Phasenwechsel nur neun Minuten und der gesamte Ladevorgang etwa 17 Minuten. Während dem Phasenwechsel ist die Leistung immer größer als 2,5 kW und beträgt im Mittel über 4 kW. Bei 8 l/min ist dauern die einzelnen Anschnitte nur unwesentlich länger als bei 16 l/min. Dementsprechend ist die Leistung im Vergleich nur leicht reduziert.

Für die Konfiguration mit 15 MPE (Abbildung 22) sind wie erwartet die Zeiten kürzer und die Leistungen höher. Bei 2 l/min dauert der Phasenwechsel zwölf Minuten und der Ladevorgang etwa 25 Minuten. Bei 16 l/min dauert der Ladevorgang zehn Minuten, gut vier davon mit Phasenwechsel. Die mittlere Leistung im Phasenwechsel beträgt über 8 kW.

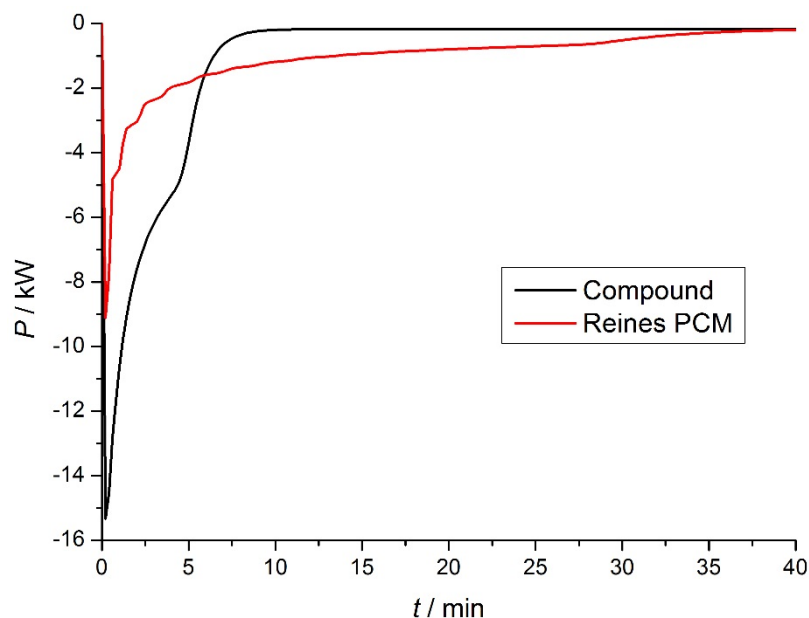


Abbildung 23: Vergleich der Leistung mit Compound und reinem PCM

Der Speicher mit 15 MPE kann kurzzeitig Leistungen in der Größenordnung der Leistung des Bremswiderstand aufnehmen und abgeben. Da die Speicherkapazität gegenüber der Konfiguration mit 10 MPE nur geringfügig reduziert ist, wurde die leistungsstärkere Variante im Funktionsmuster umgesetzt.

Eine zusätzliche Simulation wurde durchgeführt, um die Leistungssteigerung durch die Zugabe von Graphit (vgl. Abschnitt 10.1) bewerten zu können. Dazu wurde für die Simulation die Wärmeleitfähigkeit des Speichermaterials auf den Wert von reinem PureTemp23 gesetzt. Alle anderen Parameter blieben unverändert.

Abbildung 23 den Leistungsverlauf bei 16 l/min aus der Abbildung 22 und den entsprechenden Verlauf für reines PCM. Ohne Graphit beträgt die mittlere Leistung während dem Phasenwechsel weniger als 20 % der Leistung mit Graphit. Der Phasenwechsel dauert mit ca. 30 Minuten



entsprechend länger. Die Compoundierung des PCM trägt also erheblich zur Leistungsfähigkeit des Speichers bei.

### 11.3 Literatur

[Incropera und DeWitt 1996] Incropera F.P. und DeWitt D.P.: Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 4. ed., Wiley, 1996

[Muzychka und Yovanovich 2004] Muzychka Y. S. und Yovanovich M. M. Laminar Forced Convection Heat Transfer in the Combined Entry Region of Non-Circular Ducts. *Journal of Heat Transfer* 2004; **126(1)**: 54-61

## 12 TAP 9: 1. Funktionsmuster: Konstruktion

Das in TAP 6 entwickelte Funktionskonzept wurde unter Berücksichtigung der Ergebnisse der thermischen Auslegung in TAP 8 in die Konstruktion eines Funktionsmusters umgesetzt. Am ZAE Bayern wurde die konstruktive Gestaltung des Behälters, der Wärmeübertragerstruktur, der Sammler und der Zuleitungen durchgeführt. Es stellte sich heraus, dass für einige Detaillösungen eine gerade Anzahl an MPE vorteilhaft ist. Daher wurde die Anzahl von 15 auf 16 erhöht. Diese Veränderung hat nur geringe Auswirkungen auf die thermischen Auswirkungen, so dass keine großen Abweichungen gegenüber der Auslegung zu erwarten waren.

Auf halber Höhe des Speichers wurden zwei Bohrungen mit Innengewinde zur Aufnahme von Temperatursensoren vorgesehen. Die Bohrungen sind bei ca.  $\frac{1}{4}$  und  $\frac{3}{4}$  der Speicherbreite positioniert, eine an der Vorderseite und die zweite an der Rückseite des Speichers. Durch die Bohrungen können die Sensoren so platziert werden, dass ihre Spitze in einer PCM-Kammer liegt, ohne eine Speicherwand oder ein MPE-Profil zu berühren. Mit den Messwerten der Sensoren kann so qualitativ der zeitliche Verlauf der PCM-Temperatur in zwei verschiedenen Bereichen des Speichers bestimmt werden. Ein Vergleich zwischen den Messwerten der beiden Sensoren ermöglicht es, Aussagen über die Homogenität der Fluidströmung und die daraus resultierenden Verteilung der thermischen Leistung im Speicher zu treffen.

Zusätzlich wurde die Aufnahme für einen Drucksensor vorgesehen. Der Sensor sollte die Möglichkeit bieten, den Druck im Luftpolster des PCM-Bereichs zu messen und aus den Messwerten Rückschlüsse auf den Ladezustand zu ziehen.

Während der Konstruktionsarbeiten wurden Strömungssimulationen für das Wärmeträgerfluids im Speicher durchgeführt. Dazu wurde das Simulationstool des CAD-Programms SolidWorks eingesetzt. Ziel der Simulationen war es, eine gleichmäßige Anströmung der internen Wärmeübertragungsflächen des Speichers zu gewährleisten. Es konnte gezeigt werden, dass bei der Umsetzung des Konzepts mit 16 MPE keine Einbauten zur Lenkung der Strömung nötig sind. Die Simulationsergebnisse zeigten, dass bei anderen Konfigurationen zeigten die Gefahr besteht, dass sich zirkulierende Strömung im Speicher ausbilden. Solche Strömungen würden zu einer inhomogenen Be- und Entladung sowie zu einer unvorteilhaften Leistungscharakteristik führen.

Vom CES Modelshop, der die Fertigung der Funktionsmuster übernahm, wurden die CAD-Konstruktionen überarbeitet. Zum einen wurden die Komponenten so angepasst, dass die Fertigung leicht möglich war. Zum anderen wurde überprüft, ob die Konstruktion unter den vorgegebenen, dauerhaft formstabil bleibt. An kritischen Stellen wurde die Konstruktion entsprechend verändert.



### 13 TAP 10: 1. Funktionsmuster: Bau

Für den Bau der Funktionsmuster wurde ein Fertiger mit Erfahrung im Metallbau für Prototypen und Kleinserien im Automobilbereich gesucht. Der CES Modellshop übernimmt solche Aufgaben für die Continental Automotive GmbH, aber auch für externe Auftraggeber. In einem ersten Gespräch wurde Laser-Schweißen als präferiertes Fertigungsverfahren für die Muster identifiziert. Dieses Verfahren ist zwar im Allgemeinen vergleichsweise teuer. Allerdings kann aufgrund der sehr präzisen Verarbeitung eine hohe Sicherheit des Produkts erzielt werden. Besonders bei der Fertigung eines Prototyps, bei der eine iterative Anpassung des Fertigungsverfahrens zu aufwändig ist, ist dies ein wichtiger Aspekt.

Nach Erteilung des Auftrags wurden seitens CES Modellshop Probleme beim Einsatz des Laser-Schweiß-Verfahrens identifiziert. Als problematisch wurde vor allem die unterschiedliche Materialstärke von MPE und Behälterwand angesehen. Versuche seitens CES Modellshop, die Bauteile durch Löten zusammenzufügen, waren nicht erfolgreich, so dass dieser Ansatz ebenfalls verworfen wurde.

Als neues Verfahren zur Fügung der Aluminiumteile wurde von CES Modellshop ein Klebverfahren vorgeschlagen. Da CES Modellshop angab, dass mit dem entsprechenden Kleber eine sichere und dauerhafte Verbindung der Bauteile gewährleistet werden kann, wurde das Verfahren für die Fertigung der Funktionsmuster eingesetzt. Nach dem Aushärten des Klebers wurden am CES Modellshop Drucktests mit Luft an den Funktionsmustern durchgeführt, um die Druckbeständigkeit zu bestätigen. Dabei wurden nacheinander der PCM-Raum und die Fluidseite der Konstruktion mit dem Grenzdruck von 2,5 bar absolut beaufschlagt. Alle Funktionsmuster bestanden diese Tests, ohne dass dauerhafte plastische Verformung der Behälter oder Leckagen auftraten. Die Befüllung der Speicher mit PCM-Graphit-Compound sowie das Verschließen des PCM-Bereichs erfolgten am ZAE Bayern.

Wie weiter unten noch genauer erläutert wird, kam es beim ersten Funktionsmuster schon nach kurzer Versuchszeit am Teststand zum Versagen einiger Klebestellen an der Speicherhülle. In Folge dessen trat PCM aus dem Speicher in die Umgebung aus. Das zweite Funktionsmuster wurde mit dem selben Fügeverfahren gefertigt. Eine zusätzliche Verspannung stark belasteter Flächen mit Stahlplatten und Gewindestangen sollte eine zu große Verformung durch den Innendruck vermeiden. Trotz verstärkenden Maßnahme kam es zu einem erneuten Versagen der Klebung. Allerdings traten die Leckagen am zweiten Funktionsmuster an anderen Stellen auf. Die Verspannungen zeigten also lokal die gewünschte Wirkung, lösten aber nicht das allgemeine Problem der zu geringen Festigkeit der Klebung.

Das erste Funktionsmuster wurde behelfsmäßig wieder in Stand gesetzt, in dem Winkelprofile über die Kanten geklebt wurden, die Risse in der Klebung aufwiesen oder als potenziell gefährdet eingestuft wurden. Zum einen sollten damit die Risse in den Klebenähten abgedichtet werden. Zum anderen sollte ein Versteifen der Kanten erzielt werden, um erneute Leckagen zu verhindern. Durch diese Maßnahme konnte eine erneute Leckage nach außen erfolgreich unterbunden werden. Allerdings traten nach wenigen Lade- und Entladezyklen Leckagen vom PCM-Bereich in den Wasser-Glykol-Kreis auf. Das Funktionsmuster war damit nicht mehr einsatzfähig und irreparabel zerstört. Der Teststand musste aufwändig gereinigt und das Wärmeträgerfluid vollständig ausgetauscht werden.

Bei der Fertigung des dritten Funktionsmusters wurden stark belastete Verbindungsstellen in der Behälterwand verschweißt und nicht verklebt. Das Funktionsmuster wurde am Teststand ohne Compound-Befüllung untersucht. Auch hier musste bei den ersten Tests festgestellt werden, dass die



innenliegenden Klebestellen zum Teil versagten. Konkret bedeutete dies, dass Wärmeträgerfluids aus dem Kreislauf in den leeren PCM-Bereich austrat. Auch das dritte Funktionsmuster konnte nicht weiter eingesetzt werden.

Im Projekt standen kein Zeit und kein Geld zur Verfügung, mit einem anderen Fertiger neues Fertigungskonzept zu erarbeiten. Daher wurde das zweite Muster provisorisch mit Winkelprofilen repariert. Die Vermessung mit moderaten Versuchsparametern (niedrige absolute Temperaturen, niedrige Temperatursprünge, geringer Volumenstrom) bei unverschlossenem Speicher und sehr niedrigem Druck im Fluidkreis durchgeführt, um eine Leckage nach innen zu vermeiden.

