Zwischenbericht Projekt „THS-Bus“

Verantwortlich:

Werner Kraft M.Sc.
Institut für Fahrzeugkonzepte
Pfaffenwaldring 38-40
70569 Stuttgart

Beteiligte:
Veronika Jilg M.Sc.
Tim Lanz M.Sc.
Peter Vetter M.Sc.
Niklas Dicke M.Sc.

Datum: 28.06.2019

Inhalt

1 Einleitung 1
2 Aktueller Projektstand 1
2.1 Projektplan 1
2.2 Aktueller Stand der Arbeiten und Meilensteinerreichung 1
2.2.1 AP1 – Anforderungen und Randbedingungen 1
1.1.1 AP2 – Auslegungsmethodik und Auslegungswerkzeuge 2
1.1.2 AP3 – Physikalisch-Technische Grundlagen 2
1.1.3 AP4 – Adaption Speicherkonzept 2
2 Darstellung der Arbeitsinhalte 2
2.1 AP 0 – Projektmanagement und Reporting 2
2.1.1 Interne Projektdokumentation und -bearbeitung 2
2.1.2 Austausch mit assoziierten Projektpartnern 3
2.1.3 Veröffentlichungen und Außendarstellung 3
2.2 AP 1 – Anforderungen und Randbedingungen 3
2.2.1 Exkurs zu Betriebsszenarien von Elektrobussen 3
2.2.2 AP 1.1 – Energetische, topologische und einsatzspezifischen Anforderungen 5
2.2.3 AP 1.2 –Sicherheitstechnische Anforderungen und Randbedingungen 22
2.3 AP 3 – Physikalisch – Technische Grundlagen 23
2.3.1 AP 3.1 Materialtechnische Grundlagen 23
2.3.2 AP 3.2 Entwicklung Wärmeaustragssystem 26
2.3.3 AP 3.3 Entwicklung Wärmeeintragssystem 31
2.4 AP 4 – Adaption Speicherkonzept 34
2.4.1 AP 4.1 – Kritische Designaspekte 35
2.4.2 AP 4.2 – Konzeptentwicklung 35
3 Literaturverzeichnis 44

1 Einleitung

Der vorliegende Arbeitsbericht soll den aktuellen Projektstand sowie die seit Projektstart (01.08.2018) durchgeführten Arbeiten des Projektes „THS-Bus“ erläutern und darstellen. Neben den Ergebnissen der bisherigen Arbeiten werden auch die Arbeitsschritte beleuchtet, die zur Erreichung der jeweiligen Ergebnisse durchgeführt wurden. Der vorliegende Arbeitsbericht soll dabei einen zusammenfassenden Charakter aufweisen. Es wird daher darauf hingewiesen, dass die Darstellungen im Rahmen des vorliegenden Zwischenberichtes nicht den tatsächlich vorliegenden Tiefgang der durchgeführten Arbeiten wiedergeben können. Eine Einsicht in weitere Dokumentationen zu den jeweiligen Arbeitsschritten ist jedoch selbstverständlich möglich.

2 Aktueller Projektstand

2.1 Projektplan

Der Projektplan zum Projekt „THS-Bus“ ist in Abbildung 1 dargestellt. Gemäß dem Projektplan ist zum Zeitpunkt des vorliegenden Arbeitsberichts damit etwa ein Drittel der gesamten Projektdauer abgeschlossen. Arbeiten wurden gemäß Projektplan bisher in den Arbeitspaketen AP1, AP2, AP3 und AP4 durchgeführt. Weiterhin ist der Meilenstein MS1 gemäß dem Projektplan bereits zu erreichen. Eine ausführliche Beschreibung zum aktuellen Stand der Arbeitspakete sowie zur Meilenstein- und Zielerreichung erfolgt im nachfolgenden Kapitel.

			2018				2019				2020				2021			
AP/MS	AP-Titel/MS-Titel	Verantwortlicher	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
AP 0	Projektmanagement und Reporting	FK-AEW																
AP 1	Anforderungen und Randbedingungen	FK-AEW Beteiligungen: Konvekta, Flughafen																
AP 1.1	Energetische, topologische und einsatzspezifische Anforderungen																	
AP 1.2	Betriebs- und sicherheitstechnische Anforderungen und Randbedingungen																	
MS 1	*Anforderungen und Randbedingungen definiert*					X												
AP 2	Auslegungsmethodik und Auslegungswerkzeuge	FK-AEW Beteiligungen: Konvekta																
AP 2.1	Auslegungsmethodik																	
AP 2.2	Auslegungswerkzeuge																	
MS 2	*Speicherkonzept ausgelegt*										X							
MS 3	*Auslegungswerkzeuge validiert*															X		
AP 3	Physikalische - Technische Grundlagen	FK-AEW																
AP 3.1	Materialtechnische Grundlagen potentieller Speichermaterialien und Einhausungsmaterialien																	
AP 3.2	Entwicklung anwendungsgerechtes Wärmeaustragssystem																	
AP 3.3	Entwicklung anwendungsgerechtes Wärmeeintragssystem																	
AP 4	Adaption Speicherkonzept	FK-AEW Beteiligungen: Konvekta																
AP 4.1	Kritische Designaspekte																	
AP 4.2	Konezptentwicklung																	
MS 4	*Speicherkonzept entwickelt*									X								
AP 5	Funktionsmusterbau und Laboruntersuchung	FK-AEW																
AP 5.1	Aufbau eines prototypischen Wärmespeichersystems																	
AP 5.2	Experimentelle Untersuchung des aufgebauten Wärmespeichersystems																	
MS 5	*Prototypisches Wärmespeichersystem aufgebaut*													X				
AP 6	Bewertung und Ausblick	FK-AEW Beteiligung: Konvekta, Flughafen																
AP 6.1	Bewertung des Wärmespeichersystems im Fahrzeugsystem																	
AP 6.2	Ausblick zu Potentialen thermischer Energiespeicher																	

Abbildung 1: Projektplan zum Projekt „THS-Bus“

2.2 Aktueller Stand der Arbeiten und Meilensteinerreichung

2.2.1 AP1 – Anforderungen und Randbedingungen

Die Definition der Anforderungen und Randbedingungen ist zum aktuellen Stand bereits vollständig abgeschlossen sowie der Meilenstein MS1 erreicht. Entgegen des ursprünglichen Projektplans konnten der Abschluss des Arbeitspaketes sowie die Erreichung des Meilensteines erst deutlich später, in etwa zur Mitte von Q2 erfolgen. Ursächlich hierfür sind wesentliche Änderungen bei den tatsächlichen Arbeitsinhalten im Vergleich zu den ursprünglich geplanten Arbeitsinhalten. Die Auswertung der durch den Flughafen bereitgestellten Daten hat ergeben, dass eine Ableitung der zur Beheizung der Busse benötigten Heizleistungen auf Basis der Datenlage nicht möglich ist. Da die Kenntnis über die notwendige Heizleistung für das Projekt essentiell ist, wurde sich für eine Messung der Heizleistung im Realbetrieb entschieden. Die Planung der Messung, Ausstattung eines Busses mit entsprechender Messtechnik sowie die Auswertung der Messergebnisse stellten einen

erheblichen Mehraufwand im Vergleich zu den ursprünglich geplanten Arbeitsinhalten, in denen keine eigene Vermessung im Realbetrieb geplant war, dar.

Trotz des erheblichen Mehraufwandes und der damit verbundenen Abweichung vom Projektplan lässt sich allerdings ein sehr positives Fazit zum AP1 ziehen. Durch die eigenen Messungen konnte bzw. kann ein erheblicher Mehrwert sowohl für das Projekt, aber auch und v.a. für die wissenschaftliche Tiefe sowie die Öffentlichkeitswirksamkeit erreicht werden. Die Messung der Heizleistungen an batterieelektrischen Flughafenbussen wurde nach aktuellem Kenntnisstand erstmalig durchgeführt. Die erzielten Ergebnisse entsprechen zudem den Erwartungen und lassen sich künftig sehr gut für Veröffentlichungen nutzen.

Unabhängig vom Projekt könnten die Messungen außerdem zu einer Optimierung des aktuellen Heizsystems genutzt werden sowie zu einer Weiterentwicklung des Heizsystems durch den Bushersteller für künftige Busgenerationen. Busbetreiber, wie z.B. der Flughafen Stuttgart, könnten durch die hieraus mögliche Verbesserung der Fahrzeuge ebenfalls profitieren.

1.1.1 AP2 – Auslegungsmethodik und Auslegungswerkzeuge

Die Arbeiten im AP2 konnten entgegen des Projektplans noch nicht begonnen werden. Ursächlich hierfür ist der erhebliche Mehraufwand, der im AP1 geleistet werden musste. Aktuell wird davon ausgegangen, dass die Arbeiten im AP2 zum Q3/2019 begonnen werden können. Von einer Gefährdung der Projektziele ist allerdings momentan noch nicht auszugehen. Eine Auslegung des Speicherkonzepts bis zum Ende von Q1/2020, welche für den weiteren Aufbau und die Untersuchung des Funktionsmusters notwendig ist, ist daher weiterhin ein realistisches Ziel.

1.1.2 AP3 – Physikalisch-Technische Grundlagen

Die Bearbeitung der Arbeitsinhalte des AP3 ist zum aktuellen Zeitpunkt plangemäß. Sowohl im AP3.1, im AP3.2 als auch im AP3.3 wurde mit den geplanten Arbeitsinhalten bereits begonnen und ein entsprechender Stand, der den Erwartungen zum aktuellen Zeitpunkt entspricht, erreicht.

1.1.3 AP4 – Adaption Speicherkonzept

Die Arbeiten zur Adaption des Speicherkonzeptes sind nach aktueller Einschätzung dem Projektplan etwas voraus. Die Ableitung der kritischen Designaspekte im AP4.1 konnte gemäß Projektplan bereits abgeschlossen werden. Im AP4.2 konnte die experimentelle Untersuchung verschiedener Speicherkonzepte mit dem Fokus auf dem Wärmekontakt zwischen Speichermaterial und Wärmeein- und austragssystem bereits vollständig abgeschlossen werden. Die Arbeiten hierfür konnten entgegen der ursprünglichen Planung bereits im Q3/2018 begonnen werden und wurden im Q2/2019 bereits abgeschlossen. Die noch ausstehende Ableitung anwendungsgerechter Speicherkonzepte kann voraussichtlich bereits im Q3/2019 und damit etwa ein Quartal früher als geplant abgeschlossen werden.

2 Darstellung der Arbeitsinhalte

2.1 AP 0 – Projektmanagement und Reporting

2.1.1 Interne Projektdokumentation und -bearbeitung

Die interne Projektdokumentation erfolgt auf Basis der am DLR Institut für Fahrzeugkonzepte bestehenden QM-Standards. Grundlegend hierfür ist eine Ordnerstruktur, die eine klare Untergliederung und Ablage relevanter Dokumente in administrative und inhaltliche Aspekte unterstützt. Zur effizienten Projektbearbeitung wurden einzelnen Personen aus der DLR-Projektgruppe Zuständigkeiten für die Bearbeitung der jeweiligen Arbeitsinhalte übertragen. Zu Beginn des Projektes hat am 13.7.2018 ein DLR-internes Kick-Off Meeting stattgefunden. Zum

regelmäßigen Austausch des Arbeitsfortschrittes wurde innerhalb der DLR-Projektgruppe kürzlich außerdem ein zweiwöchiger Regeltermin eingeführt.

2.1.2 Austausch mit assoziierten Projektpartnern

Der Austausch mit den assoziierten Projektpartnern hat bisher im Rahmen von 2 Treffen vor Ort, im Rahmen von TelKos sowie über weitere Kommunikation per E-Mail und Telefon erfolgt. Außerdem wurde kürzlich ein alle vier Wochen stattfindender Telefontermin eingerichtet, bei dem ein regelmäßiger Austausch zwischen dem DLR und Konvekta sowie bei entsprechend relevanten Themen zusätzlich mit dem Flughafen erfolgt. Folgende Aufzählung benennt die bisher stattgefundenen Treffen und Telefontermin ohne Benennung der kürzlich eingerichteten Regeltermine sowie des anderweitig stattfindenden Austausches:

- 27.08.2018: Kick-Off Meeting am DLR; Teilnehmer: DLR, Konvekta
- 06.11.2018: Projekttreffen am Flughafen Stuttgart; Teilnehmer: DLR, Konvekta, Flughafen, WMBW
- 14.12.2018: TelKo zu Anforderungen und Randbedingungen; Teilnehmer: DLR, Konvekta, Flughafen
- 10.05.2019: TelKo zu Ergebnissen der Messungen am Flughafen sowie zu Anforderungen und Randbedingungen; Teilnehmer: DLR, Konvekta

2.1.3 Veröffentlichungen und Außendarstellung

Eine Veröffentlichung erster Projektergebnissen mit dem Schwerpunkt auf den Anforderungen und Randbedingungen (v.a. Fokus Messungen am Flughafenbus) hat am 26.06.2019 im Rahmen des „Seminar Erneuerbare Energien“ an der Hochschule Karlsruhe erfolgt. Eine weitere Veröffentlichung in der Projektergebnisse vorgesellten werden, ist für den April 2020 bei der TRA in Helsinki in Planung (Annahme des Abstracts steht noch aus). Weiterhin ist eine Projekthomepage in Planung die durch das DLR betrieben werden soll. Zweck der Homepage ist es, über aktuelle Inhalte und Ergebnisse des Projektes zu berichten sowie vermehrt auf die im Projekt behandelte Thematik in der Öffentlichkeit aufmerksam zu machen.

2.2 AP 1 – Anforderungen und Randbedingungen

2.2.1 Exkurs zu Betriebsszenarien von Elektrobussen

Bevor im Weiteren auf die am Stuttgarter Flughafen zugrunde liegenden Randbedingungen für den Einsatz eines Thermischen Hochleistungsspeichers (THS) eingegangen wird, erfolgt zunächst ein allgemeiner Exkurs bezüglich der möglichen Betriebsszenarien von Elektrobussen. Das Anwendungsfeld von Elektrobussen wird hierfür nicht auf den Einsatz am Flughafen beschränkt sondern leitet sich maßgeblich aus dem Einsatzbereich im ÖPNV ab. Hierdurch wird der Anspruch des Projekts, den Einsatz von THS in Elektrobussen nicht nur beschränkt auf das Zielszenario Flughafenvorfeld, sondern möglichst allgemein zu untersuchen, bestärkt. Aufgrund der großen Spannweite der im Folgenden beschriebenen Einsatzszenarien im ÖPNV kann hierdurch nahezu die vollständige Bandbreite an möglichen Anwendungsszenarien von Elektrobussen und damit auch die Anforderungen an THS aufgrund der verschiedenen Betriebsszenarien dargestellt werden.

Grundsätzlich sind die Betriebs- und Umlaufpläne von Bussen je nach Verkehrsbetrieb sehr unterschiedlich aufgebaut. Die größten Unterschiede treten hierbei zwischen urbanen und ländlichen Betrieben auf. Eine Gemeinsamkeit besteht jedoch darin, dass die höchsten Kosten mit ca. 55 % bis 65 % der Gesamtkosten auf das Fahrpersonal entfallen. Geringfügige Änderungen in den Umlaufplänen können demnach große Auswirkungen auf den Personaleinsatz und den hiermit verbundenen Kosten haben. Folglich sind Anpassungen des Umlaufplanes aufgrund der mangelnden Reichweite der Fahrzeuge bzw. deren Jahreszeitabhängigkeit (v.a. durch Beheizung im Winter) ein primäres Markthindernis.

Abbildung 2 zeigt die Summenkurve der durchschnittlichen Fahrleistungen von 16 Verkehrsunternehmen mit insgesamt 2563 Umlaufplänen aus Deutschland und der Schweiz. Hieraus geht hervor, dass mit einer Reichweite eines Fahrzeugs von 250 km etwa die Hälfte aller Umlaufpläne, bei einer Reichweite von 300 km knapp 80 % aller Umlaufpläne und mit einer Reichweite von ca. 400 km nahezu alle Umlaufpläne bedient werden können. [1] [2]

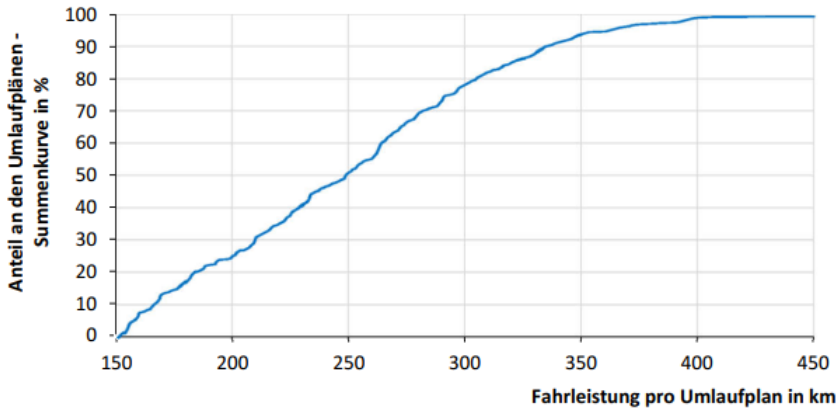


Abbildung 2: Summenkurve der Fahrleistungen eines Solobusses an Schultagen im ÖPNV in Deutschland, beginnend bei einer Umlaufplanlänge von 150 km [1]

Die maximale Reichweite eines Elektrobusses während eines Umlaufes wird neben der Reichweite des Fahrzeugs mit einer Batterieladung zusätzlich durch das Ladeszenario bestimmt. Eine grundsätzliche Unterscheidung erfolgt in die Szenarien „Volllader" und „Gelegenheitslader". Beide Szenarien werden im Folgenden näher erläutert.

Volllader

Beim Volllader wird das Fahrzeug lediglich einmal pro Tag, i.d.R. am Betriebshof außerhalb der Betriebszeiten geladen. Die einmalig zugeführte Energiemenge muss demnach für den vollständigen Umlaufplan ausreichen. Abbildung 3 veranschaulicht das beschriebene Szenario.

Abbildung 3: Nachladestrategie beim Volllader [1]

Wie bereits erwähnt können in ländlichen Gebieten Umlaufpläne von bis zu 400 km auftreten. Typische Durchschnittsgeschwindigkeiten liegen im Bereich von 21 km/h bis 23,5 km/h, wobei in ländlichen Gegenden meist höhere Geschwindigkeiten auftreten. Im urbanen Bereich sind Umlaufpläne häufig deutlich kürzer, allerdings einhergehend mit meist geringeren Durchschnittsgeschwindigkeiten. Anhand der genannten Daten wird daher angenommen, dass die maximale Umlaufdauer bei ca. 17 h liegt. Die verfügbare Ladedauer liegt demnach bei ca. 7 h. [1] [2] [3] [4]

Gelegenheitslader

Beim Gelegenheitslader erfolgen neben der bereits bekannten Beladung am Betriebshof außerdem Beladungen während des Umlaufs. Möglichkeiten zum Beladen während des Umlaufs sind typischerweise an Endhaltestellen denkbar, an denen ohnehin eine gewisse Aufenthaltsdauer bis zur Weiterfahrt vorgesehen ist. Voraussetzung hierfür ist die Installation von Ladeinfrastruktur an den entsprechenden Haltepunkten. Abbildung 4 verdeutlich dieses Betriebsszenario.

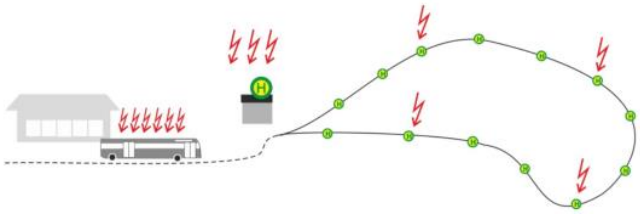


Abbildung 4: Nachladestrategie beim Gelegenheitslader [1]

Aus der Literatur bekannte typische Linienstrecken sind ca. 11 km lang. Die anzunehmenden Durchschnittsgeschwindigkeiten hängen maßgeblich vom Verkehrsfluss und der Dichte der Haltestellen ab. Typische Werte liegen im Bereich von ca. 21 km/h bis 23,5 km/h, nach dem SORT-Stadtfahrzyklus bei 12 km/h, 17 km/h oder 27 km/h. Unter der Annahme einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 21 km/h resultiert eine Fahrzeit von 31,5 Min. Die garantierte Standzeit und damit auch die Ladezeit an der Endhaltestelle beträgt ca. 3 Min. [1] [2] [3] [5]

Abschließend lässt sich zusammenfassen, dass es sowohl für den Gelegenheitslader als auch den Volllader entsprechende Gründe geben kann. Beim Volllader muss die Ladeinfrastruktur ausschließlich zentral am Betriebshof bereitgestellt werden. Auch müssen kaum Änderungen bei den bisher etablierten Umlaufplänen erfolgen. Nachteilig sind allerdings die hohen erforderlichen Reichweiten der Fahrzeuge und damit der Bedarf an sehr großen Energiespeichern. Beim Gelegenheitslader können die Energiespeicher der Fahrzeuge deutlich kleiner gehalten werden. Nachteilig sind hingegen die Notwendigkeit entsprechender Ladeinfrastruktur im Streckennetz sowie möglicherweise die Anpassung der Umlaufpläne zu werten.

Hinsichtlich des Thermomanagements und damit auch der Anforderungen an einen THS stellen die beiden skizzierten Ladestrategien sehr unterschiedliche Anforderungen. Beim Volllader sind grundsätzlich sehr hohe Speicherkapazitäten erforderlich, allerdings ist aufgrund der langen Ladedauern die notwendige Ladeleistung im Verhältnis zur Speicherkapazität eher gering. Beim Gelegenheitslader sind grundsätzlich eher niedrige Speicherkapazitäten notwendig, aufgrund der sehr kurzen Ladedauern jedoch hohe Ladeleistung im Verhältnis zur Speicherkapazität erforderlich.

Weiterhin ist davon auszugehen, dass es sich bei den beiden skizzierten Szenarien um extreme Szenarien handelt, die nahezu die vollständige Bandbreite an Betriebsszenarien von Elektrobussen abdecken.

2.2.2 AP 1.1 – Energetische, topologische und einsatzspezifischen Anforderungen

Im Folgenden wird auf die energetischen, topologischen und einsatzspezifischen Anforderungen an den zu entwickelnden THS eingegangen. Dazu werden zunächst die technischen, klimatischen und infrastrukturellen Rahmenbedingungen erläutert. Zur besseren Verständnis der speziellen Situation am Flughafen wird ebenfalls auf das Einsatzszenario und das resultierende Fahr- und Ladeverhalten eingegangen. Weiterhin wird das gegenwärtige Heizsystem der Vorfeldbusse beschrieben und die Durchführung sowie die Ergebnisse einer Fahrzeugvermessung zur energetischen Analyse erläutert.

Referenzfahrzeug

Bei den am Stuttgarter Flughafen eingesetzten Bussen handelt es sich um Busse des in Wiesbaden ansässigen Unternehmens Cobus Industries GmbH, welches ein Tochterunternehmen des portugiesischen Herstellers Caetanobus ist. Abbildung 5 zeigt zwei der insgesamt 16 am Stuttgarter Flughafen eingesetzten Busse.

Abbildung 5: Elektrische Vorfeldbusse des Stuttgarter Flughafens

Die vollelektrischen Vorfeldbusse vom Typ E.COBUS wurden speziell für den Vorfeldeinsatz auf Flughäfen entwickelt. Die technischen Daten der am Stuttgarter Flughafen eingesetzten Fahrzeuge können Tabelle 1 entnommen werden.

Tabelle 1: Technische Eigenschaften der Vorfeldbusse

Gesamtmasse	20,4 t
Leermasse	12 t
Länge/Höhe/Breite	(13,9/3,1/3) m
Fahrgastkapazität	max. 112
Batteriekapazität	85 kWh
Leistung Ladegerät (extern)	ca. 60 kW
Nennleistung Traktionsantrieb	160 kW

Heizsystem des Referenzfahrzeugs

Da der Fokus des Projekts auf der Beheizung der Busse liegt, wird zunächst das gegenwärtige Heizsystem inklusive der verbauten Baugruppen analysiert. In Abbildung 6 ist das gegenwärtige Heizsystem der Fahrzeuge schematisch dargestellt.

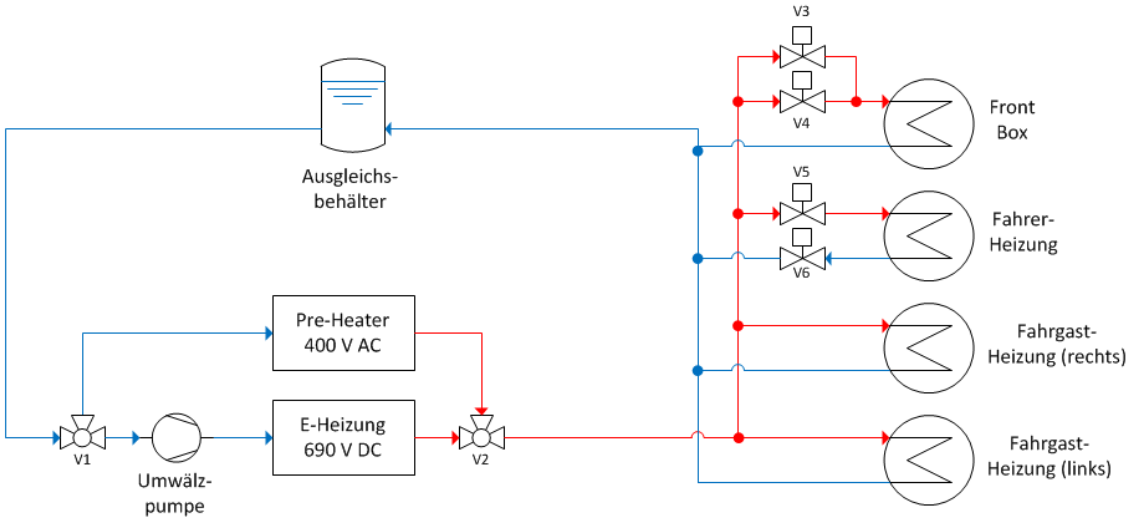


Abbildung 6: Gegenwärtiges Heizsystem der Vorfeldbusse

Heizgeräte

Die Beheizung der Vorfeldbusse erfolgt primär über einen E-Heizer mit externer Umwälzpumpe. Die dazu erforderliche elektrische Energie wird den Traktionsbatterien entnommen. Optional kann das Fahrzeug via separaten Netzanschluss über einen parallel geschalteten Pre-Heater (mit integrierter Umwälzpumpe) vorkonditioniert werden.

Abbildung 7: E-Heizung (links) und Pre-Heater (rechts)

Die durch die E-Heizung oder dem Pre-Heater (Abbildung 7) bereitgestellte Wärme wird mittels eines Wärmeträgerfluids (Antifrogen N) über vier parallel geschaltete Stränge an Wasser-Luft-Wärmeübertrager transportiert und dort mithilfe von Gebläsen an die Innenraum-Luft übertragen. Die technischen Daten der Heizgeräte können Tabelle 2 entnommen werden. Beide Geräte befinden sich in räumlicher Nähe im Bereich vor der Trennwand zur Fahrerkabine (Abbildung 19). Der Zugang erfolgt entweder über eine Serviceklappe im Fahrgastraum oder außen über den Fahrzeugunterboden. Die E-Heizung wird ausschließlich mit Gleichstrom aus den Traktionsbatterien betrieben. Der Pre-Heater dient ausschließlich zur thermischen Vorkonditionierung (Vermeidung der vollständigen Auskühlung des Fahrzeugs und der damit einhergehenden Vereisung der Fenster) und wird über einen separaten Anschluss mit Wechselstrom aus dem Netz mit Energie versorgt.

Tabelle 2: Technische Daten der Heizgeräte

Nennleistung E-Heizung	20 kW (690 V/DC)
Nennleistung Pre-Heater	7,6 kW (400 V/AC)
L/B/H E- Heizung	(578/247/225) mm
L/B/H Pre-Heater	(550/190/190) mm
Masse E-Heizung	15 kg
Masse Pre-Heater	15,5 kg

Die Front-Box (Heizungswärmeübertrager), welche ausschließlich zur Enteisung bzw. der Vermeidung eingeschränkter Sicht durch Beschlagen der Scheiben dient, befindet sich auf der Beifahrerseite unmittelbar unter der Windschutzscheibe. Gemäß des Heizschemas (Abbildung 6) wird die Fahrerkabine separat über einen eigenen Wärmetauscher beheizt. Mittels Ventilen kann der Wärmestrom entsprechend geregelt werden. Die Fahrgast-Heizung besteht hingegen aus zwei Wärmetauscher-Strängen (links und rechts an der Fahrzeugdecke). Die zu erwärmende Luft wird unmittelbar unterhalb der Wärmeübertrager angesaugt, erwärmt und anschließend am Rand der Fahrzeugdecke in den Fahrgastraum eingeblasen. Es erfolgt damit ausschließlich ein Umluftbetrieb. Dies kann auf die kurze Verweilzeit der Fahrgäste und den massiven Luftaustausch bei Türöffnung zurückgeführt werden.

Die Ansteuerung der Heizer erfolgt grundsätzlich im AN/AUS-Modus. Hierzu werden Schaltschwellen verwendet, welche bei 68 °C und 75 °C Kühlmitteltemperatur liegen. Bei 75 °C werden die Heizer abgeschaltet, bei 68 °C eingeschaltet. Im Fehlerfall löst ein Temperaturbegrenzer bei 125 °C aus und unterbricht den Heizprozess.
Weiterhin werden zu Regelzwecken die Temperaturen der Umgebung, der Fahrerkabine und des Fahrgastraums mittels Temperaturfühler gemessen. Wie aus dem Heizungs-Schema hervorgeht, werden die Wärmetauscher des Fahrgastraumes immer mit der vollen Heizleistung beaufschlagt. Der Wärmetransport zur Front-Box und Fahrer-Heizung kann jeweils über die Ventile V3 bis V6 geregelt werden. Über ein Bedienelement kann der Fahrer die gewünschte Temperierung in der Fahrerkabine einstellen. Die Beheizung des Fahrgastraumes erfolgt auf eine Zieltemperatur von 10 °C. Liegt die Temperatur im Fahrgastraum unterhalb von 10 °C, so wird bei vorhandenem Netzanschluss der Pre-Heater oder während der Fahrt die E-Heizung eingeschaltet.

Einsatzszenario und Fahrdienste

Der Zweck der Busse am Stuttgarter Flughafen ist die Beförderung von Fluggästen vom Terminal zum Flugzeug bei Abflügen („Outbound“) sowie vom Flugzeug zum Terminal bei Ankünften („Inbound“). Hierfür verkehren die Busse auf dem Rollfeld des Flughafens. Der Fahrdienst unterliegt dabei einem wiederkehrenden Ablaufplan, welcher im Weiteren noch näher beschrieben wird. Außerhalb des Fahrdienstes ist der genaue Aufenthalt der Busse, sofern diese nicht zum Beladen an der Ladestation angeschlossen sind, nicht genau bekannt. Zur Beladung stehen zentral insgesamt 16 Ladesäulen zur Verfügung. Diese können durch jeden Bus innerhalb bestimmter Vorgaben des Flughafenbetreibers nach Ermessen des Fahrers angesteuert werden. Einen Blick aus der Vogelperspektive auf den für den Betrieb der Flughafenbusse relevanten Bereich gibt Abbildung 8.

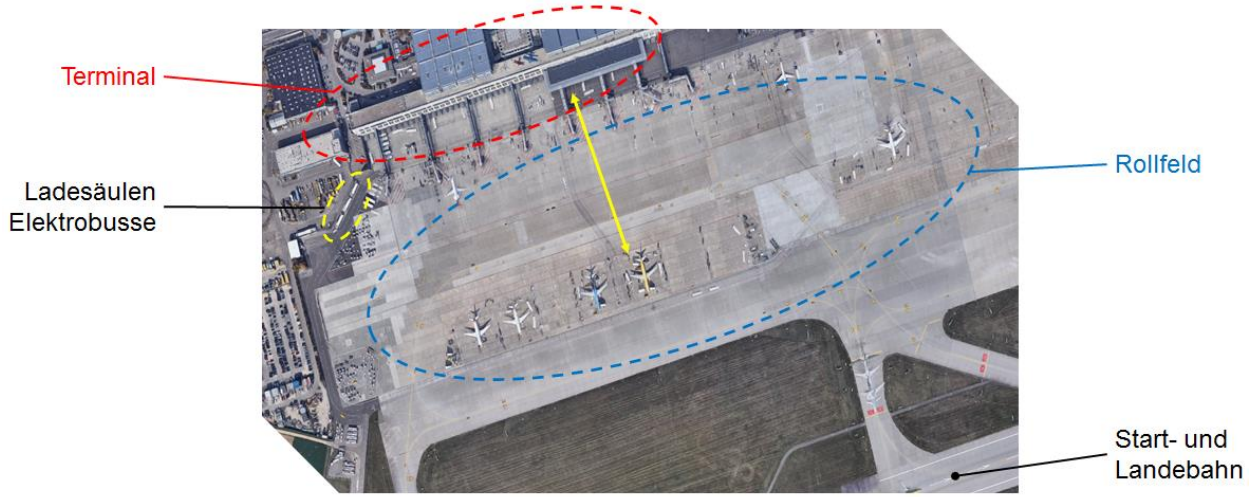


Abbildung 8: Ausschnitt des Stuttgarter Flughafens aus der Vogelperspektive [6]

Der Vollzug der Fahrdienste („Inbound“ und „Outbound“) läuft nach einem in sieben Phasen unterteilten, stets wiederkehrenden Schema ab. Abbildung 9 visualisiert dieses Ablaufschema. Jedes der auftretenden Ereignisse wird durch den Busfahrer quittiert und der entsprechende Zeitpunkt abgespeichert. Der Fahrer erhält zu Beginn die Anfrage für einen Fahrdienst, die er anschließend bestätigt. Nach der Bestätigung beginnt der Busfahrer mit der Anfahrt zum Ort, an dem die Fluggäste abgeholt werden sollen. Beim „Inbound“-Fahrdienst ist dies das Flugzeug, beim „Outbound“-Fahrdienst das Terminal. Nach Ankunft am Zielort werden die Türen geöffnet und die Fahrgäste steigen in den Bus ein. Nachdem die Fahrgäste eingestiegen sind, werden die Türen geschlossen und der Busfahrer beginnt die Fahrt zum Zielort, an dem die Fluggäste aussteigen (Terminal bei „Inbound“-Fahrdienst, Flugzeug bei „Outbound“-Fahrdienst). Nach Ankunft am Zielort werden die Türen geöffnet und die Fluggäste beginnen mit dem Aussteigen. Nachdem die Fluggäste aus dem Bus ausgestiegen sind, werden die Türen geschlossen. Das Schließen der Türen bildet den Abschluss des dokumentierten Ablaufs der Fahrdienste. Der anschließende Aufenthaltsort

und Zustand des Buses zwischen dem Ende von Phase 7 und dem Beginn von Phase 1 ist unbekannt, sofern keine Beladung an der Ladestation erfolgt. Erfolgt eine Beladung, wird dies durch die Datenerfassung der Ladestation dokumentiert. Phase 4 und Phase 7 sind in Abbildung 9 rot markiert. Während diesen Phasen sind die Türen des Busses geöffnet, wodurch ein entsprechender Wärmeverlust und damit ein Einfluss auf die benötigte Heizleistung zu erwarten ist.

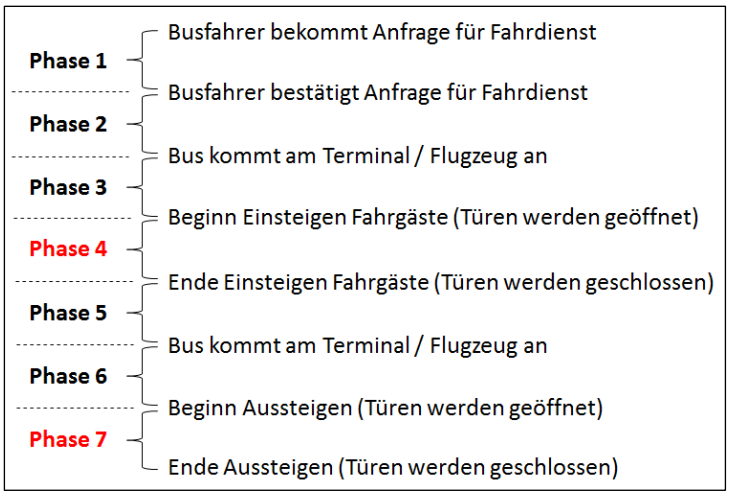


Abbildung 9: Ablaufschema zum Vollzug der Bus-Fahrdienste; während Phase 4 und Phase 7 (rot) sind die Türen des Busses geöffnet

Um Kenntnis über die zeitliche Abfolge der Fahrdienste zu erlangen, wurden exemplarisch die „Outbound"-Daten des Flughafenbusses FB68 für den Monat Oktober 2018 analysiert und ausgewertet. Abbildung 10 zeigt grafisch die Dauern der jeweiligen Phasen sowie Tabelle 3 die Zahlenwerte. Jeder Linienpunkt entspricht dabei einem dokumentierten Wert. Die schwarzen Linien markieren den Mittelwert, die bräunlichen Linien den Median jeder Phase.

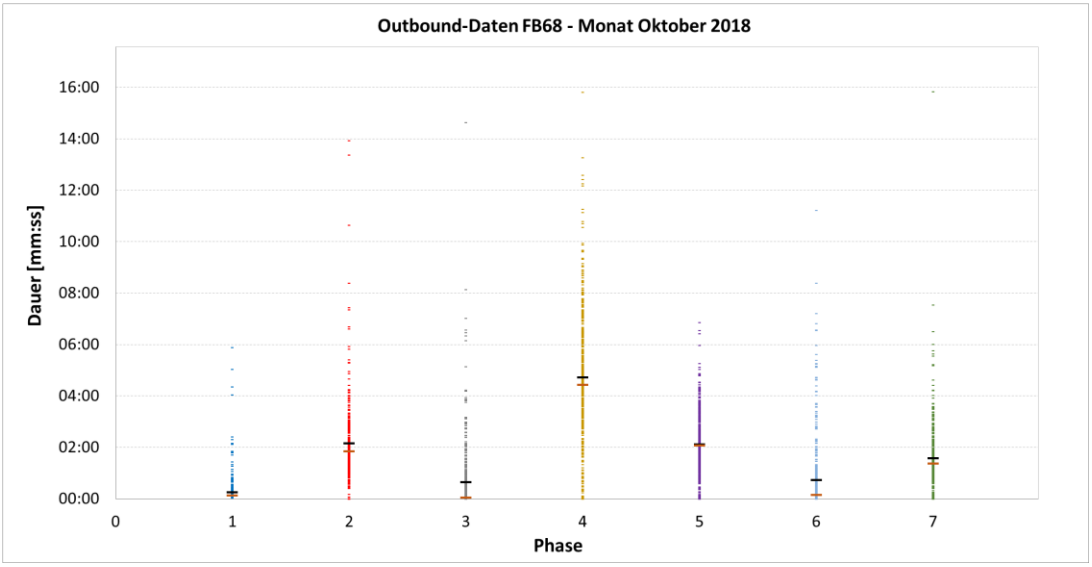


Abbildung 10: Dauer der einzelnen Betriebsabschnitte für den Flughafenbus FB68 im Monat Oktober 2018

Die Dauer von Phase 1 von Anfrage bis Bestätigung des Auftrages erweist sich mit einem Median von 7 s und einem Mittelwert von 15 s als kurz. Die Aufträge werden demnach meist unmittelbar durch die Fahrer bestätigt. Die anschließende Phase 2 beschreibt im Wesentlichen die Dauer der Anfahrt des Buses von der Position der Auftragsannahme bis zu der Position, an dem die Fluggäste abgeholt werden sollen. Die Busse sind demnach im Mittel 2 min und 8 s unterwegs, der Median liegt mit 1 min 50 s etwas darunter. Die anschließende Dauer von Phase 3 erweist sich mit einem

Median von 2 s als sehr kurz. Es ist daher davon auszugehen, dass unmittelbar nach Ankunft des Buses auch die Türen geöffnet werden können. Der Mittelwert liegt mit 39 s deutlich über dem Median. Bei vereinzelten Fahrdiensten ist die Dauer von Phase 3 sehr lang – die Türen konnten demnach nicht unmittelbar nach Ankunft geöffnet werden. Gründe hierfür können beispielsweise Verzögerungen durch noch nicht abgeschlossene Einsteigeprozesse durch vorausfahrende Busse oder aber Verzögerungen bei der Abfertigung der Fluggäste im Terminal sein. Phase 4 ist mit einem Median von 4 min 25 s und einem Mittelwert von 4 min 43 s die längste Phase. Die Dauer des Einsteigens der Fluggäste dauert damit verhältnismäßig zu den anderen Phasen sehr lange – der Bus befindet sich damit für eine relativ lange Dauer mit geöffneten Türen am Terminal. Die anschließende Dauer von Phase 5 liegt mit einem Median von 2 min 4 s bzw. einem Mittelwert von 2 min 6 s in der Größenordnung von Phase 2. Die Fahrt mit Fluggästen dauert demnach ähnlich lange wie die Anfahrt des Busses zum Ort des Einsteigens der Fluggäste. Phase 6 ist mit einem Median von 8 s ähnlich kurz wie Phase 3. Auch zeigt sich wie bei Phase 3, dass der Mittelwert mit 43 s deutlich über dem Median liegt. Es daher davon auszugehen, dass nach Ankunft am Ort des Aussteigens der Fluggäste die Türen meist unmittelbar geöffnet werden können, es in einigen Fällen jedoch zu Verzögerungen im Betriebsablauf kommt, die ein Öffnen der Türen und damit das Aussteigen der Fluggäste verzögern. Der Prozess des Aussteigens der Fluggäste (Phase 7) ist mit einem Median von 1 min 21 s und einem Mittelwert von 1 min 43 s deutlich kürzer als das Einsteigen. Ursächlich hierfür ist, dass die Passagiere Aufgrund der Abfertigung am Terminal einzeln, nacheinander vom Terminal zum Bus gehen. Beim Aussteigen hingegen besteht aufgrund der großen Türöffnungen die Möglichkeit, dass mehrere Personen gleichzeitig den Bus verlassen. Dies reduziert die Dauer des Aussteigens deutlich im Vergleich zur Dauer des Einsteigens.

Tabelle 3: Dauer der einzelnen Betriebsabschnitte für den Flughafenbus FB68 im Monat Oktober 2018

Phase	Mittelwert	Median	Min	Max
1	00:15	00:07	00:02	05:53
2	02:08	01:50	00:00	21:22
3	00:39	00:02	00:00	14:38
4	04:43	04:25	00:00	29:55
5	02:06	02:04	00:00	06:52
6	00:43	00:08	00:00	11:13
7	01:43	01:21	00:00	15:50

Die Gesamtdauer der sieben beschriebenen Phasen beträgt im Median 9 min 45 s, im Mittelwert 12 min 17 s. Die Summe aus Phase 4 und Phase 7 beträgt im Median 5 min 46 s bzw. im Mittelwert 6 min 26 s. Der Anteil dieser Phasen und damit auch der Phasen mit offenen Türen und beträgt damit ca. 52 % bis 57 %. Weiterhin befindet sich der Bus während dieser Phasen in Ruhe. Auf Basis dieser Beobachtung ist daher davon auszugehen, dass durch lange Türöffnungszeiten eine häufige Luftaustauschrate und damit auch ein Verlust an thermischer Energie stattfinden. Weiterhin sind die Anteile in denen der Bus steht ähnlich hoch bzw. höher als die Anteile, in denen der Bus fährt. Da auch während der Standzeiten von einem Heizbedarf auszugehen ist, ist zu erwarten, dass der Heizenergiebedarf möglicherweise in ähnlichen Dimensionen wie der Traktionsenergiebedarf angesiedelt ist, bzw. diesen teilweise übersteigt. Weiter Ausführungen hierzu finden sich in Kapitel 2.2.2.

Fahr- und Ladeverhalten

Die Ermittlung des Fahr- und Ladeprofils dient dazu zu bestimmen, wie lange ein Fahrzeug im Betrieb ist und damit ein Heizenergiebedarf entsteht sowie die Möglichkeiten zur Beladung des Thermischen Energiespeichers zu ermitteln. Hierfür wurden vom Stuttgarter Flughafen bereitgestellte Daten der am Flughafen genutzten Ladesäulen verwendet. Aus den durch die Ladesäulen geloggten Daten gehen Informationen hervor, wann die Fahrzeuge zur Beladung an die

Ladesäule zur Beladung angeschlossen sind, mit welchen Leistungen die Fahrzeuge beladen werden sowie Informationen zu Kilometerstand und Betriebsstunden der Fahrzeuge. Abbildung 11 zeigt die absolute Häufigkeit der Zeitpunkte, zu denen der Flughafenbus FB68 im Oktober 2018 an eine Ladesäule angeschlossen war.

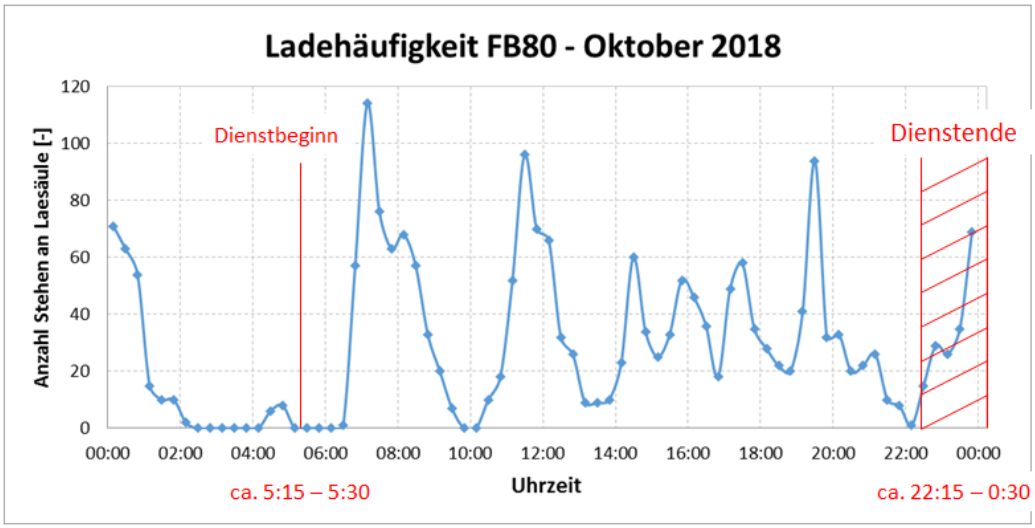


Abbildung 11: Absolute Ladehäufigkeiten in Abhängigkeit der Uhrzeit des Flughafenbusses FB68 für den Monat Oktober 2018

Anhand der Daten geht hervor, dass um 7:30 Uhr, um 11:30 Uhr, um 19:30 Uhr und um 0:00 Uhr der Bus sich gehäuft an der Ladestation befindet. Weiterhin ist zwischen 14 Uhr und 17:30 Uhr eine weitere Häufung festzustellen die sich jedoch im Vergleich zu den anderen Häufungen über einen weiteren Zeitraum erstreckt und dazu weniger stark ausgeprägt ist. Der typische Dienstbeginn eines Buses liegt zwischen 5:15 Uhr und 5:30 Uhr, das typische Dienstende zwischen 22:15 Uhr und 00:30 Uhr. Laut Informationen des Flughafens bleiben die Busse außerdem nach Dienstende bis zum Dienstbeginn am darauffolgenden Morgen an den Ladestationen angeschlossen.
Anhand der Darstellung lässt sich ableiten, dass ein Flughafenbus zwischen Dienstbeginn und Dienstende typischerweise 3 bis 4 Mal, maximal etwa 5 Mal pro Tag an der Ladesäule zwischengeladen wird. Weiterhin wird der Bus zum Dienstende an die Ladesäule angeschlossen und unmittelbar vollgeladen. Die Vollladung ist i.d.R. bis spätestens 1 Uhr abgeschlossen, sodass der Bus bis zum nächsten Dienstbeginn an der Ladesäule verbleibt, ohne dabei weitere Energie aufzunehmen. Die Gesamtbetriebsdauer von Dienstbeginn bis Dienstende beträgt maximal etwa 19 h.

Grundsätzlich liegt am Stuttgarter Flughafen damit ein Betriebsszenario „Gelegenheitslader" vor. Es bestünde daher die Möglichkeit, einen Thermischen Hochleistungsspeicher ebenfalls bei den Zwischenladungen zu beladen. Aufgrund des Zeitintervalls von 4 h zwischen 1 Uhr und 5 Uhr, in denen der Bus zwar an der Ladestation steht die Batterie jedoch bereits voll beladen ist, wäre für den Thermischen Hochleistungsspeicher auch eine Beladung über Nacht, entsprechend dem Szenario „Volllader" denkbar. Hierdurch könnte möglicherweise eine Lastverschiebung bzw. Lastvergleichmäßigung bei der Beladung der Busse realisiert werden sowie die Anzahl der am Tage aufgenommenen Energiemenge. Eine Optimierung im Betriebsablauf der Busse (z.B. Reduzierung der Gesamtzahl der eingesetzten Busse, Reduzierung der Standzeiten, etc.) könnte hierdurch evtl. ermöglicht werden.

Der typische Ladezustand (SOC) der Batterie zu Beginn einer Beladung ist in Abbildung 12 dargestellt. Im Diagramm aufgetragen ist dabei die absolute Häufigkeit der zu Ladebeginn festgestellten SOCs. Die niedrigsten SOCs zu Ladebeginn liegen zwischen 31 % und 40 %. Die

maximalen SOCs lagen bei über 90 %. Am häufigsten treten SOCs zwischen 71 % und 81 % auf. Der Mittelwert des SOC zu Ladebeginn beträgt 68,6 %.
Anhand der Werte lässt sich ableiten, dass die Busse die Energiekapazität der Batterie i.d.R. nur selten ausschöpfen und bereits frühzeitig an der Ladestation zwischenladen. Eine volle Ausnutzung der Batteriekapazität kommt praktisch nicht vor.

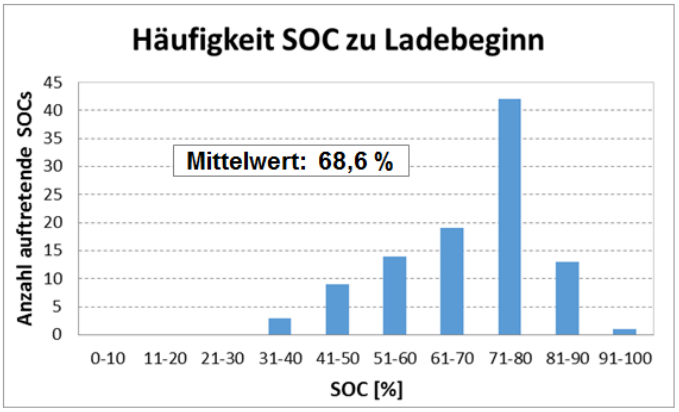


Abbildung 12: Häufigkeitsverteilung des SOC (State of Charge) zu Beginn eines Ladevorgangs für den Flughafenbus FB68 im Monat Oktober 2018

Analog zur vorherigen Darstellung ist in Abbildung 13 der Ladezustand der Batterie zum Ende einer Ladung dargestellt. Deutlich am häufigsten tritt ein Ladezustand zwischen 96 % und 100 % auf. Niedrigere Ladezustände treten, ohne diese im Text näher zu quantifizieren, selten auf. Der Mittelwert des Ladezustandes zum Ende einer Ladung beträgt 94,8 %.
Anhand der Ergebnisse lässt sich ableiten, dass die Busse, wenn Sie sich zur Ladung an der Ladestation befinden, in der Regel auch vollgeladen werden. Ein vorzeitiges Beenden des Beladevorgangs vor dem Vollladen der Batterie findet nur selten statt.

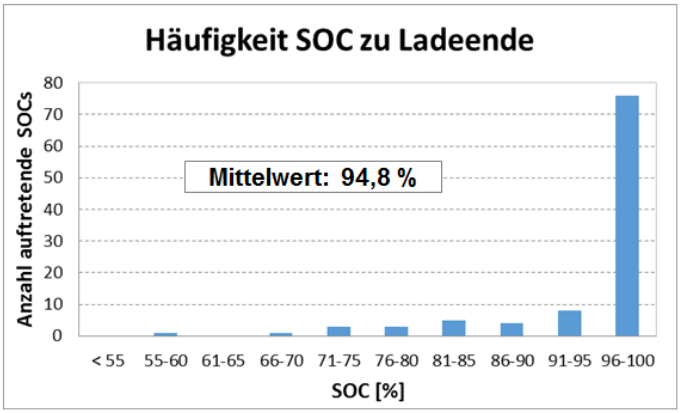


Abbildung 13: Häufigkeitsverteilung des SOC (State of Charge) zum Ende eines Ladevorgangs für den Flughafenbus FB68 im Monat Oktober 2018

Die Häufigkeitsverteilung der Ladedauern ist in Abbildung 14 dargestellt. Zu erkennen ist ein Anstieg der Häufigkeiten bis zum Maximum beim Intervall zwischen 26 und 30 Minuten. Anschließend nimmt die Häufigkeit bis zum Intervall zwischen 46 und 50 Minuten ab, um anschließend wieder leicht zuzunehmen. Die durchschnittliche Ladedauer beträgt 28,5 Minuten.

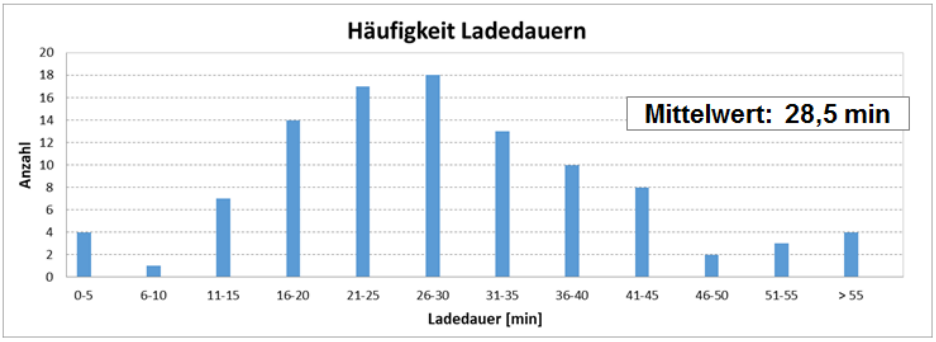


Abbildung 14: Häufigkeitsverteilung der Ladedauer für den Flughafenbus FB68 im Monat Oktober 2018

Die Häufigkeitsverteilung der Durchschnittsgeschwindigkeiten der Busse ist in Abbildung 15 aufgetragen. Die Verteilung beginnt bei relativ selten auftretenden Durchschnittsgeschwindigkeiten von unter 2 km/h und steigert sich bis zum Maximum von Durchschnittsgeschwindigkeiten zwischen 4,1 und 4,5 km/h, die am Häufigsten auftreten. Anschließend sinkt die Häufigkeit bis hin zum Bereich von 6,6 bis 7 km/h, welches auf dem Niveau der Häufigkeit von Geschwindigkeiten unterhalb von 2 km/h liegt. Teilweise treten weiterhin Durchschnittsgeschwindigkeiten von über 7 km/h, die jedoch nicht näher spezifiziert werden. Der Mittelwert der Durchschnittsgeschwindigkeit liegt bei 4,6 km/h.

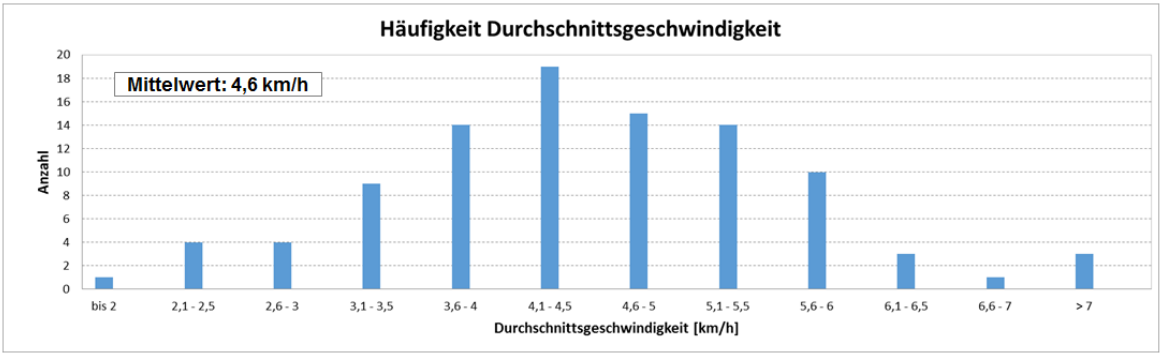


Abbildung 15: Häufigkeitsverteilung der Durchschnittsgeschwindigkeit im Zeitraum zwischen zwei Ladungen für den Flughafenbus FB68 im Monat Oktober 2018

Die relativ niedrigen auftretenden Durchschnittsgeschwindigkeiten bestätigen die Erwartungen aus der Betrachtung der einzelnen Phasen eines Fahrdienstes. Dort wurde festgestellt, dass die Standzeiten zum Ein- und Aussteigen einen relativ hohen Anteil am Gesamtfahrzyklus besitzen. Zur besseren Einordnung der ermittelten Durchschnittsgeschwindigkeiten werden die Durchschnittsgeschwindigkeiten von Bussen im ÖPNV herangezogen. Diese liegen wie bereits in Kapitel 3 dargestellt, bei 12 km/h im urbanen Verkehr, bei 17 km/ bei einer Mischung aus urbanem Verkehr und Überlandrouten sowie bei 27 km/h bei Überlandrouten. Weitere Quellen geben Geschwindigkeiten von ca. 21,1 bis 23,5 km/h für die Stadt Amsterdam an. Die am Stuttgarter Flughafen erreichten Durchschnittsgeschwindigkeiten liegen damit deutlich unter denen im ÖPNV.

Ladeinfrastruktur

Bei der am Stuttgarter Flughafen verwendeten Ladeinfrastruktur (vgl. Abbildung 16 und Abbildung 17) handelt es sich um ein Stecker-basiertes Gleichstromladesystem von Siemens. Die Ladesäulen ermöglichen eine Beladung der Batterien mit 60 kW bei einer Nennspannung von 690 VDC. Zusätzlich existiert ein weiterer Stecker-basierter 400 VAC Anschluss, welcher Leistungen von max. 11 kW ermöglicht. Der 11 kW/400 VAC Anschluss wird ausschließlich zum direkten Anschluss des Pre-Heaters genutzt. Insgesamt stehen am Stuttgarter Flughafen 16 Ladestationen des gleichen Typs zur Verfügung.

Abbildung 16: Flughafenbus und Ladestation am Stuttgarter Flughafen [7]

Abbildung 17: Ladestation am Stuttgarter Flughafen; Stecker-Anschluss für den Pre-Heater (links) sowie die Beladung der Batterie (rechts)

Bauraum

Als geeigneter Bauraum wurde im Flughafenbus der Bereich am vorderen Ende des Fahrgastraumes unterhalb des elektrischen Schaltschrankes identifiziert. In diesem Bereich befinden sich aktuell der Elektrische Heizer sowie der Pre-Heater. Beide könnten durch einen Thermischen Hochleistungsspeicher substituiert werden, sodass dieser Bauraum entsprechend zur Verfügung steht. Abbildung 18 zeigt den Fahrgastraum mit Blick auf die Abdeckung, unter der sich die Heizer befinden. Abbildung 19 zeigt außerdem die beiden Heizer im eingebauten Zustand. Sofern der gezeigte Bauraum nicht ausreichend für eine spätere Integration eines THS sein sollte, könnte weiterhin der Bereich im Innenraum vor dem Schaltschrank mitgenutzt werden.

Abbildung 18: Innenraum eines Flughafenbusses mit Blick in Fahrtrichtung

Abbildung 19: Positionierung des elektrischen Hauptheizers und Pre-Heaters unter der Abdeckung im Innenraum des Flughafenbusses

Regelung / Steuerung der Heizung

Zur Definition der Anforderungen an die Regel- und Steuerbarkeit des THS werden die Eigenschaften des aktuell verwendeten elektrischen Heizers analysiert. Dieser wird grundsätzlich im AN/AUS-Modus betrieben und trägt im AN-Betrieb die Nennleistung in das Kühlmittel ein. Weiterhin sind Ein- und Ausschaltschwellen definiert, die an die Kühlmitteltemperatur gekoppelt sind. Unterschreitet das Kühlmittel eine Temperatur von 68 °C, wird der Heizer eingeschaltet. Überschreitet das Kühlmittel eine Temperatur von 75 °C, so wird der Heizer ausgeschaltet. [8]

Für den THS wird damit als Anforderung gestellt, dass mindestens ein AN/AUS-Betrieb, analog dem vorher beschrieben Steuerbetrieb des elektrischen Heizers erforderlich ist. Eine feiner aufgelöste Steuerung bzw. Regelung wie beispielsweise ein stufenloser Betrieb wäre ebenfalls denkbar, ist jedoch nicht zwingend erforderlich.

Klimatische Randbedingungen

Um Aussagen über die für die Auslegung relevanten Heizleistungen treffen zu können, ist die Kenntnis über die klimatischen Randbedingungen des betrachteten Standorts notwendig. Der Deutsche Wetterdienst stellt für die Zwecke der Auslegung von Heiz- und Klimatisierungsgeräten sog. Test-Referenz-Jahre kostenfrei zur Verfügung. Hierbei handelt es sich um Datensätze, die relevante klimatische Parameter (z.B. Umgebungstemperatur, Solarstrahlung, Windgeschwindigkeit, etc.) für jede Stunde eines Jahres beinhalten. Die Daten sind dabei repräsentativ für das am Standort vorherrschende Klima. Eine weitere Unterscheidung kann zwischen sog. „normalen Jahren“, „warmen Jahren“ und „kalten Jahren“ erfolgen. Außerdem können die drei genannten Jahre für die aktuellen klimatischen Gegebenheiten oder für künftige klimatische Gegebenheiten im Jahre 2045, unter Berücksichtigung des sich wandelnden Klimas, abgebildet werden. Zur Auslegung des Thermischen Hochleistungsspeichers wurde sich aufgrund der aktuellen Relevanz des Themas für ein „normales Jahr“ zum aktuellen Zeitpunkt entschieden. Der relevanteste Parameter für die Auslegung eines THS ist die Lufttemperatur. Der Jahresverlauf der Lufttemperatur am Standort Flughafen Stuttgart ist in Abbildung 20 aufgetragen.

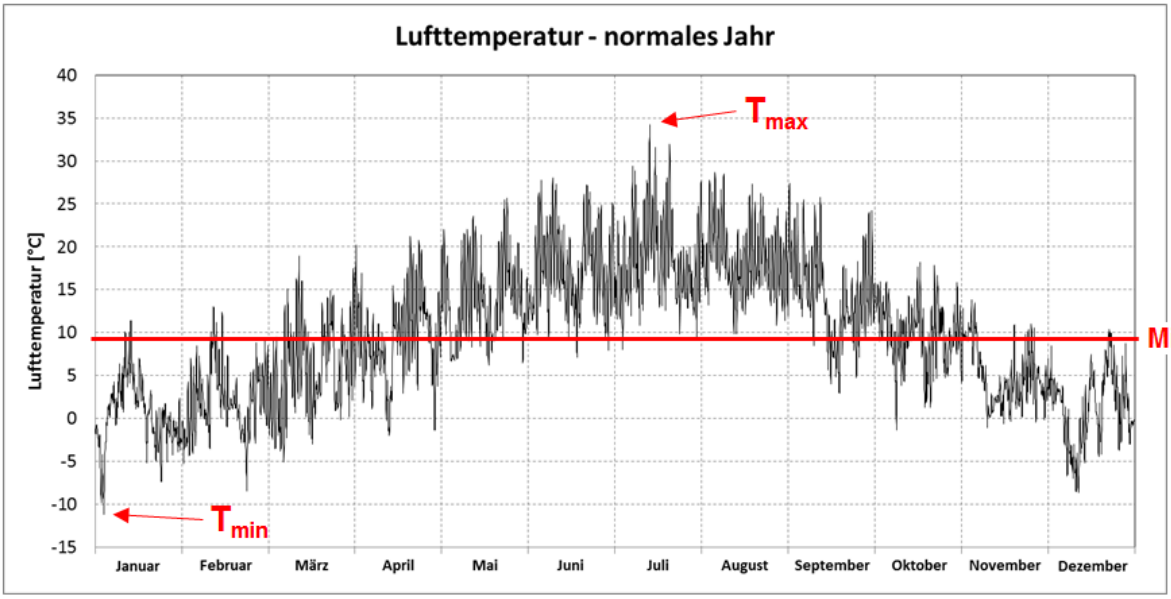


Abbildung 20: Verlauf der Lufttemperatur für den Standort Flughafen Stuttgart für ein Testreferenzjahr 2015 für ein normales Jahr

Der Verlauf der Lufttemperatur entspricht dem typischen Verlauf in Deutschland mit den wärmsten Temperaturen im Juli und den kältesten Temperaturen im Januar. Die Extremwerte betragen -11,2 °C im Januar sowie +34,2 °C im Juli. Die Jahresdurchschnittstemperatur beträgt 9,7 °C. Weiterhin wurde die Durchschnittstemperatur für die Betriebszeit eines Buses zwischen ca. 5 Uhr und 24 Uhr betrachtet. Von Relevanz ist im Weiteren die niedrigste, auftretende Durchschnittstemperatur in diesem Zeitraum, welche -7,5 °C beträgt (nicht grafisch dargestellt).

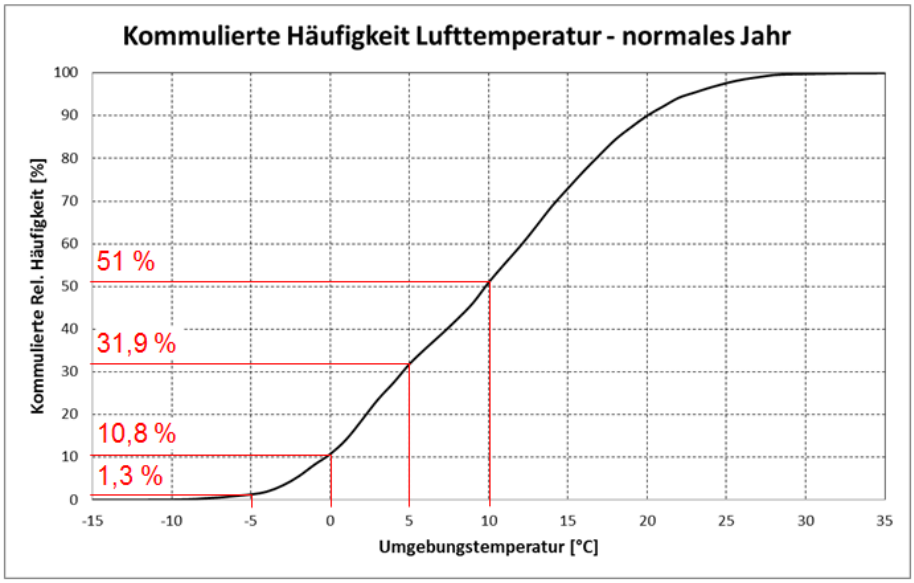


Abbildung 21: Häufigkeitsverteilung der Lufttemperatur für den Standort Flughafen Stuttgart auf Basis des Testreferenzjahres für 2015, normales Jahr

Weiterhin ist in Abbildung 21 die kumulierte Häufigkeit der auftretenden Lufttemperaturen dargestellt. Mit Hilfe des Diagrammes lässt sich aufschlüsseln, wie häufig Temperaturen bis zu einem bestimmten Wert im Jahr auftreten. So treten Temperaturen bis maximal 10 °C an 51 %, Temperaturen bis max. 5 °C an 31,9 %, Temperaturen bis 0 °C an 10,8 % sowie Temperaturen bis max. -5 °C an 1,3 % im Jahr auf. Unter Berücksichtigung der Beheizung des Fahrgastraumes eines Busses auf max. +10 °C bedeutet dies, dass in etwa die Hälfte des Jahres ein Heizbedarf für den Fahrgastraum besteht. Aufgrund einer Beheizung der Fahrerkabine auf Temperaturen von höher als

10 °C (abhängig vom Komfort-Empfinden des Fahrers) tritt insgesamt häufiger im Jahr ein entsprechender Heizbedarf auf.
Für die Auslegung der Leistungsfähigkeit des THS wird im Folgenden die minimal auftretende Umgebungstemperatur von -11,2 °C herangezogen. Für die Auslegung der Energiekapazität für extreme Wintertage wird der Tag mit der niedrigsten Durchschnittstemperatur während der Betriebszeit eines Busses herangezogen. Diese beträgt -7,5 °C. Für alle weiteren Abschätzungen und Auslegungen ist der Jahrestemperaturverlauf von Relevanz.

Ermittlung des Energiebedarfs für Heizung und Traktion
Um den Heizbedarf der Busse bestimmen zu können, wurden wie bereits eingangs in Kapitel 2.2.1 erläutert, Messungen im Realbetrieb durchgeführt. Grundsätzlich käme hierfür eine Messung der durch die Heizer aufgenommenen elektrischen Leistung oder aber der durch die Heizer abgegebenen thermischen Leistung in Frage. Die Messung der elektrischen Leistung wurde dabei als risikobehafteter eingestuft, da hierdurch ein Eingriff in die Hochvolt-Architektur des Fahrzeugs notwendig gewesen wäre und damit bei Problemen die Funktionalität der elektrischen Energieversorgung und damit auch der Betriebsbereitschaft des Fahrzeugs gefährdet worden wäre. Für Messung der thermischen Leistung kamen grundsätzlich drei Varianten infrage:

1. Direkte hydraulische Wärmestrommessung
2. Indirekte elektrische Wärmestrommessung
3. Indirekte thermische Wärmestrommessung

Für jede Variante wurde ein entsprechendes Messkonzept ausgearbeitet. Die Herausforderung bestand dabei in der Anforderung den Eingriff in das bestehende Fahrzeugsystem so gering wie möglich zu halten. Da eine Fahrzeugvermessung ursprünglich nicht im Projektplan vorgesehen war (Kapitel 2.2), musste zudem eine unkomplizierte Lösung, welche sich schnell umsetzen ließ, gefunden werden. Die Messkonzepte wurden daher hinsichtlich des messtechnischen Aufwandes, den Kosten und der Umsetzbarkeit bewertet und miteinander verglichen. Unter Berücksichtigung der zuvor erläuterten Rahmenbedingungen wurde sich für die indirekte thermische Wärmestrommessung entschieden. Da die dafür erforderliche Messtechnik (Abbildung 22) bereits vorlag und die notwendigen Messstellen (Abbildung 23) uneingeschränkt zugänglich waren, konnte die Messtechnik mit vertretbarem Aufwand in das Fahrzeug integriert werden.

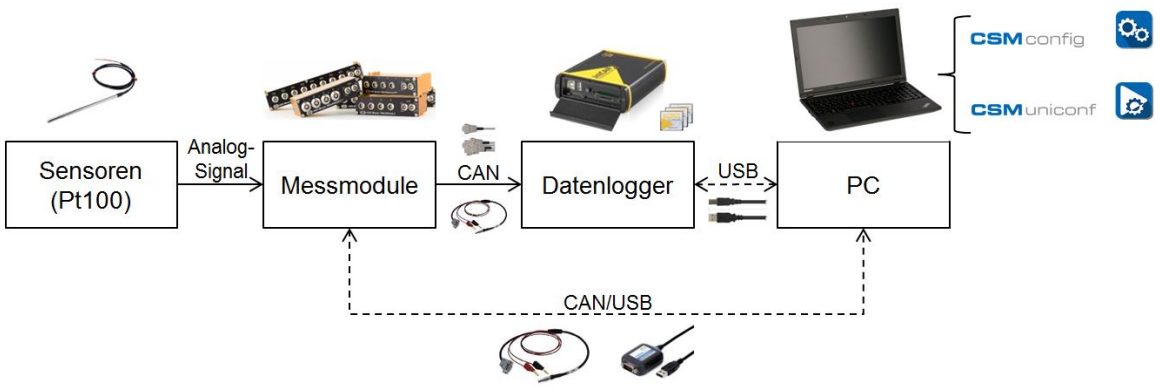


Abbildung 22: Verwendete Messtechnik und Software

Indem die Vor- und Rücklauftemperatur der Heizgeräte ermittelt wurde, konnte der Betriebszustand der Heizgeräte detektiert werden (EIN/AUS). Mit Hilfe der technischen Daten der Heizgeräte konnte wiederum die Heizleistung näherungsweise abgeleitet werden. Da die Nennleistung des Heizgerätes 20 kW beträgt, wurde eine eingetragene Heizleistung von 20 kW beim Betriebszustand „EIN" angenommen. Grundsätzlich ist zu erwähnen, dass es sich hierbei um eine Annäherung handelt, da die tatsächliche Heizleistung von der anliegenden Batteriespannung abhängt. Da die

Batteriespannung wiederum eine Abhängigkeit vom Ladezustand der Batterie (SOC) aufweist, kann diese in der Realität sowohl nach als auch nach unten von der Nennspannung (690 VDC) abweichen. Dieser Effekt wurde nicht berücksichtigt. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die hierdurch zustande kommenden Abweichungen als gering einzuschätzen sind. Die Messung erfolgte minimalinvasiv direkt an der Oberfläche der wärmeträgerführenden Rohrleitungen. Eine zusätzliche Dämmung an den Messstellen diente der Verringerung von Störquellen.

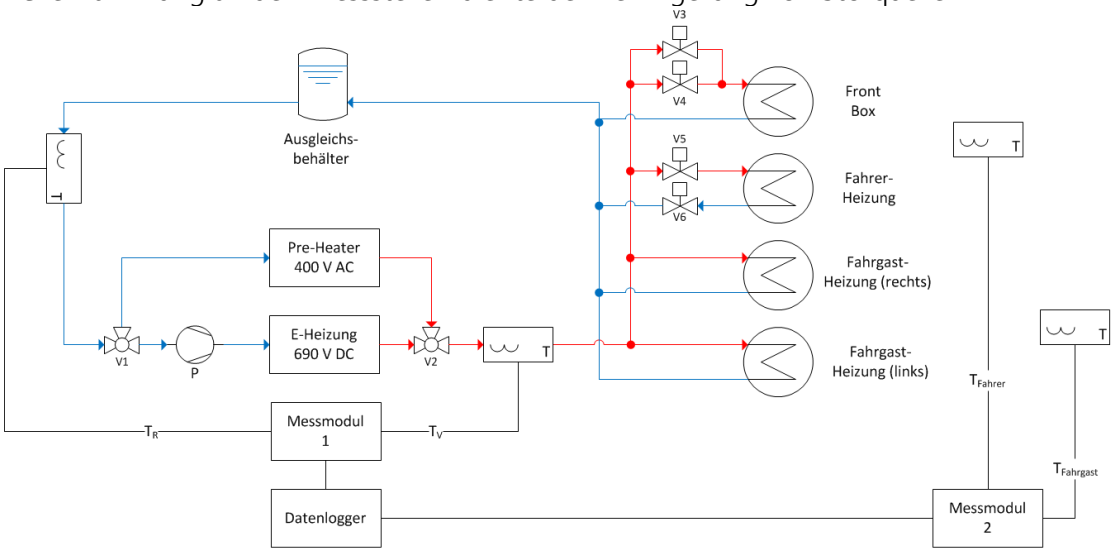
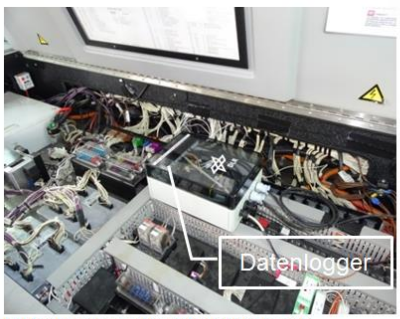
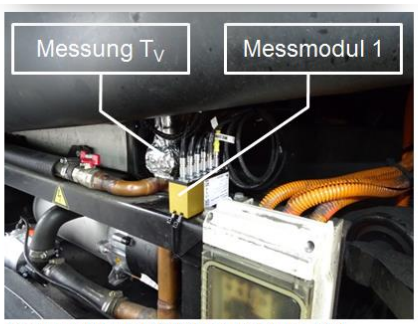


Abbildung 23: Anbindung der Messtechnik an das Heizsystem (Messkonzept 3)

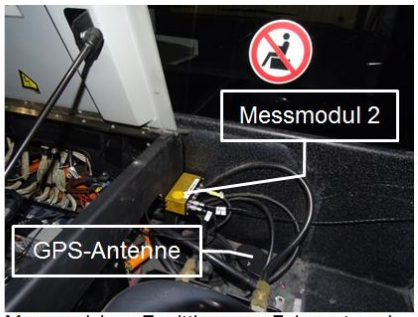
Um Rückschlüsse auf die Wärmesenken ziehen zu können wurde ebenfalls die Temperatur im Fahrgast- und Fahrerraum gemessen. Bei allen Temperaturmessungen wurden Temperaturfühler vom Typ PT100 verwendet. Die durch die Messung bereitgestellten Daten wurden durch Daten zur Umgebungstemperatur, welche vom Deutschen Wetterdienst bereitgestellt wurden, ergänzt. Zusätzlich zu den Temperaturen wurde die Position des Fahrzeugs mit Hilfe von GPS ermittelt. Dadurch konnte bei der Auswertung zwischen den verschiedenen Betriebsphasen differenziert und diverse Messpunkte näher untersuchen werden.



Datenlogger im Hauptschaltschrank



Messmodul zur Ermittlung von Vor- und Rücklauf- sowie Umgebungstemperatur



Messmodul zur Ermittlung von Fahrgast- und Führerhaustemperatur sowie GPS-Antenne

Abbildung 24: Messtechnik nach Fahrzeugintegration

Die zum Betrieb der Messtechnik erforderliche Hilfsenergie (12V/DC) wurde an einer geeigneten Stelle im Hauptschaltschrank abgegriffen. Aufgrund des gegenüber den fahrzeugeigenen Verbrauchern sehr geringen Energiebedarfs, wurde dieser bei der Auswertung nicht weiter berücksichtigt. Abbildung 24 zeigt die im Fahrzeug verbaute Messtechnik.