## **14 TAP 11: 1. Funktionsmuster: Test/Auswertung**

### **14.1 Ziel**

Um die Funktionsfähigkeit des integrierten Funktionsmusters gewährleisten zu können, sollte es an einem Teststand am ZAE Bayern in Betrieb genommen und getestet werden. Erstes Ergebnis sollte eine Aussage über die mechanische Beständigkeit der Konstruktion im geplanten Normalbetrieb und unter starker thermischer und hydraulischer Belastung sein.

Durch Variation der Prozessparameter (Temperaturen, Volumenstrom) bei den Messungen, sollte das Funktionsmuster umfassend thermisch charakterisiert werden. Die wichtigsten Kenngrößen sind dabei die thermische Leistung des Speichers beim Be- und Entladen, so wie die Speicherkapazität.

Zusätzlich sollte die Möglichkeit, den Speicherladezustand über den Innendruck der PCM-Kammern zu bestimmen, geprüft werden. Dazu sollte der Druck während der Be- und Entladevorgänge gemessen und Korrelationen mit dem thermisch bestimmten Ladezustand identifiziert werden.

### **14.2 Methodik**

#### **14.2.1 Teststand und Messstrategie**

Zur thermischen Charakterisierung von Latentwärmespeichern wird im Allgemeinen eine Reihe von Versuchen durchgeführt, bei der der Speicher möglichst isotherm auf eine Starttemperatur vorkonditioniert wird und dann mit einem steilen Temperatursprung im Fluidvorlauf beaufschlagt wird. Um solche Versuche an den Funktionsmustern durchführen zu können wurde am ZAE Bayern ein entsprechender Teststand aufgebaut.

Der Teststand besteht aus einem geschlossenen Fluidkreislauf, in dem das Wärmeträgerfluid im Kreis gepumpt wird (Vgl. Abbildung 24). Der Volumenstrom wird mit einem magnetisch-induktivem Durchflussmesser überwacht und elektronisch über ein Stellventil auf den Vorgabewert geregelt. Über einen Wärmeübertrager kann das Fluid bei Bedarf gegen einen externen Kühlwasserkreislauf gekühlt werden. Mit einem elektrischen Heizschwert wird das Fluid auf die vorgegebene Vorlauftemperatur erwärmt. Über ein Dreiwegeventil kann der zu untersuchende Speicher in den Fluidkreis geschaltet werden, so dass er in Serie mit übrigen Komponenten liegt. Soll der Teststand auf eine Temperatur vortemperiert werden und gleichzeitig die Temperatur im Speicher unverändert bleiben, wird über das Dreiwegeventil ein Bypass parallel zum Speicher geöffnet und gleichzeitig der Speicher selbst vom Kreislauf getrennt.

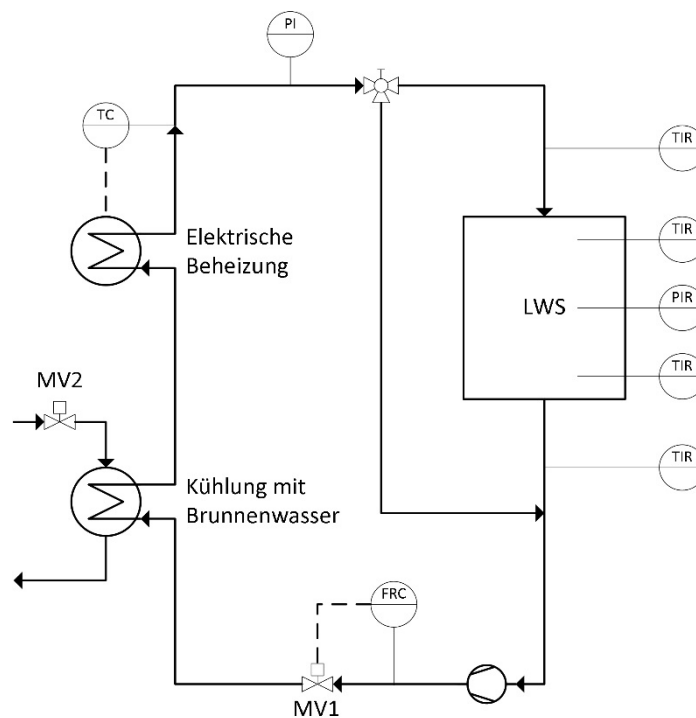


Abbildung 24: Vereinfachtes Anlagenschema des am ZAE Bayern zur Vermessung der Funktionsmuster eingesetzten Teststands

Für Analysen des thermischen Verhaltens der Funktionsmuster werden während der Versuche die Messwerte von vier Temperatursensoren aufgezeichnet. Zwei der Sensoren sind wie in Abschnitt 12 beschrieben im Speicher positioniert. An diesen Messstellen kommen NTC-Sensoren zum Einsatz, da mit dieser im Automobilbereich präferiert eingesetzten Technologie eine spätere Integration in ein Versuchsfahrzeug vereinfacht werden kann.

Jeweils eine Temperaturmessstelle ist im Vorlauf und im Rücklauf des Speichers platziert. Da die Messwerte dieser Sensoren zur Berechnung der thermischen Leistung beim Be- und Entladen der Funktionsmuster verwendet werden, sind hier PT100-Sensoren eingesetzt, die eine höhere Messgenauigkeit als NTC-Sensoren ermöglichen.

Die Messdaten des oben erwähnten Durchflusssensors werden ebenfalls kontinuierlich aufgezeichnet und dienen als Basis für die Berechnung der im Speicher übertragenen thermischen Leistung.

Wie im Abschnitt 12 beschrieben wurde ein Drucksensor (WIKA Type A-10) im Gaspuffervolumen vorgesehen, der den Innendruck des Speichers überwacht und dessen Messdaten als Grundlage für eine Ladezustandbestimmung dienen sollten.

Der Druck im Fluidkreis wird lediglich an einem analogen Manometer angezeigt, da der Wert nicht für die Charakterisierung der Funktionsmuster verwendet wird.

Um eine konstante Temperatur des Wärmeträgerfluids im Vorlauf des Speichers auch bei hohen übertragenen Leistungen erreichen zu können, wurde die Integration eines Pufferbehälters in das System geplant. Aus Zeitgründen wurden die ersten Messungen ohne den Behälter durchgeführt. Bei diesen Versuchen wurde erkannt, dass es zum mechanischen Versagen der Funktionsmuster und zum Eintrag von PCM in den Fluidkreis kommen kann. Um die Menge des Fluids, dass bei einer solchen Leckage verunreinigt würde, gering zu halten, wurde der Einbau des Behälters vorerst verschoben.





## 14.2.2 Ablauf und variable Parameter der Versuche

Wie bei jedem thermischen Energiespeicher ist die Kapazität eines Latentwärmespeichers abhängig von den Temperaturen, bei denen der Speicher als vollständig be- bzw. entladen angesehen wird. Prinzipiell gilt, dass die Kapazität umso größer ist, je weiter die beiden Temperaturen auseinander liegen. Bei Latentwärmespeichern wird nur, wenn die Schmelztemperatur des PCM zwischen den Temperaturgrenzen liegt, eine hohe Speicherdichte erreicht. Um den Zusammenhang zwischen der Wahl der Temperaturgrenzen und der Kapazität der Funktionsmuster zu bestimmen, wurde daher der zu vermessende Speicher zu Beginn jedes Versuchs zunächst auf eine Starttemperatur vortemperiert. Dann wurde der Speicher vom Fluidkreis abgekoppelt und der Teststand auf die angestrebte Endtemperatur temperiert. Beim erneuten Einkoppeln des Speichers lag so ein steiler Temperatursprung am Speichereingang an. Die Vorlauftemperatur wurde auf der angestrebten Endtemperatur gehalten, bis der Speicher ebenfalls diese Temperatur angenommen hatte.

Die Starttemperatur, auf die der Speicher vortemperiert wird, und die Zieltemperatur, die gleichzeitig die Vorlauftemperatur des Fluid ist, sind zwei Versuchsparameter, die zur thermischen Charakterisierung variiert wurden. Die Temperaturen, die bei den Versuchen eingestellt wurden, lagen zwischen der maximalen Einsatztemperatur im Fahrzeug (90 °C) und der minimal durch Kühlung gegen Brunnenwasser erzielbaren Vorlauftemperatur (ca. 12 °C).

Der dritte Parameter, der bei den Versuchen variiert wurde, ist der Volumenstrom des Wärmeträgerfluids. Den in TAP 1 definierten Randbedingungen zufolge wurden für die Versuche Werte zwischen 2 l/min und 16 l/min eingestellt.

Wie in Abschnitt 13 beschrieben, konnten mit dem ersten Funktionsmuster nur sehr wenige Versuche durchgeführt werden. Auch das zweite Muster wies nach der ersten Versuchsreihe Leckagen auf. Um die Speicherkonstruktion thermisch charakterisieren zu können ohne ein erneutes mechanisches Versagen zu riskieren, wurden an dem reparierten zweiten Muster zunächst Versuche mit moderaten Temperaturen, Volumenströmen und Wärmeträgerfluidrücken durchgeführt. Zusätzlich wurden die Verschlusschrauben der PCM-Kammern und der Drucksensor entfernt, so dass sich in den Kammern kein Druck aufbauen konnte.

Zur systematischen thermischen Vermessung des Speichers wurden jeweils ein Schmelz- und ein Erstarrungsversuch zusammengefasst. Dazu wurde der Speicher wie oben beschrieben auf eine Starttemperatur unter der Schmelztemperatur des PCM vortemperiert und dann auf eine Zieltemperatur über dem Schmelzpunkt aufgeheizt. Sobald der Speicher keine Wärme mehr aufnahm und sich die Innentemperatur nicht mehr änderte, wurde der Speicher wieder auf die Starttemperatur abgekühlt. Während einer solchen Versuchskombination wurde der Volumenstrom des Wärmeträgerfluids nicht verändert. In Tabelle 5 findet sich eine Übersicht der Temperaturen und Volumenströme, die für die verschiedenen Versuche eingestellt wurden. Es sei darauf hingewiesen, dass auf Grund von Regelabweichungen und Wärmeverlusten in den Komponenten und Rohren des Teststands die reale Vorlauftemperatur schwanken und vom Vorgabewert abweichen kann. Entsprechend Tabelle 5 ergeben sich 16 Einzelversuchsvarianten, die zum Teil mehrfach durchgeführt wurden, um eine Aussage über die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse treffen zu können.



Tabelle 5: Versuchsparameter für die systematische thermische Vermessung des zweiten Funktionsmusters

Untere Temperatur in °C	Obere Temperatur in °C	Volumenstrom in l/min
18	28	4
14	32	4
14	40	4
14	60	4
18	28	8
14	32	8
14	40	8
14	60	8

Nach den Messungen zum thermischen Verhalten des Funktionsmusters, wurden weitere Versuche durchgeführt, um Möglichkeit der Bestimmung des Ladezustands über den Innendruck in den PCM-Kammern zu untersuchen. Dazu wurde der Drucksensor eingeschraubt und die übrigen Kammern mit den Verschlusschrauben gegen die Umgebung abgedichtet. Bei den Messungen kam es allerdings erneut zu einem Versagen der Klebestellen, so dass die Ergebnisse nicht verwendbar waren.

### 14.3 Ergebnisse

Im folgenden Abschnitt werden die Messergebnisse einzelner Versuche ausführlich diskutiert und die Ergebnisse der Messreihe, die am zweiten Funktionsmuster durchgeführt wurde, im Gesamten betrachtet.

#### 14.3.1 Vermessung und mechanisches Versagen des ersten Funktionsmusters

Die Vermessung des ersten Funktionsmusters direkt nach der Befüllung mit PCM-Compound sollte erste Anhaltspunkte zur Leistungscharakteristik und die Wahl der Versuchsparameter für die systematische thermische Vermessung des Speichers liefern. Weiterhin sollte die thermische und mechanische Stabilität der Behälterkonstruktion innerhalb der gesetzten Grenzen getestet werden. Dazu wurde der Speicher am Teststand in Stufen von 12 °C auf 80 °C aufgeheizt. Nach jeder Stufe wurde die Vorlauftemperatur gehalten, bis die Rücklauftemperatur einen annähernd konstanten Wert angenommen hatte.

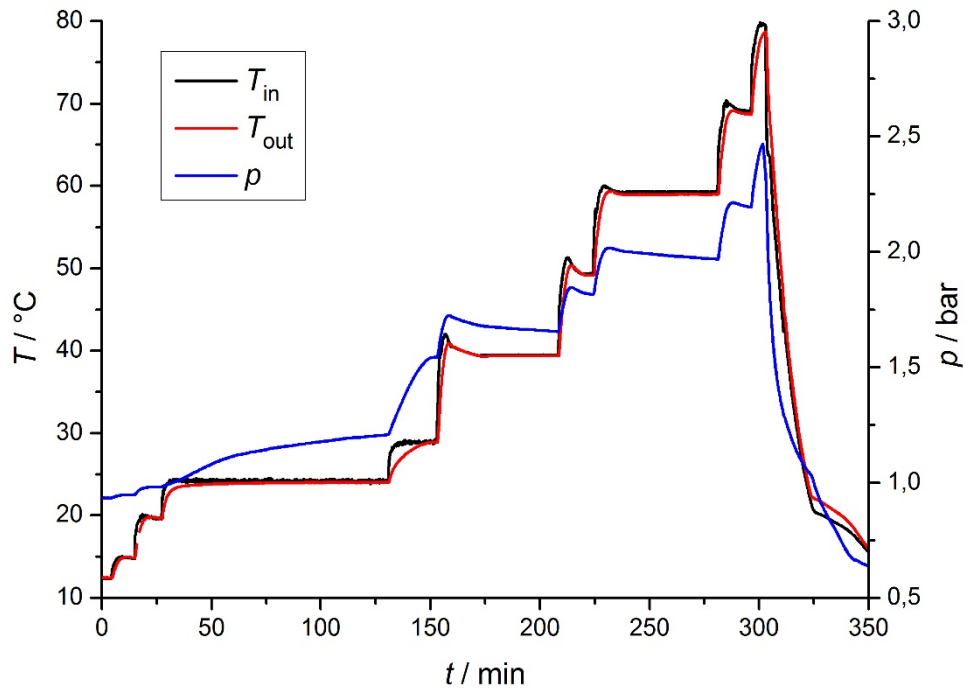


Abbildung 25: Verlauf von Temperaturen und Innendruck beim Aufheizen des ersten Funktionsmusters in mehreren Temperaurstufen bis zum mechanischen Versagen bei 80 °C

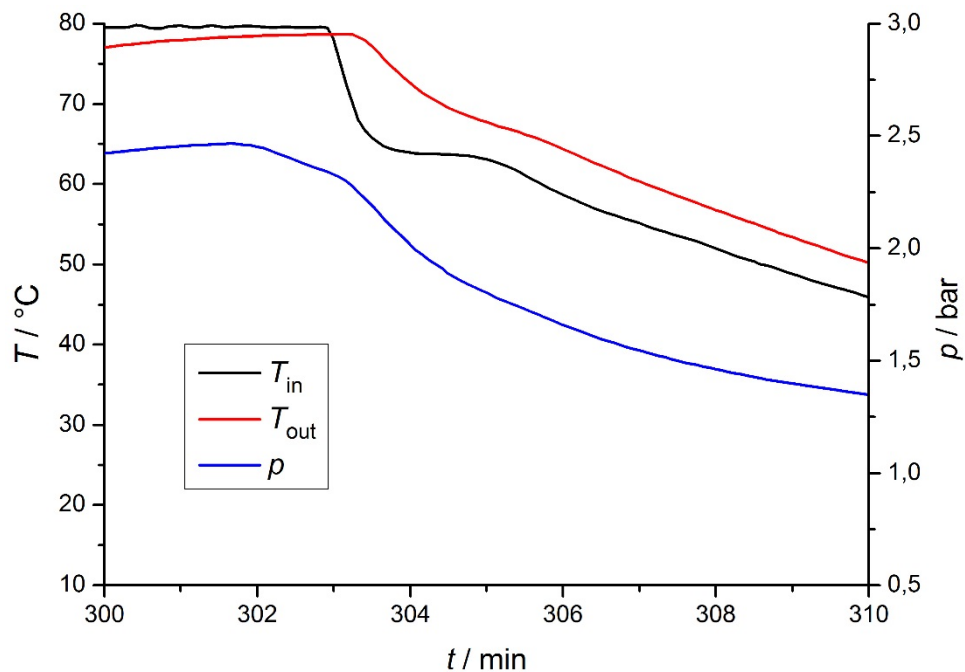


Abbildung 26: Vergrößerung aus dem Abbildung 25 im Bereich des Zeitpunkts des mechanischen Versagens des ersten Funktionsmusters

In Abbildung 25 ist zu erkennen, dass der Innendruck des Speichers wie erwartet der Temperatur folgt und mit jedem Schritt ansteigt. Während des Schrittes von 70 °C auf 80 °C versagte eine

Klebestelle an der Außenwand des Speichers. Der Innendruck des Speichers lag zu diesem Zeitpunkt unterhalb des maximalen absoluten Betriebsdruck von 2,5 bar.

Aus Abbildung 26 lässt sich entnehmen, dass der Innendruck etwa bei Minute 302 beginnt einzubrechen. Die Vorlauftemperatur nimmt erst nach dem manuellen Abbruch des Versuchs bei Minute 303 ab. Die Druckabnahme ist also mit dem Versagen der Klebung und dem resultierenden Druckausgleich mit der Umgebung und nicht mit der Abnahme der Temperatur zu erklären. Da der Drucksensor in der mittleren PCM-Kammer positioniert ist, die Leckage aber in einer der beiden Randkammer des Speichers auftrat, lässt sich daraus ableiten, dass der Druckausgleich zwischen den Kammern bei aufgeschmolzenem PCM wie geplant funktioniert. Analoge Beobachtungen konnten auch bei der Messung am zweiten Funktionsmuster, bei der ebenfalls eine Leckage zur Umgebung entstand, gemacht werden.

### 14.3.2 Systematische thermische Vermessung des zweiten Funktionsmusters

#### Repräsentativer Ladeversuch

In Abbildung 27 sind die typischen Temperaturverläufe eines Ladeversuchs abgebildet. Die nominelle Starttemperatur des Speichers ist 14 °C, die nominelle Endtemperatur 40 °C und der Volumenstrom 4 l/min. Die Eintrittstemperatur steigt zu Beginn des Versuchs schnell auf 40 °C an und bricht dann kurzzeitig wieder ein. Dieser Einbruch resultiert daher, dass vom Teststand aufgrund des fehlenden Pufferspeichers nicht genügend thermische Leistung zur Verfügung gestellt werden kann. Ab Minute fünf bleibt die Temperatur annähernd konstant bei 39 °C.

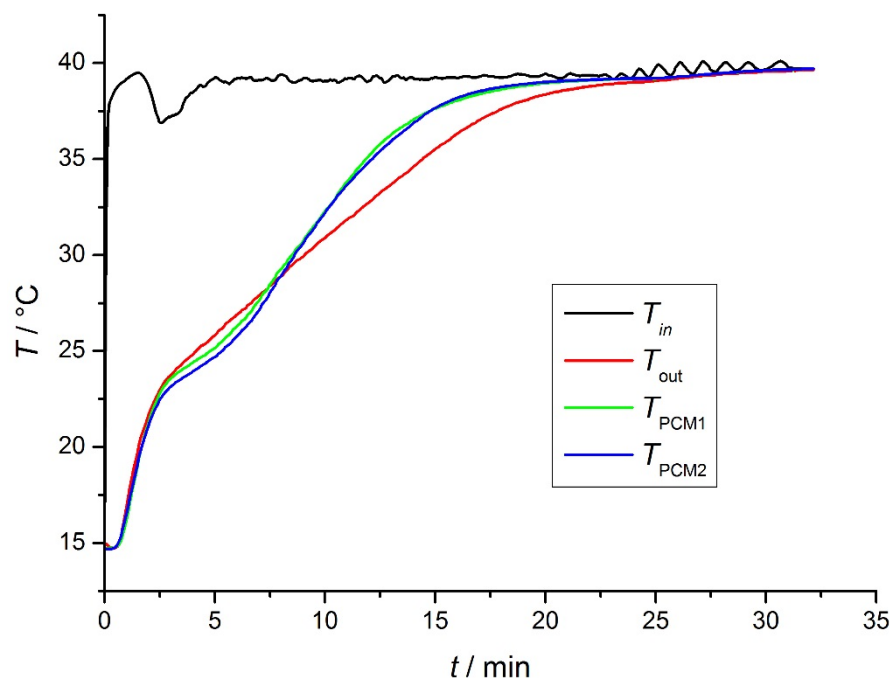


Abbildung 27: Gemessene Temperaturen während eines Ladeversuchs bei einem Volumenstrom des Wärmeträgerfluids von 4 l/min

Die Austrittstemperatur sinkt anfangs kurzzeitig auf die Ausgangstemperatur des Speichers ab und steigt dann stark an. In diesem Zeitabschnitt wird zum einen das vor dem Start des Versuchs im Speicher abgekühlte Fluid aus dem Speicher gedrückt, zum anderen wird das eintretende Fluid durch

die sensible Erwärmung des Aluminiums und des Compounds stark abgekühlt. Sobald die Austrittstemperatur in etwa die Schmelztemperatur des PCM ( $23\text{ °C}$ ) erreicht, steigt sie weniger stark an. Da das PCM beim Schmelzen Wärme ohne starke Temperaturänderung aufnimmt, ändert sich der Temperaturgradient zwischen PCM und Wärmeträgerfluid und damit der Wärmeentzug aus dem Fluid weniger stark. Die Austrittstemperatur nimmt weiter annähernd linear mit Zeit ab, bis sie etwa  $5\text{ K}$  unter der Eintrittstemperatur liegt. Dies liegt an der Phasenfront im PCM-Graphitgemisch die sich immer weiter von den Wärmetauschoberflächen weg bewegt, wodurch sich der Wärmewiderstand zwischen Phasenfront und Wärmetauscher erhöht. Anschließend, wenn das PCM geschmolzen ist, nähert sich die Austrittstemperatur asymptotisch der Eintrittstemperatur an.

Die beiden Temperatursensoren im Speicher zeigen einen annähernd synchronen Verlauf der PCM-Temperatur in den überwachten Kammern. Die Temperaturverläufe steigen zunächst stark an und flachen dann zu etwa dem gleichen Zeitpunkt, an dem auch die Austrittstemperatur einen Knick aufweist, ab. Der flache Bereich in den Verläufen zeigt den Zeitraum, in dem das PCM in der Nähe der Sensoren schmilzt. Nach etwa sechs Minuten steigen die Temperaturen wieder stärker an, was darauf hindeutet, dass in der Umgebung der Sensoren die Wärme sensibel gespeichert wird. Die Temperaturverläufe der PCM-Sensoren schneiden die Kurve der Austrittstemperatur etwa bei Minute acht und nähern sich der Eintrittstemperatur entsprechend schneller an.