Ermittelte Heizleistung

Die Heizleistungen wurden mit Hilfe der zuvor beschriebenen Messtechnik ermittelt und die Ergebnisse stündlich aufgeschlüsselt und über die gemittelte Umgebungstemperaturen aufgetragen (Abbildung 25). Jeder im Diagramm dargestellte Datenpunkt repräsentiert demnach die über eine

Stunde gemittelte Heizleistung bei der innerhalb dieser Stunde vorherrschenden Umgebungstemperatur.

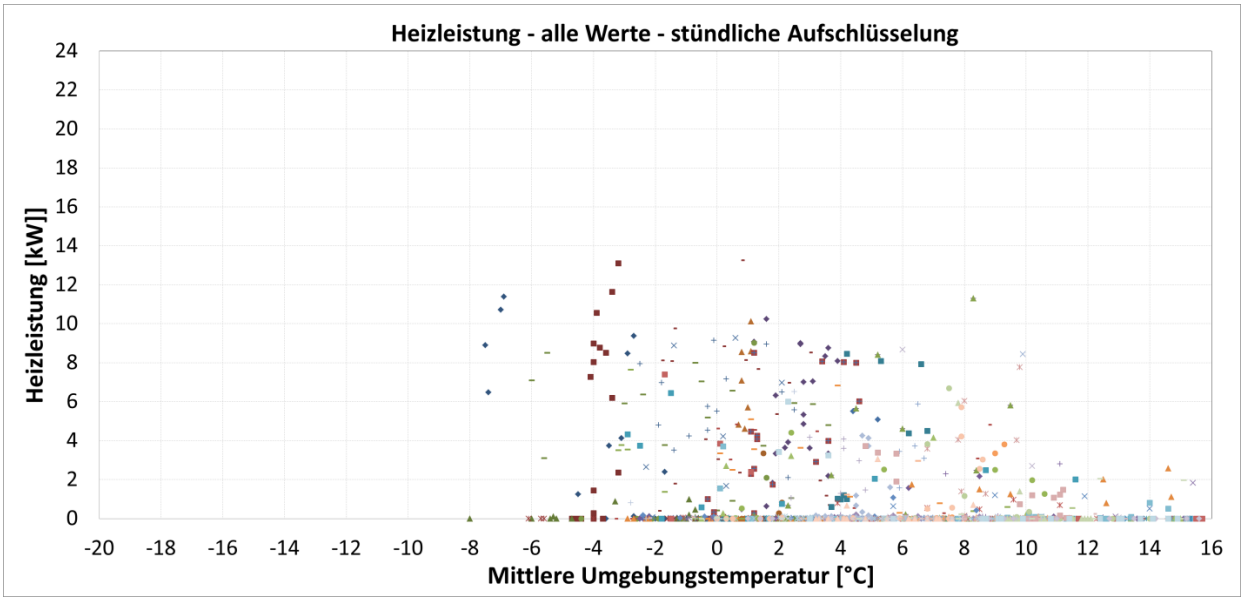


Abbildung 25: Ergebnisse der aus den Messwerten abgeleiteten Heizleistung in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur

Zunächst fällt auf, dass eine große Streuung der Messwerte vorliegt und sich eine Punktewolke ausbildet. Die Heizleistung kann bei konstanter Umgebungstemperatur demnach unterschiedlichste Werte annehmen. Diese große Streuung ist damit zu begründen, dass neben der Umgebungstemperatur noch weitere Effekte die notwendige Heizleistung beeinflussen. Diese werden nachfolgend aufgezählt:

- Intensität der Solarstrahlung (Tag/Nacht, bewölkt/sonnig, etc.)
- Windgeschwindigkeit (hohe Windgeschwindigkeiten sorgen für höhere Wärmeverluste durch Konvektion)
- Dauer der Türöffnung (hohe Wärmeverluste durch Öffnung der Türen; Dauer der Türöffnung variabel)
- Komfortbedarf des Fahrers (Fahrerkabine wird unabhängig von Fahrgastraum beheizt; gewünschte Temperatur wird vom Fahrer selbst eingestellt)
- Anzahl der transportierten Personen (jede Person gibt ca. 75 W bis 100 W Wärme ab; bei hoher Personenanzahl im Fahrgastraum ist der Wärmeeintrag durch die Fahrgäste demnach größer)
- Stationärer Heizbetrieb / Dynamischer Heizbetrieb (v.a. zu Dienstbeginn sind Busse trotz Pre-Heater deutlich ausgekühlter als während das Tages; hierdurch muss während der ersten Fahrdienste eines Tages stärker geheizt werden)

Weiterhin ist darauf hinzuweisen, dass eine große Anzahl an Messpunkten zu erkennen ist, bei denen die Heizleistung einen Wert von 0 kW aufweist. Dies ist damit zu begründen, dass der Bus während des Messbetriebs teilweise keinen Fahrdienst vollzogen hat (Ursache hierfür sind z.B. Reparaturen, Wartungsarbeiten, etc.) oder aber kein Heizbedarf vorgelegen hat (z.B. bei moderaten Umgebungstemperaturen um 10 °C und zusätzlich einer hohen Intensität der Solarstrahlung). Auch ist zu erkennen, dass auch bei Temperaturen oberhalb von 10 °C (Zieltemperatur, auf die der Fahrgastraum temperiert wird) teilweise ein Heizbedarf vorliegt. Ursache hierfür ist, dass die Fahrerkabine aus Komfortgründen auf deutliche höhere Temperaturen als 10 C aufgeheizt wird und damit ein Heizbedarf oberhalb von 10 °C entsteht.

Für die weitere Auslegung des THS ist hinsichtlich der Auslegung der Speicherkapazität eine mittlere Heizleistung und für die Auslegung der Leistungsfähigkeit des Wärmeaustragssystems die maximale Heizleistung von Relevanz. Aufgrund des nach physikalischen Grundgesetzen linearen Zusammenhangs zwischen Heizleistung und mittlerer Umgebungstemperatur wurden Trendlinien dem Diagramm zugefügt, die den Mittelwert und den Maximalwert der Heizleistung in linearer Abhängigkeit der Umgebungstemperatur beschreiben. Abbildung 26 zeigt das um die Trendlinien ergänzte Diagramm.

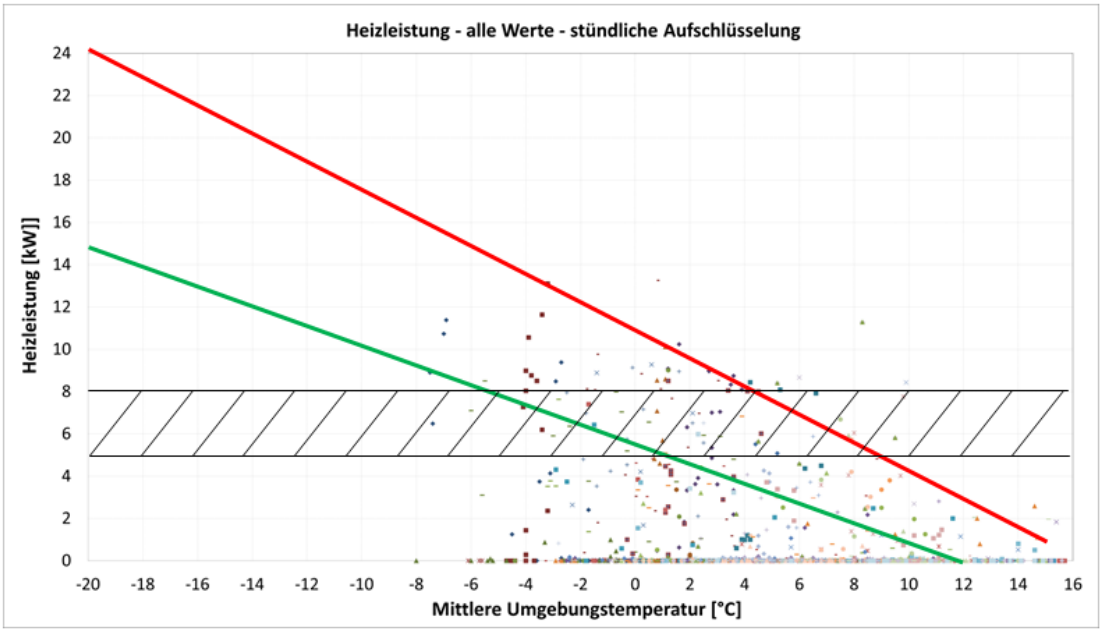


Abbildung 26: Ergebnisse der aus den Messwerten abgeleiteten Heizleistung in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur, ergänzt um eine Trendlinie der mittleren Heizleistung, maximalen Heizleistung sowie des Leistungsbedarfs für Traktion und sonstige Nebenverbraucher

Die grüne Linie repräsentiert die mittlere und die rote Linie die maximale Heizleistung. Die mittlere Heizleistung beträgt ca. 1 kW bei 10 °C, 5,5 kW bei 0 °C, 10,5 kW bei -10 °C und 15 kW bei -20 °C. Die maximale Heizleistung beträgt 4 kW bei +10 °C, 11 kW bei 0 °C, 17,5 kW bei -10 °C und 24 kW bei -20 °C.
Gemäß der zuvor geschilderten klimatischen Rahmenbedingungen liegt die minimal auftretende Temperatur bei -11,2 °C. Es resultiert damit ein maximaler Heizleistungsbedarf von ca. 18 kW welcher durch den THS bereitgestellt werden muss. Die über die Betriebsdauer eines Tages auftretende mittlere Umgebungstemperatur beträgt minimal -7,5 °C. Die im Mittel über einen Tag bereitzustellende Heizleistung beträgt demnach ca. 9 kW. Unter Berücksichtigung einer maximalen Einsatzdauer von 19 h an einem Tage müsste dem Bus am kältesten Tag im Jahr demnach eine Heizenergie von ca. 171 kWh zugeführt werden. Unter Berücksichtigung der gegenüber Stadtbussen moderaten Innenraumtemperaturen (10 °C gegenüber 24 °C) deckt sich dies mit entsprechenden Literaturangaben.

Weiterhin ist zu erwähnen, dass sowohl die aufgezeigte Variabilität der Heizleistung als auch die Größenordnungen den Erwartungen entsprechen. Messwerte zum Heizleistungsbedarf von Stadtbussen liegen aktuell ausschließlich für Busse aus dem ÖPNV vor. Auch dort wurde eine entsprechende Variabilität der Heizleistung festgestellt. Die notwendigen Heizleistungen für einen 12 m liegen außerdem in einer ähnlichen Größenordnung (leicht höher) wie beim Flughafenbus. Ursache für den etwas höheren Heizbedarf beim Bus im ÖPNV sind die höheren Ansprüche an den Komfort im Fahrgastraum. So liegen die geforderten Innenraumtemperaturen gemäß VDV-Schrift

236 beim Linienbus beispielsweise zwischen 16 °C und 22,5 °C bei einer Umgebungstemperatur von -10 °C. [9]

Weiterhin ist in Abbildung 26 ein in schwarz schraffierter Bereich dargestellt. Hierdurch wird das Spektrum des Traktionsenergiebedarfs plus sonstiger Verbraucher im Diagramm markiert. Der Verbrauch für Traktion und sonstige Verbraucher liegt demnach zwischen 5 kW und 8 kW. Die den schraffierten Bereich und die Trennlinien für die Heizleistung aufgespannte Raute repräsentiert den Bereich, indem sich das Verhältnis aus Heiz- und Traktionsleistung angleicht. Dieser liegt zwischen -4 °C und +9 °C.

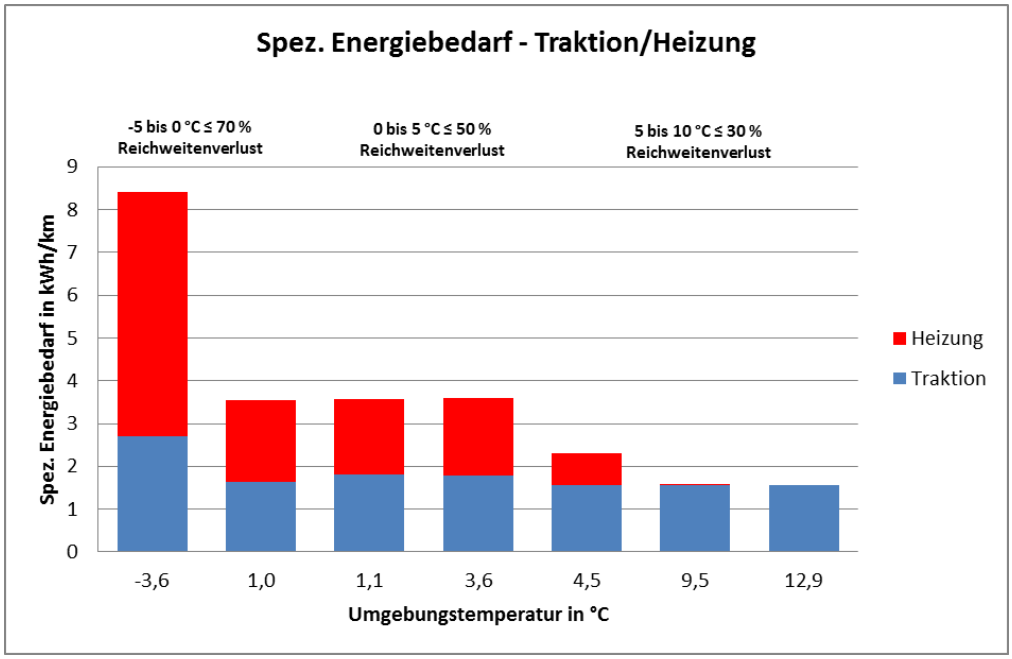


Abbildung 27: Verhältnis von spez. Traktions- zu Heizenergieverbrauch bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen

Mit Hilfe der ermittelten Heizleistung und der Kenntnis über die Laufleistung der Fahrzeuge zwischen zwei Ladevorgängen (Laufleistung wird beim Laden durch die Ladesäule erfasst) konnte der spezifische Traktions- und Heizenergieverbrauch ermittelt werden. Aus Abbildung 27, welche exemplarisch einige spezifische Energieverbräuche darstellt, geht hervor, dass sich die Reichweite der Vorfeldbusse im Temperaturbereich von -5 bis 10 °C um bis zu 70 % reduzieren kann oder anders ausgedrückt, der Heizenergiebedarf in etwa doppelt so hoch wie der Energiebedarf für Traktion und sonstige Verbraucher ist.

Relevante Temperaturniveaus

Da idealerweise lediglich die gegenwärtigen Heizgeräte durch einen THS substituiert, das übrige Heizsystem jedoch erhalten bleiben soll, ist zur Auslegung des THS (insbesondere des Wärmeaustragsystems) ebenfalls der Verlauf der Vor- und Rücklauftemperaturen im Heizkreislauf von Interesse. Abbildung 28 zeigt exemplarisch einen Temperaturverlauf für die verwendeten Messstellen.

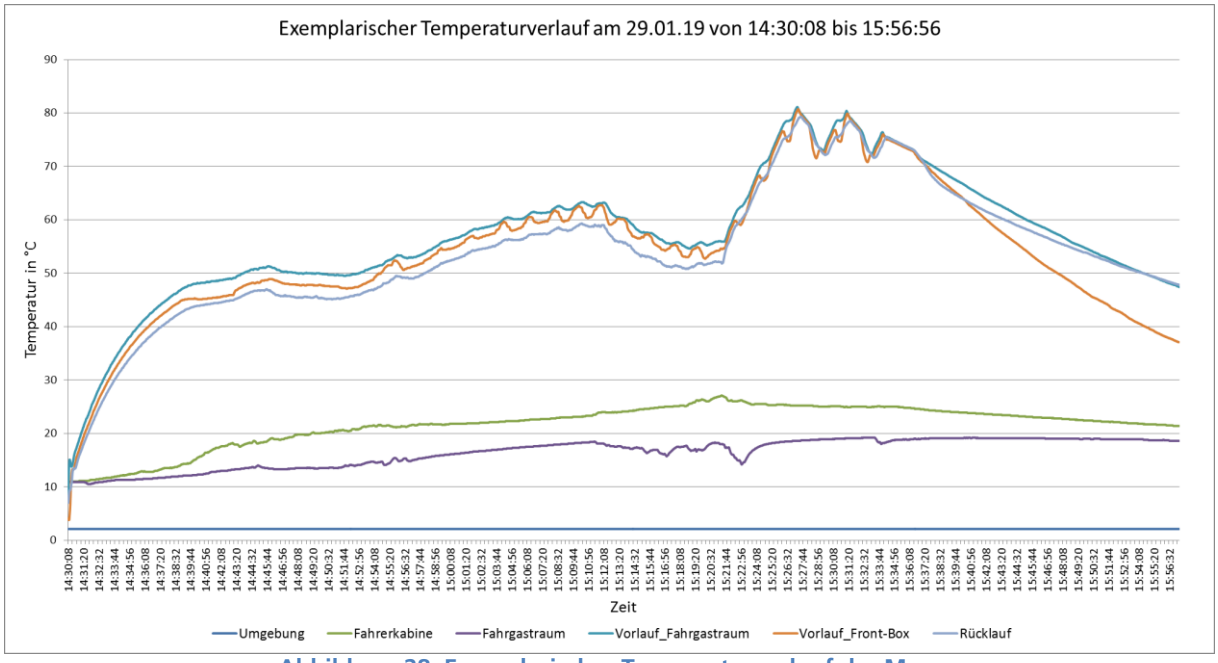


Abbildung 28: Exemplarischer Temperaturverlauf der Messung

Die für die Auslegung relevanten Maximaltemperaturen im Heizkreislauf (z.B. orangene Kurve – Vorlauf_Front-Box) betragen gemäß Abbildung 28 ca. 80 °C und liegen etwas über der oberen Schaltschwelle des Heizgerätes (75 °C). Allerdings lässt sich erkennen, dass auch die untere Schaltschwelle mit ca. 72 °C etwas über der eigentlich angegebenen Schaltschwelle von 68 °C liegt. Dies kann entweder auf Abweichungen bei der eigenen Messung oder aber auf Abweichungen bei den Schaltschwellen zurückzuführen sein.

2.2.3 AP 1.2 –Sicherheitstechnische Anforderungen und Randbedingungen

Beim verkehrsüblichen Betrieb eines Fahrzeugs mit thermischem Hochleistungsspeicher muss die Sicherheit von Personen, Sachen, der Umwelt und des Speichersystems selbst gewährleistet werden. Dazu werden vier maßgebliche sicherheitskritische Designaspekte identifiziert und Möglichkeiten zum Umgang mit diesen identifiziert. Dabei handelt es sich im Einzelnen um zulässige Höchsttemperaturen an der Außenseite und im Innern des Speichers, den Umgang mit flüssiger heißer Metallschmelze, Druck und Temperatur von fahrzeugseitigem Kühlmittel bzw. im Wärmeaustragssystem und nicht zuletzt Kriterien der Hochvoltsicherheit. Regelwerke, die bezüglich mehrerer Aspekte herangezogen werden können und die für Komponenten in elektrischen Fahrzeugen allgemein gelten, sind die Regeln der Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen zur Sicherheit batterieelektrische Fahrzeuge [10] und ISO-Spezifikationen (z.B. [11]).

Die erlaubte **Höchsttemperatur** im Innern des Speichers wird unter anderem durch die im Datenblatt der Heizelemente vorgegebene erlaubte Manteltemperatur definiert. Die erlaubte Höchsttemperatur an der Außenseite des Speichers hängt von der Positionierung ab. Generell muss gewährleistet werden, dass Personen keine Schäden, wie z.B. Verbrennungen, durch Berühren der Speicheraußenseite davon tragen können. In diesem Fall wird die zulässige Kontakttemperatur entsprechend den in Normen definierten Verbrennungsschwellen mit bis zu 60 °C festgelegt [12] [13] [14]. Eine Überhitzung im Inneren oder an der Außenseite des Speichers könnte durch Temperaturüberwachungen gekoppelt mit einer Sicherheitsabschaltung der Heizeinrichtung realisiert werden.

Der **Umgang mit heißem Flüssigmetall** (bei Temperaturen bis zu 600 °C) muss derart erfolgen, dass der unkontrollierte Austritt an Positionen, die Mensch und Umwelt gefährden, verhindert wird. Im Falle von Flüssigaluminium als Transportgut erfolgt die Zuordnung zur Gefahrgutklasse 9 aufgrund der hohen Temperaturen (erwärmte flüssige Stoff über 100 °C oder erwärmte feste Stoffe

über 240 °C). In diesem Fall werden Tanks zur Beförderung gefährlicher Güter nach den Regeln zahlreicher Normen ausgelegt und geprüft [15] [16] [17] [18]. Ein thermischer Speicher zur Beheizung eines elektrischen Fahrzeugs ist jedoch von gefahrgutrechtlichen ADR-Richtlinien freigestellt entsprechend Sondervorschrift 388 [19] [20]. Es wird jedoch für sinnvoll erachtet, sich bei der Auslegung des Speichers grob an bestehenden Normen zum Transport von Flüssigaluminium zu orientieren. Konzepte zum Umgang mit möglichem Austritt von Flüssigmetall umfassen das Design eines Zusatzbehälters oder einer Notfallfunktion der Einhausung selbst. Außerdem können passive Sicherheitsmaßnahmen, wie die Positionierung außerhalb des Crashbereichs getroffen werden. Überwachungseinrichtungen, beispielsweise mittels Füllstandsensor oder außerhalb des mPCM-Behälters, sind ebenfalls denkbar.

Druck und Temperatur des fahrzeugseitigen Kühlmittels müssen dahingehend reguliert werden, dass es nicht zum Überhitzen und Zersetzung kommt. Dies ist mittels Thermostat möglich, so dass bei Überschreiten einer Grenztemperatur die Pumpe zur Förderung des Zwischenkreis-Fluids des Wärmeaustragssystems abgeschaltet wird (analog der Sicherheitsabschaltung bei einer Kühlmitteltemperatur von 125 °C bei den aktuell verwendeten elektrischen Heizern). Gleiche Bedingungen gelten für das Arbeitsmedium im Zwischenkreis des Wärmeaustragssystems. In diesem geschlossenen Kreis, in dem es zur gezielten Verdampfung und Kondensation des Fluids kommt, muss das Entstehen eines unkontrollierten Überdrucks beispielsweise durch ein Sicherheitsventil vermieden werden.

Zur Gewährleistung der **Hochvoltsicherheit** können zahlreiche Regularien herangezogen werden. Beispielsweise nach §62 StVZO muss diese „so beschaffen sein, dass bei verkehrsüblichem Betrieb der Fahrzeuge durch elektrische Einwirkung weder Personen verletzt noch Sachen beschädigt werden können". Vorgaben, die bei der Errichtung von Starkstromanlagen bis 1000 V eingehalten werden müssen, werden durch VDE Vorschriften (z.B. [21]) geliefert. Konkrete elektrische Schutzanforderungen wie z.B. einzuhaltende Schutzart, Isolationswiderstände, und Kennzeichnung werden in der Richtlinie UN-ECE R100 [22] genannt. Der relevante Abschnitt „Part 3: Electrical Safety" in der entsprechenden ISO-Spezifikation [11] ist ebenfalls heranzuziehen. Eine umfassende Übersicht für alle geltenden Normen zur elektrischen Sicherheit in der Elektromobilität liefert [23].

2.3 AP 3 – Physikalisch – Technische Grundlagen

2.3.1 AP 3.1 Materialtechnische Grundlagen

Wie in Abschnitt 2.2.2 erläutert, steht im Flughafenbus ausreichend Bauraum für einen Thermischen Hochleistungsspeicher zu Verfügung. Aus diesem Grund wird dem Volumen des Speichers eine geringere Relevanz als dessen Masse zugeschrieben, welche wiederum Auswirkungen auf den Traktionsenergieverbrauch sowie auf die Fahrgastkapazität (aufgrund des zulässigen Gesamtgewichts) hat. Somit ist zu empfehlen, bei der Bewertung möglicher Speichermaterialien das Kriterium der höchsten gravimetrischen Energiedichte heranzuziehen.

Als zu nutzender Temperaturbereich des Speichers wird das Intervall zwischen 100 °C und 600 °C definiert. Eine unbegrenzte Erhöhung der oberen Temperaturgrenze ist nur bedingt sinnhaft, da ein Kompromiss aus steigendem Energiegehalt und steigenden Wärmeverlusten identifiziert werden muss sowie die Anforderungen an die Teilkomponenten des THS mit höheren Maximaltemperaturen steigen (beispielsweise an die Heizung und die Einhausung). Um den Vorteil eines Phasenwechselmaterials zu nutzen, muss dessen Schmelztemperatur innerhalb des gewählten Temperaturintervalls liegen.
Eine systematische Analyse geeigneter (halb)metallischer Legierungselemente sowie Identifikation der am besten geeigneten Legierungssysteme und deren eutektischen Zusammensetzung resultieren in einer Menge möglicher mPCM im gesuchten Temperaturintervall. Die Einschränkung auf eutektische Zusammensetzungen erfolgt aufgrund derer Besonderheit eines kongruenten

Phasenwechsels ohne Änderung der Zusammensetzung, wodurch eine stabile Zyklierung ohne Degradation des Materials ermöglicht wird. Außerdem sinkt die Schmelztemperatur eines Legierungssystems bei der eutektischen Zusammensetzung auf ein Minimum innerhalb des Systems (siehe beispielhaft in Abbildung 29) bei einer dennoch hohen Energiedichte.

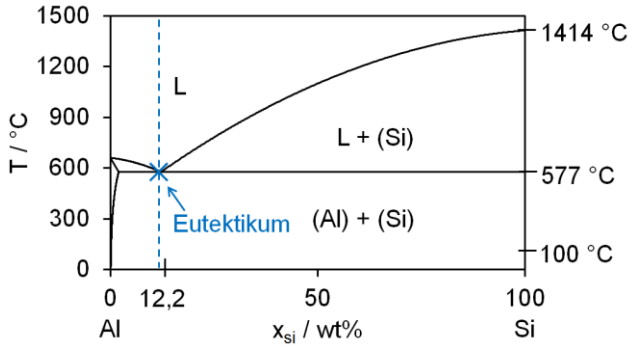


Abbildung 29: Phasendiagramm des Systems Aluminium-Silizium mit Markierung der eutektischen Zusammensetzung bei $AlSi_{12}$ mit der niedrigsten Schmelztemperatur von 577 °C im System.

Im Bereich zur Nutzung bis 600 °C weist das mPCM $AlSi_{12}$ die höchste gravimetrische Energiedichte auf basierend auf theoretischen Berechnungen mithilfe der Software FactSage unter Nutzung verschiedener Datenbanken. Da die Qualität und Ungenauigkeiten der durch die Datenbanken genutzten Quellen oft nicht einschätzbar sind, wird eine experimentelle Analyse der relevanten thermophysikalischen Eigenschaften von $AlSi_{12}$ nachfolgend durchgeführt. Die experimentell ermittelten Daten sind mit Werten aus Datenbanken und der Literatur im Rahmen der Ungenauigkeiten konform. Die Werte, die experimentell mittels dynamischer Differenzkalorimetrie, Laser-Flash-Analyse und Dilatometrie bestimmt wurden, sind in Tabelle 4 angegeben. Im Falle von temperaturabhängigen Werten sind die Werte bei Raumtemperatur angegeben. Die spezifische Wärmekapazität wird als Mittelwert über den Temperaturverlauf angegeben.

Tabelle 4: Experimentell ermittelte thermophysikalische Eigenschaften des mPCM $AlSi_{12}$.

Thermophysikalische Eigenschaft	**Wert**
Schmelztemperatur	577 °C
Spezifische Wärmekapazität	1,1 J/gK
Spezifische Schmelzenthalpie	481 J/g
Dichte	2,65 g/cm³
Temperaturleitfähigkeit	81 mm²/s
Wärmeleitfähigkeit	192 W/mK

Diese erste experimentelle Charakterisierung erfolgt an Proben in der Größenordnung einiger Milligramm. Außerdem erfahren die Proben bei den Untersuchungen nie mehr als zwei Schmelz-/Erstarrungszyklen. In der realen Anwendung wird Speichermaterial in der Größenordnung mehrerer Kilogramm für eine große Anzahl von Zyklen betrieben. Um Erfahrungen über das Verhalten des Speichermaterials im realen Anwendungsfall zu ermitteln, müssen Zyklierversuche im Anwendungsmaßstab durchgeführt werden. Die Entwicklung der Speicherkapazität ist jedoch nicht nur vom Speichermaterial selbst abhängig, sondern wird auch stark vom gewählten Einhausungsmaterial beeinflusst. Aus diesem Grund sollte eine Zyklierung in Verbindung mit dem später zu verwendenden Einhausungsmaterial durchgeführt werden. Im Folgenden wird der Vorgang zur Auswahl dessen erläutert.

Das mPCM liegt im Betrieb zeitweise als Metallschmelze bei hohen Temperaturen vor, die beim Kontakt mit anderen Werkstoffen zu einer Schädigung durch Schmelzkorrosion führen kann. Beispielhafte Mechanismen, die auftreten können, sind das Auflösen von Teilen der Einhausung

oder die Entstehung von unerwünschten Reaktionsprodukten. Daraus resultierend kann die mechanische Stabilität der Einhausung reduziert werden und diese könnte mit der Zeit ihre Funktionalität als Einhausung nicht mehr erfüllen. Außerdem kann Schmelzkorrosion zur Reduzierung der Speicherkapazität führen, wenn Reaktionsprodukte entstehen, die die mPCM Zusammensetzung ändern. Darüber hinaus können entstehende Reaktionsprodukte zur weiteren mechanischen Schädigung der Einhausung beitragen. In Abbildung 30 ist beispielhaft die Reaktivität zwischen 1.4301 Edelstahl und dem mPCM $AlSi_{12}$ gezeigt, die diese Materialkombination ungeeignet für die Anwendung macht. Eisen ist im mPCM Lösung und eine schichtweise Entwicklung von Reaktionsprodukten und Phasen kann beobachtet werden.

Abbildung 30: Reaktion einer AlSi12-Probe nach 72 h schmelzflüssig in einem 1.4301 Edelstahl-Tiegel makroskopisch (links) und mikroskopisch (rechts)

Um ein geeignetes Einhausungsmaterial zu identifizieren werden in einem ersten Schritt Phasendiagramme zwischen mPCM und potentiell geeigneten Einhausungsmaterialien untersucht und solche Systeme identifiziert, in denen keine Löslichkeit zu beobachten ist. Die resultierenden metallischen und keramischen Werkstoffe werden anschließend hinsichtlich ihrer technischen Eignung (bspw. Kosten, Formgebung, kommerzielle Nutzung) bewertet. Dann wird die Rangliste der Reihenfolge nach in experimentelle Reaktionstests überführt, bis geeignete Einhausungswerkstoffe identifiziert werden. Die Einhausungsmaterialien, die in ersten Reaktionstests mit Kontaktdauern von bis zu 336 Stunden keine Reaktion mit flüssigem $AlSi_{12}$ bei 650 °C aufweisen sind Aluminiumoxid, Graphit, Bornitrid und C/C-SiC. Somit sind zum aktuellen Stand weitere Untersuchungen mit Einhausungslösungen aus einem oder mehreren dieser vier Werkstoffe vorgesehen.

Im nächsten Schritt werden Einhausungen im anwendungsnahen Maßstab unter Nutzung der ausgewählten Einhausungsmaterialien (entweder massiv oder als funktionale Beschichtung) geplant und gefertigt. Anschließend können Zyklierversuche im Kontakt mit dem ausgewählten mPCM $AlSi_{12}$ erfolgen. Zu diesem Zweck wurde ein Prüfstand (siehe Abbildung 31) aufgebaut, mit dem mPCM-Einhausungs-Systeme im Anwendungsmaßstab zyklisch getestet werden können. Zahlreiche Temperaturmessstellen sowie die Erfassung der zugeführten Heizleistung und Messung der ausgetragenen thermischen Energie ermöglichen die Bilanzierung des Wärmehaushalts des Messsystems, woraus thermophysikalische Eigenschaften des Prüflings bestimmt werden können. Durch die Charakterisierung dieser Eigenschaften über die Zyklierung hinweg können Aussagen über die Zyklenstabilität der Materialkombination getroffen werden. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, den Prüfling im Anschluss an die Zyklierung zerstörungsfrei (CT-Analyse) oder optisch makro- und mikroskopisch zu untersuchen.

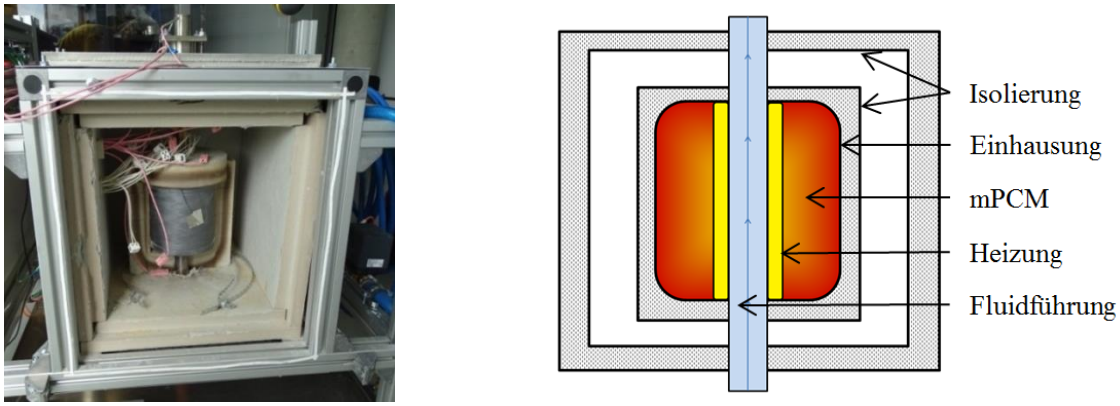


Abbildung 31: Foto (links) und schematischer Aufbau (rechts) des Prüfstands zur thermophysikalischen Charakterisierung metallischer Latentwärmespeichersysteme im Anwendungsmaßstab

2.3.2 AP 3.2 Entwicklung Wärmeaustragssystem

Basis der Entwicklung eines geeigneten Wärmeaustragssystems ist die detaillierte Beschreibung der zugrundeliegenden Hauptfunktion und Teilfunktionen, welche zur Erfüllung der Aufgabe umgesetzt werden müssen. Die Hauptfunktion dieses Teilsystems ist der Transport thermischer Energie von einem System höherer Temperatur zu einem System niedrigerer Temperatur, wobei sich als Wärmequelle höherer Temperatur der Speicher ergibt und als Wärmesenke niedrigerer Temperatur das Kühlmittel im Heizkreislauf des Buses (vgl. Abbildung 32).

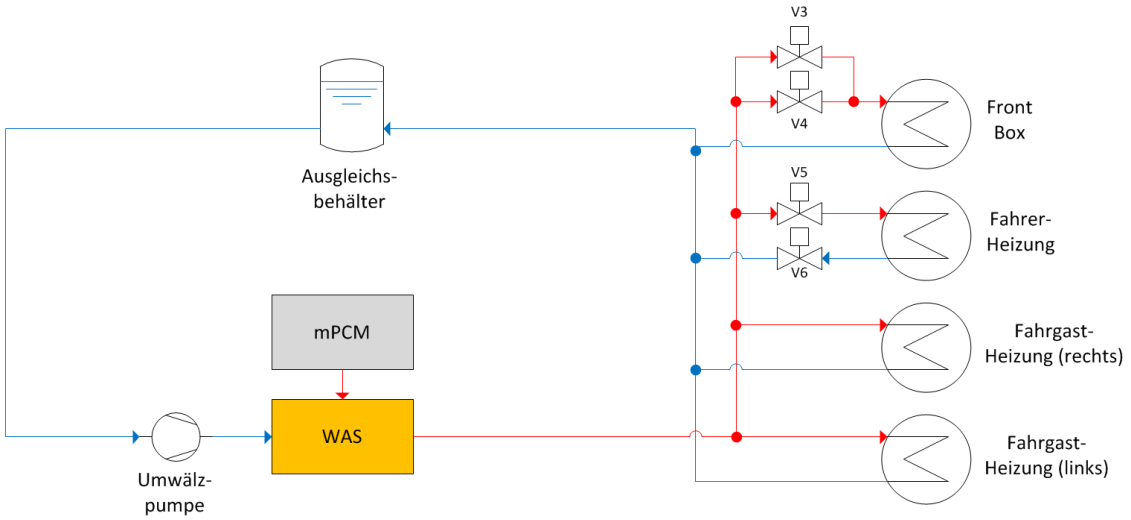


Abbildung 32: Schamtische Darstellung des Bezugs des Wärmeaustragssystems zu dessen Schnittstellen „Kühlmittelkreislauf des Buses“ und „Wärmespeichers“

Diese Schnittstellen, welche in den vorauslaufenden Kapiteln dargestellt wurden, definieren für das angestrebte Wärmeaustragssystem die entsprechenden Randbedingungen. In Abschnitt 2.2.2 kann mit dem aktuell verwendeten elektrischen Heizer eine Heizleistung von bis zu 20 kW realisiert werden. Anhand der Messungen sowie der klimatischen Randbedingungen beträgt gemäß Kapitel 2.2.2 die maximal notwendige Heizleistung ca. 18 kW. Aufgrund der anvisierten modularen Bauweise des Speichersystems wird davon ausgegangen, dass eine Realisierung der maximalen Heizleistung von 18 kW ausschließlich bei einem gleichzeitigen Betrieb mehrerer Module notwendig ist. Da sich die genaue Modulanzahl erst im Laufe des weiteren Projekts ergibt, wird für die weitere Entwicklung des Wärmeaustragssystems von einer Modulanzahl von 4 Modulen ausgegangen. Unter Berücksichtigung der maximalen Heizleistung von 18 kW ergibt sich damit eine notwendige Heizleistung von 4,5 kW je Modul. Um etwas Spielraum für die Leistungsfähigkeit eines einzelnen Moduls zu erhalten, wird dieser rechnerische Wert aufgerundet und damit für die weitere

Entwicklung des Wärmeaustragssystems eine Nennleistung von 5 kW als Zielgröße vorgegeben. Der Massenstrom des Kühlmittels im Heizkreislauf als weitere wichtige Kenngröße, beträgt im vorliegenden Szenario mindestens 1500 l/h. Das Temperaturniveau des Kühlmittels liegt entsprechend der Ein- und Ausschaltschwellen des elektrischen Heizers im Intervall von 68 °C - 75 °C, kann in der Spitze jedoch Temperaturen von bis ca. 80 °C aufweisen. Für die Weiterentwicklung des Wärmeaustragssystems wird die untere Temperaturgrenze von 68 °C als Zielwert definiert. Ergänzend ist der in Abschnitt 2.3.1 definierte, effektiv genutzte Temperaturbereich des Speichers zwischen 100 °C und 600 °C für das Wärmeaustragssystem relevant. Innerhalb dieses Temperaturintervalls soll idealerweise die Nennleistung aus dem Speicher bereitgestellt werden können.