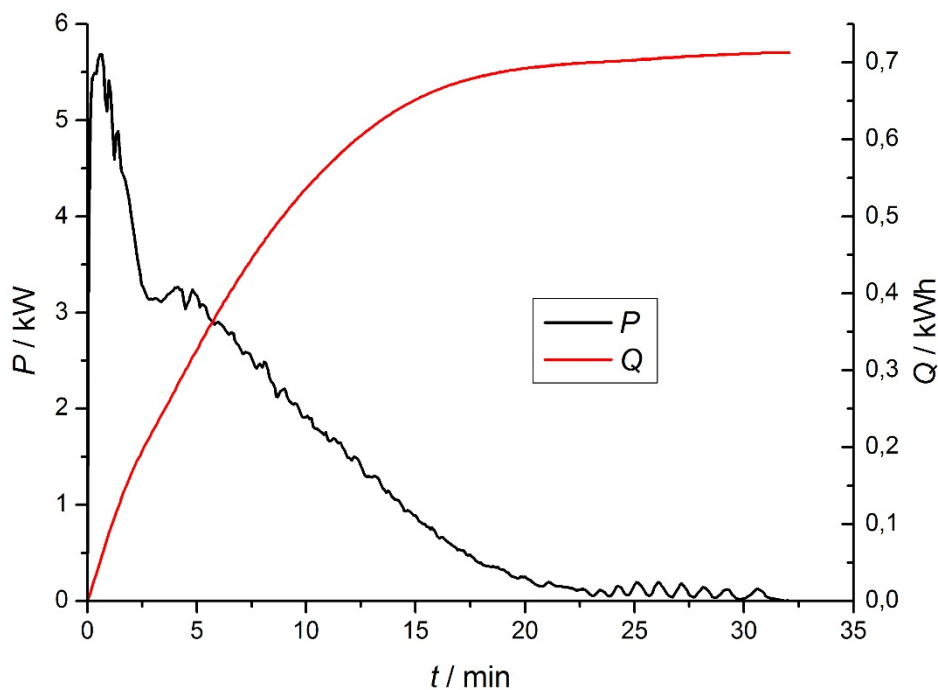


Abbildung 28: Thermische Leistung und eingespeicherte Wärmemenge entsprechend den Temperaturen aus Abbildung 27

Für die Berechnung der momentan übertragenen thermischen Leistung wird die Differenz von Ein- und Austrittstemperatur mit dem Wärmekapazitätsstrom des Fluids multipliziert. In Abbildung 28 ist der Verlauf der Leistung während der eben beschriebenen Messung aufgetragen. Aufgrund der großen Temperaturdifferenz zu Beginn der Messung ergibt sich ein hoher Leistungspeak von etwa  $5,5\text{ kW}$ . Das darauf folgenden Plateau bei gut  $3\text{ kW}$  resultiert aus der Überlagerung des Einbruchs der Eintrittstemperatur und dem Abknicken der Austrittstemperatur. Sobald die Eintrittstemperatur



den konstanten Endwert angenommen hat, nimmt die Leistung der Austrittstemperatur folgend weiter ab.

Um einen aussagekräftigen Vergleichswert der thermischen Leistung zu erhalten, muss der Mittelwert der Leistung in einem repräsentativen Bereich der Messung gebildet werden. Bei Latentwärmespeichern ist das Zeitintervall, während dem ein Phasenwechsel im Speichermaterial stattfindet eine gute Vergleichsbasis. Das Intervall kann aus dem Verlauf der Speicherinnentemperatur hergeleitet werden. Aus den Messdaten zum des in diesem Abschnitt diskutierten Versuchs ergibt sich so ein Zeitintervall von Minute 2,6 bis 6,2. Der Mittelwert der Leistung in diesem Bereich ist 3,1 kW. Da die thermische Leistung eines Speichers stark von der Vorlauftemperatur des Wärmeträgerfluids abhängt, kann der Mittelwert zur besseren Vergleichbarkeit mit andern Speichern zusätzlich temperaturbereinigt werden. Dazu wird die Differenz der nominellen Schmelztemperatur des PCM und der Vorlauftemperatur berechnet, wobei wieder der Mittelwert im oben angegebenen Zeitintervall gebildet wird. Im betrachteten Fall beträgt die mittlere Vorlauftemperatur 38,4 °C und somit die Differenz 15,4 K. Die temperaturbereinigte Leistung beträgt dann 0,20 kW/K.

Durch kontinuierliche Integration der Leistung über die Zeit erhält man die momentan eingespeicherte Wärmemenge. Im Verlauf dieser Messung steigt die gespeicherte Wärmemenge auf etwa 0,71 kWh.

### Repräsentativer Entladeversuch

Die Temperaturverläufe des Entladeversuchs, der im Anschluss dem im vorherigen Abschnitt beschriebenen Ladeversuch durchgeführt wurde, sind in Abbildung 29 dargestellt. Entsprechend den Versuchsparametern beim Laden ist die nominelle Starttemperatur 40 °C, die nominelle Endtemperatur 14 °C und der Volumenstrom des Fluids 4 l/min.

Die Eintrittstemperatur fällt sehr schnell auf 15 °C und schwingt dann schwach um einen konstanten Wert knapp unter 15 °C. Die Austrittstemperatur steigt analog zum Ladeversuch kurzzeitig auf die Speicherinnentemperatur an und fällt dann schnell ab. Kurz oberhalb der Phasenwechseltemperatur des PCM flacht der Verlauf ab. Ab ca. Minute 13 ist der Phasenwechsel zum Großteil abgeschlossen und die Austrittstemperatur nimmt wieder stärker ab, bis sie sich asymptotisch dem Mittelwert der schwingenden Eintrittstemperatur annähert.

Die gemessenen PCM-Innentemperaturen nehmen anfangs synchron zur Austrittstemperatur ab. Anders als beim Ladeversuch bilden sie im Bereich des Phasenwechsels ein Plateau aus. Ein Grund dafür kann die in den DSC- und T-History-Messungen beobachtete Unterkühlung des Materials sein.

Da in der Verlauf der Eintrittstemperatur in diesem Versuch keinen großen Über- oder Unterschwinger zeigt, entspricht der Verlauf der thermischen Leistung annähernd dem der Austrittstemperatur. Das Plateau während des Phasenwechsels liegt bei knapp 2 kW. Der Unterschied des Leistungsbetrags zu dem des Ladeversuchs ergibt sich auf aus der abweichenden Differenz zwischen Eintritts- und Phasenwechseltemperatur.

Der Mittelwert der Leistung im Phasenwechselbereich ist 1,8 kW und die Differenz zwischen Eintritts- und Phasenwechseltemperatur 8,4 K. Daraus ergibt sich eine temperaturbereinigte Leistung von 0,21 kW/K.

Die entladene Wärmemenge entspricht mit 0,71 kWh der die im vorhergehenden Versuch eingespeicherte Wärmemenge.



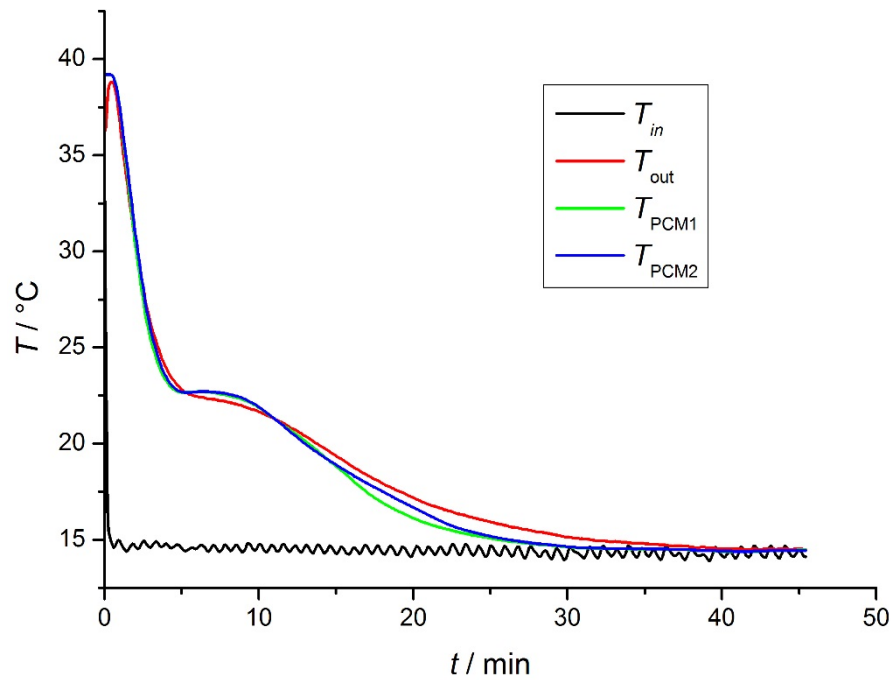


Abbildung 29: Gemessene Temperaturen während eines Entladeversuchs bei einem Volumenstrom des Wärmeträgerfluids von 4 l/min

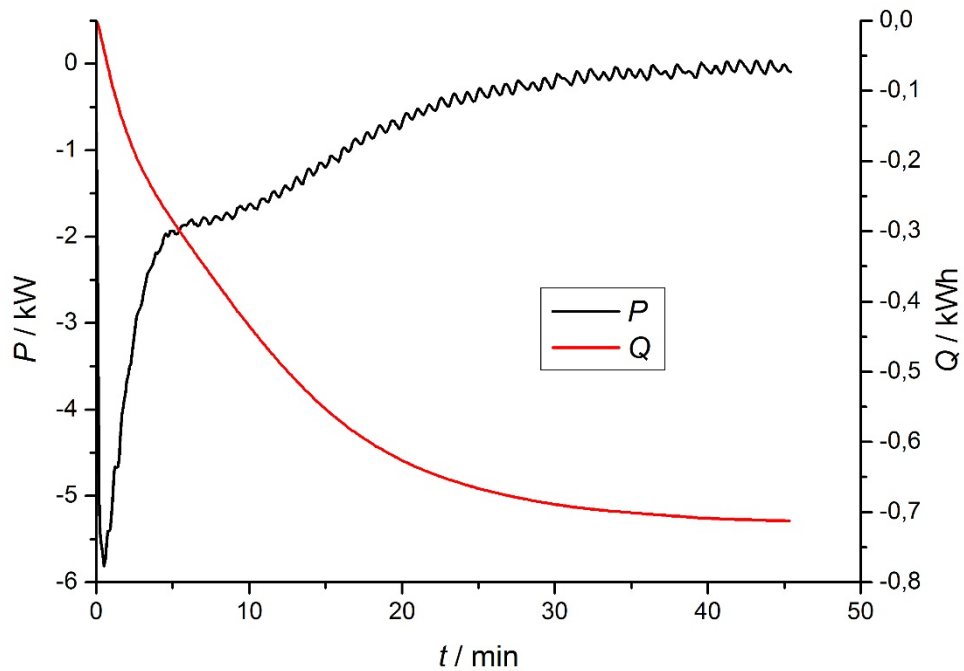


Abbildung 30: Thermische Leistung und entladene Wärmemenge entsprechend den Temperaturen aus Abbildung 29

## Charakteristische thermische Kenngrößen

Alle Messungen, die am zweiten Funktionsmuster durchgeführt wurden, wurden so ausgewertet, wie es in den beiden vorhergehenden Abschnitten für zwei repräsentative Versuche erläutert wurde. Die Ergebnisse der einzelnen Messungen sind im Anhang grafisch dargestellt.

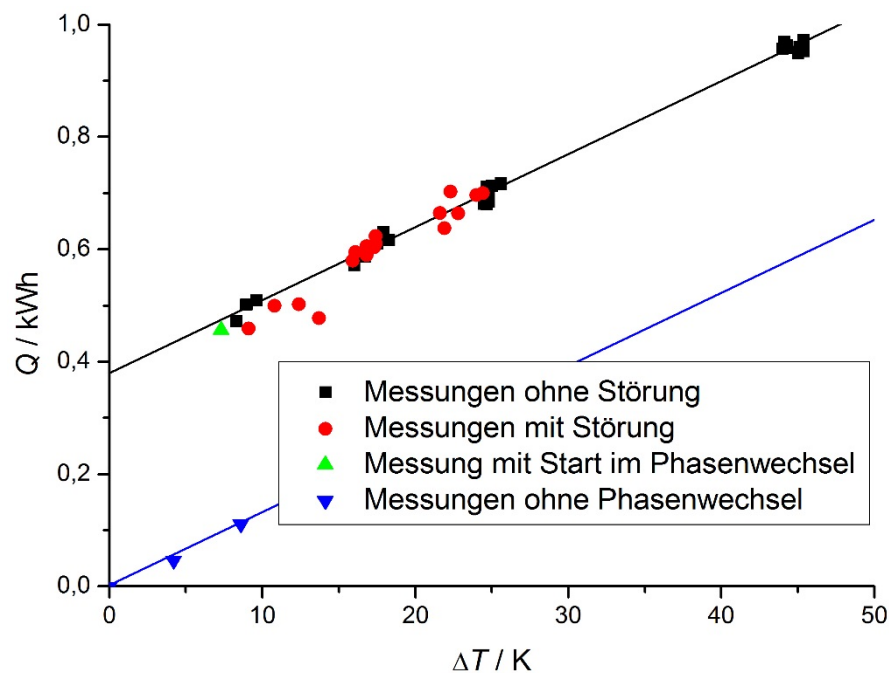


Abbildung 31: Übersicht der thermischen Speicherkapazität des zweiten Funktionsmusters bei verschiedenen Versuchsbedingungen.  $\Delta T$  ist die Differenz zwischen Start- und Endtemperatur;  $Q$  der Betrag der eingespeicherten bzw. entnommenen Wärmemenge.