Anhand der erarbeiteten Randbedingungen werden im Zuge des Entwicklungsprozess, angelehnt an die VDI-Richtlinie 2221, Anforderungen definiert und Lösungsprinzipien für die Teilfunktionen des Wärmeaustragssystems erarbeitet. Durch Kombination der Lösungsprinzipien und einer anschließenden Bewertung nach ausgewählten Kriterien, ergibt sich das in Abbildung 33 gezeigte Konzept als vielversprechendste Lösungsvariante zur Umsetzung des Wärmeaustragssystems. Das Grundprinzip des Wärmeaustragssystems beruht auf dem physikalischen Phänomen der erzwungenen Konvektion mit gleichzeitiger Verdampfung des Arbeitsmittels. Dabei wird mittels einer Pumpe Wasser über eine Steigleitung im Zentrum an das obere Ende des Speichers geführt. Von dort strömt das Wasser an ein zylinderförmiges Rohrstück (Verdampfer), welcher im wärmeleitenden Kontakt mit dem Speicher steht. Durch den Transport der im Speichermaterial gespeicherten thermischen Energie an den Verdampfer kommt es zur Aufnahme dieser Energie durch das Arbeitsmedium und damit zur Verdampfung. Im geschlossenen Kreislauf gelangt der Dampf zur Wärmesenke (Kühlmittelkreislauf des Fahrzeuges). Dort kommt es zur Verflüssigung und zur erneuten Förderung des Mediums mittels einer Fluidpumpe zur Wärmequelle (Verdampfer).

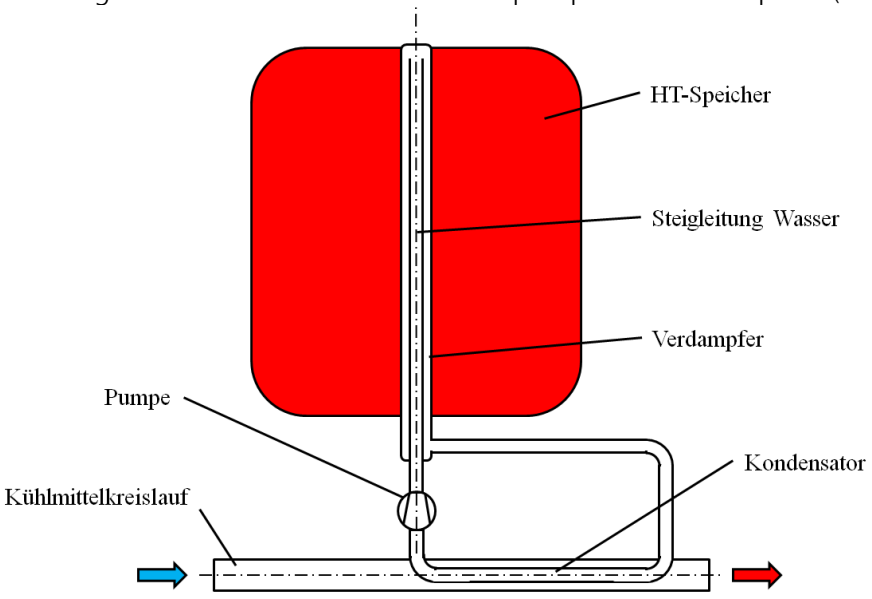


Abbildung 33: Ausgewähltes Konzept zum Austrag thermischer Energie vom Speicher in das Kühlmittel

Zur Einschätzung der Leistungsfähigkeit des entworfenen Konzepts dient eine numerische Abbildung mittels der Simulations-Software Dymola. Abbildung 34 zeigt die Simulationsbausteine mit Hilfe derer eine mathematische Interpretation der real ablaufenden Prozesse und physikalischen Phänomene erreicht werden können. Dabei wird innerhalb der Bausteine über diverse Parameter das numerische Modell an das beschriebene Konzept angenähert und während der Simulation iterativ Lösungen berechnet. Im vorliegenden Fall wird der Speicher vereinfacht über eine fixe Temperatur und einen Wärmeleitwiderstand abgebildet. Diese Elemente stehen mit dem Verdampfer, welcher aus einzelnen Segmenten aufgebaut ist, in thermischen Kontakt. Gespeist wird der Verdampfer durch Eingangsparameter eines Arbeitsmediums, welches nach dem

Durchströmen des Kondensators durch weitere Bedingungen am Auslass beschrieben wird. Die Kaltseite des Kondensators wird ebenfalls über Ein- und Auslassbedingungen eines zweiten Mediums definiert.

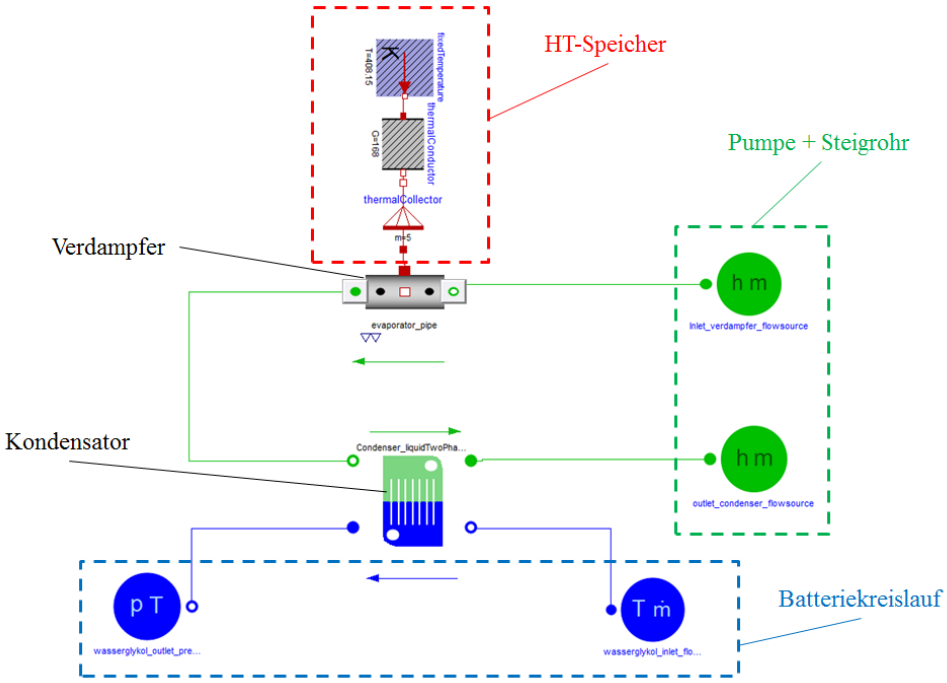


Abbildung 34: Numerisches Modell des ausgewählten Konzepts

Abbildung 35 zeigt das Simulationsergebnis (thermische Leistungsfähigkeit) der durchgeführten numerischen Untersuchung. Anhand der Simulationsergebnisse geht hervor, dass die geforderte Austragsleistung von 5 kW bei Massenströmen des verdampfenden Arbeitsfluids über 6,5 kg/h und Temperaturen des Speichers von über 120 °C erreicht werden.

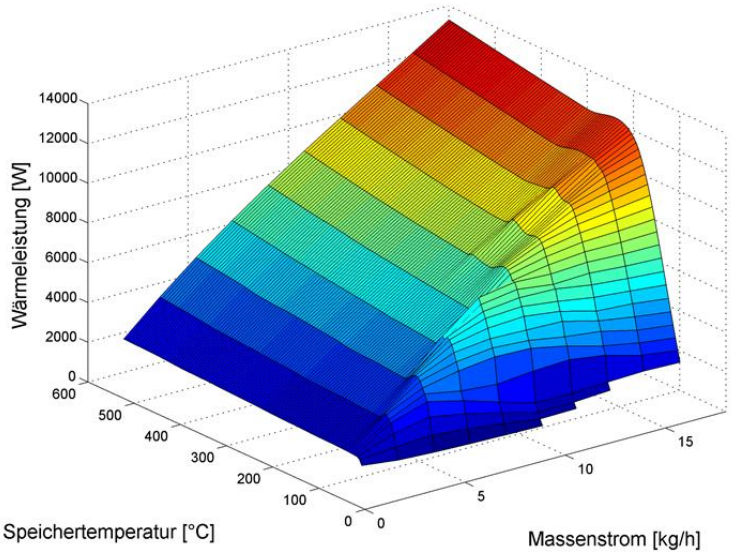


Abbildung 35: Simulationsergebnisse für das ausgewählte Konzept

Zur Validierung dieser Ergebnisse dienen Versuchsreihen an einem speziell für die Untersuchung des Wärmeaustragssystems aufgebauten Prüfstandes (Prüfstandsinfrastruktur wurde bereits vor Beginn des Projektes THS-Bus aufgebaut). Der Prüfstand wird in Abbildung 36 und Abbildung 37 dargestellt.

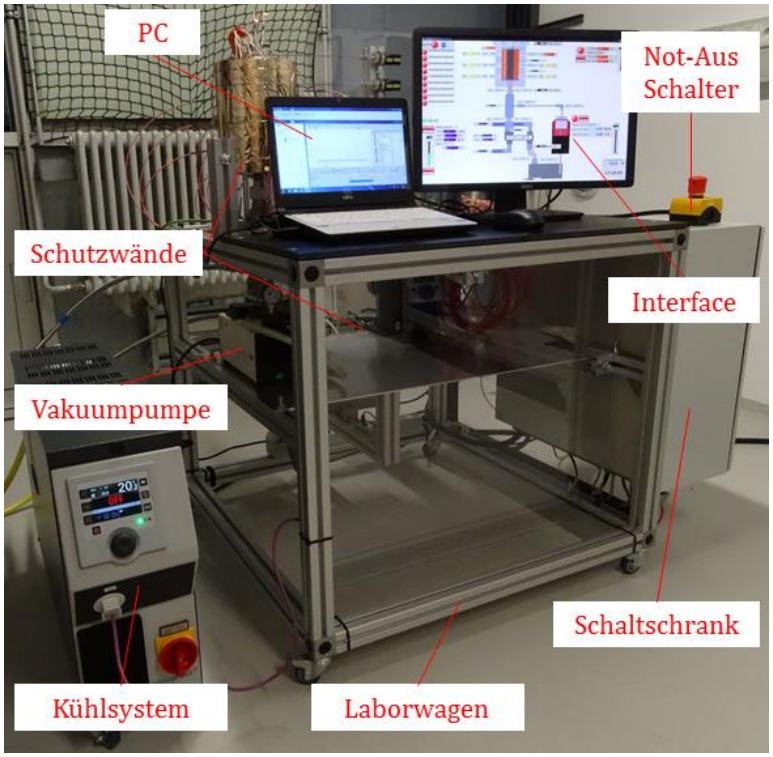


Abbildung 36: Vorderansicht des Prüfstands zur Untersuchung des Wärmeaustragssystems

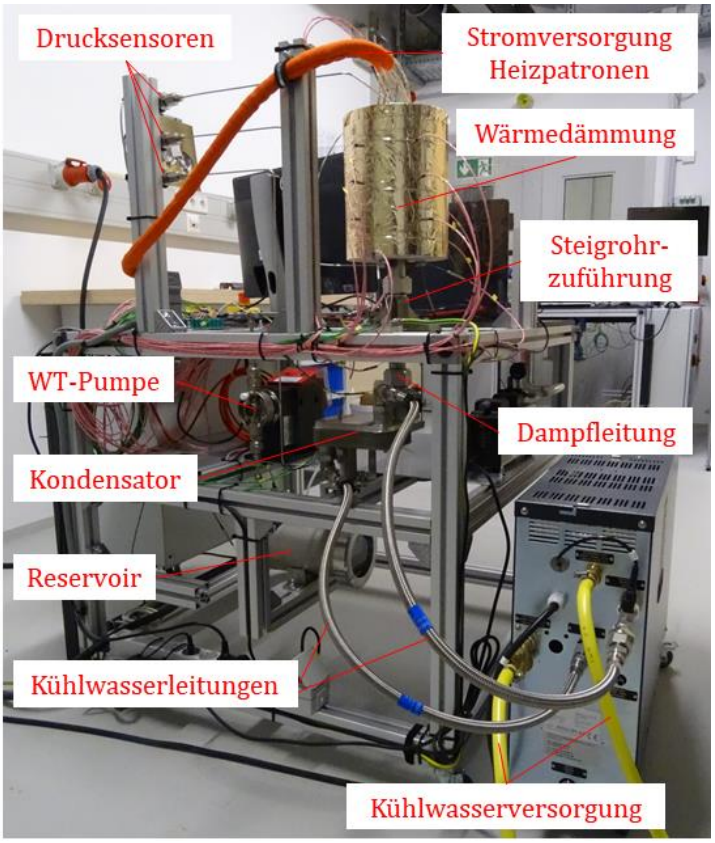


Abbildung 37: Rückansicht des Prüfstands zur Untersuchung des Wärmeaustragssystems

Abbildung 38 zeigt das Ergebnis der experimentellen Untersuchung des Wärmeaustragssystems. Grundsätzlich kann zunächst festgestellt werden, dass die Nennleistung von 5 kW auch im Experiment erreicht werden konnte, jedoch nicht für alle Betriebspunkte, in denen auch bei der Simulation eine entsprechend hohe Wärmeleistung dargestellt werden konnte. Die Abweichungen

können aus numerischen Ungenauigkeiten und unzureichenden Idealsierungen des Simulationsmodells bzw. von im Experiment zusätzlich auftretender Effekte stammen. Grundsätzliche Abweichungen sind vor allem bei niedrigen Massenströmen zu erkennen. Im Bereich niedriger Massenströme wird kaum Wärmeleistung an das Kühlmittel abgegeben. Stattdessen erfolgt im Bereich um 8 bis 10 kg/h ein sehr steiler Anstieg der ausgetragenen Wärmeleistung. Auch bei höheren Temperaturen kommt es zu Abweichungen. Im Gegensatz zu den numerischen Untersuchungen verringert sich mit zunehmendem Massenstrom im Experiment die ausgetragene Wärmeleistung. Ursache für die beobachteten Abweichungen zwischen Simulation und Experiment sind nach aktuellem Kenntnisstand das Ausbleiben der Benetzung der Verdampferwand bei niedrigen Massenströmen (Arbeitsmedium erreicht aufgrund zu geringer Ausströmgeschwindigkeiten nicht die Verdampferwand). Der steile Anstieg der ausgetragenen Wärmeleistungen beim Massenstrom von 8 bis 10 kg/h wird mit dem Erreichen des Arbeitsmediums der Verdampferwand erst ab diesen Massenströmen begründet. Des Weiteren könnte bei hohen Temperaturen eine zu rasche Verdampfung zu einem Dampfpolster zwischen Wand und Fluid führen. In beiden Fällen ist der Wärmetransport gehindert. Um beide Effekte zu vermeiden ist eine geometrische Optimierung der Ausströmung und des Verdampfers sinnvoll.

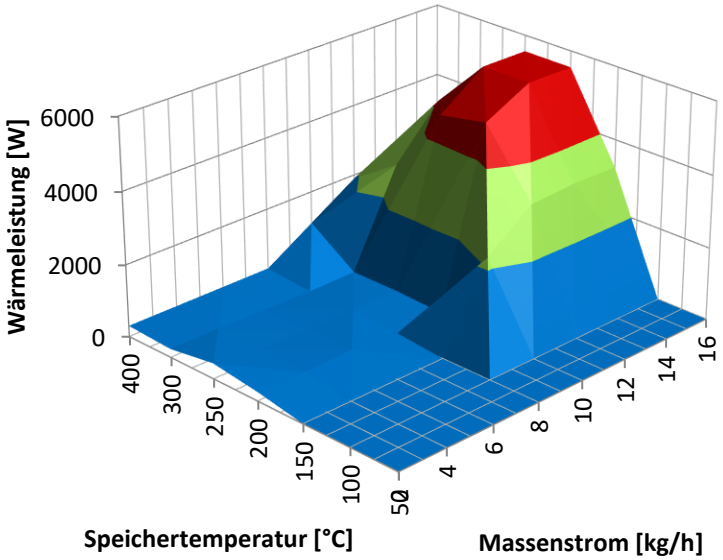


Abbildung 38: Versuchsergebnisse für das ausgewählte Konzept

Nach Bestätigung der Funktionstüchtigkeit und Leistungsfähigkeit des Konzepts gilt es in einem weiterführenden Schritt das System zu optimieren und damit die Leistungsfähigkeit zu steigern sowie besser an die Randbedingungen anzupassen. Dabei sollen die aus den bisherigen Untersuchungen gewonnen Kenntnisse in einer weiteren Entwicklungsschleife genutzt werden um den Wärmeaustrag effizienter, regelbarer und damit anwendungsgerecht zu gestalten. Ziel ist es, eine gleichmäßige Benetzung des Verdampfers über den gesamten Betriebsbereich zu gewährleisten. Auch eine günstige Strömung im Verdampfer und eine ideale Übertragungsfläche werden angestrebt.

Anhand dieser Kriterien wurden über eine Kreativphase weitere Lösungsprinzipien entwickelt. Bei diesen Lösungsprinzipien gilt es nun in Vorversuchen kritische Designparameter zu untersuchen um eine bessere Einschätzung der Prozesse zu erhalten. Hierzu dient ein Versuchsaufbau mit Plexiglas (vgl. Abbildung 39) der es ermöglicht, die im Verdampferrohr auftretenden Strömungen (Ausströmung aus Steigrohr, Verteilung Arbeitsmedium an der Verdampferwand) sichtbar zu machen. Die Vorversuche dienen der Vorbereitung weiterer experimenteller Untersuchungen am

Prüfstand mit Wärmeaustrag sowie um vertiefte Kenntnisse über das Ausströmverhalten und die Fluidverteilung nach der Ausströmung zu erhalten.

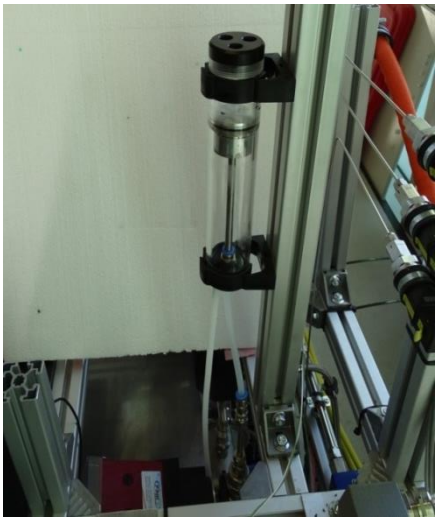


Abbildung 39: Versuchsaufbau zur Untersuchung kritischer Designaspekte

2.3.3 AP 3.3 Entwicklung Wärmeeintragssystem

Das Wärmeeintragssystem (WES) dient der bedarfsgerechten Beladung des THS mit thermischer Energie. Es gilt daher ein System zu entwickeln, welches die an der Ladesäule verfügbare elektrische Energie in Wärme wandelt und diese gezielt in das Speichermaterial einbringt.

Vorgehensweise

Abbildung 40 zeigt die bei der Bearbeitung von AP3.3 verfolgte Vorgehensweise. Zunächst wurden die für das WES relevanten Rahmenbedingungen untersucht (1). Aus diesen konnten wiederum resultierende Anforderungen abgeleitet werden (2). Im Rahmen einer umfangreichen Recherche zum Stand der Technik sowie unter Einbeziehung bereits erfolgter Untersuchungen, wurde ein Heizverfahren ausgewählt, welches die Anforderungen grundsätzlich erfüllt (3).

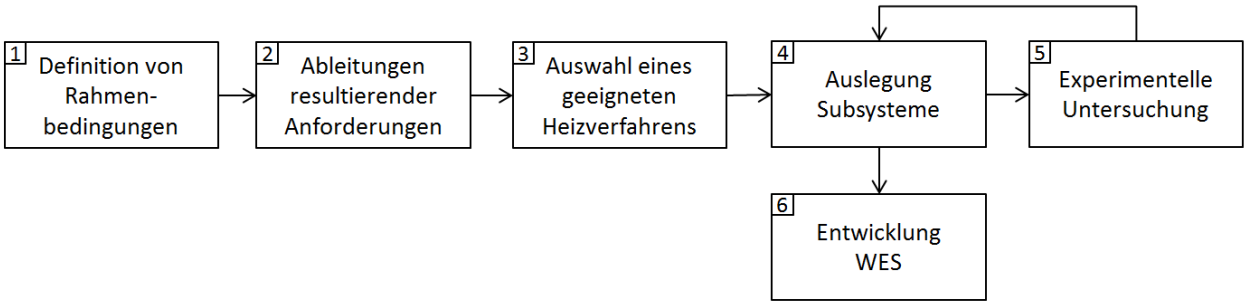


Abbildung 40: Schema der Vorgehensweise zur Bearbeitung von AP3.3

Rahmenbedingungen

Die Rahmenbedingungen werden im Wesentlichen durch die verfügbare Ladeinfrastruktur sowie die angestrebte Ladestrategie definiert. An den Ladestationen des Flughafens sind gegenwärtig max. 60 kW DC abgreifbar. Wie in Kapitel 3.2.1 beschrieben kommen grundsätzlich zwei Ladestrategien infrage. Zum einen besteht die Option der Gelegenheitsladung (Zwischenladungen während des Fahrbetriebes), bei der die maximale Ladeleistung von 60 kW sinnvollerweise genutzt wird, um eine möglichst rasche Beladung des Speichersystems und damit kurze Standzeiten des Buses an der Ladestation zu gewährleisten. Im Falle einer Volladerstrategie müssten gemäß Kapitel 2.2.2 insgesamt 171 kWh an thermischer Energie am kältesten Wintertag bereitgestellt werden. Diese Energie müsste ebenfalls gemäß Kapitel 2.2.2 innerhalb einer Dauer von 4 h dem Speicher zugeführt werden, wodurch sich eine notwendige Heizleistung von 42,75 kW ergibt.

Da zum aktuellen Zeitpunkt des Projektes noch kein optimales Betriebsszenario des Speichers definiert werden kann (Ergebnis der Auslegung aus AP 2), wird von einer notwendigen Leistung des Wärmeeintragssystems von 60 kW ausgegangen. Im Falle des Nachtladerszenarios könnte diese jedoch im weiteren Verlauf des Projektes nach unten hin abweichen.

Anforderungen
Auf Basis der zuvor definierten Rahmenbedingungen und der systemspezifischen Eigenschaften werden die Anforderungen an das WES abgeleitet werden:

- Effiziente Wandlung der elektrischen- in thermische Energie
- Realisierung einer Ladeleistung von 60 kW bei 690 VDC
- Robustheit bzw. ausreichende Lebensdauer, evtl. auf Bauteil- oder Systemebene austauschbar
- Sicher gegenüber Kurzschluss und Überhitzung
- Homogener Wärmeeintrag bzw. Berücksichtigung von Auswirkung auf Lunkerbildung
- Flexible Geometrie
- Kostengünstig

Geeignete Heizverfahren
Da eine Vielzahl verschiedener Verfahren zur Wandlung elektrischer in thermische Energie existiert, wurden diese bereits in diversen Voruntersuchungen hinsichtlich ihrer Eignung für den Wärmeeintrag in einem fahrzeuggerechten THS vorselektiert. Dabei wurde das Prinzip der indirekten Widerstandsheizung als am vielversprechendsten bewertet. Die verfügbaren Heizsysteme können grundsätzlich die die zuvor abgeleiteten Anforderungen erfüllen und haben sich zudem in verschiedensten industriellen Anwendungen bewährt.
Die Funktionsweise basiert auf dem Effekt, dass sich jeder stromdurchflossene Leiter aufgrund des materialabhängigen elektrischen Widerstandes erwärmt. Die dabei erzielbare Maximaltemperatur hängt wiederum von den Heizleiterwerkstoffen ab. [24]
Als grundsätzlich geeignet gelten Heizelemente auf Basis von metallischen oder keramischen Heizleiterwerkstoffen. Nachfolgend werden grundsätzlich geeignete Heizleiterwerkstoffe genannt:

Metallische Heizleiterwerkstoffe:
- Chrom-Nickel-Legierungen (CrNi)
- Ferritische Chrom-Eisen-Aluminium-Legierungen (CrFeAl)
- Molybdän- (Mo) und Wolfram-Legierungen (Wo)

Keramische Heizleiterwerkstoffe:
- Siliziumkarbid (SiC)
- Molybdänsilizid (MoSi2)
- Graphit

Die für den THS erforderliche Maximaltemperatur von 600 °C kann ohne weiteres mit jedem der oben aufgeführten Heizleiterwerkstoffen erreicht werden. Zum jetzigen Zeitpunkt ist eine Auswahl jedoch nicht zielführend.

Abbildung 41 zeigt eine zylindrische Heizpatrone. Diese Variante der indirekten Widerstandserwärmung hat sich in einer Vielzahl von technischen Anwendungen bewährt und wird dementsprechend in großen Stückzahlen gefertigt. Daher fand diese Ausführung bereits Anwendung in den bisher am DLR durchgeführten Untersuchungen.

Abbildung 41: Indirekte Widerstandsheizung – Heizpatrone [25]

Die Besonderheit besteht darin, dass der Heizleiter bereits in einem elektrischen Isolationsmaterial eingehaust ist, sodass das Gehäuse direkt mit dem zu erwärmenden Medium in Berührung treten kann. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Wärmeabfuhr möglichst homogen erfolgt, da ansonsten eine lokale Überhitzung zur Beschädigung führen kann. Für den direkten Kontakt zum mPCM sind die konventionell eingesetzten Gehäusematerialien ungeeignet, sodass entweder ein alternatives Material gewählt oder zusätzliche korrosionsbeständige Wärmeleitstrukturen eingesetzt werden müssen. Die Verwendung gewöhnlicher Heizpatronen kommt damit jedoch grundsätzlich für das WES infrage.

WES-Integration

Bei der Speicherintegration des WES kann grundsätzlich zwischen folgenden Integrationsstufen differenziert werden:

1. Voll-Integriert
2. Teil-Integriert
3. Nicht-Integriert

Um von den bereits vorhandenen Heizlösungen zu profitieren wurde eine ausführliche Recherche zur Lokalisierung von Anwendungen mit analogen Systemparametern durchgeführt. Dabei wurde insbesondere in der Aluminiumherstellung und -Verarbeitung ein vielversprechendes Anwendungsfeld gefunden. Abbildung 42 zeigt beispielsweise sogenannte „Immersion Heater" (Tauchheizkörper) zur Temperierung von Aluminiumschmelzen.

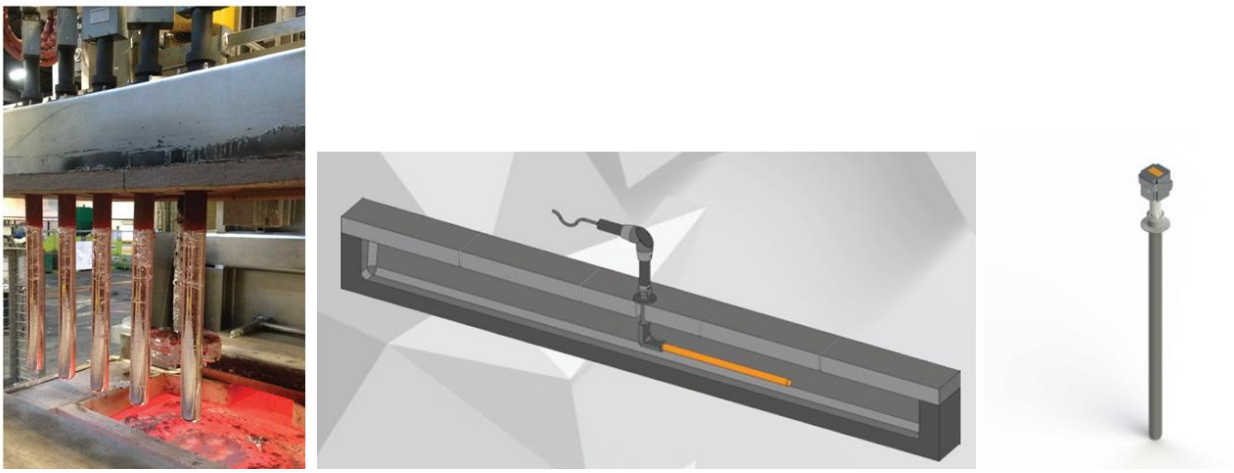


Abbildung 42: Indirekte Widerstandsheizungen (Voll-Integriert)

Die Immersion Heater bestehen aus einem elektrischen Heizwiderstand, welcher zum Schutz gegen die Metallschmelze in einem Heizrohr aus Siliziumnitrid eingehaust wird. Dadurch könnten die Heizer ohne zusätzliche Koppelstruktur frei im Speichermaterial positioniert werden. Allerdings erfordert dies im Hinblick auf die Adaption für einen THS eine Durchführung durch die

Speicherwand. Zur Vermeidung einer solchen Durchführung kann das WES alternativ direkt in die Einhausung integriert oder unmittelbar an deren Außenfläche positioniert werden. Sogenannte Heizplatten (Abbildung 43) ermöglichen flächenbezogen einen homogenen Wärmeeintrag und lassen sich flexibel an die Außengeometrie der Einhausung anpassen.

Abbildung 43: Indirekte Widerstandsheizungen (Teil-Integriert)

Eine weitere Möglichkeit bieten Heizlösungen welche außerhalb der Einhausung positioniert werden. Diese finden sich ebenfalls in der industriellen Aluminiumherstellung. Da allerdings kein direkter thermischer Kontakt zwischen den Heizelementen und der Einhausung besteht, entfällt der Wärmetransport durch Wärmeleitung, sodass diese Variante hinsichtlich der Leistungsfähigkeit und Effizienz beschränkt wird.

Abbildung 44: Indirekte Widerstandsheizungen (Nicht-Integriert)

Grundsätzlich können alle zuvor erläuterten Heiztechniken beliebig miteinander kombiniert werden. Allerdings ist abzusehen, dass manche Anforderungen mit steigender Komplexität nicht mehr zufriedenstellend erfüllt werden.

Gegenwärtig werden die drei Integrationsvarianten hinsichtlich ihrer Eignung für den Einsatz im THS bewertet und miteinander verglichen. Da dies maßgeblich von dem grundsätzlichen Speicherkonzept abhängig ist, erfolgt diesbezüglich eine enge Abstimmung mit den Ergebnissen aus AP2. Anschließend können die Subsysteme gemäß des Vorgehens in Abbildung 40 ausgelegt (4) und experimentell untersucht (5) werden. Die dabei erlangten Erkenntnisse werden schließlich in der Entwicklung des WES-Gesamtsystems (6) münden.

2.4 AP 4 – Adaption Speicherkonzept

Das Arbeitspaket 4 hat zum Ziel, den möglichst optimalen konzeptionellen Aufbau eines Thermischen Hochleistungsspeichers für die Anwendung im Bus zu definieren. Ausgangspunkt hierfür sind die bisher am DLR definierten Speicherkonzepte, deren Anwendungsfokus jedoch beim PKW lag. Das Arbeitspaket untergliedert sich dabei in das Teilarbeitspaket AP4.2, welches die Aufarbeitung kritischer Designaspekte der bisher am DLR vorliegenden Speicherkonzepte sowie die möglicherweise als kritisch erscheinenden Designaspekte für die Anwendung im Bus zur Aufgabe hat. Im AP 4.2. wird letztendlich das Speicherkonzept für die Anwendung im Bus erarbeitet.

2.4.1 AP 4.1 – Kritische Designaspekte

Als kritischster Designaspekt wird die Anordnung der Teilkomponenten des Speichersystems zueinander erachtet, da diese nach aktuellem Kenntnisstand maßgeblich Einfluss auf die Funktionalität, Langzeitstabilität aber auch Performance des Speichers hat. Von großer Bedeutung hierfür sind der Erstarrungsprozess des Speichermaterials und die mit dem Erstarrungsprozess verbundene Ausbildung von Materialdefekten (Lunker, Poren, etc.). Eine Ausbildung von Materialdefekten am Wärmeeintragssystem kann beispielsweise eine Verringerung der Aufheizleistung oder eine deutliche Verkürzung der Lebensdauer der Heizelemente zur Folge haben. Materialdefekte am Wärmeeintragssystem können die Wärmeaustragsleistung und damit die Leistungsfähigkeit des Heizsystems Thermischer Hochleistungsspeicher negativ beeinflussen.
Als zweiter kritischer Designaspekt wird die Umsetzung einer langzeitstabilen Einhausung betrachtet. Wie bereits im Kapitel 2.3.1 berichtet, kommt es zwischen konventionellem Edelstahl und dem Speichermaterial zu Reaktionserscheinungen, die sowohl die energetischen Eigenschaften des Speichersystems aber auch und v.a. die Langzeitstabilität negativ beeinflussen können. Neben der Identifikation langzeitstabiler Einhausungsmaterialien gilt es diese auch in entsprechender Art und Weise als Einhausung für einen anwendungsgerechten THS umzusetzen.

2.4.2 AP 4.2 – Konzeptentwicklung

Wesentlicher Hauptbestandteil der Konzeptentwicklung ist die Definition, wie die einzelnen Teilkomponenten eines THS optimal zueinander anzuordnen sind. Die wesentlichen Teilkomponenten sind das Speichermaterial, die Einhausung, das Wärmeeintragssystem, das Wärmeaustragssystem sowie die Wärmedämmung. Besonderer Fokus liegt dabei auf der Anordnung des Wärmeein- und austragssystem bezüglich des Speichermaterials. Guter Wärmekontakt zwischen Speichermaterial und Wärmeeintragssystem ist von Relevanz, um eine hohe Langzeitstabilität der Heizelemente zu Gewährleisten. Guter Wärmekontakt zwischen Speichermaterial und Wärmeaustragssystem ist notwendig, um eine hohe Leistungsfähigkeit des Wärmeaustragssystems sowie eine kompakte Bauweise dessen realisieren zu können (vgl. vorheriges Kapitel)

Maßgeblich für den Wärmekontakt zwischen Speichermaterial und den entsprechenden Komponenten ist das Erstarrungsverhalten des mPCM. Für Untersuchungen hierzu kommen grundsätzlich simulative Betrachtungen oder aber experimentelle Untersuchungen in Betracht. Aufgrund der Komplexität des Erstarrungsverhaltens von Metallschmelzen (thermische, mechanische und chemische Einflussfaktoren) ist für eine simulative Untersuchung Spezialsoftware notwendig. Entsprechende Spezialsoftware ist allerdings kostenintensiv in der Anschaffung, erfordert fachliches Spezialwissen und kann zudem die Realität nur in eingeschränkter Art und Weise abbilden. Experimentelle Untersuchungen sind zwar ebenfalls kostspielig in der Durchführung, bilden die Realität jedoch vollumfänglich ab. Aus diesem Grund wurde sich dafür entschieden, im Rahmen des Projektes experimentelle Untersuchungen mit dem Fokus auf dem Wärmekontakt zwischen mPCM und Wärmeein- und –austragssystem durchzuführen. Die Untersuchungen wurden maßgeblich im Rahmen einer Abschlussarbeit eines Master-Studenten geplant und durchgeführt. Ausführliche Ergebnisse zu den Untersuchungen finden sich daher in der entsprechenden Master-Arbeit. Im Rahmen dieses Projektberichtes werden die durchgeführten Untersuchungen daher auf das Wesentliche beschränkt und zusammengefasst wiedergegeben.

Theoretische Grundlagen

Für eine zielgerichtete Konzeptentwicklung sind Kenntnisse über die im mPCM bei der Erstarrung auftretenden Effekte maßgeblich. Relevante Effekte sind der Volumenverlust des Speichermaterials während des Phasenwechsels von flüssig nach fest (beinhaltet auch die Bildung von Lunkern und Poren) sowie die Erstarrungsmorphologie.

Die Volumenänderung eines metallischen Werkstoffes über dem Phasenwechsel resultiert aus der Dichteänderung dessen. Im vorliegenden Fall tritt eine Zunahme der Dichte vom festen in den flüssigen Zustand auf, d.h. das Volumen verringert sich. Dieser sog. technische Volumenverlust resultiert in der Bildung von Innen- und Außendefiziten zusammen. Abbildung 45 zeigt den technischen Volumenverlust während der Erstarrung sowie dessen Bestandteile.

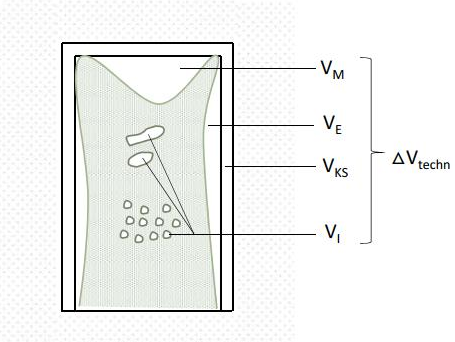


Abbildung 45: Technischer Volumenverlust über dem Phasenwechsel eines metallischen Werkstoffes und dessen Bestandteile [26]

Als Innendefizite V_I treten die bereits angesprochenen Lunker und Poren auf. Bei Lunkern handelt es sich um Hohlräume im Werkstoff. Sie entstehen, wenn während der Erstarrung bestimmte Bereich nicht mit flüssiger Schmelze aufgefüllt werden können. In Lunkern herrscht Unterdruck bis hin zum Vakuum. Bei Poren handelt es sich um Gaseinschlüsse im Material. Ihre Entstehung beruht auf strömungsmechanischen Effekten (Einschließen von Luftblasen während des Gusses), verfahrens- und formstoffbedingten Ursachen (Gasabgabe durch Trennmittel, Kerne, etc.) oder auf thermodynamischen Ursachen (begrenzte Gaslöslichkeit in der Gusslegierung beim Abkühlen). Lunker weisen meist freie Formen auf, Poren hingegen i.d.R. annähernd kreisrunde Formen.
Die Außendefizite setzen sich aus dem Makrolunkervolumen V_M, dem Einfallvolumen V_E sowie der kubischen Schwindung V_{KS} zusammen. Makrolunker an der Oberfläche entstehen durch das kollabieren oberflächennaher Lunker, sobald die Oberflächenspannung während der Erstarrung nicht mehr ausreicht um ein abgeschlossenes Volumen aufrecht zu erhalten. Bei der kubischen Schwindung handelt es sich um die grundsätzlich auftretende Schrumpfung durch die Dichteänderung. Das Einfallvolumen ist die Folge einer ungleichmäßigen kubischen Schwindung. [27] [26] [28] [29] [30]

Die Erstarrungsmorphologie ist ein metallkundlicher Begriff, der die Erscheinungsform der Kristallisation und Kristallstruktur, die sich während des Erstarrungsvorgans ausbildet, beschreibt. Je nach Material können diese sehr unterschiedlich ausgeprägt sein und werden wie folgt klassifiziert:

- Exogen-glattwandig
- Exogen-rauhwandig
- Exogen-schwammartig
- Endogen-breiartig
- Endogen-schalenbilden

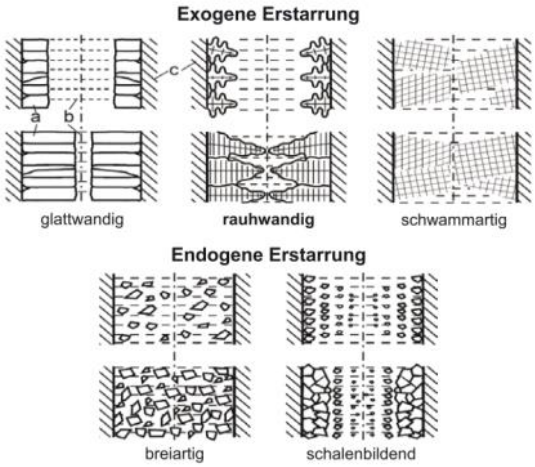


Abbildung 46: Mögliche Erstarrungsmorphologie metallischer Werkstoffe [26]

Abbildung 46 zeig die genannten unterschiedlichen Morphologien. Exogene Kristalle und Körner bilden sich in Bereichen mit Wärmeaustrag, wie bspw. einer Formwand, Speicherwand (durch Wärmeverluste an der entsprechenden Oberfläche) oder an einem Wärmeübertrager (z.B. am Wärmeaustragssystem). Endogene Kristalle bilden sich vornehmlich in der gesamten Schmelze und expandieren anschließend. An Phasengrenzen der einzelnen, in Kontakt stehenden Kristalle und Körner bilden sich sog. Erstarrungsfronten aus. Treffen Erstarrungsfronten aufeinander, so ist in diesen Bereich mit einem erhöhten Lunker- und Porenvorkommen zu rechnen. [31] [27] [26] [28] [29]

Konzeptentwicklung und -auswahl

Im Rahmen einer Konzeptentwicklung wurden insgesamt 8 verschiedene Speicherkonzepte entworfen mit dem Ziel, die Anordnung von Wärmeein- und austragssystem maximal zu variieren und damit eine möglichst große Bandbreite an unterschiedlichen Ausführungsmöglichkeiten abzudecken. Für jedes der Speicherkonzepte wurden außerdem 2 Ausführungsvarianten mit eckiger und zylindrischer Außenkontur erstellt, sodass sich insgesamt 16 verschiedene Speicherkonzepte ergeben.