In Abbildung 31 ist für jeden Versuch die aus den Messergebnissen ermittelte Kapazität über der Differenz zwischen Start- und Endtemperatur aufgetragen. Um die Lade- und Entladeversuche vergleichen zu können, werden hier sowohl für die Kapazitäten als auch für die Temperaturdifferenzen die Beträge der berechneten Werte verwendet. Die schwarzen Datenpunkte stellen die Kapazitäten der Versuche mit den Parametersätzen aus Tabelle 5 dar. Der Vollständigkeit halber sind die Ergebnisse aus Versuchen, die nicht unter idealen Bedingungen durchgeführt werden konnten, ebenfalls mit aufgenommen (roter Datenpunkte). In zwei zusätzlichen Versuchen wurden die Start- und Endtemperaturen so vorgegeben, dass kein Phasenwechsel stattfand. Die aus diesen Messungen ermittelten Kapazitäten enthalten also keine Speicherung latenter Wärme und sind im Diagramm blau dargestellt. Eine Messung wurde durchgeführt, bei der die Starttemperatur im Phasenwechselbereich des PCM lag. Die entsprechende Kapazität ist durch den grünen Datenpunkt dargestellt.

Die Datenpunkte aus den Versuchen, die ohne Störung durchgeführt wurden, zeigen eine lineare Abhängigkeit der Kapazität von der Temperaturdifferenz. Die Steigung der Ausgleichsgerade beträgt  $0,013 \text{ kWh/K}$ , der Ordinatenabschnitt etwa  $0,38 \text{ kWh}$ . Für die Ausgleichsgerade der Kapazitäten aus Messungen ohne Phasenwechsel wurden die Datenpunkte um den fiktiven Punkt  $(0 \text{ K}, 0 \text{ kWh})$  erweitert. Die Steigung der Geraden beträgt ebenfalls  $0,013 \text{ kWh/K}$ .

Aus den Parametern der Ausgleichgeraden lässt sich ableiten, dass der rein latente Anteil der Speicherkapazität, also die Wärmemenge die zum Aufschmelzen des PCM benötigt wird, 0,38 kWh beträgt. Der sensible Anteil ist abhängig von der Differenz zwischen Start- und Endtemperatur und ist gleichzusetzen der Summe der Wärmekapazitäten von PCM, Graphit, Speichergehäuse und Wärmeträgerfluid (im Speicher). Entsprechend der Steigung der Ausgleichgeraden beträgt die sensible Speicherkapazität 0,013 kWh/K.

Als zweite charakteristische Kenngröße des Speichers kann die temperaturbereinigte Leistung für verschiedenen Volumenströme ermittelt werden. Dazu wird für jede Messung wie oben beschrieben ein repräsentatives Zeitintervall bestimmt und aus den gemittelten Messwerten die Größe berechnet. Für die Messungen werden nach Volumenstromvorgabe gruppiert und für jeden Volumenstrom wiederum der Mittelwert der berechneten temperaturabhängigen Leistungen gebildet.

Für das zweite Funktionsmuster wurde aus den Messungen mit 4 l/min eine temperaturbereinigte Leistung von etwa 0,2 kW/K bestimmt. Die Streuung der Werte aus den einzelnen Messungen ist sehr gering. Für 8 l/min wurde eine temperaturbereinigte Leistung von etwa 0,3 kW/K ermittelt. Allerdings ist hier die relative Standardabweichung mit etwa 0,11 vergleichsweise hoch.

### Vergleich mit Simulationsergebnissen

Parallel zu Auswertung der Versuchsergebnisse wurde die für die Speicherauslegung erstellte Komponentensimulation mit den Parametern ausgewählter realer Versuche wiederholt. Dabei wurden anders als bei den Auslegungssimulationen das Fluid in den Sammlerstrukturen und die thermische Masse des Aluminiums mit Abgebildet. Für die Temperatur des Fluids am Speichereintritt wurden die real gemessenen Temperaturverläufe eingesetzt.

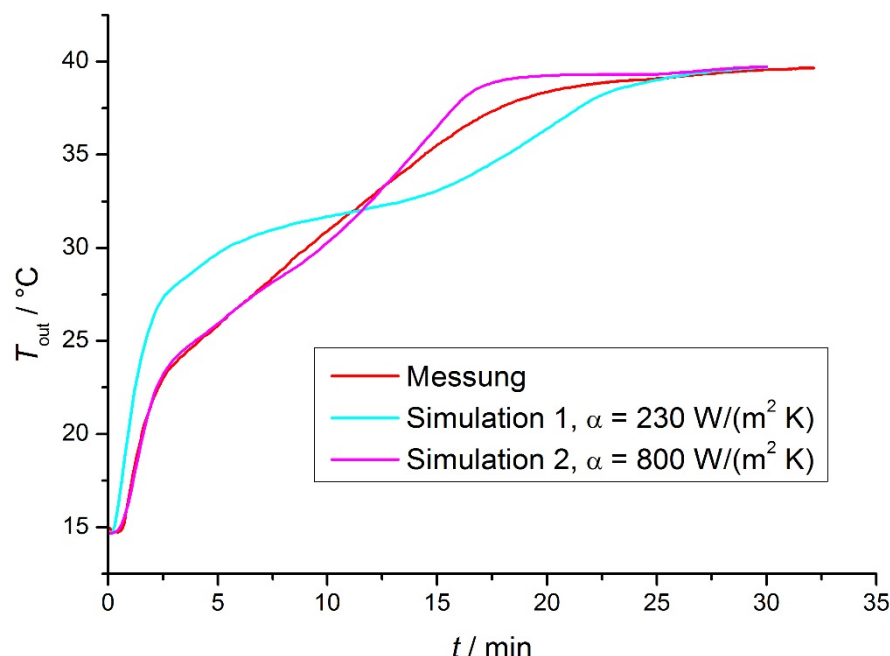


Abbildung 32: Vergleich der Austrittstemperatur-Ergebnisse aus Simulationen mit Messergebnissen eines repräsentativen Heizversuchs

In Abbildung 32 zeigt den Verlauf der Austrittstemperatur aus der Messung und aus zwei verschiedenen Simulationen eines Versuchs, bei dem der Speicher bei 4 l/min von etwa 14 °C auf 40 °C aufgeheizt wurde. Bei der ersten Simulation wurde für den Wärmeübergangskoeffizienten zwischen Fluid und Speicher der Wert eingesetzt, der sich aus den in der Literatur gefunden

Korrelationen errechnet. Im Vergleich mit dem Messergebnissen ist zu erkennen, dass die Austrittstemperatur zu Beginn in der Simulation wesentlich höher ist. Dementsprechend ist die Leistung in der Simulation anfangs wesentlich niedriger. Da die Leistung mit dem Wärmeübergangskoeffizient zunimmt, wurde der für die zweite Simulation entsprechend erhöht. Die Ergebnisse zeigen über weitere Bereiche eine sehr gute Übereinstimmung mit den Messergebnissen.

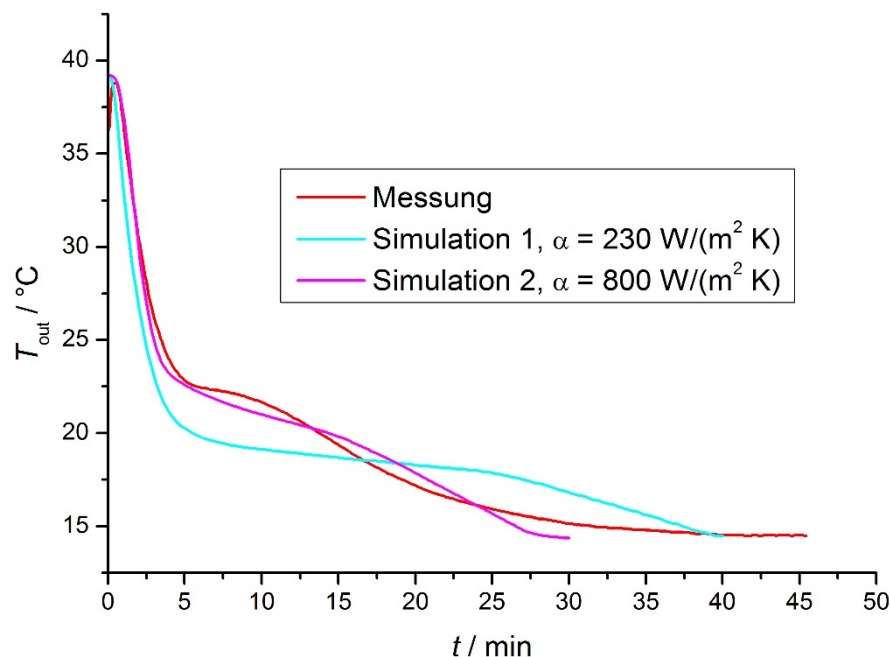


Abbildung 33: Vergleich der Austrittstemperatur-Ergebnisse aus Simulationen mit Messergebnissen eines repräsentativen Kühlversuchs

Die Simulationen wurden für einen Versuch, bei dem der Speicher bei 4 l/min von 40 °C auf 14 °C abgekühlt wurde, wiederholt (Abbildung 33). Auch hier zeigt sich bei den Ergebnissen der Simulation mit dem angepassten Wärmeübergangskoeffizient eine wesentlich höhere Übereinstimmung mit den Messergebnissen. Allerdings ist die Übereinstimmung nicht so groß wie bei dem Heizversuch. Grund hierfür ist wohl die in der Simulation nicht berücksichtigte Unterkühlung des PCM, die bei der Messung zur Ausbildung des Plateaus in der Austrittstemperatur führt.

## 15 TAP 12: Integriertes Funktionsmuster

Wie oben erläutert, wurde geplant, das erste Funktionsmuster so ausgelegt und konstruiert wird, dass die es für die Integration in das Testfahrzeug geeignet ist. Daher wurde das Arbeitspensum dieses Teilarbeitspakets in die vorherigen Paketen integriert.

## 16 TAP 13: Bericht/Dokumentation

Für 2012 und 2013 wurde jeweils zum Jahresende ein Zwischenbericht über den Projektfortschritt erstellt und an den Projektträger gesandt.



## 17 Nutzen, Verwertbarkeit des Ergebnisses

Die gewonnenen Ergebnisse werden in weiteren nationalen Projekten des ZAE Bayern (sowohl öffentlich geförderten als auch direkten Industriekooperationen z.B. DiTES4Grid - Thermische Speicher als verschiebbare Lasten in elektrischen Netzen FKZ: 03ESP330A) im Bereich der Latentwärmespeicherung genutzt und an den Ingenieur- bzw. Wissenschaftlernachwuchs weitergegeben.

## 18 Forschungsergebnisse Dritter

Während der Projektlaufzeit wurden keine relevanten Forschungsergebnisse Dritter bekannt.