Zusätzlich ist theoretisch jedes Speicherkonzept in 2 verschiedenen Dimensionen, für ein Betriebsszenario „Volllader“ und ein Betriebsszenario „Gelegenheitslader“ (vgl. Kapitel 2.2.1) auszuführen, sodass sich in Summe theoretisch 32 verschieden Konzeptausführungen ergeben.

Aufgrund des sehr hohen Aufwandes, der mit dem Aufbau und der Untersuchung von 32 verschiedenen Speicherkonzepten verbunden wäre, wurde eine Vorauswahl getroffen. Grundlage der Vorauswahl ist es, mit den verbleibenden Konzepten weiterhin möglichst viele zu erwartende Effekte untersuchen zu können. Als Ergebnis wurden die in Abbildung 47 bis Abbildung 50 dargestellten Grundkonzepte ausgewählt. Weiterhin wurde sich entschieden, ausschließlich die quaderförmige Ausführungsvariante zu untersuchen, da bei der zylindrischen Variante durch die runde Außenkontur sowie den höheren Symmetriegrad von positiven Effekten hinsichtlich des Erstarrungsverhaltens auszugehen ist und damit potentiell bei der quaderförmigen Variante auftretende Effekte nicht untersucht werden können. Für die vier verbleibenden, quaderförmigen Grundkonzepte wurde sich dafür entschieden, je eine Variante für den „Gelegenheitslader“ als auch eine Variante für den „Volllader“ aufzubauen. Damit ergeben sich insgesamt 8 Versuchsspeicher, die experimentell untersucht wurden.

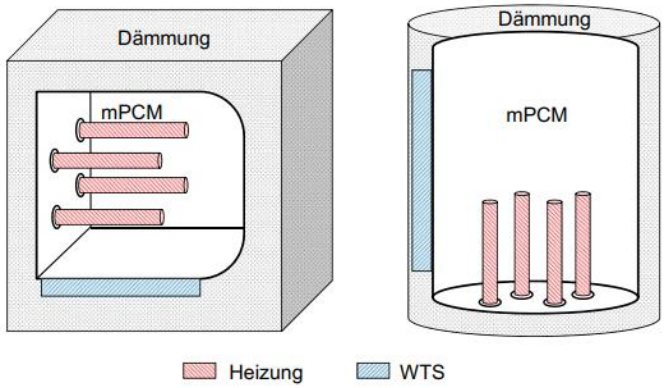


Abbildung 47: Darstellung des Speicherkonzepts 2 mit flächigem Wärmeaustragssystem (WTS) und normal zum WTS angeordneten Heizpatronen

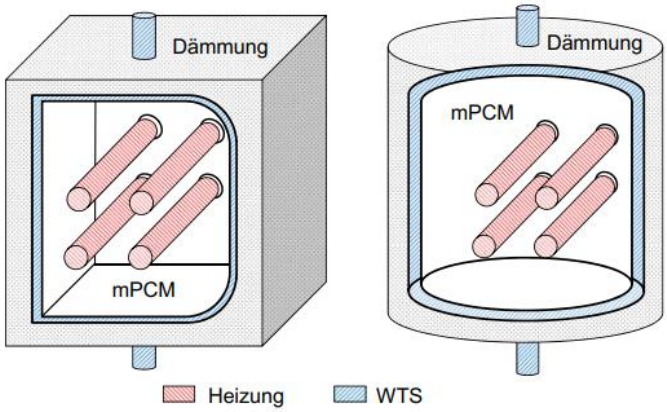


Abbildung 48: Darstellung des Speicherkonzepts 3 mit der Mantelfläche als Wärmeaustragssystem (WTS) und normal zum WTS angeordneten Heizpatronen

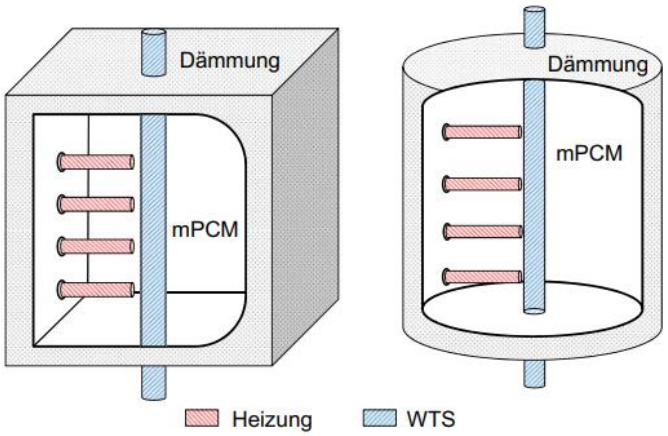


Abbildung 49: Darstellung des Speicherkonzepts 5 mit zentriert angeordnetem Wärmeaustragssystem (WTS) und normal zum WTS angeordneten Heizpatronen

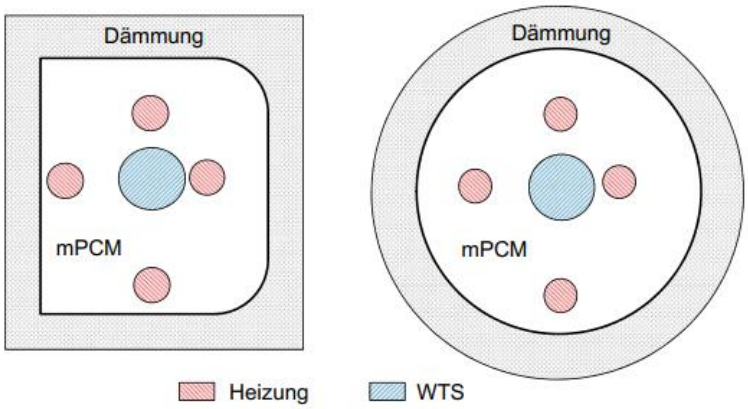


Abbildung 50: Darstellung des Speicherkonzepts 8 mit zentriert angeordnetem Wärmeaustragssystem (WTS) und parallel zum WTS angeordneten Heizpatronen

Aufbau ausgewählte Speicherkonzepte

Die insgesamt acht Versuchsspeicher sind nachfolgend in Abbildung 51 bis Abbildung 58 als 3D-CAD Modelle dargestellt. Grundsätzlich ist es so, dass eine Unterscheidung zwischen der Ausführungsvariante „Gelegenheitslader" und „Volllader" erfolgt. Die Unterscheidung drückt sich in der Anzahl und der Dimension der verwendeten Heizpatronen aus sowie der installierten Entladeleistung (unterschiedliche Auslegung Luftwärmeübertrager). Hierdurch kann das Verhältnis von Be- und Entladeleistung entsprechend den Randbedingungen eines „Gelegenheitsladers" bzw. „Volllladers" angepasst werden.

Variationen erfolgen bei allen Konzepten hinsichtlich der Positionierung der Heizpatronen. Hierdurch sollen Einflüsse auf den Wärmekontakt zwischen Heizpatronen und Speichermaterial in Abhängigkeit der Einbauposition untersucht werden können. Weiterhin sind die Heizpatronen teilweise mit Thermoelementen ausgerüstet (mit roter Umrandung markiert), um entsprechende Temperaturprofile im Speicher zu ermitteln und diese mit den erzielten Ergebnissen übereinbringen zu können. Zuletzt wurden bei den „Gelegenheitslader"-Konzepten Heizpatronen teilweise durch Dummies (gelbe Umrandung) aus Edelstahl ersetzt. Gründe hierfür sind zum einen um Kosten bei der Herstellung der Versuchsspeicher einzusparen, aber auch die nicht ausreichende elektrische Leistungsfähigkeit der verwendeten Prüfstandsinfrastruktur, die eine Ansteuerung aller Heizungen nicht zulässt.

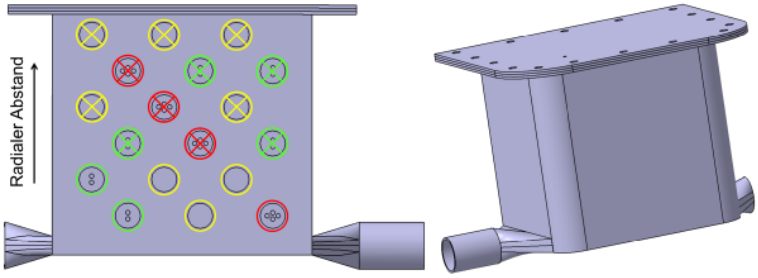


Abbildung 51: 3D-Ansicht des Speicherkonzepts 2 in der Ausführungsvariante „Gelegenheitslader"

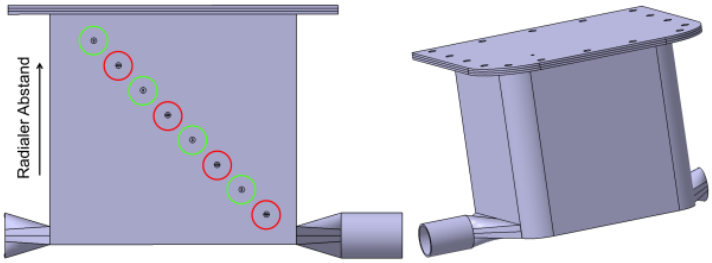


Abbildung 52: 3D-Ansicht des Speicherkonzepts 2 in der Ausführungsvariante „Volllader“

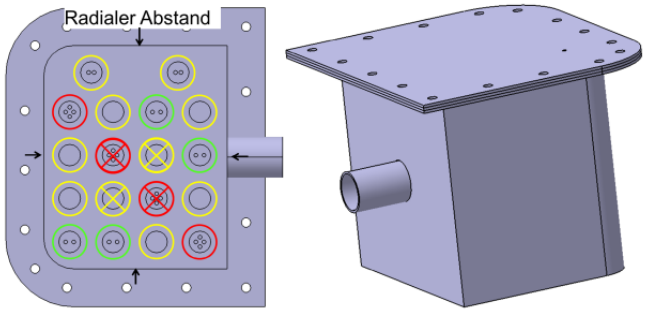


Abbildung 53: 3D-Ansicht des Speicherkonzepts 3 in der Ausführungsvariante „Gelegenheitslader“

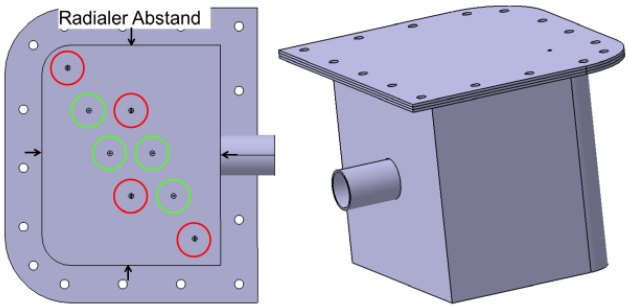


Abbildung 54: 3D-Ansicht des Speicherkonzepts 3 in der Ausführungsvariante „Volllader“

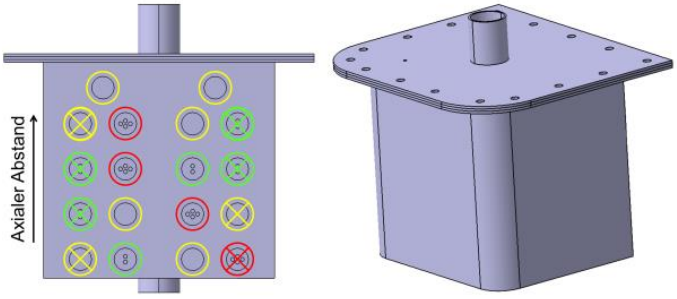


Abbildung 55: 3D-Ansicht des Speicherkonzepts 5 in der Ausführungsvariante „Gelegenheitslader“

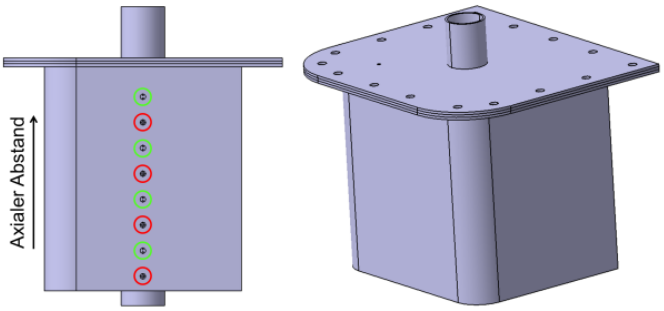


Abbildung 56: 3D-Ansicht des Speicherkonzepts 5 in der Ausführungsvariante „Volllader“

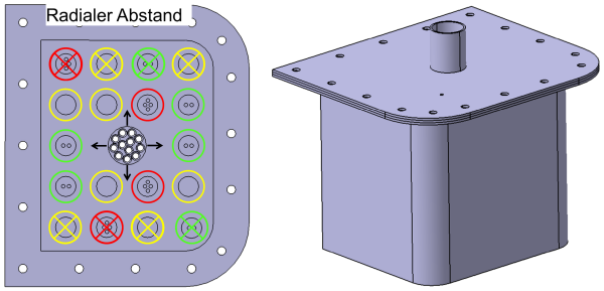


Abbildung 57: 3D-Ansicht des Speicherkonzepts 8 in der Ausführungsvariante „Gelegenheitslader“

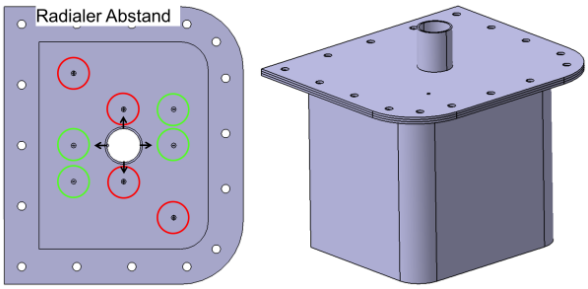


Abbildung 58: 3D-Ansicht des Speicherkonzepts 8 in der Ausführungsvariante „Volllader“

Experimentelle Untersuchung Speicherkonzepte

Die Versuchsspeicher wurden im in Abbildung 59 dargestellten Prüfstand eingebaut und untersucht. Der Versuchsablauf stellt sich bei allen Versuchsspeichern vom Grundprinzip identisch dar. Die Speicher wurden zunächst mit Hilfe der Heizpatronen aufgewärmt, aufgeschmolzen und leicht über den Schmelzpunkt hinaus auf ca. 600 °C erwärmt. Im Anschluss an die Erwärmung wurden die Speicher mittels Luft über den Luftwärmeübertrager bis auf ca. 50 °C, unter Erstarrung des Speichermaterials im Schmelzpunkt, abgekühlt.

Abbildung 59: Verwendete Prüfstandsinfrastruktur zur experimentellen Untersuchung der Speicherkonzepte

Abbildung 60 zeigt beispielhaft einen Versuchsspeicher. Die Einhausung wurde aus konventionellem Edelstahl hergestellt (nicht langzeitstabil, für die Versuche mit lediglich einem Aufschmelzprozess jedoch vollkommen ausreichend). Das Speichermaterial wurde in einer Gießerei in den Speicherbehälter eingegossen. Die elektrischen Anschlüsse der genutzten Heizpatronen wurden in einem Stecker zusammengefasst. Mit Hilfe der angeschweißten Rohrleitungen wird die Luft dem Wärmeübertrager im Speicher zur Entladung zugeführt.

Abbildung 60: Beispiel eines gefertigten Versuchsspeichers

In Abbildung 61 ist exemplarisch ein Versuchsspeicher während des Einbaus in den Prüfstand abgebildet. Der Versuchsspeicher wurde mittels der Luftzu- und -ableitung in einem Aluminiumbehälter fixiert. Der Aluminiumbehälter wurde anschließend mit einem Granulat aus mikroporösem Dämmmaterial aufgefüllt. Hierdurch wurde die Wärmedämmung realisiert. Zum Abschluss wurde der Aluminiumbehälter mit einem Deckel verschlossen.

Abbildung 61: Beispiels eines im Prüfstand eingebauten Versuchsspeichers

Die Analyse des Erstarrungsverhaltens und damit des Wärmekontakts wurde mit Hilfe von CT-Analysen untersucht. Die Versuchsspeicher wurden hierfür nach Versuchsdurchführung aus dem Prüfstand ausgebaut. Mittels einer CT-Anlage wurden anschließend schichtweise Bilder vom Speicherquerschnitt über die vollständige Speicherlänge hinweg erstellt. Die Querschnittsbilder wurden anschließend hinsichtlich der Kristallisationsrichtung, der Ausbildung von Materialdefekten sowie im Speziellen der Ausbildung von Materialdefekten an den Grenzflächen zu Wärmeein- und austragssystem analysiert und ausgewertet. Abbildung 62 beispielhaft eine CT-Aufnahme eines Versuchsspeichers.

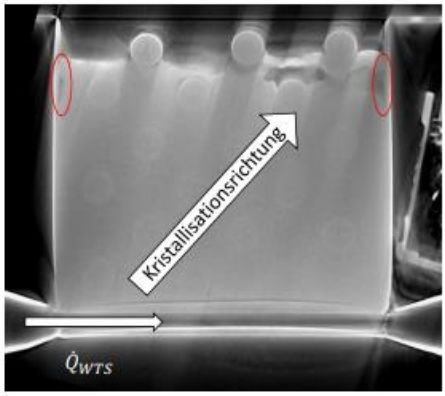


Abbildung 62: Beispielhaftes CT-Bild zur Untersuchung der Versuchsspeicher

Wesentliche Ergebnisse

Die Wesentlichen Erkenntnisse aus der experimentellen Untersuchung sowie weiterer im Rahmen der Planung der Untersuchungen erlangten Erkenntnisse im Hinblick auf den konzeptionellen Aufbau Thermischer Hochleistungsspeicher werden im Folgenden stichpunktartig zusammengefasst:

- Hinsichtlich möglichst niedriger Kosten und einer guten Handhabbarkeit sollten möglichst große, dafür wenige Heizpatronen zur Realisierung der notwendigen Aufheizleistungen verwendet werden; bei größeren Heizpatronen sind die spezifischen Kosten je kW Leistung deutlich geringer
- Hinsichtlich möglichst hoher Energiedichten sollten möglichst kleine, dafür eine Vielzahl an Heizpatronen verwendet werden; kleinere Heizpatronen zeichnen sich im Vergleich zu größeren Heizpatronen durch hohe volumetrische Leistungsdichten aus
- Die Ausrichtung der Heizpatronen relativ zur Kristallisationsrichtung beeinflusst maßgeblich die Defekthäufigkeit, Defektverteilung sowie die Defektvorhersagbarkeit
- Der Wärmeeintrag durch die Heizungen sollte zur Vermeidung von Temperaturspitzen im Speicher möglichst homogen ins Speichermaterial erfolgen
- An Heizpatronen in der Nähe von Oberflächen ist mit einem erhöhtem Defektaufkommen zu rechnen; eine Anbringung der Heizpatronen in der Nähe des Wärmeaustragssystems ist zu bevorzugen
- Die Oberflächenqualität des Edelstahlmantels ist bei direktem Einbau in den Speicher zu vernachlässigen; zu Gunsten einer günstigeren Fertigung kann auf geringe Oberflächenrauhigkeiten verzichtet werden
- Die Wärmestromdichte bei der Entladung hat maßgeblichen Einfluss auf die sich ausbildende Kristallstruktur und damit auf die Homogenität des Gefüges
- Die Solidifikationsgeschwindigkeit sollte möglichst konstant gehalten werden
- Die Durchströmungsrichtung, d.h. Entladerichtung hat maßgeblichen Einfluss auf die Kristallisationsrichtung
- Die Kristallisationsrichtung sollte so gewählt werden, dass diese durch die Schwerkraft positiv unterstützt wird
- Volllastzustände sind gegenüber Teillastzuständen bei der Entladung zu bevorzugen

Die genannten Erkenntnisse dienen als Grundlage für die im weiteren Verlauf des Projektes stattfindende Entwicklung eines optimalen Speicherkonzeptes für die Anwendung im Bus.

3 Literaturverzeichnis

[1] Knote, *Ansätze zur Standardisierung und Zielkosten für Elektrobusse,* Dresden: Fraunhofer IVI, 2017.

[2] R. Beekman und R. van den Hoed, „Operational demands as determining factor for electric bus charging infrastructure," in *Hybrid and Electric Vehicle Conerence*, London, 2016.

[3] J. Schmitz, *Kennzahlen des Busbetriebes,* Köln: Anfrage an VDV, 2018.

[4] J. Schmitz, *Elektrobusse Technik - Wirtschaftlichkeit - Ausblick,* Köln: VDV, 2016.

[5] UITP International Congress, „Standardised ON-Road Test Cycles - SORT.A project of the UITP Bus Committe in collaboration with manufacturers," 54th UITP International Congress, 2001. [Online]. Available: http://ec.europa.eu/environment/archives/clean%7B/_%7Dbus/slides/etienne%7B/_%7Dsort.pdf.

[6] Google, „Flughafen Stuttgart - Sattelitenkarte," [Online]. Available: https://www.google.de/maps/place/Flughafen+Stuttgart/@48.688194,9.2002841,3566m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x4799c28ca5ce6fb5:0x51e8e178f7793d93!8m2!3d48.6876365!4d9.205576. [Zugriff am 25 Juni 2019].

[7] Siemens AG, „Ladetechnik für eBusse," [Online]. Available: https://new.siemens.com/global/de/produkte/mobilitaet/strassenverkehr/elektromobilitaet/ebus-ladeinfrastruktur.html. [Zugriff am 25 Juni 2019].

[8] Valeo, *Werkstatt-Handbuch Thermo AC/DC,* Gilching, 2018.

[9] VDV, *VDV-Schrift 236 - Klimatisierung von Linienbussen der Zulassungsklassen I und II,* Köln: Verband Deutscher Verkehrsunternehmen, 2018.

[10] Economic Commission for Europe (ECE), *Proposal for the 02 serie of amendments to Regulation No. 100 (Battery electric vehicle safety),* 2012.

[11] ISO 6469, *Electrically propelled road vehicles -- Safety specifications,* 2018.

[12] DIN EN ISO 13732-1, *Ergonomie der thermischen Umgebung - Teil 1: Heiße Oberflächen.*

[13] ÖNORM EN 563.

[14] *Maschinen-Sicherheitsverordnung MSV BGBI. Nr. 306/94.*

[15] DIN EN 14025, *Tanks für die Beförderung gefährlicher Güter - Metallische Drucktanks - Auslegung und Bau.*

[16] DIN EN 12285-1:2003, *Werksgefestigte Tanks aus Stahl.*

[17] DIN EN 12972, *Tanks für die Beförderung gefährlicher Güter - Prüfung, Inspektion und Kennzeichnung von Metalltanks.*

[18] RID/ADR 6.8.2, *Werkstoffe des Tankkörpers.*

[19] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur - Referat G16 - Frau Schwan (Referatsleitung), *Beförderung gefährlicher Güter, E-Mail Korrespondenz,* Berlin: BMVI, 2019.

[20] GBK Ingelheim, „Deutschland - ADR Änderungen 2019," Juli 2019. [Online]. Available: https://www.gbk-ingelheim.de/newsletter/download/07-18/ADR-%C3%84nderungen%202019.pdf. [Zugriff am 6 Juni 2019].

[21] DIN VDE 0100, *Errichten elektrischer Anlagen mit Nennspannung bis 1000 V,* VDE Verlag.

[22] UN-ECE R100, *Battery electric vehicle safety,* ECE/TRANS/WP.29, 2010.

[23] W. Hofheinz, D. Haub und M. Zeyen, VDE-Schriftenreihe, Bd. 174, Berlin: VDE Verlag GmbH, 2019.

[24] IBW Dr. Irretier GmbH, *Heizen und Schmelzen mit elektrischen Widerstandsheizelementen,* Klewe, 2015.

[25] Marathon Heater PVT.LTD, „Cartridge Heater," [Online]. Available: http://marathonheater.in/product/component-heater/cartridge-heater. [Zugriff am 27 Juni 2019].

[26] A. Bührig-Polaczek, *Handbuch Urformen,* DOI: 10.3139/9783446434066, 2013.

[27] BDG, *Volumendefizite von Gussstücken - VDG-Merkblatt, BDG-Richtlinie,* www.bdguss.de, 2010.

[28] S. Franke, *Taschenbuch der Giesserei-Praxis,* Schiel & Schön, 2018.

[29] S. Hasse, *Giesserei-Lexikon,* www.giessereilexikon.com/giessereilexikon, 2018.

[30] A. Reis, *Modeling of shrinkage defects during solidification of long an short freezing materials,* Journal of Materials Processing Technology 202.1-3, S. 428-434, 2008.

[31] R. Atwood und P. Lee, *Simulation of the three-dimensional morphology of solidification porosity in an aluminium-silicon alloy,* Acta Materialia 51.18., 2003.

Zwischenbericht Projekt „THS-Bus“

Verantwortlich:

Werner Kraft M.Sc.
Institut für Fahrzeugkonzepte
Pfaffenwaldring 38-40
70569 Stuttgart

Beteiligte:
Veronika Stahl M.Sc.
Peter Vetter M.Sc.

Datum: 30.06.2020

Inhalt

1 Einleitung 1
2 Aktueller Projektstand 1
2.1 Projektplan 1
2.2 Aktueller Stand der Arbeiten und Meilensteinerreichung 1
2.2.1 AP1 – Anforderungen und Randbedingungen 1
2.2.2 AP2 – Auslegungsmethodik und Auslegungswerkzeuge 1
2.2.3 AP3 – Physikalisch-Technische Grundlagen 2
2.2.4 AP4 – Adaption Speicherkonzept 2
2.2.5 AP5 – Funktionsmusterbau und Laboruntersuchung 2
3 Darstellung der Arbeitsinhalte 2
3.1 AP 0 – Projektmanagement und Reporting 2
3.1.1 Austausch mit assoziierten Projektpartnern 2
3.1.2 Veröffentlichungen und Außendarstellung 3
3.2 AP 2 – Auslegungsmethodik und Auslegungswerkzeuge 3
3.2.1 Gesamtübersicht Simulationsmodell 4
3.2.2 Bilanzierung 7
3.3 AP 3 – Physikalisch – Technische Grundlagen 8
3.3.1 AP 3.1 Materialtechnische Grundlagen 8
3.3.2 AP 3.2 Entwicklung Wärmeaustragssystem 15
3.3.3 AP3.3 – Entwicklung Wärmeeintragssystem 20
3.4 AP 4 – Adaption Speicherkonzept 27
3.4.1 Abgeleitete Speicherkonzepte 27
3.4.2 Leitkonzept 30
Anhang 32

1 Einleitung

Der vorliegende Zwischenbericht soll den aktuellen Projektstand sowie die seit des letzten Zwischenberichts (30.06.2019) durchgeführten Arbeiten im Projekt „THS-Bus“ erläutern und darstellen. Neben den Ergebnissen der bisherigen Arbeiten werden auch die Arbeitsschritte beleuchtet, die zur Erreichung der jeweiligen Ergebnisse durchgeführt wurden. Der vorliegende Arbeitsbericht soll dabei einen zusammenfassenden Charakter aufweisen. Es wird daher darauf hingewiesen, dass die Darstellungen im Rahmen des vorliegenden Zwischenberichtes nicht den tatsächlich vorliegenden Tiefgang der durchgeführten Arbeiten wiedergeben können. Eine Einsicht in weitere Dokumentationen zu den jeweiligen Arbeitsschritten ist jedoch selbstverständlich möglich.

2 Aktueller Projektstand

2.1 Projektplan

Der Projektplan zum Projekt „THS-Bus“ ist in Abbildung 1 dargestellt. Gemäß dem Projektplan sind zum Zeitpunkt der Erstellung des vorliegenden Zwischenberichts damit etwa zwei Drittel der gesamten Projektdauer abgeschlossen. Arbeiten wurden gemäß Projektplan bisher in den Arbeitspaketen AP1, AP2, AP3, AP4 und AP5 durchgeführt. Weiterhin sind die Meilensteine MS1, MS2 und MS4 gemäß dem Projektplan bereits zu erreichen. Eine ausführliche Beschreibung zum aktuellen Stand der Arbeitspakete sowie zur Meilenstein- und Zielerreichung erfolgt im nachfolgenden Kapitel.

			2018				2019				2020				2021			
AP/MS	AP-Titel/MS-Titel	Verantwortlicher	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
AP 0	Projektmanagement und Reporting	FK-AEW																
AP 1	Anforderungen und Randbedingungen	FK-AEW Beteiligungen: Konvekta, Flughafen																
AP 1.1	Energetische, topologische und einsatzspezifische Anforderungen																	
AP 1.2	Betriebs- und sicherheitstechnische Anforderungen und Randbedingungen																	
MS 1	*Anforderungen und Randbedingungen definiert*					X												
AP 2	Auslegungsmethodik und Auslegungswerkzeuge	FK-AEW Beteiligungen: Konvekta																
AP 2.1	Auslegungsmethodik																	
AP 2.2	Auslegungswerkzeuge																	
MS 2	*Speicherkonzept ausgelegt*										X							
MS 3	*Auslegungswerkzeuge validiert*															X		
AP 3	Physikalische - Technische Grundlagen	FK-AEW																
AP 3.1	Materialtechnische Grundlagen potentieller Speichermaterialien und Einhausungsmaterialien																	
AP 3.2	Entwicklung anwendungsgerechtes Wärmeaustragssystem																	
AP 3.3	Entwicklung anwendungsgerechtes Wärmeeintragssystem																	
AP 4	Adaption Speicherkonzept	FK-AEW Beteiligungen: Konvekta																
AP 4.1	Kritische Designaspekte																	
AP 4.2	Konezptentwicklung																	
MS 4	*Speicherkonzept entwickelt*									X								
AP 5	Funktionsmusterbau und Laboruntersuchung	FK-AEW																
AP 5.1	Aufbau eines prototypischen Wärmespeichersystems																	
AP 5.2	Experimentelle Untersuchung des aufgebauten Wärmespeichersystems																	
MS 5	*Prototypisches Wärmespeichersystem aufgebaut*													X				
AP 6	Bewertung und Ausblick	FK-AEW Beteiligung: Konvekta, Flughafen																
AP 6.1	Bewertung des Wärmespeichersystems im Fahrzeugsystem																	
AP 6.2	Ausblick zu Potentialen thermischer Energiespeicher																	

Abbildung 1: Projektplan zum Projekt „THS-Bus“

2.2 Aktueller Stand der Arbeiten und Meilensteinerreichung

2.2.1 AP1 – Anforderungen und Randbedingungen

Dieses Arbeitspaket war bereits zum vorherigen Zwischenbericht vollständig abgeschlossen.

2.2.2 AP2 – Auslegungsmethodik und Auslegungswerkzeuge

Gemäß dem Projektplan sollen die Arbeitspakete AP2.1 und AP2.2 zum aktuellen Zeitpunkt bereits abgeschlossen sein und der Meilenstein MS2 bereits vorliegen. Dies konnte bisher noch nicht erreicht werden. Ursächlich hierfür sind der deutlich erhöhte Aufwand in Arbeitspaket 1, wie bereit im vorherigen Zwischenbericht beschrieben, sowie das Ausscheiden eines Mitarbeiters im September 2019, der erst kürzlich ersetzt werden konnte. Die Arbeiten im Arbeitspaket 2 konnten

daher erst zum Q1/2020 begonnen werden. Grundsätzlich ist jedoch weiterhin von einem Erreichen der Ziele von Arbeitspaket 2 innerhalb der regulären Projektdauer, bis zum Q2/2021 auszugehen.

Da vom Erreichen des Meilensteins 2 gemäß Projektplanung der Aufbau des Funktionsmusters in AP5 abhängt und dieser aktuell noch nicht erreicht werden konnte, musste bezüglich des weiteren Projektfortlaufs eine Anpassung erfolgen. So erfolgt der Aufbau des Funktionsmusters nicht auf Basis der Auslegung des Speichersystems aus AP3 sondern auf Basis eines skalierbaren Speicherkonzepts, welches als Leitkonzept für alle im Projekt durchzuführenden experimentellen Untersuchungen dient. Die Durchführbarkeit von Arbeitspaket 5 kann hierdurch sichergestellt werden. Eine Erläuterung des definierten Leitkonzepts erfolgt in Kapitel 3.4.2.

2.2.3 AP3 – Physikalisch-Technische Grundlagen

Die Arbeiten im Arbeitspaket 3 sind entgegen dem Projektplan noch nicht vollständig abgeschlossen. Im Bereich der materialtechnischen Untersuchungen erweisen sich grundlegende Untersuchungen als deutlich aufwändiger im Gegensatz zur ursprünglichen Planung, da eine gründliche Entwicklung eines zu testenden Einhausungskonzepts möglichen Tests vorangehen muss. Im Rahmen des Projekts wird dies daher intensiv betrachtet. Eine Durchführung einer anwendungsnahen Zyklierung einer Kombination aus Speicher- und Einhausungsmaterial ist bis zum Abschluss des Projektes nach wie vor weiterhin geplant. Im Bereich des Wärmeeintragssystems ist die Verzögerung erneut mit dem deutlichen Mehraufwand im Arbeitspaket 1 zu erläutern, sowie zusätzlich durch die temporäre Schließung des Labors aufgrund der Corona-bedingten Einschränkungen. Die noch ausstehende experimentelle Untersuchung verschiedener Systeme zum Wärmeeintrag ist nun im Laufe von Q3/2020 und Q4/2020 geplant. Die Arbeiten zum Wärmeaustragssystem konnten bereits abgeschlossen werden.

2.2.4 AP4 – Adaption Speicherkonzept

Die Arbeiten in diesem Arbeitspaket konnten planmäßig zum Q4/2019 abgeschlossen werden. Zum Stand vom letzten Zwischenbericht stand noch eine finale Ableitung entsprechender Speicherkonzepte aus. Diese werden im Kapitel 3.4.1 dargestellt. Weiterhin wurde außerplanmäßig ein Leitzkonzept definiert, welches als Grundlage für alle weiteren experimentellen Untersuchungen dient. Eine Darstellung dessen erfolgt in Kapitel 3.4.2.

2.2.5 AP5 – Funktionsmusterbau und Laboruntersuchung

Im Hinblick auf den Bau und die experimentelle Untersuchung eines Funktionsmusters im Labor sind gemäß Projektplan bereits einige Arbeitsschritte erfolgt. So ist die Auskonstruktion einer Einhausung gemäß dem definierten Leitkonzept bereits in den finalen Zügen. Weiterhin ist parallel zum Projekt eine Prüfstandsinfrastruktur im Aufbau, die die Untersuchung des Funktionsmusters im Projekt sowie die Untersuchung aller künftigen Funktionsmuster ermöglichen soll. Die Fertigstellung der Prüfstandsinfrastruktur erfolgt voraussichtlich im Q4/2020, sodass anschließend eine Untersuchung des Funktionsmusters im Projekt erfolgen kann.

3 Darstellung der Arbeitsinhalte

3.1 AP 0 – Projektmanagement und Reporting

3.1.1 Austausch mit assoziierten Projektpartnern

Der Austausch mit den assoziierten Projektpartner hat im vergangen Jahr mittels regelmäßig stattfindenden Telefonkonferenzen stattgefunden. Der regelmäßige Turnus beträgt dabei 4 Wochen. Inhaltlich werden hierbei stets die Arbeiten der vergangenen 4 Wochen aufbereitet, dargestellt sowie anschließend mit den assoziierten Partnern diskutiert. Aufgrund der im vergangenen Jahr bearbeiteten Arbeitsinhalte die sich mit der Weiterentwicklung des

Speichersystems beschäftigt haben, erfolgte primär eine Teilnahme von Konvekta an den Telefonkonferenzen. Der Stuttgarter Flughafen wird nach Vereinbarung wieder an den Telefonkonferenzen teilnehmen sobald erneut Themen besprochen werden, die mehr im Bezug zur Anwendung am Flughafen stehen.

3.1.2 Veröffentlichungen und Außendarstellung

Im Verlauf des bisherigen Projekts kam es bereits zu zwei Veröffentlichungen. Im Rahmen des „Seminar Erneuerbare Energien" wurden am 26.06.2019 an der HS Karlsruhe erste Ergebnisse zu den in AP1 definierten Randbedingungen veröffentlicht. Die Folien zur Veröffentlichung finden sich im Anhang des Berichts. Ein Link zur Veranstaltung findet sich hier:

https://www.hs-karlsruhe.de/erneuerbare-energien/

Eine weitere Veröffentlichung war im Zuge der internationalen Konferenz „TRA 2020" im April 2020 in Helsinki geplant. Aufgrund der Corona-Pandemie erfolge jedoch eine Absage der Konferenz. Das Abstract bzw. Short-Paper wurde trotz der Absage veröffentlicht. Inhalte dessen sind die allgemeine Vorstellung der Technologie „Thermische Hochleistungsspeicher", eine Beschreibung des Szenarios am Flughafen sowie eine grobe Auslegung des Speichersystems für dieses Szenario sowie eine Darstellung der Potentiale der Technologie. Das Short Paper findet sich ebenfalls im Anhang, ein Link zur Homepage der Veranstaltung findet sich hier:

https://traconference.eu/

Weiterhin wurde eine eigene Homepage zum Projekt erstellt. Auf der Homepage sind allgemeine Informationen zum Projekt, zur Technologie „Thermische Hochleistungsspeicher" sowie zu aktuellen Ergebnissen aus dem Projekt zu finden. Nachfolgend findet sich ein Link zur Homepage.

https://verkehrsforschung.dlr.de/de/projekte/ths-bus-thermische-hochleistungsspeicher-fuer-elektrobusse

3.2 AP 2 – Auslegungsmethodik und Auslegungswerkzeuge

Innerhalb von AP2 erfolgt die Erarbeitung einer Auslegungsmethodik und der zugehörigen Auslegungswerkzeuge. Grundidee hierbei ist es ein Auslegungstool zu konzipieren, welches die vollumfängliche Abschätzung der Potentiale Thermischer Hochleistungsspeicher für nahezu beliebige Einsatzszenarien (Gelegenheitsladen, Schnellladen, etc.) für unterschiedlichste Fahrzeugarten (Kategorie Bus – Flughafenbus, Stadtbus, etc.) zulässt. Unter Potentiale wird dabei der Vergleich relevanter technischer, ökonomischer und ökologischer Kenngrößen eines Fahrzeugs, welches mit einem Thermischen Hochleistungsspeicher beheizt wird mit einem Fahrzeug, welches mit einer Heizkomponente nach dem Stand der Technik (Kraftstoffheizer, elektrischer Widerstandsheizer, Wärmepumpe) beheizt wird, verstanden. Neben dem eigentlichen Heizsystem steht hierfür außerdem das Batteriesystem im Fokus der Betrachtungen. Grund hierfür ist, dass ein Thermischer Hochleistungsspeicher als eine Möglichkeit der Energiespeicherung i.d.R. der konventionellen Art der Energiespeicherung in einem Batteriesystem gegenüberzustellen ist. Auch ist das Batteriesystem das zentrale Energiespeicherelement für elektrisch betriebene Heizsysteme (elektrischer Heizer u. Wärmepumpe). Zuletzt besteht ein indirekter Einfluss auf die Batteriekapazität durch den massenabhängigen Traktionsenergiebedarf, welcher u.a. auch von der Masse des Heizsystems beeinflusst wird. Im Rahmen einer möglichst gesamtheitlichen Betrachtungsweise ist daher eine Mitberücksichtigung der Batterie zwingend erforderlich.
In den folgenden Unterkapiteln erfolgt zunächst eine Übersicht über den Gesamtaufbau der Auslegungswerkzeuge, deren Verknüpfung sowie eine zugehörige Erläuterung der angedachten Auslegungsmethodik. Anschließend erfolgt eine detailliertere Erläuterung des als „Bilanzierung"

bezeichneten Bausteins. Hierdurch soll verdeutlicht werden, welche Kenngrößen zur Abschätzung der Potentiale betrachtet werden.

3.2.1 Gesamtübersicht Simulationsmodell

Eine Übersicht über die rudimentären Bestandteile des Auslegungswerkzeugs ist in Abbildung 2 dargestellt. Im Wesentlichen besteht dieses aus den Kernbestandteilen „Randbedingungen", „Fahrzeugsystem", „Dimensionierung Heizsystem und Batteriesystem", „Transiente Simulation Betriebsverhalten" und „Bilanzierung". Aus Bilanzierung und Dimensionierung gehen abschließend die Potentiale hervor.

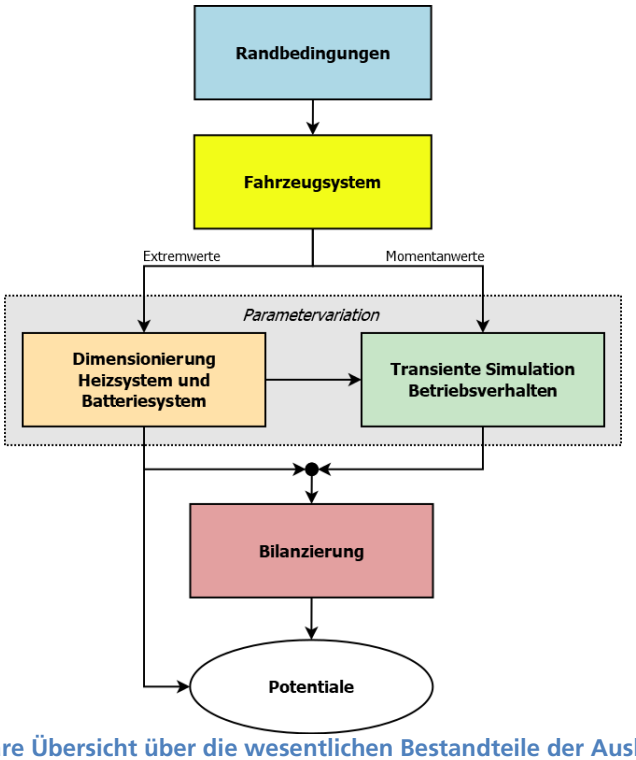


Abbildung 2: Rudimentäre Übersicht über die wesentlichen Bestandteile der Auslegungswerkzeuge und Verknüpfung dieser

Grundidee ist es, zunächst die relevanten Randbedingungen zu definieren. Diese dienen anschließend als Input für das Fahrzeugsystem. Im Fahrzeugsystem sollen für die Dimensionierung und Transiente Simulation des Betriebsverhaltens von Heiz- und Batteriesyteme relevante Parameter, wie z.B. der Heizenergiebedarf oder der Traktionsenergiebedarf, bestimmt werden. Die Ergebnisse aus Dimensionierung und transienter Simulation bilden die Grundlage für die Bilanzierung. Die Bilanzierung sowie die Ergebnisse der Dimensionierung münden letztendlich in den Potentialen. In der nachfolgenden Abbildung 3 erfolgte eine detaillierte Darstellung des eben rudimentär beschriebenen Simulationsmodells sowie der Verknüpfung der einzelnen Bausteine.

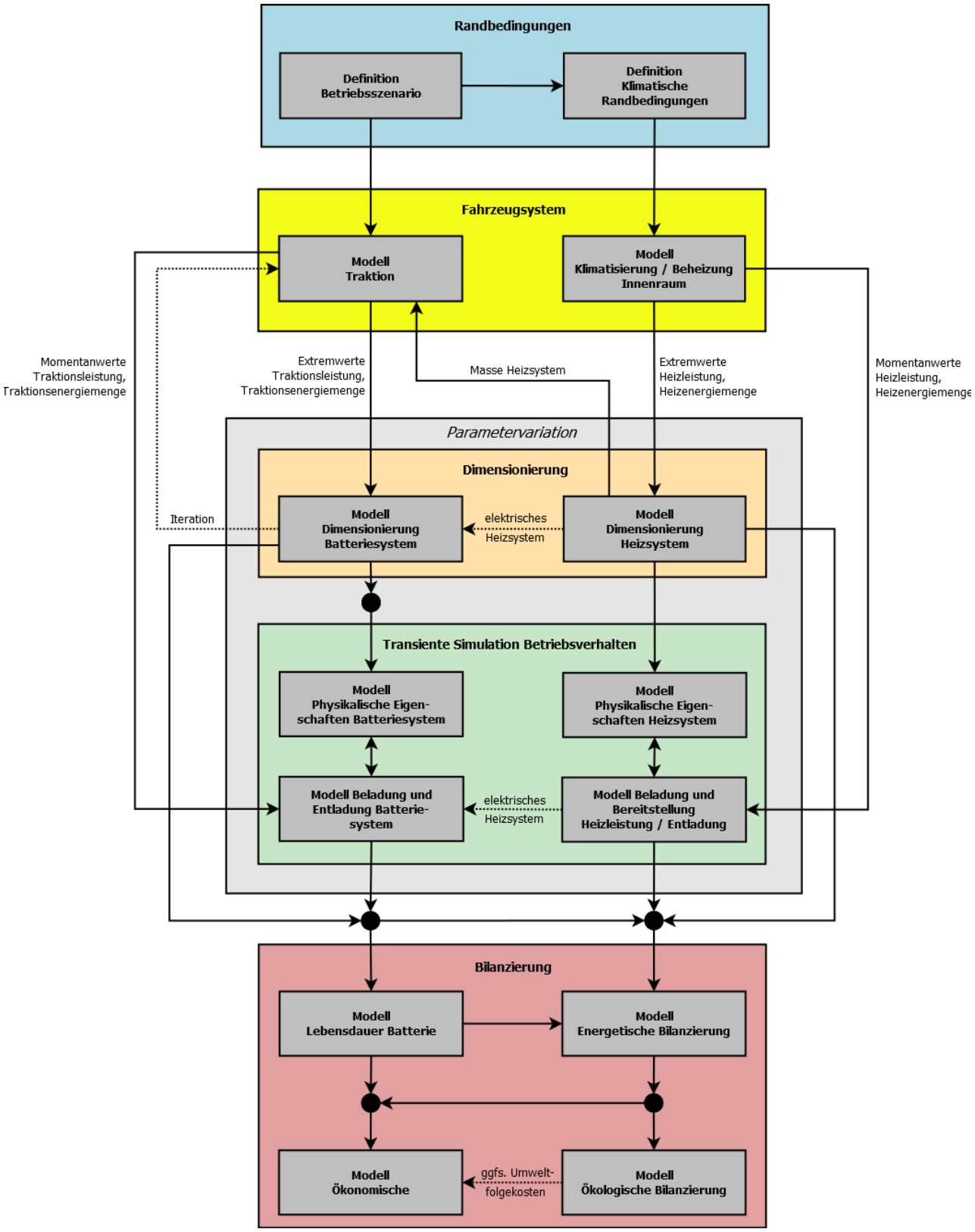


Abbildung 3: Detailübersicht über die wesentlichen Bestandteile der Auslegungswerkzeuge und Verknüpfung dieser

Randbedingungen
Wesentliche Randbedingungen, die es zunächst zu definieren gilt, sind die für das Betriebsszenario relevanten sowie die klimatischen Randbedingungen. Für das Betriebsszenario relevante Randbedingungen sind beispielsweise die Uhrzeit des Betriebsbeginns, die Fahrzeiten und Standzeiten mit Möglichkeit zur Beladung. Grundidee ist es, auf Basis dieser Betriebsdaten das Betriebsszenario über eine komplettes Jahr hinweg ableiten bzw. definieren zu können. Die Definition der klimatischen Randbedingunen hat in erster Linie das Ziel, den Jahresverlauf der Umgebungstemperatur zu definieren. Auch soll idealerweise das vorher definierten Betriebsszenario mit den entsprechenden klimatischen Randbedingungen „gematcht" werden, sodass für jeden Fahrbetrieb die Umgebungstemperatur bekannt ist. Je nach Modell zur Berechnung der notwendigen Heizleistung („Modell Klimatisierung / Beheizung Innenraum") könnten grundsätzlich auch noch weitere Randbedingungen zu den Klimatischen Randbedingungen, wie z.B. die Solarstrahlung an dieser Stelle definiert werden.

Fahrzeugsystem
Nach der Definition der Randbedingungen erfolgt die Modellerierung der relevanten Komponenten des Fahrzeugsystems. Diese sind zum einen der Traktionsantrieb und zum anderen die Klimatisierung bzw. Beheizung des Innenraumes. Der Traktionsantrieb ist von Interesse aufgrund des Einflusses der gesamten Fahrzeugmasse auf den Traktionsenergieverbrauch. Da unterschiedliche Heizsysteme auch unterschiedlich große Massen aufweisen, gilt es dies zu betrachten. Im Modell „Traktion" erfolgt daher eine Modellierung der Traktionsleistung des Fahrzeugs. Die berechnete Traktionsleistung wird im weiteren Modell als Eingangsgröße zur Dimensionierung des Batteriesystems sowie zur Be- und Entladung des Batteriesystems genutzt. Zur Dimensionierung des Batteriesystems werden Extremwerte verwendet, d.h. beispielsweise die maximal während einer Fahrtperiode auftretenden Traktionsenergieverbräuche. Für die spätere Be- bzw. Entladung der Batterie innerhalb der transienten Simulation sind hingegen die Momentanwerte der Traktionsleistung bzw. des Traktionsenergieverbrauchs für die nächste Fahrperiode von Relevanz.
Im Modell „Klimatisierung / Beheizung Innenraum" erfolgt die Berechnung der zur Klimatisierung bzw. Beheizung des Innenraums notwendigen Heizleistung (ggfs. auch Kühlleistung). Hierzu werden die vorab definierten klimatischen Randbedingungen (in denen auch bereits Informationen zum Betriebsszenario mit verarbeitet wurden) verwendet. Ähnlich wie vorab für das Modell „Traktion" beschrieben, werden die berechneten Heizleistungen bzw. Heizenergieverbräuche zum einen für die Dimensionierung des Heizsystems und zum anderen zur Be- bzw. Entladung des Heizsystems während der transienten Simulation des Betriebsverhaltens verwendet. Auch hier sind erneut Extremwerte für die Dimensionierung und Momentanwerte für die transiente Simulation von Interesse.

Dimensionierung
Innerhalb der Dimensionierung erfolgt die Festlegung der Dimensionen von Batteriesystem und Heizsystem. Typische Kenngrößen die hierbei festgelegt werden sind z.B. die Speicherkapazität oder die Nennleistung des jeweiligen Systems. Für den Thermischen Hochleistungsspeicher erfolgt hier außerdem eine detailliertere Festlegung beispielsweise der Modularisierung oder relevanter Abmessungen. Grundlage für die Dimensionierung sind die berechneten Extremwerte von Antriebsleistung und Heizenergiebedarf aus den zuvor beschriebenen Modellen des Fahrzeugsystems. Sofern es sich um ein elektrisches Heizsystem handelt welches das Batteriesystem als Energiespeicher nutzt, werden Informationen aus der Dimensionierung des Heizsystems auch für die Dimensionierung des Batteriesystems benötigt. Aufgrund der vorher beschriebenen Massenabhängigkeit des Traktionsenergiebedarfs ist evtl. eine Iterationsschleife bei der Bestimmung der Batteriekapazität notwendig.

Transiente Simulation Betriebsverhalten
Die Transiente Simulation bildet den „Kern" des gesamten Simulationswerkzeugs bzw. der Auslegung. Hierin erfolgen die physikalische Abbildung und damit die Abbildung der Eigenschaften

des Heizsystems und des Batteriesystems, sowie deren Ansteuerung zur Be- und Entladung bzw. Bereitstellung von Heizleistung. Wie bisher erfolgt auch hier wiederum eine Differenzierung zwischen Batteriesystem und Heizsystem. Daten aus den vorher durchgeführten Dimensionierungen dienen als Eingangsgrößen sowohl für die physikalischen Eigenschaften der Systeme als auch für die Modelle zur Be- bzw. Entladung. Zwischen den physikalischen Modellen, die prinzipiell auch als physikalische Ersatzmodelle ausgeführt werden können und den Modellen zur Be- und Entladung, erfolgt ein kontinuierlicher Austausch von Informationen zu den aktuellen Betriebszuständen. Die Modelle zur Be- und Entladung sind ähnlich wie bei einer Regelung dabei als Regelkomponente zu betrachten. Die Sollwertvorgabe wird hierbei aus den Modellen zum Fahrzeugsystem, die physikalischen Modelle von Batteriesystem und Heizsystem geben entsprechende Istwerte relevanter Zustandsgrößen zurück. Sofern ein elektrisches Heizsystem verwendet wird, erfolgt zusätzlich ein Input vom Modell zur Be-/Entladung des Heizsystems zum Modell zur Be-/Entladung des Batteriesystems.

3.2.2 Bilanzierung

Innerhalb der Bilanzierung erfolgt die Ermittlung der essentiellen Kenngrößen zur Bestimmung der Eigenschaften der Fahrzeugsysteme, der betrachteten Heizsysteme und damit auch der Potentiale des Thermischen Hochleistungsspeichers als Heizsystem gegenüber den Heizsystemen nach dem Stand der Technik. Aufgrund einer gesamtheitlichen Betrachtung erfolgen dabei eine energetische Bilanzierung, eine ökonomische Bilanzierung, eine ökologische Bilanzierung sowie eine Betrachtung der Lebensdauer der Batterie. Eine Übersicht über die vier beschriebenen Bilanzierungen gibt das in Abbildung 4 dargestellte Schaubild.

Bei der energetischen Bilanzierung werden der Energieaufwand für die Herstellung, der Energieverbrauch für die Traktion sowie der Energieverbrauch für die Innenraumheizung bilanziert. Aufgrund der hohen Relevanz des Energieverbrauchs für die Herstellung von Batterien, wird neben dem Energieverbrauch für die Herstellung des Heizers außerdem der Energieverbrauch für die Herstellung der Batterie bilanziert. Die Bilanzierung des Traktionsenergiebedarfs ist von Relevanz, da die unterschiedlichen Heizsysteme unterschiedliche Gesamtmassen aufweisen. Hierdurch resultiert ein Einfluss auch auf die Traktion. Bezüglich der Innenraumheizung ist neben dem Gesamtenergieverbrauch außerdem die Effizienz bei der Bereitstellung der Heizenergie als markante Kenngröße von Interesse.

Die ökonomische Bilanzierung unterteilt sich in eine Bilanzierung der Investitionskosten, der Energiekosten und der Wartungskosten. Bei den Investitionskosten sind neben den Kosten für das eigentliche Heizsystem erneut die Batteriekosten von großem Interesse, da die Batterie einer der wesentlichen Kostentreiber im Gesamtfahrzeugsystem darstellt. Im Hinblick auf die Energiekosten sind wie bei der energetischen Bilanzierung neben den Energiekosten für die Innenraumheizung auch die Energiekosten für die Traktion mit zu berücksichtigen. Aufgrund der Notwendigkeit von Wartung an den Heizsystemen sind zuletzt außerdem die Wartungskosten von Relevanz.

Die ökologische Bilanzierung fokussiert den CO2-Fußabdruck der jeweiligen Heiztechnologien. Betrachtet werden hierbei die Ökobilanz bei der Herstellung des Systems sowie die Ökobilanz während des Betriebs und damit die des resultierenden Energieverbrauchs. Bei der Herstellung erfolgt erneut eine Berücksichtigung der Ökobilanz sowohl des eigentlichen Heizsystems als auch der Batterie. Beim Energieverbrauch wird wie zuvor die Ökobilanz des Energieverbrauchs für die Innenraumheizung als auch für die Traktion berücksichtigt.

Zuletzt erfolgt eine Lebensdauerbetrachtung der Batterie. Je nach verwendetem Heizsystem wird die Batterie unterschiedlich groß dimensioniert. Hieraus resultieren über ein komplettes Jahr unterschiedliche Entladetiefen, Entladeraten, Beladeraten, etc. Durch diese potentiell unterschiedliche Belastung der Batterie kann es zu deutlichen Unterschieden bei der Zyklenbeständigkeit bzw. Langzeitstabilität der Batterien kommen. Idealerweise kann hieraus ein State of Health (Abk. SOH) abgeleitet werden. Aufgrund der allerdings komplexen Zusammenhänge zwischen Betriebsweise der Batterie und der für die Langzeitstabilität ausschlaggebenden Zellchemie

sollen zudem Kenngrößen wie die Beladehäufigkeit, Be- und Entladetiefe sowie spezifische Be- und Entladeleistungen zur Bilanzierung betrachtet werden.

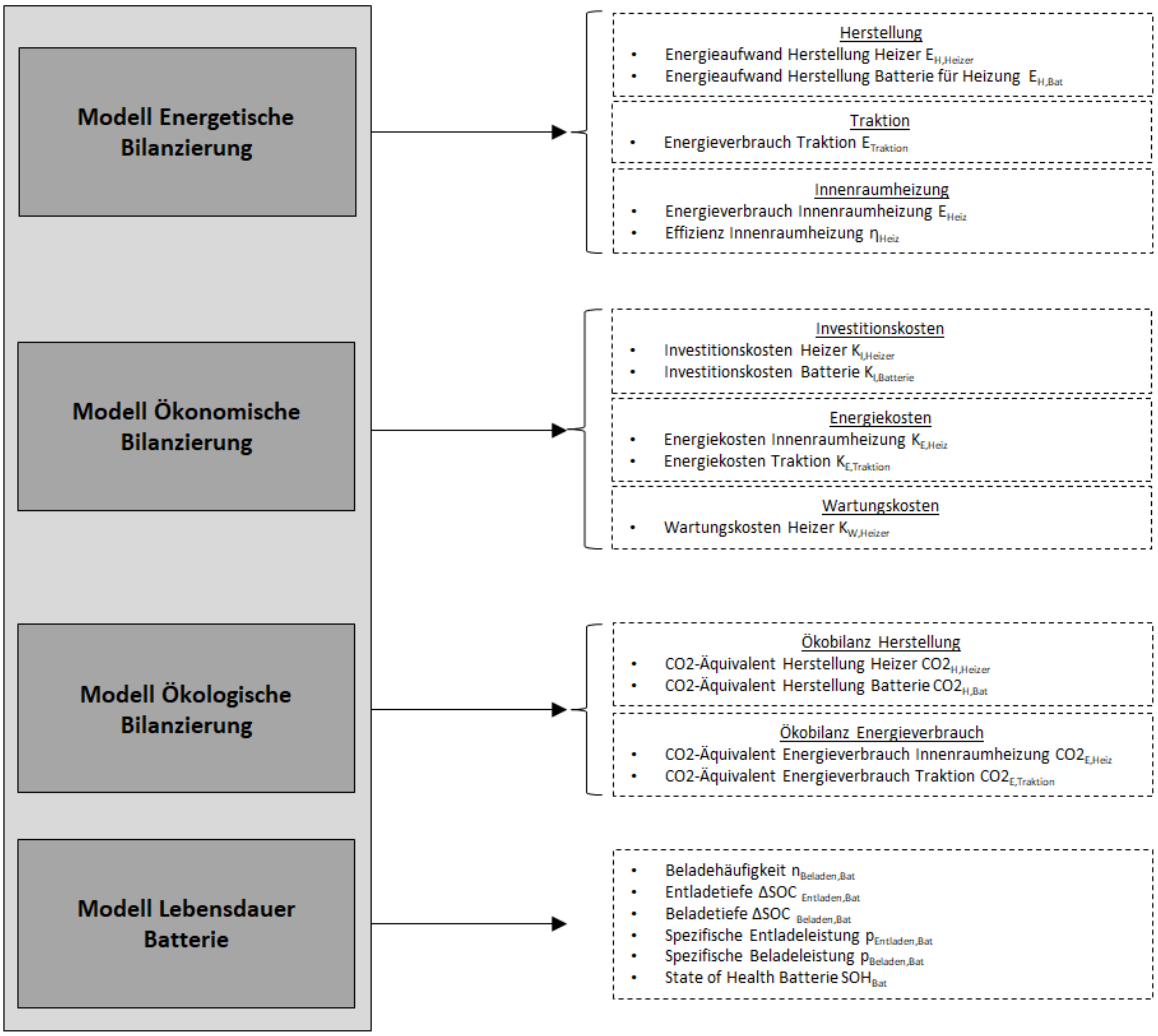


Abbildung 4: Darstellung der aus der Bilanzierung hervorgehenden Kenngrößen

3.3 AP 3 – Physikalisch – Technische Grundlagen

3.3.1 AP 3.1 Materialtechnische Grundlagen

Ziel dieses Arbeitspakets ist die Bewertung geeigneter Speicher- und Einhausungsmaterialien. Die Prozessschritte für das Erreichen dieses Ziels sind in Abbildung 5 dargestellt.

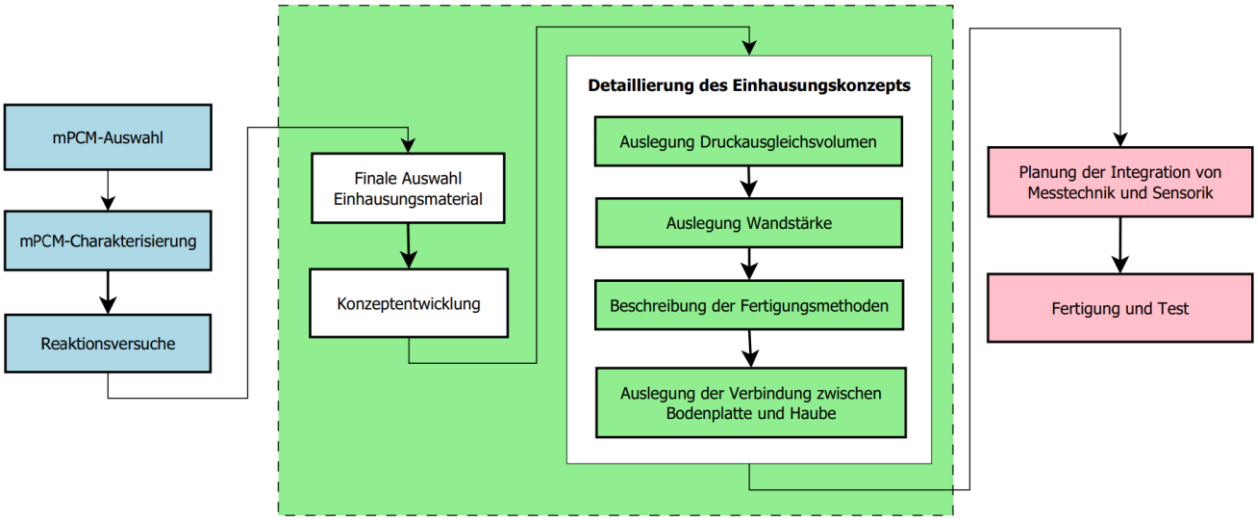


Abbildung 5: Prozess zur Bewertung geeigneter Speicher- und Einhausungsmaterialien. Blaue Prozessschritte: im ersten Zwischenbericht erläutert. Prozessschritte im grünen Feld: In diesem Zwischenbericht erläutert. Rote Prozessschritte: Noch ausstehend.

Im ersten Schritt wurde das mPCM $AlSi_{12}$ als am besten geeignet für eine Nutzung bis 600 °C bei möglichst hoher gravimetrischer Energiedichte identifiziert und im kleinen Maßstab thermophysikalisch charakterisiert. Reaktionsversuche im kleinen Maßstab mit potentiellen Einhausungsmaterialien fanden statt und ergaben, dass Aluminiumoxid, Graphit, Bornitrid und C/C-SiC keine Reaktion mit flüssigem $AlSi_{12}$ bei 650 °C nach 336 Stunden aufwiesen. Nach der Durchführung dieser prinzipiellen Materialauswahl folgt nun die Entwicklung eines fertigungsgerechten Einhausungskonzepts mit zunächst einem der identifizierten Einhausungsmaterialien. Das Einhausungskonzept wird dabei für das in Abschnitt 3.4.2 definierte Leitkonzept entwickelt.

3.3.1.1 Finale Auswahl des Einhausungsmaterials

Nachdem die Reaktivität mit flüssigem $AlSi_{12}$ für alle vorausgewählten Einhausungsmaterialien in gleichem Maße bewertet wurde, erfolgt die finale Auswahl eines Einhausungsmaterials für das erste Einhausungskonzept nach ökonomischen Kriterien. Der Grund hierfür ist, dass die Vorauswahl sich in dieser Hinsicht besonders stark voneinander unterscheidet und das kostengünstige Komponenten ein sehr starkes Kriterium für den Mehrwert des gesamten Konzepts für den Nutzer sein können. Andere Kriterien werden zunächst als nicht kritisch erachtet, da sie konzeptionell gelöst werden könnten. Beispielsweise können ungünstige mechanische Eigenschaften durch unterstützende Strukturen kompensiert werden oder ungünstige Ausdehnungskoeffizienten bei der Konzeption entsprechend berücksichtigt werden. In Tabelle 1 sind die Bauteilkosten in €/kg grob abgeschätzt und resultieren aus Vergleichen mit kommerziell erwerbbaren Standardtiegeln. Die Schätzungen gelten dabei grundsätzlich für Bauteile aus Vollmaterial. Nicht berücksichtigt sind für das Einhausungskonzept erforderliche Zusatzkomponenten oder andere Fertigungsmethoden. Beispielsweise wurden für Graphit Vergleiche mit Graphittiegeln durchgeführt und nicht berücksichtigt, dass für diese Anwendung eine gasdichte Umhüllung notwendig wäre, um eine nicht-oxidierende Atmosphäre sicherzustellen. Außerdem ist nicht sicher, ob eine Graphit-Einhausungskomponente mit denselben Fertigungsmethoden wie kommerzielle Standardtiegel hergestellt werden können oder ob starke Skalierungseffekte auftreten. Eine grobe Rangordnung wird jedoch ersichtlich. Die Auswahl für das erste Einhausungskonzept fällt auf Graphit.

Tabelle 1: Grob abgeschätzte spezifische Bauteilkosten für vorausgewählte Einhausungsmaterialien.

Einhausungsmaterial	Grob abgeschätzte Bauteilkosten / €/kg
Graphit	30
Aluminiumoxid	400
C/C-SiC	600
BN	1000

3.3.1.2 Konzeptentwicklung

Die Entwicklung des Graphit-Einhausungskonzepts erfolgt in Anlehnung an die Methodik der VDI-Richtlinie 2221. Wesentliche Anforderungen sind vorgegeben durch Materialeigenschaften selbst (z.B. Schutzgasatmosphäre und damit Gasdichtigkeit), durch das Leitkonzept (siehe Kapitel 0), durch Sicherheitsrichtlinien (z.B. Normen für Druckbehälter) und durch das Anwendungsszenario (z.B. Lebensdauer). Die Hauptfunktion der Einhausung ist, das mPCM für die erzielte Lebensdauer stabil einzuhausen. Teilfunktionen dabei sind, eine mögliche Reaktion mit der gasdichten Hülle zu vermeiden um die Speicherkapazität und strukturelle Integrität aufrecht zu halten, bei allen Betriebsmodi strukturell stabil zu sein und somit ungewollten Austritt von mPCM zu verhindern, die Oxidation durch Atmosphäre zu vermeiden, Bersten durch Überdruck zu vermeiden und eine geeignete gerichtete Erstarrung des mPCM beim Entladen zu unterstützen. Für alle Teilfunktionen wurden Lösungsprinzipien entwickelt und führten zu einem morphologischen Kasten. Die Kombination aus allen Lösungsprinzipien, die die Teilfunktionen am besten erfüllen, resultiert im finalen Graphit-Einhausungskonzept, das in Abbildung 6 dargestellt ist. Das Konzept sieht den Wärmeein- und austrag entsprechend des Leitkonzepts über die Bodenplatte vor (vgl. Leitkonzept aus Abschnitt 3.4.2). Dies unterstützt eine vorteilhafte Erstarrung des mPCM und vermeidet die Integration von funktionalen Komponenten direkt ins Speichermaterial. Die Schnittstelle zur funktionalen Bodenfläche könnte wechselbar ausgestaltet werden. Zusätzlich zur Bodenplatte besteht das Konzept aus einer Edelstahl-Haube, die die Gasdichtigkeit und somit Schutzgasatmosphäre sicherstellt sowie zur strukturellen Unterstützung genutzt werden kann. Die Reaktionsbarriere zum mPCM bildet ein Graphitliner, der in Abbildung 6 rechts dargestellt ist.

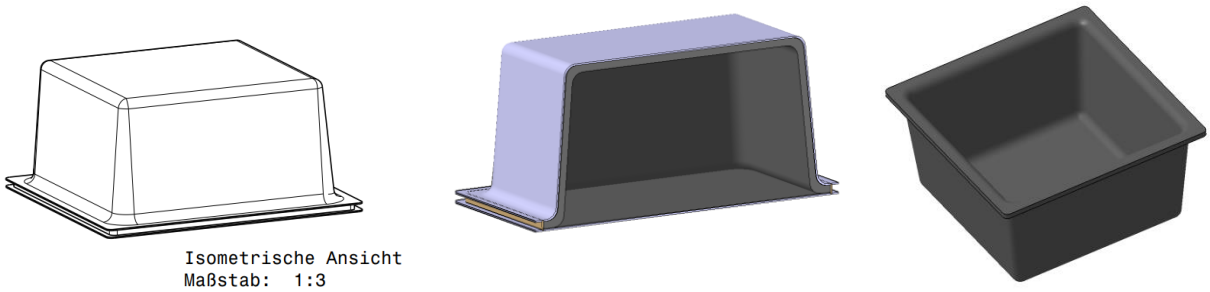


Abbildung 6: Graphit-Einhausungskonzept. Links: Isometrische Ansicht, Mitte: Schnitt durch die isometrische Ansicht, Rechts: Ansicht des Graphit-Liners.

3.3.1.3 Detaillierung des Einhausungskonzepts

Bevor es zur Fertigung der Einhausungskomponente kommen kann, ist eine fertigungsgerechte Konstruktion notwendig sowie eine Detaillierung bezüglich Auslegung des erforderlichen Druckausgleichsvolumens, der Wandstärken, der Fertigungsmethoden sowie der gasdichten Verbindung an der Schnittstelle zwischen Bodenplatte und Haube.

Auslegung des Druckausgleichsvolumens

Beim Beladen des Speichers kommt es zur thermischen Dehnung des mPCMs und der eventuell vorliegenden Gasphase. Die thermische Dehnung des Behälterinhalts ist größer als die thermische Dehnung des Behälters. Es muss ein ausreichend großes ausgleichendes Gasvolumen im Behälter vorgesehen werden um zu verhindern, dass der Behälterinnendruck übermäßig ansteigt. Dies würde einerseits die mechanischen Anforderungen an den Behälter erheblich vergrößern und wäre im Berstfall gefährlich. Um das benötigte Druckausgleichsvolumen zu identifizieren wird der maximale Behälterinnendruck p_2, der bei der maximalen Betriebstemperatur T_2 vorliegt, als Funktion des normierten Behältervolumens $V_{box,normiert}$ beschrieben. Das normierte Behältervolumen in % ist das Verhältnis aus dem gesamten Behälterinnenvolumen und dem mPCM-Volumen im Ausgangszustand bei der niedrigsten Temperatur T_1. Es ist zu beachten, dass für T_1 nicht die Temperatur gewählt wird, bis zu der der Speicher mit hoher Leistung entladen wird, sondern die niedrigste mögliche Temperatur, die der Speicher z.B. durch Selbstentladung erreichen kann. Dies entspricht im Normalfall der Umgebungstemperatur. Bei einem normierten Boxvolumen von 200 % ist also beispielsweise das Ausgangsvolumen des mPCMs genauso groß wie das Ausgangsvolumen des Gases bei der niedrigsten Temperatur. Die Funktion wird unter den Annahmen aufgestellt, dass das Gas sich wie ein ideales Gas verhält und dass die Gasmolekülzahl konstant bleibt. Der Faktor der thermischen Volumenausdehnung des mPCMs über den Temperaturbereich T_1 bis T_2 wird als α bezeichnet. Der Behälterinnendruck im kalten Zustand p_1 kann vorausgewählt werden. Somit ergibt sich für den maximalen Behälterinnendruck folgende Gleichung:

$$p_2\left(V_{box,normiert}\right) = \frac{p_1 \cdot T_2}{T_1} \cdot \frac{\left(V_{box,normiert} - 1\right)}{\left(V_{box,normiert} - \alpha\right)} \tag{1}$$

Für den Temperaturbereich $T_1 = 20$ °C bis $T_2 = 650$ °C für $AlSi_{12}$ gilt $\alpha = 1{,}08$. Für den Ausgangsdruck $p_1 = 1$ bar ergibt sich somit die Kurve in Abbildung 7. Der untere Grenzwert des Drucks wird bei einem unendlich großen Boxvolumen erreicht und beträgt für das Beispiel 3,15 bar. Dieser Wert wird nie unterschritten, da er aus der thermischen Dehnung des Gases resultiert. Der Wert kann beispielweise durch die Auswahl eines niedrigeren Ausgangsdrucks p_1 reduziert werden. Der Maximaldruck p_2 wird unendlich groß, wenn das normierte Boxvolumen dem Faktor der thermischen Ausdehnung des mPCM entspricht. Um einen Kompromiss aus möglichst kompakter Bauform sowie geringen mechanischen Belastungen zu realisieren, wird ein normiertes Boxvolumen von 1,2 gewählt sowie ein Ausgangsdruck im Grobvakuumbereich von 0,4 bar. Dies resultiert in einen maximalen Betriebsdruck von 2,38 bar.

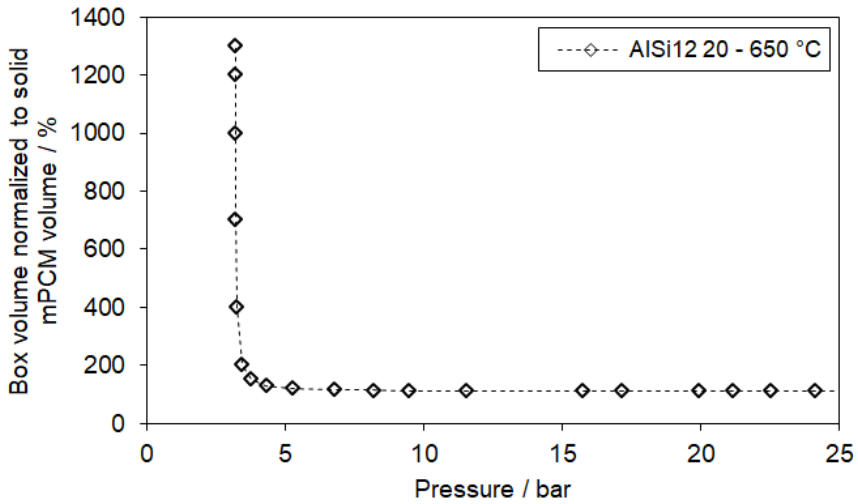


Abbildung 7: Maximaler Behälterinnendruck in Abhängigkeit vom normierten Boxvolumen in für AlSi12 von 20 bis 650 °C bei einem Ausgangsdruck von 1 bar.

Dem Leitkonzept liegt eine quaderförmige Geometrie zugrunde. Die wärmetauschende Fläche der Bodenplatte wird zunächst mit 180 x 180 mm festgelegt um eine definierte Schnittstelle zur unabhängigen Entwicklung der Subkomponenten zu haben (vgl. Leitkonzept, Abschnitt 3.4.2). In Bezug auf die reale Anwendung handelt es sich hier um eine skalierte Fläche um Voruntersuchungen im Labor durchführen zu können. Das Verhältnis aus Kantenlänge der quadratischen Grundfläche b und Höhe des Quaders h resultiert durch das Anwendungsszenario da es das Verhältnis aus der Fläche, die für Wärmeein- und austrag benötigt wird und der Speicherkapazität widerspiegelt. Für die Anwendung im Flughafen Vorfeldbus wird dieses Verhältnis je nach Betriebsszenario variieren. Das Verhältnis $b/h = 5$ gilt dabei als Mittelmaß, welches grundsätzlich für verschiedene Szenarien denkbar wäre. Diese Randbedingungen sind hinreichend um alle Abmessungen der Einhausung und des mPCMs zu definieren.

Auslegung der Wandstärke

Die Wandstärke der beiden Einhausungskomponenten Edelstahl-Haube und Graphit-Liner kann nun durch die Vorgabe des Behälterinnendruck- und Temperaturverlaufs ausgelegt werden. Die Wandstärke kann am einfachsten unter Annahme einer dünnen Wandstärke mit zweidimensionaler Krümmung abgeschätzt werden, da dann ein Membranspannungszustand vorliegt. Bei Abweichungen davon müssen zusätzlich noch Biegespannungen berücksichtigt werden. Die Wandstärke e hängt vom erlaubten Spannungszustand im Behältermaterial ab. Dieser hängt wiederum von der materialspezifischen Dehngrenze R ab. Für Keramiken gilt in der Regel, dass die Dehngrenze der Zugfestigkeit entspricht. Allerdings sind die Abschätzungen für Keramiken generell nicht zu verwenden, da Druckbehältermaterialien einerseits hohe Bruchdehnungen um die 30 % erfordern und Keramiken eine sehr niedrige Bruchdehnung um die 0,01 % aufweisen. Sie brechen spröde und verlieren beim Versagen sofort ihre Funktionalität. Außerdem haben mechanische Eigenschaften von Keramiken eine breite statistische Verteilung, da Defekte wie Poren und Einschlüsse Ursache für ein Versagen sein können. Keramiken sind daher generell nicht als Druckbehälterwerkstoff geeignet. Außerdem ist ein Liner aus Graphit nicht gasdicht, so dass eine drucktragende Ausführung des Graphitliners als nicht zielführend erachtet wird. Seine Wandstärke resultiert nur aus fertigungstechnischen Limitierungen. Für die Edelstahlhaube wird zunächst von einer Dehngrenze $R \approx 150$ MPa bei maximaler Betriebstemperatur ausgegangen. Daraus errechnet sich nach Gleichungen für einen ebenen runden Druckbehälter Boden mit Kehlnaht verschweißt eine Wandstärke von $e = 5$ mm. An dieser Stelle wird darauf hingewiesen, dass sich hierbei auf keinen Fall um eine Wandstärke der Hülle handelt, die eine spätere Anwendung gerecht wird. Vielmehr wurde diese so ausgelegt, dass eine Stabilität für die ersten Versuche in jedem Fall gewährleistet ist, ohne eine Optimierung der Hülle bereits zum jetzigen Zeitpunkt durchzuführen. Die tatsächlich benötigte Wandstärke kann in zukünftigen Optimierungsschritten deutlich reduziert werden, beispielsweise durch eine Gestaltung mit zweifacher räumlicher Krümmung, wie in Abbildung 8 dargestellt oder durch die Verwendung von mechanisch Stützenden Elementen wie z.B. Stegen. Ziel ist letztendlich die Reduktion der Wandstärke für dieses Konzept in den Bereich von ca. 1 mm oder weniger.