## 19 Durchgeführte Arbeiten im Rahmen von Aus- und Weiterbildung

Im Rahmen der Aus- und Weiterbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses wurden folgende Arbeiten durchgeführt:

- Durchführungen von Versuchen für die Materialcharakterisierung und die Validierung des Funktionskonzeptes im Rahmen einer Tätigkeit als wissenschaftliche Hilfskraft im Anschluss an eine Abschlussarbeit am ZAE Bayern
- Sechsmonatiges Pflichtpraktikum im Rahmen eines Hochschulstudiums im Bereich Energietechnik. Inhalt: Auf- und Umbau des Teststands, Durchführung und Auswertung von Messungen am Funktionsmuster, simulatorische Arbeiten

## 20 Veröffentlichungen

Teile der Ergebnisse wurden in folgenden Vorträgen einem Fachpublikum vorgestellt:

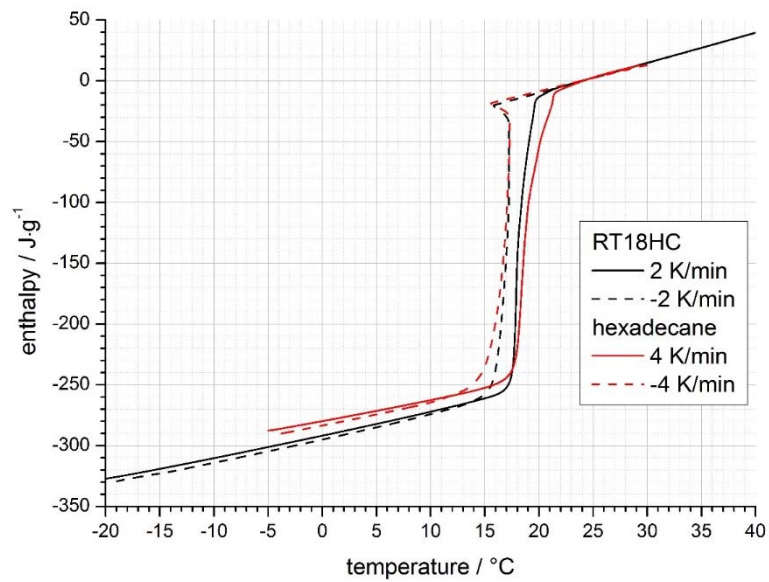
Sawatzki E 2013 Thermomanagementsystem in Elektrofahrzeugen für Energieeffizientes Fahren (EFA) 2014/2 2, *VDI-Fachkonferenz Thermomanagement für elektro-motorisch angetriebene PKW (Filderstadt bei Stuttgart)*

Hiebler S 2014 Latentwärmespeicher *VDI-Fachkonferenz Thermische Rekuperation in Fahrzeugen (Nürtingen)*

Sawatzki E, Brüll M, Griesbeck M 2014 Thermomanagementsystem in Elektrofahrzeugen für Energieeffizientes Fahren (EFA) 2014/2. Projektabschluss, 3. *VDI-Fachkonferenz Thermomanagement für elektromotorisch angetriebene PKW 2014 (Manching bei Ingolstadt)*

## Anhang

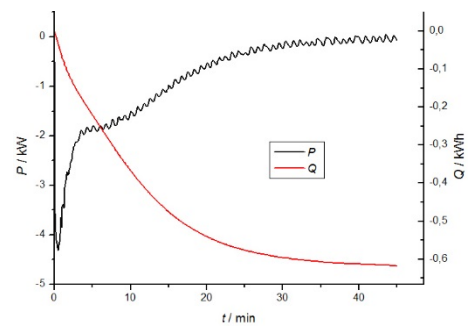
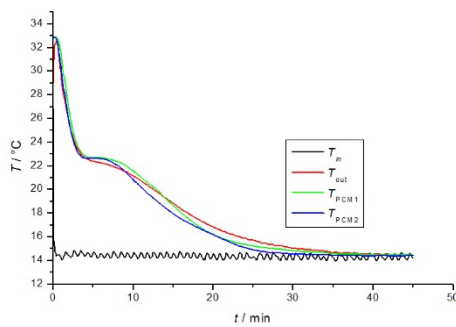
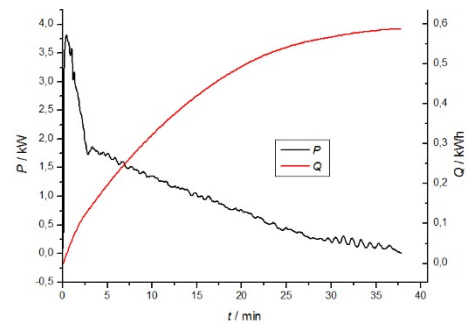
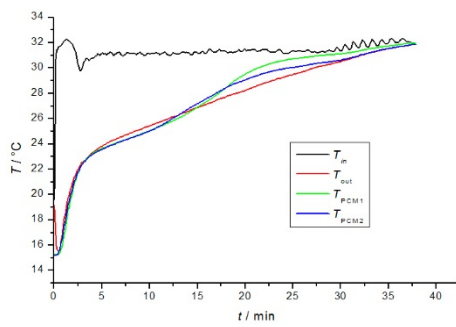
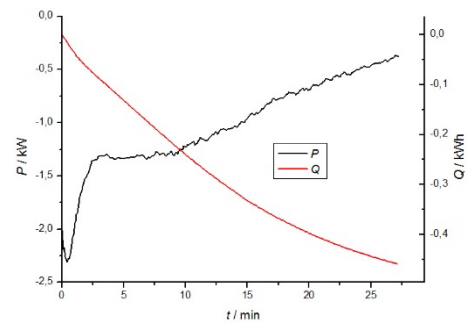
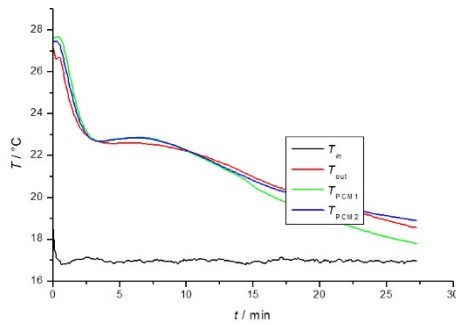
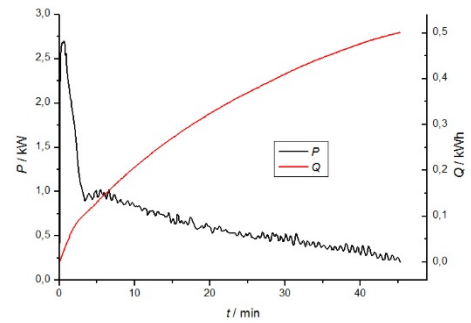
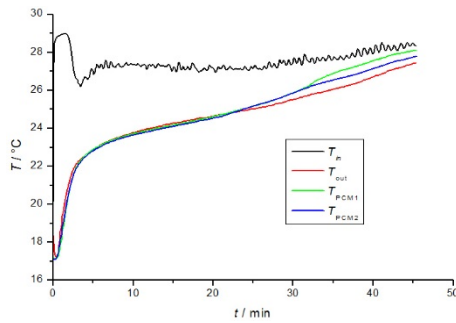
### A Vergleich von Hexadecan und RT18HC

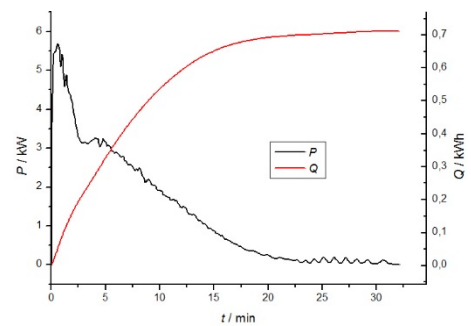
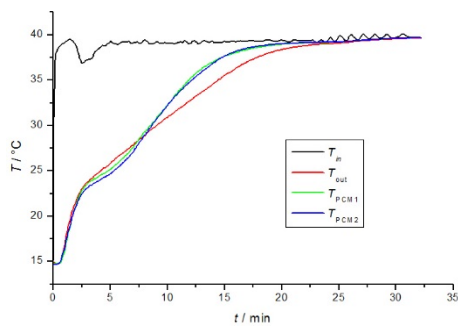
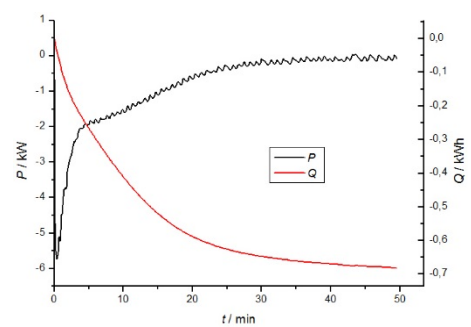
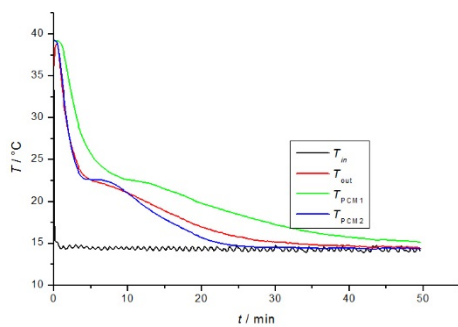
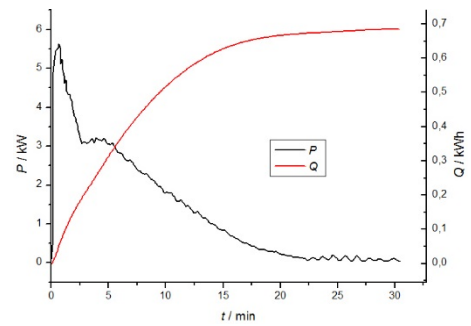
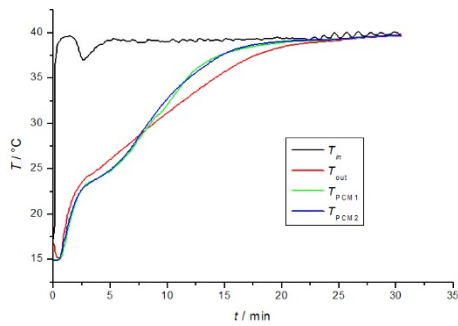
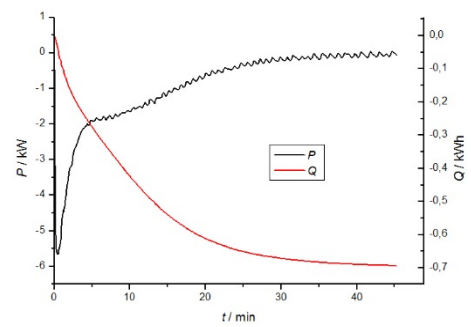
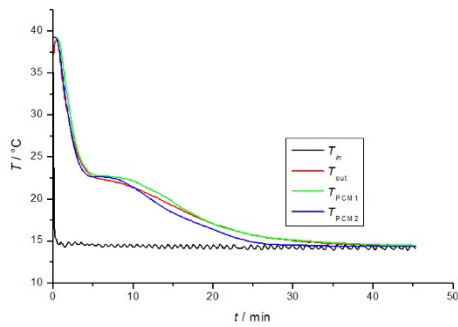
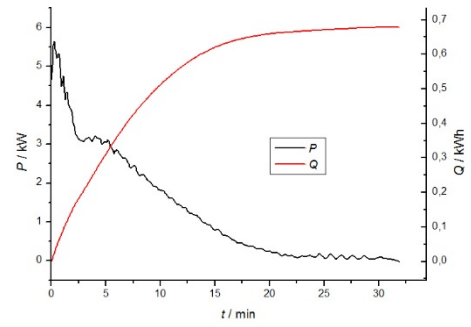
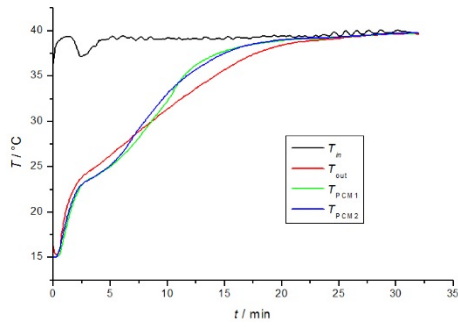