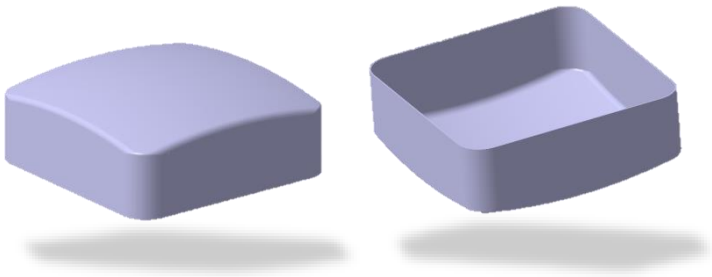


Abbildung 8: Durch eine zweifache räumliche Krümmung könnte die Wandstärke der Edelstahlhaube in zukünftigen Optimierungsschritten reduziert werden und somit Gewicht eingespart werden.

Beschreibung der Fertigungsmethoden

Der Graphit-Liner des ersten Funktionsmusters wird aus einem Block isostatisch gepressten Graphits gefräst. Eine materialsparendere Formgebung mittels Gesenkpressung ist für Hochtemperatur-Anwendungen wie die vorliegende nicht anwendbar, da bei diesen Kunstharz als Bindemittel verwendet wird. Dieses würde bei Hochtemperaturbehandlungen entweichen und einen porösen Werkstoff hinterlassen. Für diesen Fall müsste pechgebundener Graphit verwendet werden, welches wegen seiner Klebrigkeit aktuell aber nicht für das Gesenkpressen geeignet ist. Die gewählte Fertigungsmethode des Fräsens aus isostatischem Graphit führt vermutlich zu deutlichen Skalierungseffekten bezüglich des Bauteilpreises. Um für die spätere Anwendung des Bauteils Kosten und Materialeinsatz zu reduzieren, müsste die Machbarkeit des Gesenkpressens von pechgebundenen Graphiten detailliert untersucht werden.

Für die Bodenplatte wurde eine Reaktionsbarriere durch eine Graphitfolie mit einer Graphitplatte verglichen. Die Varianten unterscheiden sich bezüglich des Dicken, der Wärmeleitfähigkeit, der Oberflächenbeschaffenheit und der Flexibilität. Eine Graphitfolie kann typischerweise 0,5 mm dick sein und besitzt eine Wärmeleitfähigkeit von 3,5 W/(m·K) in Dickenrichtung. Aufgrund des Fertigungsverfahrens für Graphitfolien weisen diese anisotrope Eigenschaften auf. Eine Graphitplatte kann typischerweise mit einer Dicke von 3 mm gefertigt werden weist jedoch eine Wärmeleitfähigkeit von bis zu 100 W/(m ·K) auf (Beispiel für R7510-Graphit). In Abbildung 9 sind die beiden Varianten verglichen bezüglich der Maximaltemperatur, die die Heizer aufweisen müssen, um im mPCM eine Zieltemperatur von 620 °C zu erreichen. Für alle Grenzflächen wird ein Kontaktwiderstand von 2,5 cm²K/W angenommen. Die Heizer würden bei der Variante mit Graphitfolie 8 K heißer werden als mit Graphitplatte. Kommt es aufgrund der großen Flexibilität der Folie zu Ablösungen, die den Kontaktwiderstand erhöhen, verstärkt sich die Beobachtung noch. Darum wird beim ersten Konzeptaufbau die Lösung mit Graphitplatte bevorzugt.

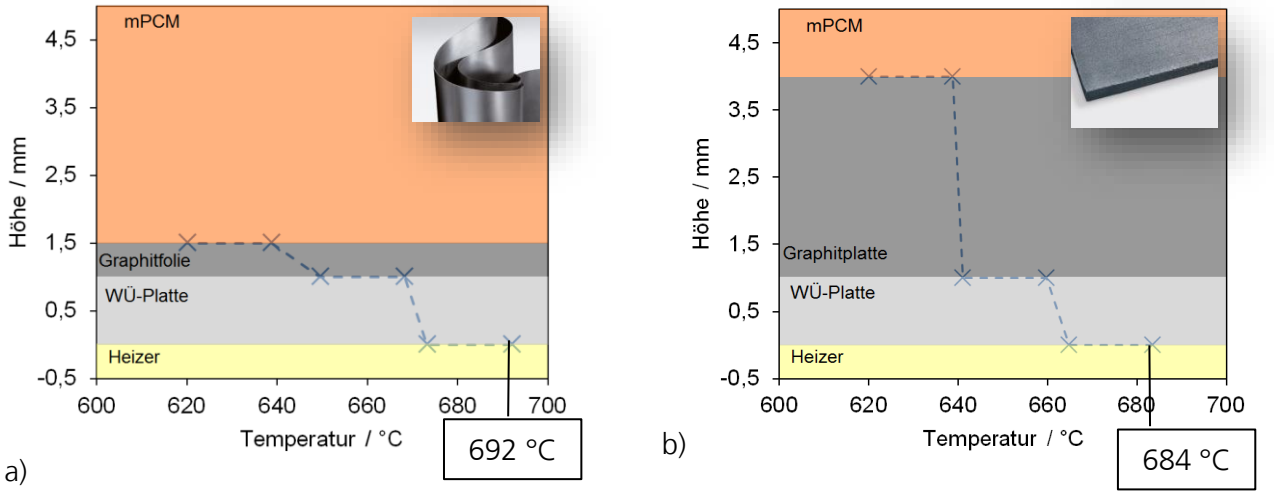


Abbildung 9: Unterschiedliche Maximaltemperaturen der Heizer für den Schichtaufbau der Bodenplatte mit Graphitfolie (a) und Graphitplatte (b). Die Zieltemperatur für das mPCM ist mit 620 °C vorgegeben und alle Kontaktwiderstände mit 2,5 cm²K/W.

Verbindung von Bodenplatte und Haube

Die Verbindung von Platte und Haube kann entweder lösbar oder nicht lösbar ausgestaltet werden. Eine nicht lösbare Verbindung wie eine Verschweißung ist einfacher bezüglich der Auslegung und Fertigung und ist besonders raumsparend. Eine lösbare Verbindung ermöglicht jedoch die Demontage der Einhausung. Vorteile bei der Anwendung können die Wartung oder der Austausch einzelner Subkomponenten sein. Vorteile bei Laboruntersuchungen können die Flexibilität zur Untersuchung verschiedener Kombinationen von Subkomponenten sein. Zunächst wird darum die Auslegung mit lösbarer Verbindung fokussiert um darüber hinaus Erfahrungen bezüglich tatsächlichem Platzbedarf, Dichtigkeit und Lebensdauer über den Betrieb zu sammeln.

Die Verbindungsstelle soll zwei Teilfunktionen erfüllen: Dichtigkeit bezüglich flüssigem mPCM sowie Dichtigkeit bezüglich Gas. Die Auslegung erfolgt zunächst mit dem Leckage-Ziel „technisch dicht", also einer Helium-Leckrate von 10^{-4} mg/(s·m). Es wird das Prinzip der weichen Flachdichtung fokussiert, da diese aufgrund der höheren Kompressibilität eine geringe Flächenpressung als Metallprofildichtungen erfordern. Außerdem sind die Kriterien an die Rauigkeit der Dichtfläche geringer. Das finale Dichtungskonzept sieht eine Graphit-Hochdruckdichtung mit Dichtlippe vor. Durch die Dichtlippe wird die benötigte Dichtstrecke reduziert gegenüber einer beispielsweise Glimmer-basierten Dichtung. Außerdem kann das Lochbild für die Schrauben bei der Graphitlösung teilweise in Form von Halblöchern bis in die Dichtung ragen. Die Auslegung der Schraubverbindung erfolgt in Anlehnung an DIN 1591-1. Die Schraubenkraft im Montagezustand (bei Raumtemperatur und 0 bar relativem Mediendruck) muss so groß sein, dass die Flächenpressung im Betriebszustand bei maximalem Mediendruck (0,138 bar relativ) und maximaler Betriebstemperatur (600 °C) der Mindestflächenpressung gegeben durch die Dichtung (20 MPa) gewährleistet wird. Es werden die Berechnungsregeln zur Auslegung einer runden Flanschverbindung zwischen Flansch und Blindflansch näherungsweise angewandt. Das Resultat ist in Abbildung 10 dargestellt. Unterlegscheiben für die Schraubverbindung sind nicht dargestellt. In Abbildung 10 c) sind außerdem Löcher an der Oberseite des Graphit-Liners dargestellt. Diese dienen zum schnellen Druckausgleich, so dass der Liner wir geplant zu jeder Zeit nicht unter Innendruck steht.

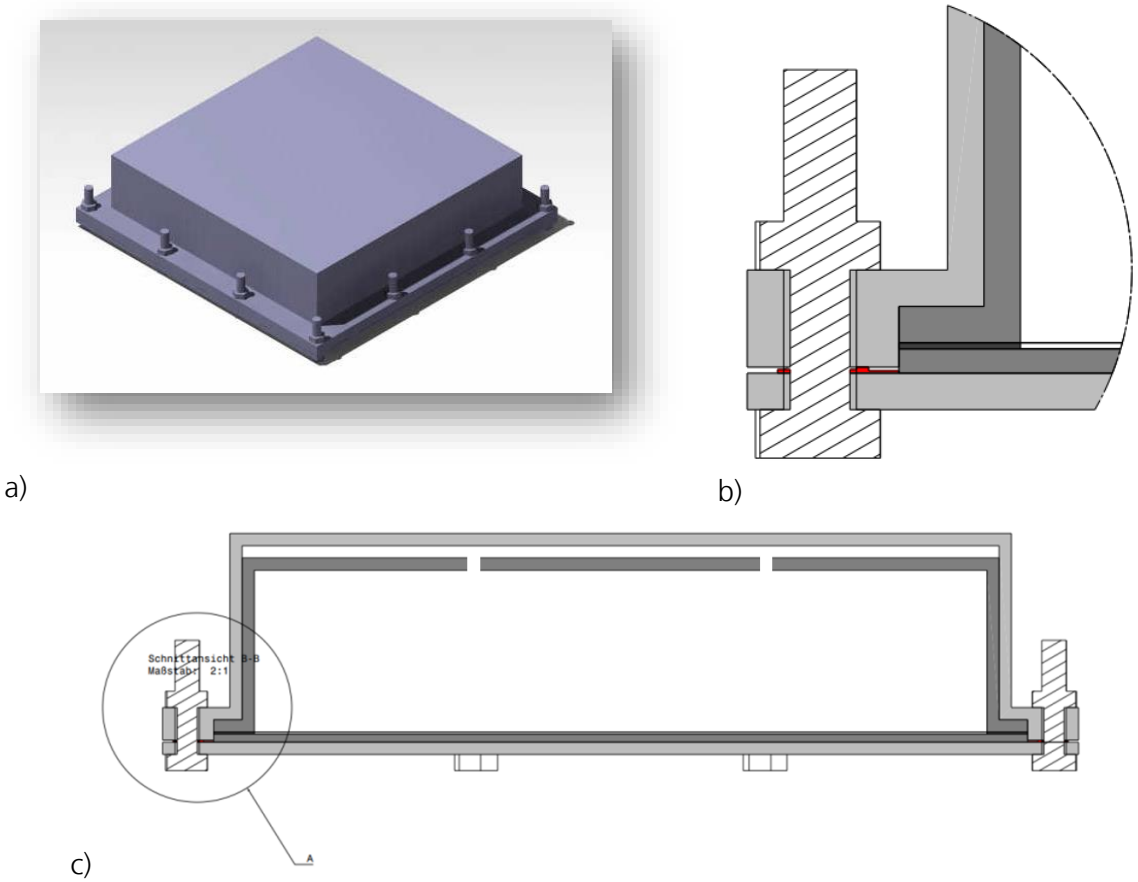


Abbildung 10: Fertigungsgerechtes Graphit-Einhausungskonzept. a) Isometrische Ansicht, b) Detailansicht der Verbindungsstelle mit Graphit-Hochdruckdichtung mit Dichtlippe (rot), c) Schnitt.

3.3.2 AP 3.2 Entwicklung Wärmeaustragssystem

Zum Stand des vorherigen Zwischenberichtes war die experimentelle Untersuchung eines ersten Konzeptes des Wärmeaustragssystems abgeschlossen. Grundsätzlich konnte die gewünschte Nennleistung nach Auslegung von ca. 5 kW. in einigen Betriebspunkten erreicht werden. Bei niedrigen Massenströmen des Arbeitsfluids von unter 8 kg/h sowie bei höheren Betriebstemperaturen von über 300 °C konnte jedoch kaum Wärmeleistung bzw. nur eine deutlich geringere Wärmeleistung ausgetragen werden. Als Ursache für die Defizite bei niedrigen Massenströmen wurde ein nicht Erreichen der Verdampferwand identifiziert. Für die Reduktion der Wärmeaustragsleistung hin zu höheren Temperaturen wurde ein Austrocknen der Verdampferwand als Ursache vermutet. Um den Einfluss beider Effekte zu reduzieren, wurden im vergangenen Jahr Untersuchungen, welche die Optimierung der Einströmung vom Steigrohr in den Verdampfer sowie die Strömungsführung im Verdampfer zum Ziel haben, durchgeführt. Durch eine verbesserte Einströmung in den Verdampfer soll ein Erreichen des Arbeitsfluids bei beliebigen Massenströmen sichergestellt werden. Durch die optimierte Strömungsführung soll das Austrocknen der Verdampferwand unterdrückt werden. Die nachfolgenden beiden Abschnitte beschreiben die durchgeführte Konzeptentwicklung, die durchgeführte experimentelle Untersuchung bzw. Versuchsauswertung sowie die resultierenden Ergebnisse.

3.3.2.1 Konzeptentwicklung

Einströmen in den Verdampfer

Im Hinblick auf die Findung geeigneter Ausströmgeometrien wurde zunächst eine grundlegende Konzeptentwicklung durchgeführt. Die verschiedenen Konzepte wurden dabei nach der Ausströmart in drei verschiedene Kategorien untergliedert:

- Ausströmung über Bohrungen oder einen Spalt
- Ausströmung über eine Düse
- Ausströmung über einen Kegel

Die auf diese Art und Weise untergliederten Konzepte wurden anschließend bewertet. Als Bewertungskriterien wurden dabei folgende definiert:

- Fluid erreicht Verdampferwand
- Fluid verbleibt an der Verdampferwand
- Prozentuale Verteilung des Fluides über der Verdampferwand

Da eine Vielzahl an verschiedenen Konzepten betrachtet wurde (nicht im Bericht dargestellt; bei Bedarf können diese innerhalb der zugrunde liegenden Masterarbeit eingesehen werden), erfolgte eine Vorauswahl der vielversprechendsten Konzepte auf Basis der genannten Bewertungskriterien. Die auf diese Art und Weise vorausgewählten Konzepte sind in Abbildung 11 dargestellt.

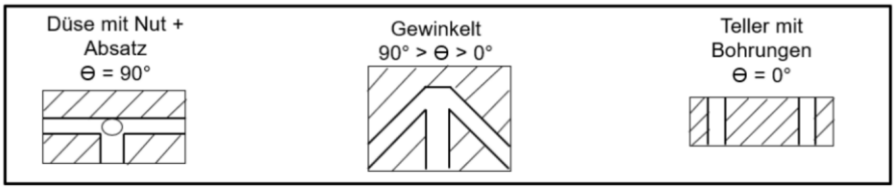


Abbildung 11: Vorausgewählte Konzepte für die experimentelle Untersuchung der Einströmung

Bei dem mit „Düse mit Nut + Absatz, Θ = 90°“ bezeichneten Konzept erfolgt die Ausströmung senkrecht zur Verdampferwand. Durch den anschließenden Absatz soll eine gleichmäßige Verteilung im Spalt zwischen Absatz und Verdampferwand begünstigt wird. Beim mit „Gewinkelt,

90° > Θ > 0°“ bezeichneten Konzept erfolgt die Ausströmung gewinkelt zur Verdampferwand. Beim Konzept „Teller mit Bohrungen, Θ = 90°“ erfolgt die Ausströmung parallel zur Verdampferwand. Bei den drei Grundkonzepte erfolgte weiterhin eine Variation der Designparameter „Asströmungsrichtung“ (lediglich bei der gewinkelten Variante), „Strömungsquerschnitt“ und „Abstand Ausströmgeometrie / Verdampferwand“. Hieraus ergaben sich insgesamt 13 verschiedene Versuchsvarianten, die im Bericht nicht weiter beschrieben werden.

Wärmeübertragungsstruktur im Verdampfer

Analog zur Optimierung der Einströmung in den Verdampfer wurden verschiedene Strukturen zur Optimierung der Wärmeübertragung und Strömungsführung innerhalb des Verdampferraumes entwickelt und betrachtet. Die verschiedenen Grundprinzipien lassen sich dabei wie folgt einteilen:

- Geradlinige Fluidführung
- Spiralförmige Fluidführung
- Kegelförmige Fluidführung
- Mehrmalige Verteilung des Fluids
- Umlenkung des Fluids

Ebenfalls analog wurde zunächst eine Bewertung der verschiedenen Konzeptvarianten durchgeführt. Folgende Bewertungskriterien wurden hierfür verwendet:

- Unabhängigkeit von der Einströmgeometrie
- Prozentuale Verteilung des Fluids über die Verdampferwand
- Fluid bleibt an der Verdampferwand
- Strömungsbild günstig (d.h. turbulente Strömung, hohe Verweildauer des Fluids im Verdampferbereich)
- Vergrößerung der Wärmeübertragungsfläche
- Lageunabhängigkeit bei Neigung

Auch in diesem Fall wurde erneut über ein Punktesystem bewertet, um eine Vorauswahl der vielversprechendsten Varianten zu treffen. Die hierbei als am vielversprechendsten bewerteten Varianten sind in Abbildung 12 dargestellt. Bei den drei Varianten handelt es sich einmal um eine „Spiralförmige Fluidführung“, eine „Kegelförmige Fluidführung“ und eine „Geradlinige Fluidführung“. Eine Darstellung der letztendlich untersuchten Ausführungsformen der drei Varianten ist in Abbildung 13 dargestellt.

Abbildung 12: Vorausgewählte Konzepte für die experimentelle Untersuchung der Strömungsführung im Verdampfer

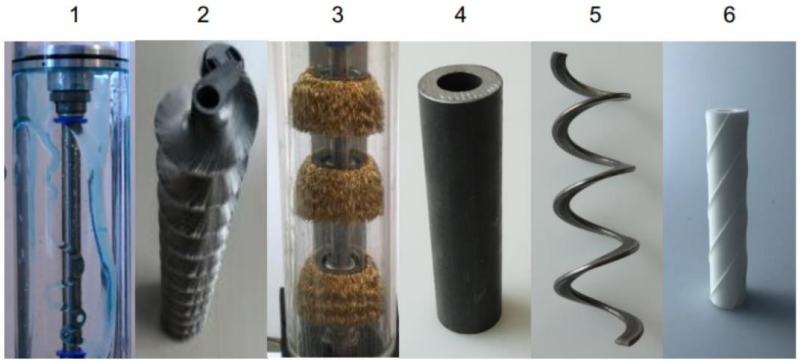


Abbildung 13: Untersuchte Konzeptvarianten der Wärmeübertragerstruktur

3.3.2.2 Experimentelle Untersuchung und Versuchsauswertung

Um die unterschiedlichen Konzepte zur Ausströmung als auch Fluidführung im Verdampfer untersuchen zu können, wurden experimentelle Untersuchungen im Labor durchgeführt. Zur Beurteilung der im vorherigen Kapitel definierten Bewertungskriterien ist dabei eine Visualisierung der Strömung erforderlich. Aus diesem Grund wurde sich dafür entschieden, eine Nachbildung des Verdampferrohres aus transparentem Plexiglas herzustellen. Um die Fluidströmung sichtbar zu machen wurde außerdem Wasser mit Frostschutzmittel versetzt. Um ähnliche Benetzungseigenschaften zwischen dem mit Frostschutzmittel versetzten Wasser an Plexiglas wie zwischen Wasser an Edelstahl zu erreichen, wurden außerdem Vorabuntersuchungen zur Bestimmung der Benetzungseigenschaften untersucht (nähere Erläuterung nicht im Zwischenbericht). Eine Abbildung des beschriebenen Versuchsaufbaus mit Plexiglasrohr ist in Abbildung 14 dargestellt.

Abbildung 14: Versuchsaufbau zur Untersuchung der Strömung im Verdampfer aus Plexiglasrohr

Als entscheidendes Kriterium zur Beurteilung der Speicherkonzepte wurde untersucht, ob eine Benetzung der Verdampferwand mit Arbeitsfluid vorliegt oder nicht. Hierfür wurde die Rohroberfläche in ein Raster mit einzelnen Gittersegmenten sowie in vier grundlegende Bereiche unterteilt. Jede Gitterzone entspricht dabei sozusagen einer Kontrolleinheit für die entschieden wird, ob eine Benetzung der Oberfläche mit Arbeitsfluid vorliegt oder nicht. Von einer Benetzung wird ausgegangen, wenn mindestens 50 % der Wand im jeweiligen Kontrollbereich benetzt wurden. Dies wurde für die vier Bereiche „Bohrung / Ausströmöffnung“, „Oberer Bereich“, „Mittlerer

Bereich“ und „Unterer Bereich“ betrachtet. Eine beispielhafte Darstellung des beschriebenen Rasters und der verschiedenen Bereiche zeigt Abbildung 15.

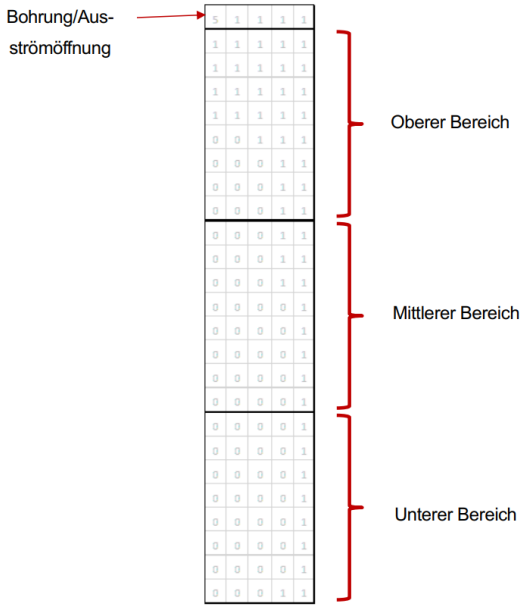


Abbildung 15: Raster, welches über die Plexiglasoberfläche gelegt wurde, zur Auswertung und Beurteilung des Benetzungsverhaltens

Zur optischen Auswertung der Oberfläche der Verdampferwand wurde ein System bestehend aus drei Kameras, K1, K2 und K3 eingesetzt. Mit jeder der drei Kameras wurde dabei ein Oberflächenmantelsegment gleicher Größe beobachtet. Da aufgrund des zylindrischen Querschnittes des Verdampferrohres von Symmetrie ausgegangen wurde, deckt jede der drei Kameras ein Segment mit einem Winkel von 60° ab. Durch die Projektion der gewölbten Oberfläche in die Ebene muss zusätzlich noch eine Umrechnung der Längen erfolgen. Dies erfolgt mittels trigonometrischer Ansätze. Eine prinzipielle Darstellung der eben beschriebenen Erfassung mittels der Kamerasysteme ist in Abbildung 16 dargestellt.

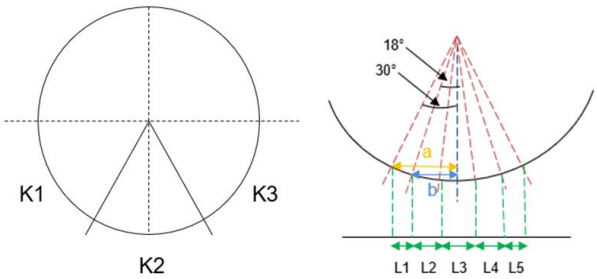


Abbildung 16: Darstellung der Kamerabereich und Geometrische Verhältnisse zur Bestimmung der Rasterlängen

3.3.2.3 Ergebnisse

Einströmung in den Verdampfer

Die Bewertung der verschiedenen Konzepte erfolgt anhand der Bewertung der drei Bewertungskriterien „Fluid erreich Verdampferwand“, „Fluid verbleibt an der Verdampferwand“ und „Prozentuale Verteilung des Fluides über der Verdampferwand“, wie bereit in Kapitel 3.3.2.1 beschrieben. Da in der experimentellen Untersuchung festgestellt wurde, dass für alle untersuchten Konzepte sowohl das Kriterium „Fluid erreicht Verdampferwand“ als auch „Fluid verbleibt an der Verdampferwand“ erfüllt werden konnte, verbleibt als einziges Kriterium zur Differenzierung

zwischen den einzelnen Varianten die Betrachtung der prozentualen Verteilung des Fluids über der Verdampferwand. Die Ergebnisse aus dieser Untersuchung sind in Abbildung 17 dargestellt. Hinsichtlich der Nomenklatur im Diagramm bezeichnet die „N4" eine Variante mit 4 Bohrungen zur Ausströmung des Arbeitsfluids und die Bezeichnung „N8" eine Variante mit 8 Bohrungen. Weiterhin werden die Grundkonzepte beschrieben sowie die Größe das Spalts (Variation 0,1 mm oder 1,1 mm).
Aus dem Diagramm geht hervor, dass die prozentuale Benetzung mit ca. 46 % der Oberfläche für die Variante (1), „N4, Spalt 0,1 mm" am größten ist. Hierbei handelt es sich um ein Konzept mit senkrechter Ausströmung des Arbeitsfluids aus Düsen auf die Verdampferwand, mit einem dünnen Spalt zwischen Ausströmgeometrie und Verdampferwand von 0,1 mm. Mit einer Benetzung von knapp 40 % ist als die am zweitbesten geeignete Variante die Konzeptvariante (8) mit der Bezeichnung „Gewinkelt N8, Spalt 0,1 mm". Hierbei handelt es sich um eine nach unten gewinkelte Ausströmgeometrie mit 8 Bohrungen und einem Spalt von 0,1 mm. Die Variante mit der drittgrößten Benetzung der Verdampferoberfläche ist Konzeptvariante (11) mit der Bezeichnung „Teller mit Bohrung N8". Hierbei handelt es sich um eine tellerförmige Ausströmgeometrie mit 8 Bohrungen.

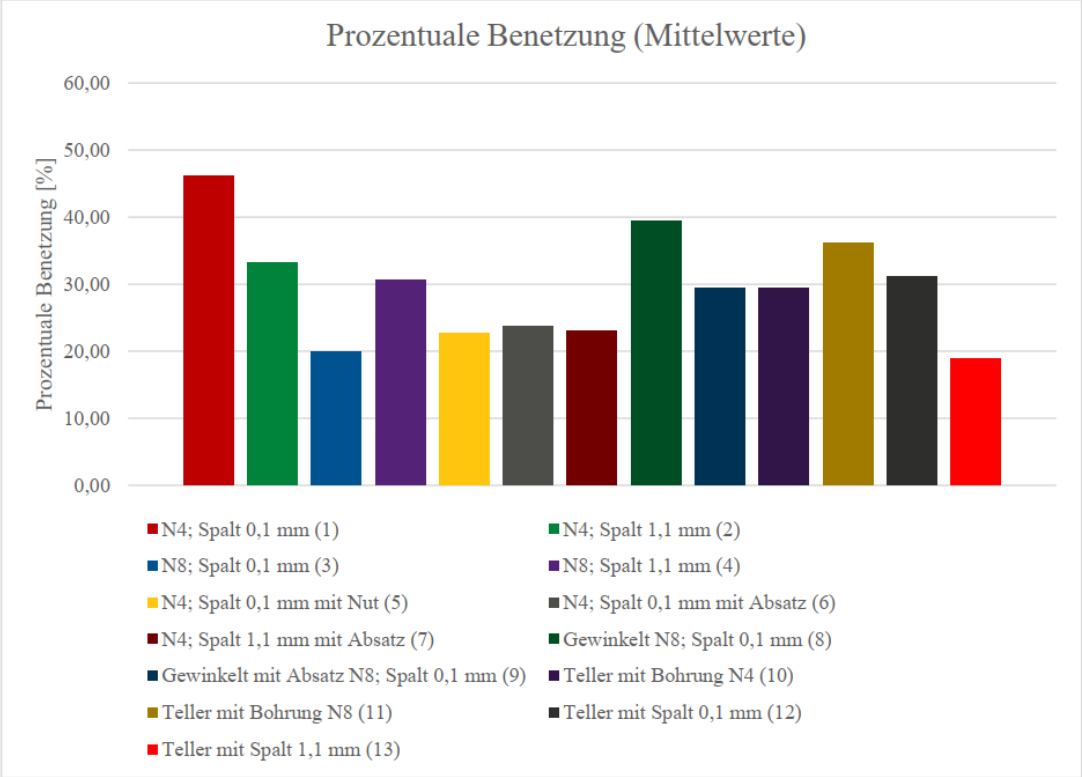


Abbildung 17: Prozentuale Benetzung der Verdampferwand für die verschiedenen Konzeptvarianten

Wärmeübertragungsstruktur im Verdampfer

Zur Bewertung der in Kapitel 3.3.2.1 dargestellten Konzeptvarianten wurde ein Punktesystem über die dort beschriebenen sechs verschiedenen Bewertungskriterien angewandt. Die genaue Darstellung der Bewertung für die einzelnen Kriterien ist nicht im Zwischenbericht dargestellt. Hierfür wird erneut auf die zugrunde liegende Masterarbeit verwiesen. Die finalen Ergebnisse sind in Abbildung 18 dargestellt.

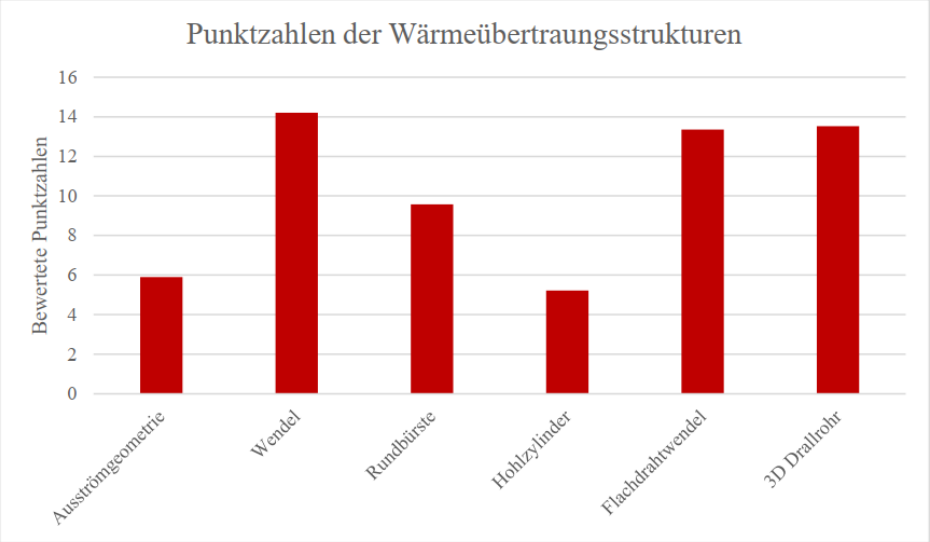


Abbildung 18: Finale Bewertung der verschiedenen Wärmeübertragungsstrukturen AP 3.3 Entwicklung Wärmeeintragssystem

Anhand Abbildung 18 geht hervor, dass die Konzeptvariante „Wendel" mit insgesamt 14 Punkten als die beste Variante bewertet wurde. Gefolgt wird diese von den Varianten „Flachdrahtwendel" und „3D Drallrohr" mit jeweils 13 Punkten. Damit erweisen sich die Varianten, bei denen eine spiralförmige Fluidverteilung im Verdampfer erfolgt als die am geeignetsten. Als Ursache hierfür wird angenommen, dass die aus der spiralförmigen Strömungsführung resultierenden Zentrifugalkräfte sich positiv auf die Benetzung der Verdampferwand auswirken. Das Fluid wird nach außen an die Verdampferwand gedrückt und erreicht damit zu einem größeren Anteil die Verdampferoberfläche, was sich potentiell positiv auf die Verdampfung auswirkt.

3.3.2.4 Fazit / Ausblick

Im Rahmen des Projekts erfolgte eine umfassende Entwicklung, simulative Untersuchung und experimentelle Untersuchung eines Systems zur effizienten Entladung des Thermischen Speichersystems, basierend auf der Verdampfung eines Arbeitsfluids. Ausgehend vom Entwicklungsstand zu Beginn des Projektes wurden die Entwicklung und Untersuchungen dabei für eine zylindrische Verdampfergeometrie durchgeführt. Die grundsätzliche Funktionsfähigkeit des Systems konnte dabei gezeigt, sowie erste Untersuchungen die eine Optimierung des Systems fokussieren durchgeführt werden. Die Arbeiten zum Wärmeaustragssystem innerhalb des Projekts werden damit als abgeschlossen angesehen.

Grundsätzlich erfolgt eine weitere Entwicklung des Wärmeaustragssystems im weiteren Verlauf außerhalb des Projekts „THS-Bus". Da es sich hierbei um ein komplexes System handelt, wird die Entwicklung dessen als ein zentraler Baustein bei der Entwicklung des gesamten Speichersystems betrachtet. Die Anpassung des Speicherkonzepts hin zu einer quaderförmigen Grundgeometrie (vgl. Kapitel 3.4.2) erfordert außerdem die Entwicklung einer flachen Verdampferstruktur. Auch dies wird außerhalb des Projektes als ein weiterer Entwicklungsschwerpunkt fortgesetzt. Da grundsätzlich am Ende des Projekts die Untersuchung eines Funktionsmusters auf Basis des neu definierten Speicherkonzepts erfolgen soll, fließt Entwicklungsarbeit am Wärmeaustragssystem, die außerhalb des Projekts geleistet wird, wiederum in das Projekt mit ein.

3.3.3 AP3.3 – Entwicklung Wärmeeintragssystem

Das Wärmeeintragssystem (WES) dient der bedarfsgerechten Beladung des THS mit thermischer Energie. Es gilt daher ein System zu entwickeln, welches die an der Ladesäule verfügbare elektrische Energie in Wärme wandelt und diese gezielt in das Speichermaterial einbringt.

Im Zwischenbericht I erläutert und in Abbildung 19 dargestellt wurden für das WES bereits relevante Rahmenbedingungen definiert (1), entsprechende Anforderungen abgeleitet (2) und die indirekte Widerstandserwärmung als adäquates Elektrowärmeverfahren zur Speicherbeladung gewählt (3). Die entsprechenden physikalischen Grundlagen wurden anschließend aufbereitet und auf kritische Designaspekte geprüft.

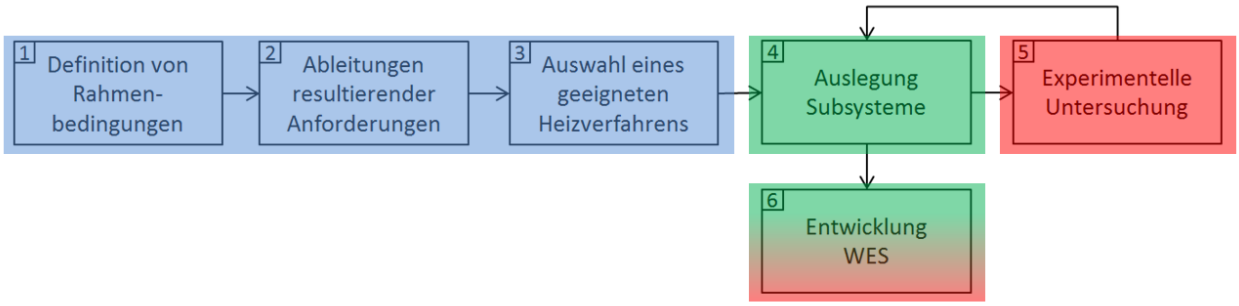


Abbildung 19: Schema der Vorgehensweise zur Bearbeitung von AP3.3 (Blau: In Zwischenbericht I erläutert, Grün: Im vorliegenden Zwischenbericht erläutert, Rot: Anstehende Arbeitsschritte)

Bei der anschließenden Auslegung der Subsysteme wurden zunächst verschiedenste Heizelemente auf Basis von Literatur- und Herstellerangaben lokalisiert und auf die WES-Eignung analysiert. Um eine Kompatibilität zwischen Heizelementen und Speichersystem herzustellen, ist je nach Heizelement-Typ eine entsprechende Struktur erforderlich, welche die erzeugte Wärme effizient an die Schnittstelle (z.B. Einhausungsboden) zum Speichermaterial (mPCM) überträgt. Diese nimmt damit eine übergeordnete Rolle ein und muss konstruktiv so ausgelegt werden, dass neben den Wärmetransporteigenschaften ebenfalls die mechanischen Anforderungen des Gesamtsystems bedient werden. Wie aus dem obigen Schaubild hervorgeht, erfordert die auf der Auslegung der Subsysteme (4) basierende Entwicklung des WES (6) zwingend die experimentelle Untersuchung der Teil-Komponenten (5). Diese liegen bereits teilweise vor, müssen jedoch nach Inbetriebnahme der Laborinfrastruktur vervollständigt und für die erforderlichen Untersuchungen assembliert werden. Die auf Literaturwerten, Herstellerangaben und eigenen Abschätzungen basierenden Annahmen sollen im weiteren Projektverlauf durch die im Labor generierten Erkenntnisse, insbesondere zur Leistungsfähigkeit und Erwärmungscharakteristik, verifiziert werden. Da es sich bei den verwendeten Heizelementen um Standard-Komponenten handelt und die angrenzenden Systeme noch nicht finalisiert sind, wurde vorerst auf eine simulative Abbildung derer verzichtet.

3.3.3.1 Indirekte Widerstandserwärmung

Bei der indirekten Widerstandserwärmung wird ein Gleich- oder Wechselstrom durch einen Heizleiter geleitet. Wie bei der direkten Widerstandserwärmung kommt es nach dem Stromwärmegesetz zu einer Temperaturerhöhung. Jedoch muss der bereitgestellte Wärmestrom auf das Wärmgut übertragen werden. Handelt es sich bei dem Wärmgut um ein elektrisch leitendes Material, so muss dieses von dem Heizleitleiter isoliert werden. Dies kann durch einen Luftspalt oder die Einbettung des Heizleiters in ein elektrisch isolierendes Material (z.B. MgO) realisiert werden.