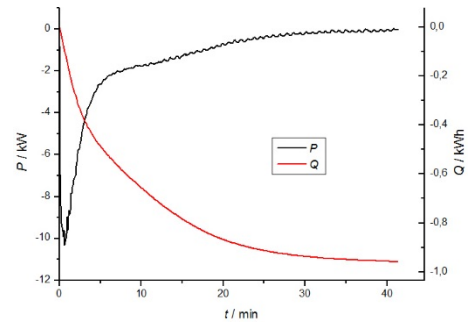
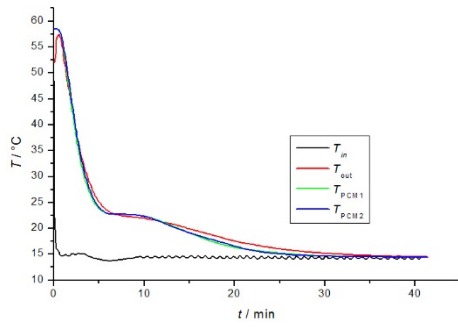
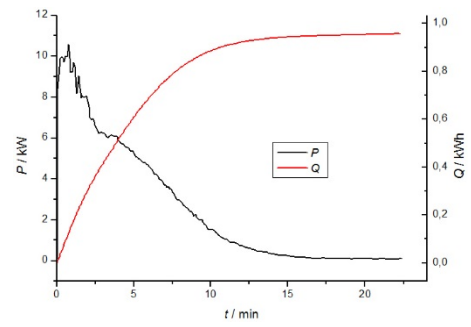
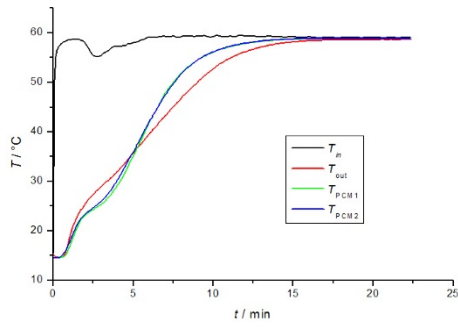
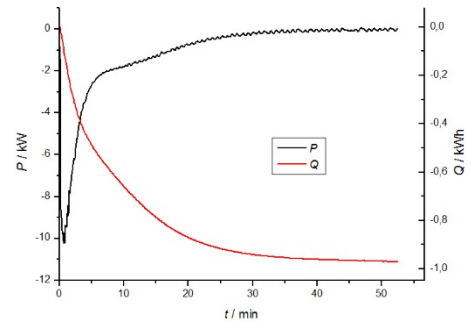
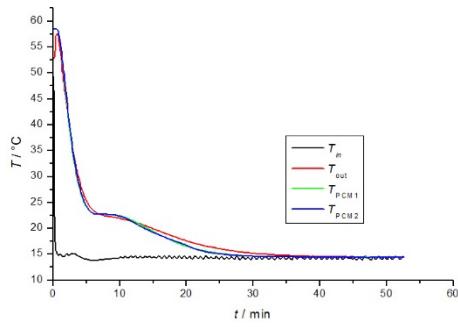
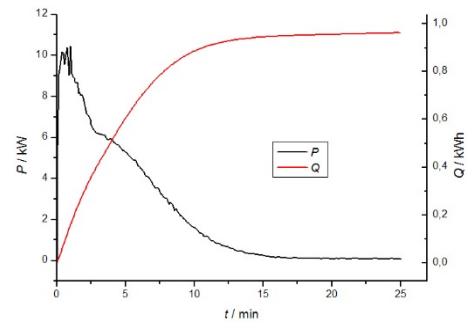
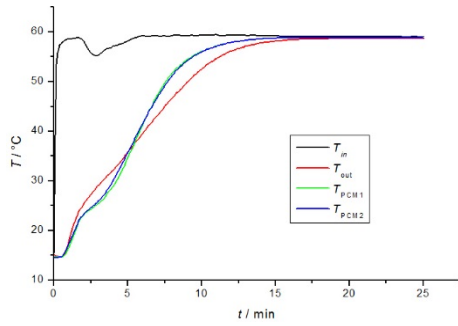
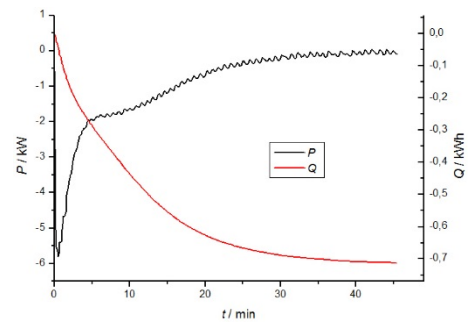
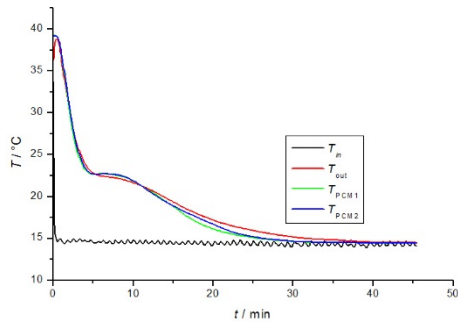


## B Ergebnisse aus den Messungen am Teststand

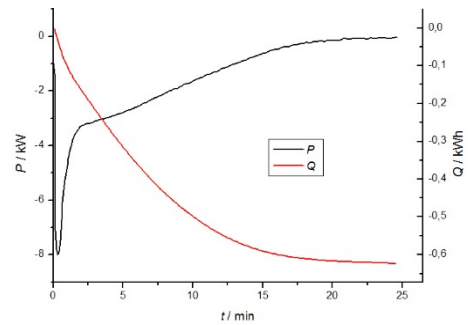
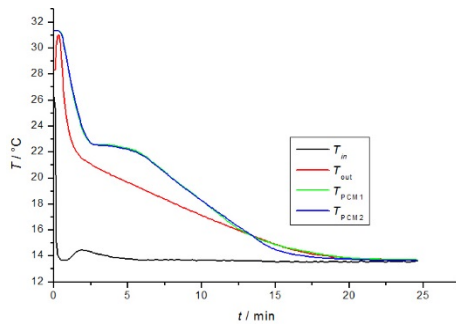
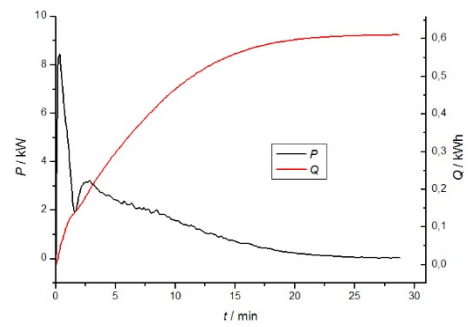
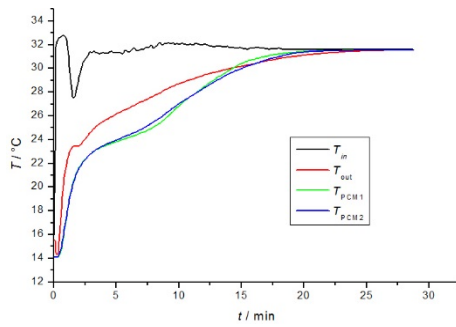
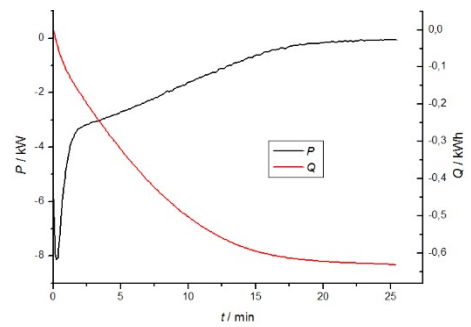
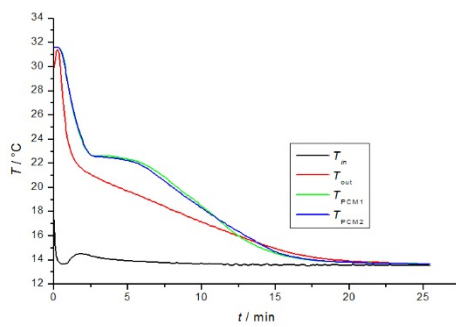
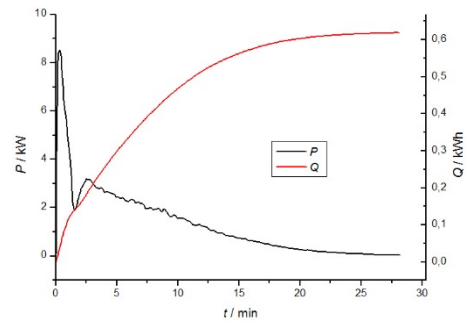
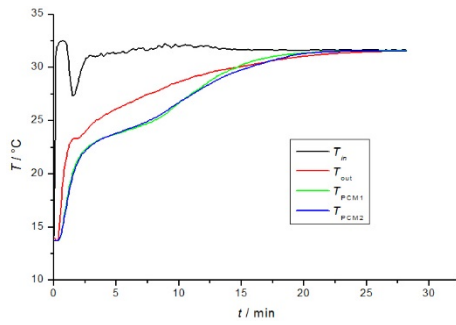
### Versuche bei 4 l/min

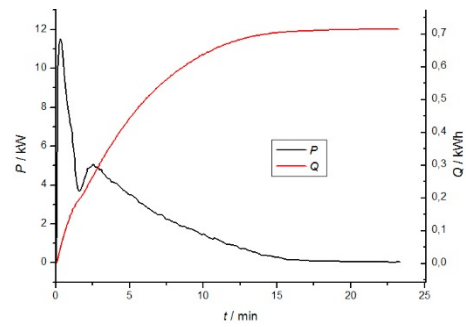
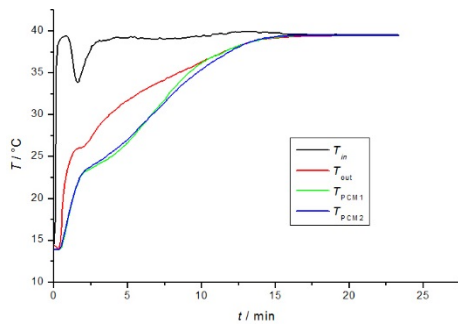
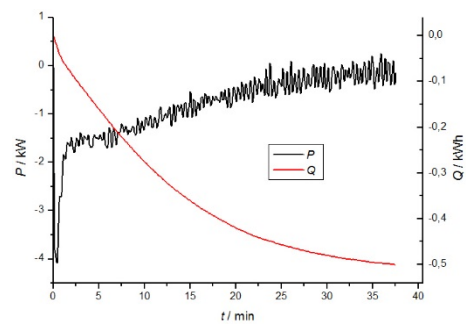
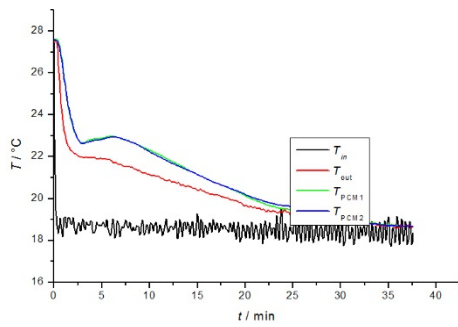
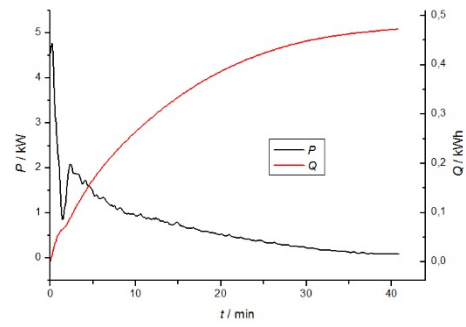
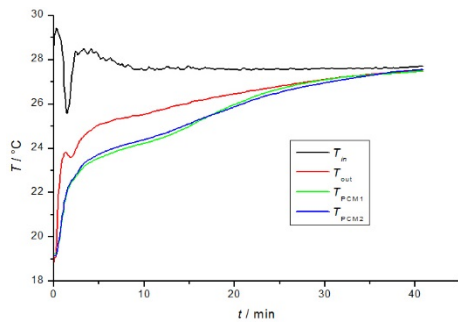
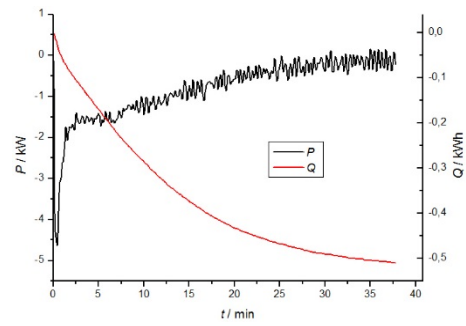
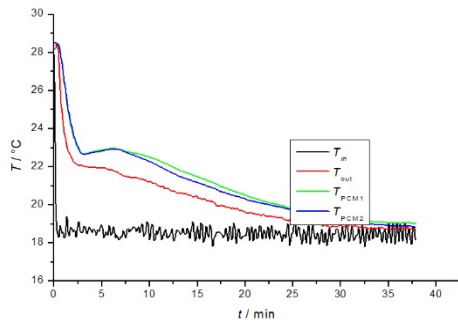
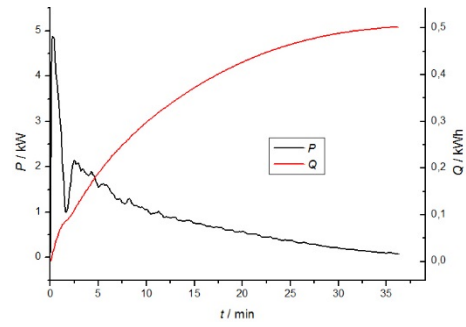
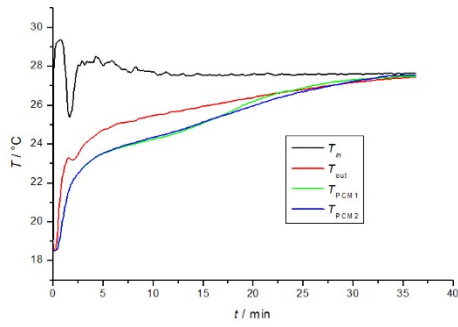


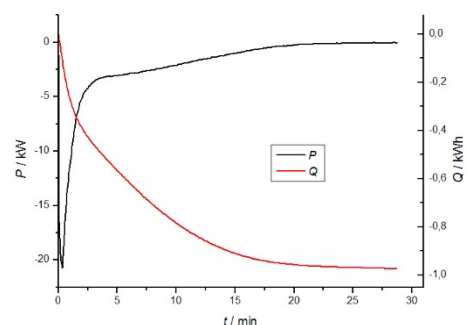
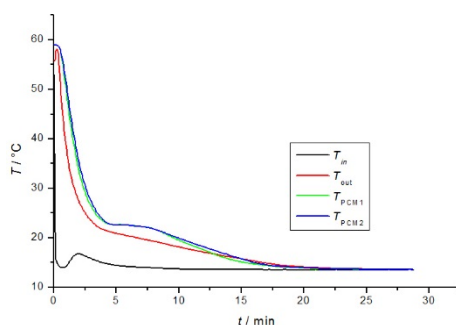
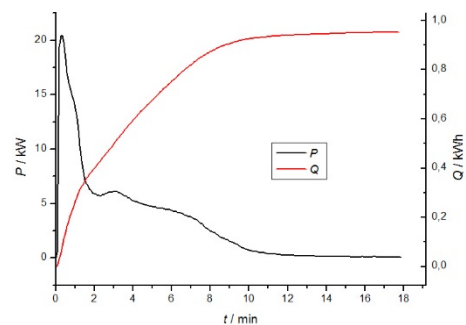
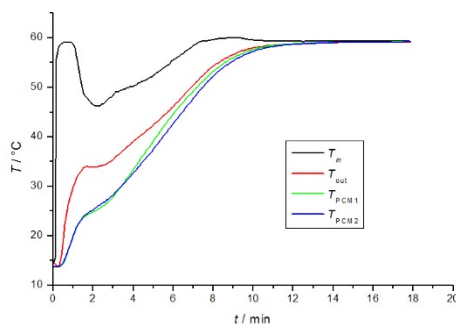
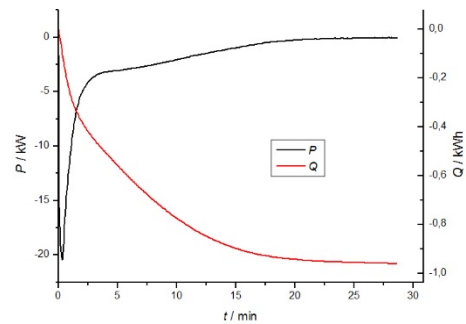
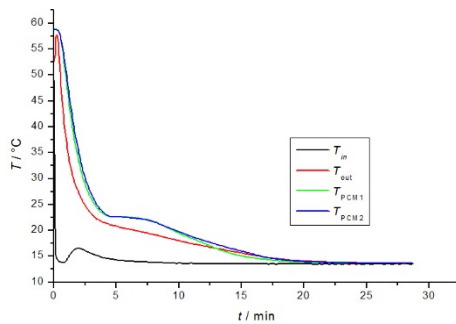
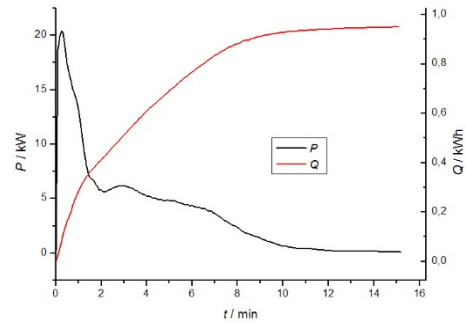
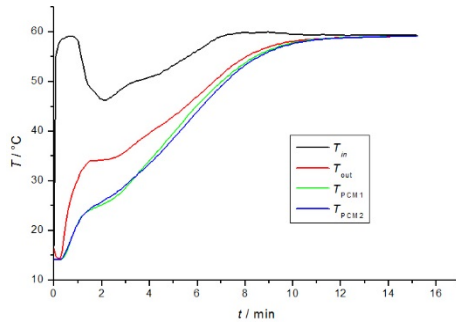
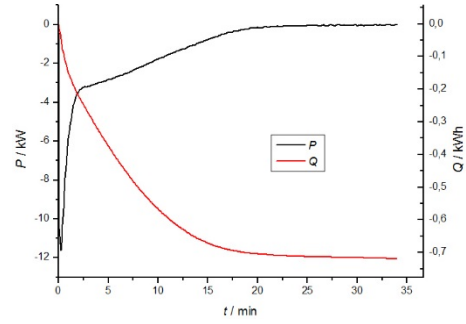
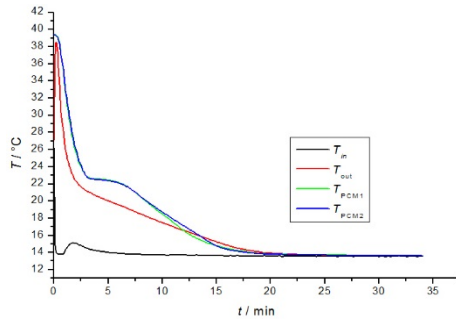




### Versuche bei 8 l/min









## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart Schlussbericht
3. Titel Schlussbericht Verbundprojekt: Energieeffizientes Fahren 2014 - 2. Projektphase (EFA2014/2) Teilvorhaben: Thermomanagement für Elektrofahrzeuge - Latentwärmespeicher	
4. Autor(en) Hiebler, Stefan Pöllinger, Simon	5. Abschlussdatum des Vorhabens Juni 2014
	6. Veröffentlichungsdatum
	7. Form der Publikation
8. Durchführende Institution(en) Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V. (ZAE Bayern) Bereich Energiespeicherung Walther-Meissner-Straße 6 85748 Garching	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 16N11950
	11. Seitenzahl 62
12. Fördernde Institution  Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben 2
	14. Tabellen 5
	15. Abbildungen 33
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
<p>18. Kurzfassung</p> <p>Bisher wurden Latentwärmespeicher im Automobil nur zur Speicherung von geringen Mengen an Wärme genutzt, um den Motor bei einem Kaltstart vorzuwärmen. Nur sehr wenige Speicher erreichten die Marktreife. Die hier verfolgte Anwendung erfordert andere Speichertemperaturen, -kapazitäten und Leistungen und somit ein komplette Neuentwicklung.</p> <p>Als Beitrag zur Energieeinsparung und Reichweitenerhöhung bei Elektrofahrzeugen sollte im Projekt EFA2014/2 ein Integriertes Thermomanagement entwickelt werden. Als Teil davon sollte ein Latentwärmespeicher entwickelt werden, der in unterschiedlichen Fahrsituationen als Wärmesenke oder -quelle dient.</p> <p>In einer umfangreichen Recherche wurden Phasenwechselmaterialien für die Temperaturbereiche 0 – 20 °C und 50 – 80 °C gesucht. Für die 115 bzw. 149 Funde wurden für die Anwendung relevante Materialdaten zusammengestellt. Im Projektverlauf wurde als für die Anwendung optimale Temperatur der Bereich 15 – 25 °C identifiziert. Für diesen Bereich wurden 10 kommerziell verfügbare Materialien ausgewählt, die am ZAE Bayern thermisch vermessen wurden. Als Favorit wurde PureTemp23 mit einer Schmelztemperatur von 23 C identifiziert. Das Material wurde unter anderem auf Zyklenstabilität und Korrosivität untersucht.</p> <p>Für den Speicher wurde ein Funktionskonzept entwickelt, dass auf einer Wärmeübertragerstruktur aus parallel angeordneten Aluminium-Multiport-Extrusions basiert. Teil des Funktionskonzepts war auch, die Wärmeleitfähigkeit des Speichermaterials und damit die thermische Leistung durch Zugabe von Graphit zu optimieren. Weiter wurde ein Konzept entwickelt und getestet, den Ladezustand des Speichers über den Innendruck abzuschätzen.</p> <p>Die Auslegung des Speichers bezüglich der thermischen Leistung erfolgte mit Hilfe von Finite-Differenzen-Simulationen. Da der Bauraum im geplanten Testfahrzeug stark begrenzt war, wurde der Speicher so konstruiert, dass er den Raum effizient ausnutzt und eine hohe Speicherkapazität aufweist. Entsprechend dem Funktionskonzept und der thermischen Auslegung wurden drei Funktionsmuster des Speichers realisiert. Die thermische Vermessung an einem Teststand am ZAE Bayern ergab eine Leistung, bezogen auf die Differenz zwischen der Eintrittstemperatur des Wärmeträgerfluids und der Schmelztemperatur des PCM, von 0,2 kW/K bei einem Volumenstrom von 4 l/min und 0,3 kW/K bei 8 l/min. Der latente Anteil der Speicherkapazität beträgt 0,38 kWh, der sensible 0,013 SkWh/K. Bei einer Spreizung von z.B. 20 K ergibt sich insgesamt eine Kapazität von etwa 0,64 kWh.</p> <p>Im Projekt wurde die prinzipiell Funktions- und Leistungsfähigkeit des entwickelten Speicherkonzepts gezeigt und das Potenzial des Einsatzes der Latentwärmespeicher-Technologie im Elektrofahrzeug konnte aufgezeigt werden. Für den serienmäßigen Einsatz der Technologie sind allerdings noch weitere Entwicklungsschritte nötig. Für die Wärmespeicherung bei höheren Temperaturen muss insbesondere die thermische Isolierung des Speichers optimiert werden.</p>	
19. Schlagwörter Phasenwechselmaterialien, PCM, Latentwärmespeicher, Elektrofahrzeug, Thermomanagement	
20. Verlag	21. Preis

## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Final report
3. title Final report Joint project: Energy efficient driving 2014 – 2 <sup>nd</sup> project phase Subproject: Thermal management for electric vehicles – Latent heat storage	
4. author(s) (family name, first name(s)) Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V. (ZAE Bayern) Bereich Energiespeicherung Walther-Meissner-Straße 6 85748 Garching	5. end of project June 2014
	6. publication date
	7. form of publication
8. performing organization(s) (name, address)  Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	9. originator's report no.
	10. reference no. 16N11950
	11. no. of pages 62
12. sponsoring agency (name, address)  Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references 2
	14. no. of tables 5
	15. no. of figures 33
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)	
18. abstract So far in the automotive sector far latent heat storages have been used only for storing small amounts of heat for preheating the motor at cold starts. Just few of these storages have been developed to a marked-ready state. The application aimed for in this project requires different storage temperatures, capacities and power characteristics which leads to a completely new development of the storage. Part of project EFA2014/2 was the development of an integrated thermal management system aiming at a reduced energy consumption and an improved range of electric vehicles. A latent heat storage was plant to be part of this system. The storage was supposed to function as heat sink or source, depending on the actual driving situation. An extensive inquiry on phases change materials with a melting point between 0 and 20 °C and between 50 and 80 °C was made. For these rages 115 and 149 materials were found. Material data, that was relevant for the application, was collected for these materials. During the project the optimal temperature range was identified as 15 – 25 °C For this range 10 promising commercialised materials were selected. These candidates were thermally characterised at ZAE Bayern. PureTemp23 was identified as the best fitting material. It was test for cycling stability and corrosiveness. A concept of function was developed that based on parallel arranged of aluminium multiport extrusion. Part of the concept was to mix the material with graphite to improve heat conductivity and thermal power. A concept was tested that utilizes data on the pressure in the storage to determine the state of charge. The optimisation of the storage design regarding thermal power was done by finite differences simulations. The installation space in the planed testing vehicle was strongly limited. So the storage was designed to use the available space efficiently to reach a high capacity. Considering the concept of function and the thermal design three functional models were built. The models were tested on a test rig at ZAE Bayern. The measured thermal power relating to the difference of the melting temperature and the entrance temperature of the heat transfer medium is 0.2 kW/K at a volume flow of 4 l/min, and 0.3 kW/K at 8 l/min. The latent part of the capacity is 0.38 kWh and the sensible part is 0.013 kWh/K. This leads to an overall capacity of e.g. 0.64 kWh at a temperature spread of 20 K. The results show the functional capability of the developed storage concept and the potential of the latent heat storage technology in the field of electro mobility. More development steps are necessary to make the technology ready for serial-production. To use the concept at higher storage temperatures the thermal insulation has to be improved.	
19. keywords	
20. publisher	21. price