Das **Stromwärmegesetz** (Erstes Joul´sches Gesetz) beschreibt die Wärmeentwicklung in einem stromdurchflossenen Leiter. Dabei steigt die Wärmeenergie Q_W [Ws] bei konstanter Leistungszufuhr linear mit der Zeit [s] an.

$$Q_W = I^2 \cdot R \cdot t = \frac{U^2}{R} \cdot t$$

Ein Heizleiter mit einem hohen elektrischen Widerstand führt demnach zu einer erhöhten spezifischen Wärmeentwicklung. Dies ist gegenüber der elektrischen Energieübertragung bei der Widerstandserwärmung erwünscht. Zur Ermittlung des Leiterwiderstandes R [Ω] ist neben dem materialspezifischen Widerstand ρ [Ω·mm²/m] die Länge l [m] und die Querschnittsfläche A [mm] des Leiters erforderlich.

$$R = \frac{l}{A} \cdot \rho$$

Ein langer Heizleiter mit geringem Querschnitt ist demnach besonders gut für die Widerstandserwärmung geeignet. Daher werden die Heizleiter spiral-, helix- oder mäanderförmig in das Isoliermaterial eingebettet. Der Leiterquerschnitt hingegen kann nicht beliebig reduziert werden, da der Heizleiter auf keinen Fall bei einer elektrischen oder mechanischen Belastung beschädigt werden darf. Der elektrische Strom I [A] mit dem der Heizleiter beaufschlagt wird ergibt sich nach dem Ohm´schen Gesetz aus dem Verhältnis der Spannung U [V] und dem temperaturabhängigen Heizleiterwiderstand. Daher darf die Spannung nicht über einen bestimmten Grenzwert erhöht werden. Andernfalls kommt es zu einer unzulässigen Erwärmung des Heizleiters und folglich zu dessen Beschädigung (Vergleichbar mit dem Prinzip einer Schmelzsicherung).

Mit Zunahme der Wärmeenergie erwärmt sich der Heizleiter und es kommt aufgrund der Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta$ [K] zur Umgebung nach den bekannten Wärmetransportmechanismen (Wärmeleitung, Wärmestrahlung und Konvektion) zu einem Wärmestrom. Die temperaturabhängige Wärmekapazität C_ϑ ist das Produkt aus der materialspezifischen Wärmekapazität c [J/kg·K] und der entsprechenden Masse m [kg].

$$\Delta\vartheta = \frac{Q_W}{C_\vartheta} = \frac{Q_W}{c \cdot m}$$

Bei gleichmäßiger Energiezufuhr kommt es bei einer erhöhten Temperatur zu einem Gleichgewichtszustand in dem der abgegebene Wärmestrom $\dot{Q}_W$ [W_{th}] mit der zugeführten elektrischen Leistung P_{el} [W_{el}] identisch ist.

$$\dot{Q}_W = \frac{\Delta Q_W}{\Delta t} = P_{el}$$

Wird die Abgabe der Wärme an dem Heizleiter partiell behindert, so kann es zu einer lokalen Temperaturerhöhung und im Extremfall zu einer Beschädigung des Heizleiters kommen. Solche Hotspots sind daher idealerweise bereits bei der konstruktiven Heizelement-Integration zu berücksichtigen.

3.3.3.2 Heizelemente

Die indirekte Widerstandserwärmung hat sich als effiziente Methode zur Erwärmung von festen, flüssigen und gasförmigen Medien etabliert. Durch die Entwicklung möglichst flexibel einsetzbarer Heizelemente mit genormten Geometrien können diese durch entsprechend hohe Stückzahlen kostengünstig angeboten werden. Je nach Beheizungs-Aufgabe können sich Ingenieure einem breiten Portfolio an Standard-Heizelementen bedienen. Kommen die Standardkomponenten nicht infrage, so sind ebenfalls Sonderlösungen verfügbar. Im Folgenden wird auf die Funktionsweise sowie die zur Auslegung relevanten Aspekte der indirekten Widerstandserwärmung eingegangen.

Wird ein elektrisch Leitfähiges Material von Strom durflossen, so kommt es wie oben beschrieben zu einer Erwärmung des selbigen. Die Stärke der Erwärmung hängt dabei in erster Linie von folgenden Einflüssen ab:

- Elektrische Leitfähigkeit des Leitermaterials

- Leiter-Geometrie (Länge und Querschnitt)
- Stromstärke und Spannung
- Wärmetransport zur Umgebung (Konvektion, Wärmeleitung, Strahlung)

Um einen guten Wärmeübergang vom Heizleiter auf das Wärmgut bzw. die Wärmeleitstruktur zu gewährleisten, wird das Isoliermaterial zwischen Heizleiter und Heizelementmantel hochverdichtet eingebracht (z.B. Hochleistungs-Heizpatronen und Rohrheizkörper). Dadurch kann die erzeugte Wärme trotz der elektrischen Isolierung möglichst gleichmäßig vom Heizleiter abgeleitet werden. Eine Sonderform bilden Heizelemente bei denen das Isoliermaterial bereits über eine ausreichende mechanische Stabilität und Dichte verfügt (z.B. keramische Heizelemente).

Heizleiteranforderungen
Folgende Anforderungen werden dabei an den Heizleiter gestellt:

- Hoher spezifischer Widerstand
- Kleiner Temperaturbeiwert (Temperaturkoeffizient)
- Hohe Betriebstemperatur bei langer Lebensdauer
- Beständigkeit gegen Auflagematerial und Einbettmassen
- Große mechanische Festigkeit bei hohen Temperaturen
- Gute chemische Beständigkeit gegen umgebende Atmosphäre
- Gute Korrosions- und Zunderbeständigkeit
- Geringe Wärmeausdehnung

Heizleitergeometrie
Da die Leiterlänge eine übergeordnete Rolle spielt (elektr. Widerstand), werden die Heizleiter in der Regel spiral- oder mäanderförmig (2D) oder spiral- und/ oder helixförmig (3D) im Heizelement positioniert bzw. verlegt. Dabei muss ausreichend Abstand zwischen den Heizleiterbahnen untereinander sowie zwischen Heizleiter und Mantel verbleiben. Zur Realisierung spiralförmiger Heizleitergeometrien werden gegebenenfalls Stützelemente (z.B. Stäbe) aus einem nichtleitenden Material wie beispielsweise Keramik genutzt.

Folgende Heizelemente eignen sich grundsätzlich für ein WES:

- Hochleistungsheizpatronen (HP)
- Geteilte Heizpatronen (GHP)
- Rohrheizkörper (RHK)
- Keramische Flachheizer (KFH)

Alle aufgezeigten Technologien lassen sich sowohl mit AC (Alternating current) als auch mit DC (Direct current) betreiben und durch eine entsprechende Verschaltung an verschiedene Betriebsspannungen anpassen. Daher wird vorerst nicht näher auf die elektrische Anbindung und die entsprechende Regelung eingegangen.

3.3.3.3 WES- Integration

Bezüglich der im Zwischenbericht I bereits thematisierten WES-Integration wurde in der teil-integrierten Variante, in Form von Heizplatten, ein Kompromiss aus Leistungsfähigkeit, Wartungsfreundlichkeit und Langlebigkeit gefunden. Die im Heizelement erzeugte Wärme wird dabei primär über Wärmeleitung in das Speichermaterial eingebracht. Jedoch führen vermehrte

thermische Kontaktwiderstände an den Grenzflächen der Komponenten sowie die Wärmeleitwiderstände der Komponenten selbst gegenüber der Vollintergation zu einer Limitierung der Übertragungsleistung. Durch konstruktive Maßnahmen sowie der Verwendung geeigneter Heizelement-Geometrien und Materialien kann jedoch, je nach Ladeszenario, potentiell eine ausreichende Wärmeeintragsleistung gewährleistet werden. Daher wurden basierend auf den zuvor erläuterten Heizelementen verschiedene Heizplatten-Varianten entwickelt, welche im Folgenden näher erläutert werden.

GHP-Heizplatte

Da sich die konventionelle Hochleistungs-Heizpatronen in der Mitte der beheizten Zone am stärksten erwärmen, kommt es aufgrund inhomogener thermischer Expansion, trotz passgenauer Aufnahmebohrung (z.B. H7), zu lokalen Unterschieden beim thermischen Kontakt zwischen der Heizpatronen- und Bohrungs-Mantelfläche (Abbildung 20). Die Folge ist die bereits erläuterte lokale Überhitzung. Um dies zu vermeiden und eine hohe Leistung der Heizpatrone über den gesamten Betriebstemperaturbereich zu gewährleisten, können sogenannte geteilte Heizpatronen eingesetzt werden.

Abbildung 20: Schnittdarstellung einer konventionellen Heizpatrone gegenüber geteilter Heizpatronen

Diese Heizpatronen besitzen einen halbkreisförmigen Querschnitt und verfügen über keinen keramischen Wickelkern, sodass durch die Umbiegung auf halber Länge annähernd vollkreisförmiger Querschnitt realisiert wird. Bei Erwärmung dehnen sich die beiden Heizpatronen-Schenkel aus und pressen sich somit gegen die Mantelfläche der Aufnahmebohrung. Dies führt zu einem guten thermischen Kontakt und ermöglicht zudem die unkomplizierte Entnahme des Heizelements im kalten Zustand.

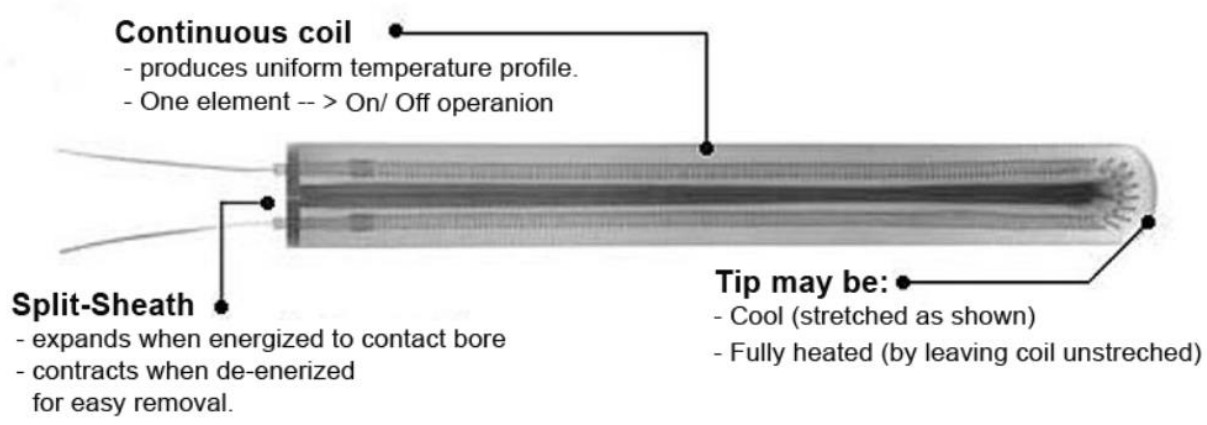


Abbildung 21: Geteilte Heizpatrone (Wattflex, Dalton Electric Heating Co. Inc)

Die Spitze der Heizpatrone kann als kalte oder heiße Variante ausgeführt werden. Beim Einsatz in Durchgangsbohrungen wird beispielsweise die kalte Variante bevorzugt. Aufgrund der dynamischen

Anpassung an den Aufnahmeradius, besteht darüber hinaus nicht die Notwendigkeit die Aufnahmebohrung als Passung auszuführen.

Vorteile gegenüber konventionellen Hochleistungs-Heizpatronen:

- Bis zu fünffache Lebensdauer
- Geringerer Wechselaufwand (Thermische Kontraktion im kalten Zustand)
- Höhere Oberflächenbelastung (+50 %)
- Höhere Betriebs-Temperaturen (bis zu 1000 °C)

Die obigen Angaben beruhen auf den Herstellerinformationen. Sollten sich diese verifizieren lassen, so bietet sich der Einsatz geteilter Heizpatronen in einem THS an.

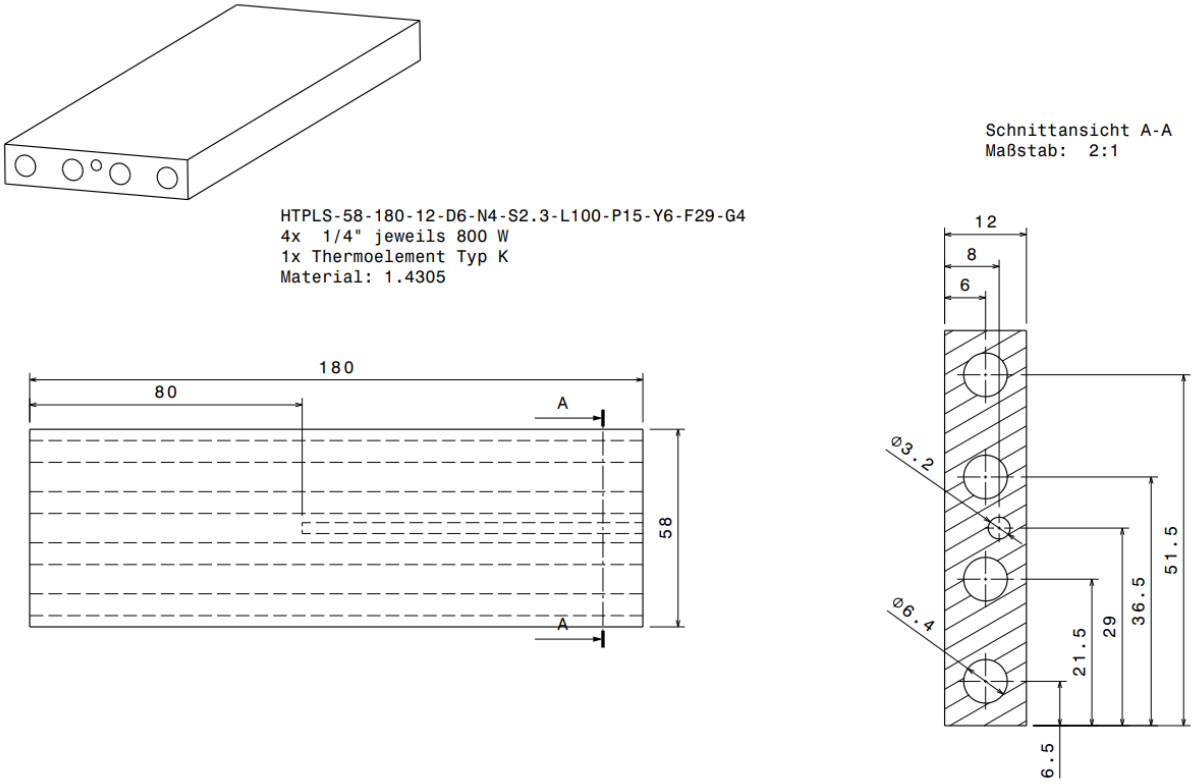


Abbildung 22: Heizplatte mit Aufnahmebohrungen für geteilte Heizpatronen

Zur Integration der geteilten Heizpatronen wurde sich für die Entwicklung einer Heizplatte mit entsprechenden Aufnahmebohrungen entschieden (Abbildung 22). Die vier Heizpatronen (nicht abgebildet) besitzen insgesamt eine installierte Leistung von 3,2 kW. Zur Erfassung der Heizplattentemperatur wurde ein Thermoelement (Typ K) vorgesehen. Die Heizpatronen sowie das Thermoelement besitzen eine Länge von 280 mm und ragen damit einseitig 100 mm aus dem beheizten Bereich heraus. Dies ist erforderlich, damit die elektrischen Anschlüsse nicht überhitzen.

KFH-Heizplatte

Keramische Heizelemente können in verschiedensten Formen hergestellt werden. Um eine Heizplatte zu realisieren, kann diese je nach den fertigungsseitigen Möglichkeiten als homogene Platte mit einem einzigen Heizleiter hergestellt werden. Um jedoch eine ausreichende Kontaktierung zwischen Heizelement und Wärmgut bzw. der zu erwärmenden Oberfläche zu gewährleisten kann es vorteilhaft sein, mehrere Heizelemente parallel aneinander zu reihen. Damit kann die thermische Expansion der Wärmgutoberfläche gegenüber einer homogenen Heizplatte besser kompensiert

werden. Abbildung 23 zeigt einen keramischen Flachheizer aus Siliziumnitrid (Si_3N_4) mit 1250 W Nennleistung.

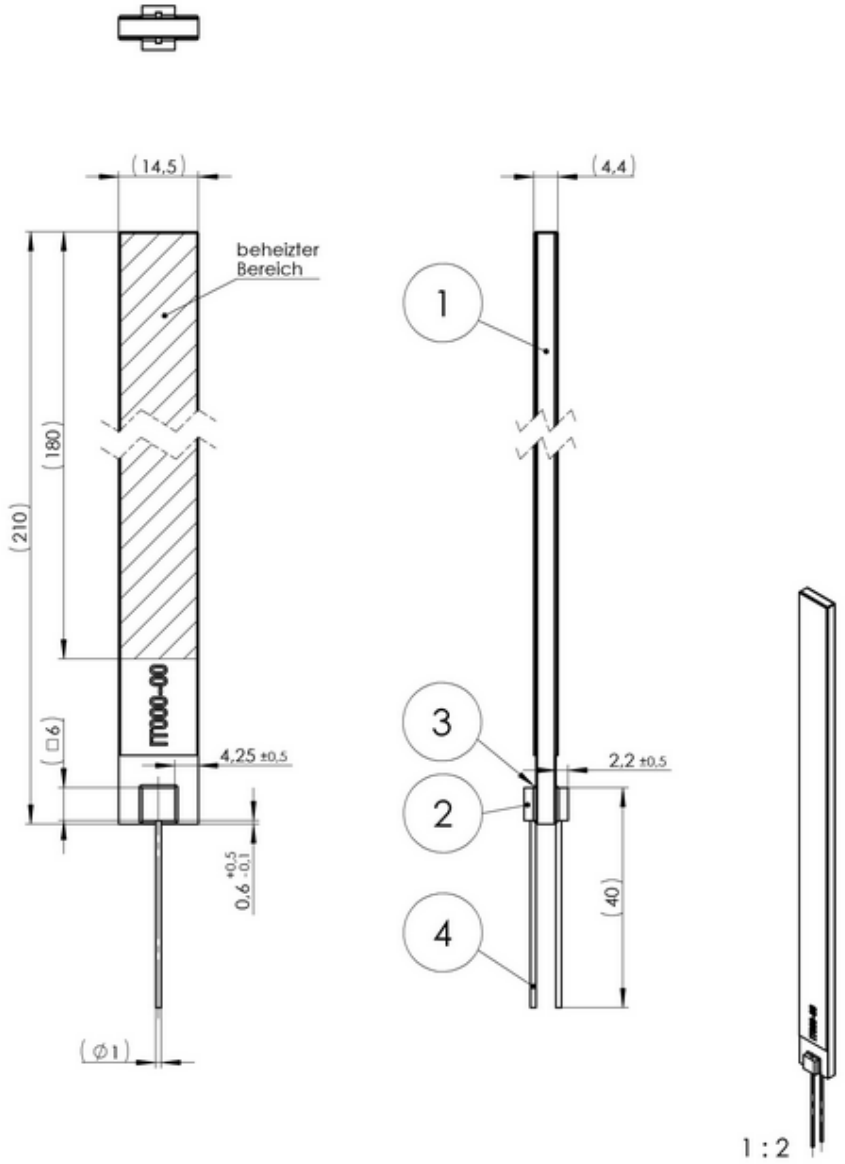


Abbildung 23: Keramischer Flachheizer (Bach Resistor Ceramics GmbH)

Durch die parallele Aneinanderreihung vier dieser Heizer kann analog zur vorherigen Heizplatte eine beheizte Fläche von 180 mm Länge und 58 mm Breite mit einer installierten Leistung von 5 kW realisiert werden. Zur Homogenisierung der resultierenden Oberfläche wurden die Heizelemente gemeinsam auf eine Stärke von 4 mm geschliffen. Damit ist für die KFH-Variante gegenüber der GHP-Variante lediglich ein Drittel der Höhe erforderlich. Die keramischen Flachheizer erfordern einen Anschlussbereich von 30 mm (exkl. elektr. Anschlüsse) sowie eine entsprechende Klemmvorrichtung, welche der Positionierung der einzelnen Heizelemente dient.

RHK-Heizplatte

Eine interessante Alternative zu den beiden vorherigen Varianten kann durch die Verwendung von Rohrheizkörpern realisiert werden. Diese werden mäander- oder spiralförmig gebogen und entweder in entsprechende Aufnahmenuten eingepresst (Abbildung 24) oder in die Heizplatte eingegossen (RHK nicht abgebildet). Bei der Entwicklung der Rohrheizkörper-Geometrie müssen die vom Hersteller vorgegeben minimalen Biegeradien berücksichtigt werden.

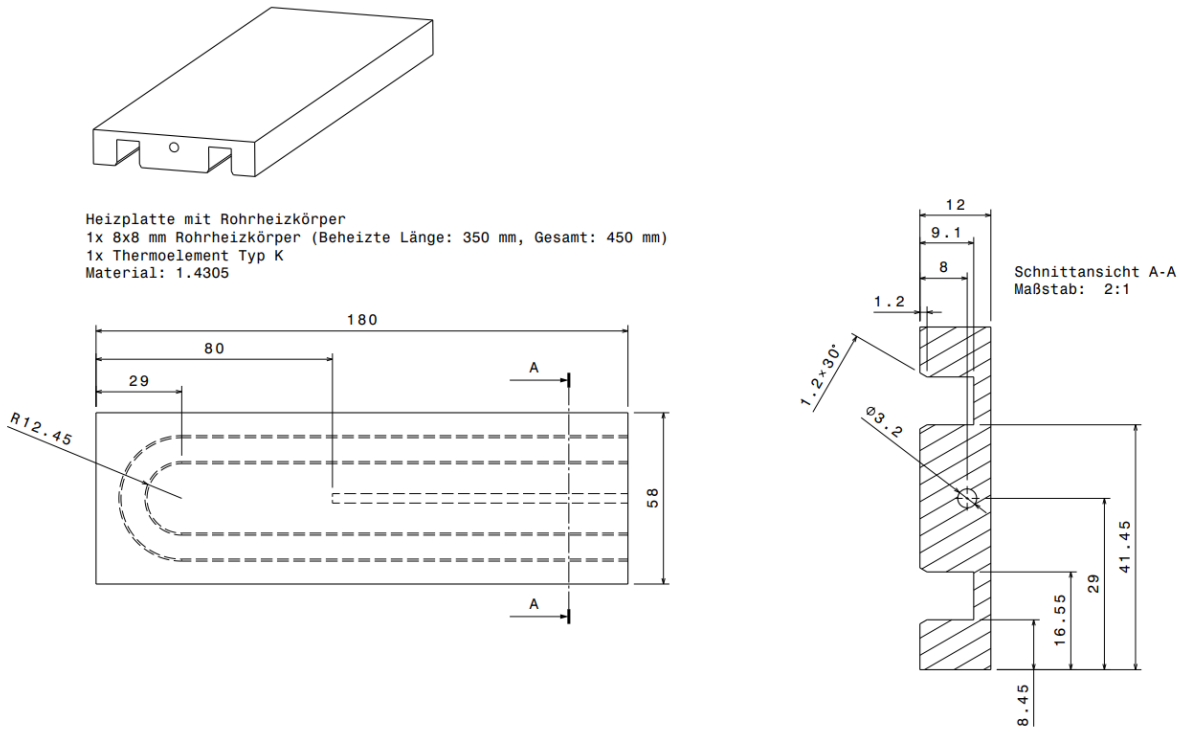


Abbildung 24: Heizplatte für eingepressten Rohrheizkörper

Da diese Variante gegenüber der GHP- und KFH-Variante deutlich geringerem Oberflächenleistungen liefert und bei Einzelfertigung zudem ein erhöhter Fertigungsaufwand besteht, wurde vorerst von detaillierten Betrachtung sowie der experimentellen Untersuchung abgesehen.

3.3.3.4 Fazit & Ausblick

Auf Basis der ausführlichen Analyse verfügbarer Elektrowärmeverfahren und insbesondere der indirekten Widerstandserwärmung konnten mehrere Heizplatten-Varianten ausgearbeitet werden. Sollte sich bei der experimentellen Untersuchung zeigen, dass die prognostizierten Eigenschaften der GHP- und KFH-Variante nicht bestätigt werden können, so kann alternativ auf die RHK-Variante zurückgegriffen werden. Unter Anderem bietet hier die Ausführung mit eingegossenen Rohrheizkörpern, aufgrund von Skalierungsfaktoren, ein hohes Kostenpotential.

Sobald dies möglich ist, wird die experimentelle Untersuchung der favorisierten Varianten initiiert. Basierend auf den dabei erlangten Erkenntnissen werden die Subsysteme optimiert und an die angrenzenden Speichersysteme angepasst. Sollten sich beide Varianten grundsätzlich als geeignet erweisen, so kann je nach Einsatzszenario potentiell zwischen mehreren Leistungsoptionen gewählt werden.

3.4 AP 4 – Adaption Speicherkonzept

3.4.1 Abgeleitete Speicherkonzepte

Zum Stand des letzten Zwischenberichts 06/2019 wurden grundlegende Erkenntnisse bzw. Empfehlungen definiert, die für die Konzeptentwicklung eines Thermischen Hochleistungsspeichers zu berücksichtigen sind. Auf Basis dieser Empfehlungen wurden fünf grundlegende Speicherkonzepte abgeleitet. Die grundlegenden Unterschiede beziehen sich dabei auf die Positionierung von Wärmeeintragssystem und Wärmeaustragssystem im Speicher. An dieser Stelle

wird darauf hingewiesen, dass grundsätzlich verschiedene Ausführungsvarianten der fünf Grundkonzepte möglich sind, diese jedoch nicht alle dargestellt werden.

Konzeptvariante I

Bei Konzeptvariante I befinden sich sowohl das Wärmeeintragssystem als auch das Wärmeaustragssystem außerhalb des Einhausungsbehälters, an der Bodenfläche. Eine exemplarische Abbildung von Konzeptvariante I zeigt Abbildung 25. Durch diese Anordnung besteht nicht die Notwendigkeit einer materialseitigen Kompatibilität zwischen Speichermaterial und den genannten Komponenten, welches als vorteilhaft anzusehen ist. Aufgrund der Anordnung beider Systeme an der Bodenfläche ist diese jedoch je nach Anforderungen an Wärmeein- und austragsleistung entsprechend ausreichend zu dimensionieren. Auch können die Wärmewiderstände zwischen Speichermaterial und Wärmeein- und austragssystem größer ausfallen, was zu Leistungseinbußen oder einer geringeren Gesamteffizienz führen kann. Im Hinblick auf die Erstarrung ist von einem sehr guten thermischen Kontakt zwischen Speichermaterial und Einhausungsbehälter am Boden auszugehen. Der Wärmeaustrag erfolgt von der Bodenfläche aus, wodurch entsprechende Materialdefekte (Lunker, Poren) entsprechend im Bereich der Oberseite des Speichersystems entstehen.

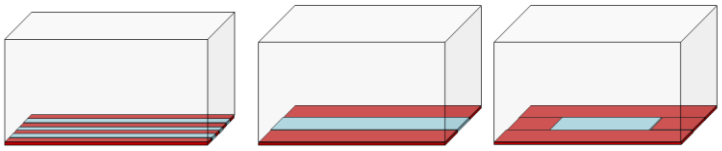


Abbildung 25: Exemplarische Darstellung von Konzeptvariante I – Wärmeein- und Austragssystem außerhalb des Einhausungsbehälters an der Bodenfläche

Konzeptvariante II

Bei Konzeptvariante II befindet sich das Wärmeeintragssystem in direktem Kontakt mit dem Speichermaterial innerhalb des Einhausungsbehälters, das Wärmeaustragssystem außerhalb des Speicherbehälters an der Bodenfläche. Eine exemplarische Darstellung von Konzeptvariante II zeigt Abbildung 26. Aufgrund des direkten Kontakts zwischen Wärmeeintragssystem und Speichermaterial ist eine materialseitige Kompatibilität zwischen beiden notwendig. Da sich das Wärmeaustragssystem alleinig an der Bodenfläche des Speichersystems befindet und diese damit eine deutlich geringere Fläche im Vergleich zu Konzeptvariante I aufweisen muss, ist die Dimensionierung der Seitenverhältnisse deutlich flexibler. Bei der Positionierung des Wärmeeintragssystems innerhalb des Speicherbehälters ist die Bildung von Lunkern und Poren entsprechend zu berücksichtigen. Eine Positionierung des Wärmeeintragssystems in normaler Ausrichtung zur Bodenfläche, wie in Abbildung 26 dargestellt, ist diesbezüglich anzustreben.

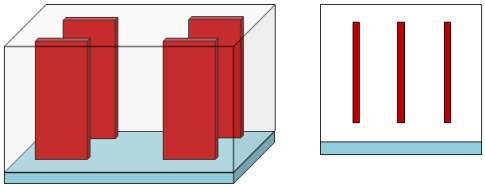


Abbildung 26: Exemplarische Darstellung von Konzeptvariante II – Wärmeeintragssystem innerhalb des Einhausungsbehälters in direktem Kontakt zum Speichermaterial, Wärmeaustragssystem außerhalb des Einhausungsbehälters an der Bodenfläche

Konzeptvariante III

Bei Konzeptvariante III befindet sich das Wärmeeintragssystem außerhalb des Speicherbehälters an der Bodenfläche, das Wärmeaustragssystem in direktem Kontakt mit dem Speichermaterial innerhalb des Einhausungsbehälters. Eine exemplarische Darstellung von Konzeptvariante III zeigt Abbildung 27. Aufgrund des direkten Kontakts zwischen Wärmeaustragssystem und Speichermaterial ist eine materialseitige Kompatibilität zwischen beiden notwendig. Da sich das Wärmeeintragssystem alleinig an der Bodenfläche des Speichersystems befindet und dieses damit eine deutlich geringere Fläche im Vergleich zu Konzeptvariante I aufweisen muss, ist die Dimensionierung der Seitenverhältnisse ähnlich wie bei Konzeptvariante II deutlich flexibler. Aufgrund der Positionierung des Wärmeeintragssystems an der Bodenfläche ist darauf zu achten, dass es dort nicht zur Bildung von Lunkern oder Poren kommt. Hierfür ist zu vermeiden, dass es zu einem ungleichmäßigen Wärmeaustrag im Wärmeaustragssystem, mit einem fallenden Wärmestromgradienten hin zur Bodenfläche kommt. Ideal wäre ein Wärmestromgradient mit fallendem Wärmestrom ausgehend von der Bodenfläche.

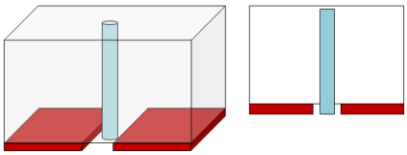


Abbildung 27: Exemplarische Darstellung von Konzeptvariante III – Wärmeeintragssystem außerhalb des Einhausungsbehälters an der Bodenfläche, Wärmeaustragssystem innerhalb des Einhausungsbehälters in direktem Kontakt zum Speichermaterial

Konzeptvariante IV

Bei Konzeptvariante IV befinden sich sowohl das Wärmeeintragssystem als auch das Wärmeaustragssystem in direktem Kontakt mit dem Speichermaterial innerhalb des Einhausungsbehälters. Eine exemplarische Darstellung von Konzeptvariante IV zeigt Abbildung 28. Aufgrund des direkten Kontakts sowohl zwischen Wärmeeintragssystem und Speichermaterial, als auch zwischen Wärmeaustragssystem und Speichermaterial ist eine materialseitige Kompatibilität zwischen jeweils beiden notwendig. Für die Positionierung beider Systeme liegen grundsätzlich beliebige Freiheitsgrade vor, sofern die Richtlinien zur Bildung von Materialdefekten in Abhängigkeit der durch den Wärmeaustrag resultierenden Wärmeströme beachtet werden.

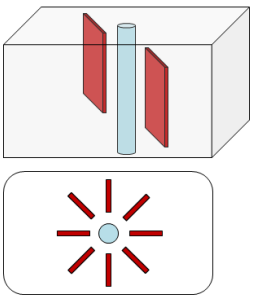


Abbildung 28: Exemplarische Darstellung von Konzeptvariante IV – Wärmeeintragssystem und Wärmeaustragssystem innerhalb des Einhausungsbehälters in direktem Kontakt zum Speichermaterial

Konzeptvariante V

Bei der exemplarisch in Abbildung 29 dargestellten Konzeptvariante V handelt es sich um eine Sonderform der in Abbildung 28 dargestellten Konzeptvariante IV. Grundsätzlich befinden sich sowohl Wärmeein- als auch Wärmeaustragssystem innerhalb des Speicherbehälters. Beide befinden sich jedoch nicht in direktem Kontakt zum Speichermaterial, sondern sind in eine entsprechende Aufnahme eingebracht, die eine materialseitige Kompatibilität zum Speichermaterial aufweisen

muss. Grundsätzlicher Vorteil dieser Variante ist, dass es an der Oberfläche der Aufnahme nicht mit der Bildung von Materialdefekten zu rechnen ist, da der Wärmeaustrag stets von dieser ausgeht. Kritisch zu betrachten sind hingegen die Wärmewiderstände, aufgrund des indirekten Kontaktes zum Speichermaterial, ähnlich wie bereits für Konzeptvariante I beschrieben.

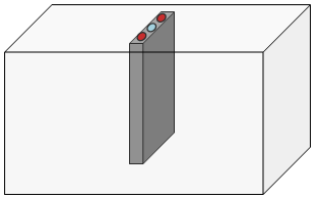


Abbildung 29: Exemplarische Darstellung von Konzeptvariante V – Wärmeeintragssystem und Wärmeaustragssystem innerhalb des Einhausungsbehälters innerhalb einer Aufnahme

3.4.2 Leitkonzept

Um eine gezielte Auslegung der einzelnen Subkomponenten des Speichersystems zu ermöglichen, wurde ein Leitkonzept des Speichersystems definiert. Neben der Festlegung auf eines der im vorherigen Kapitel beschriebenen Konzeptvarianten wurden auch bereits Grundabmessungen definiert, die die Auslegung erleichtern sollen. Selbstverständlich entsprechen diese Abmessungen nicht denen eines final ausgelegten Speichersystems für die reale Anwendung. Aufgrund der beschriebenen Verzögerung des Aufbaus der Auslegungswerkzeuge ist eine Auslegung auf Anwendungsdimensionen voraussichtlich erst zu einem späten Zeitpunkt im Projekt möglich, sodass der Aufbau eines Funktionsmusters auf Basis der Auslegung damit nicht mehr innerhalb des Projektzeitraums möglich wäre. Die Definition eines Leitkonzepts sichert daher auch die Erreichung der Projektziele ab, da ein entsprechendes Funktionsmuster auf dieser Basis aufgebaut werden kann. Eine Skizze des Leitkonzepts, welches dies im Querschnitt zeigt ist in Abbildung 30 dargestellt.

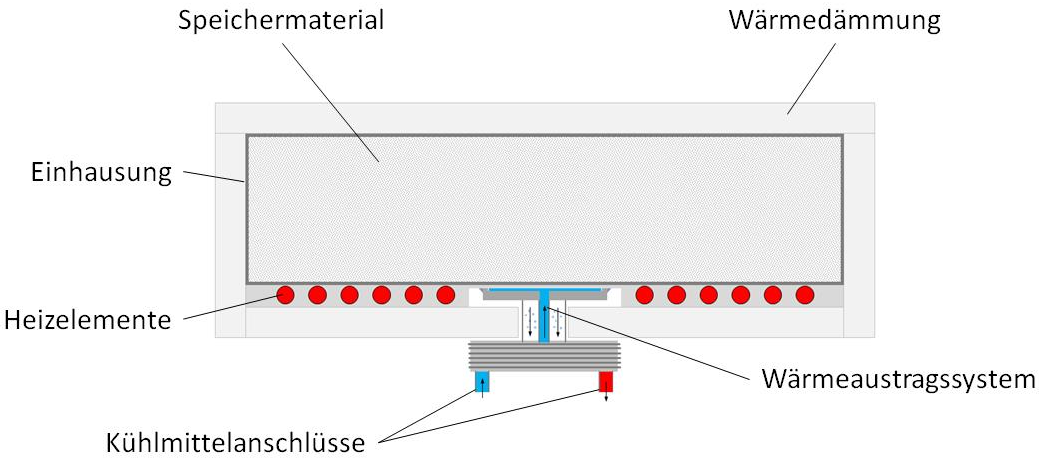


Abbildung 30: Darstellung des Leitkonzepts im Querschnitt

Das definierte Leitkonzept entspricht grundsätzlich dem Aufbau nach Konzeptvariante I (vgl. vorheriges Kapitel). Sowohl das Wärmeeintragssystem (Heizelemente) als auch das Wärmeaustragssystem sind an der Bodenfläche des Einhausungsbehälters angebracht. Das Konzept sieht dabei vor, dass der Wärmeaustrag mittig, der Wärmeeintrag an den Rändern der Bodenfläche stattfindet. Eine Erstarrung hin zur Bodenfläche und damit ein guter thermischer Kontakt auch zwischen Heizelementen und Speichermaterial werden hierdurch begünstigt, bzw. die Bildung von Materialdefekten im Bodenbereich vermieden. Die Grundgeometrie des Einhausungsbehälters wird ist als rechteckiger Quader ausgeführt. Der Aufbau wird dabei von einer Wärmedämmung umgeben. Die Bodenfläche ist schematisch in Abbildung 31 dargestellt.

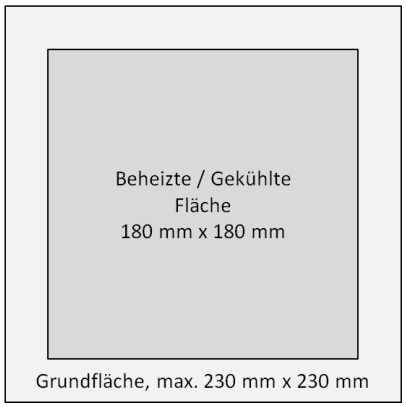


Abbildung 31: Schematische Darstellung der Bodenfläche des Leitkonzepts

Die maximalen äußeren Abmessungen wurden auf eine Seitenlänge von 230 mm festgelegt. Ursächlich für diese Festlegung sind die Abmessungen des Ofens, der am DLR für grundlegende Untersuchungen des Einhausungskonzepts eingesetzt werden soll. Die beheizte bzw. gekühlte Fläche wurde auf eine Kantenlänge von 180 mm festgelegt. Neben ausreichend Platz für Konstruktionselemente können durch die Wahl dieses Maß auch teilweise Standardheizelemente verwendet werden (vgl. Abschnitt 0).

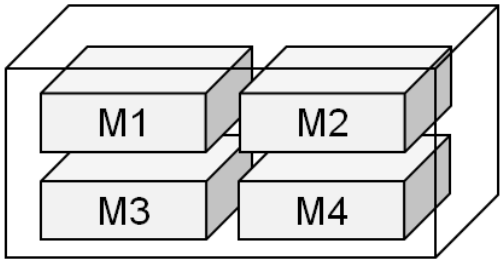
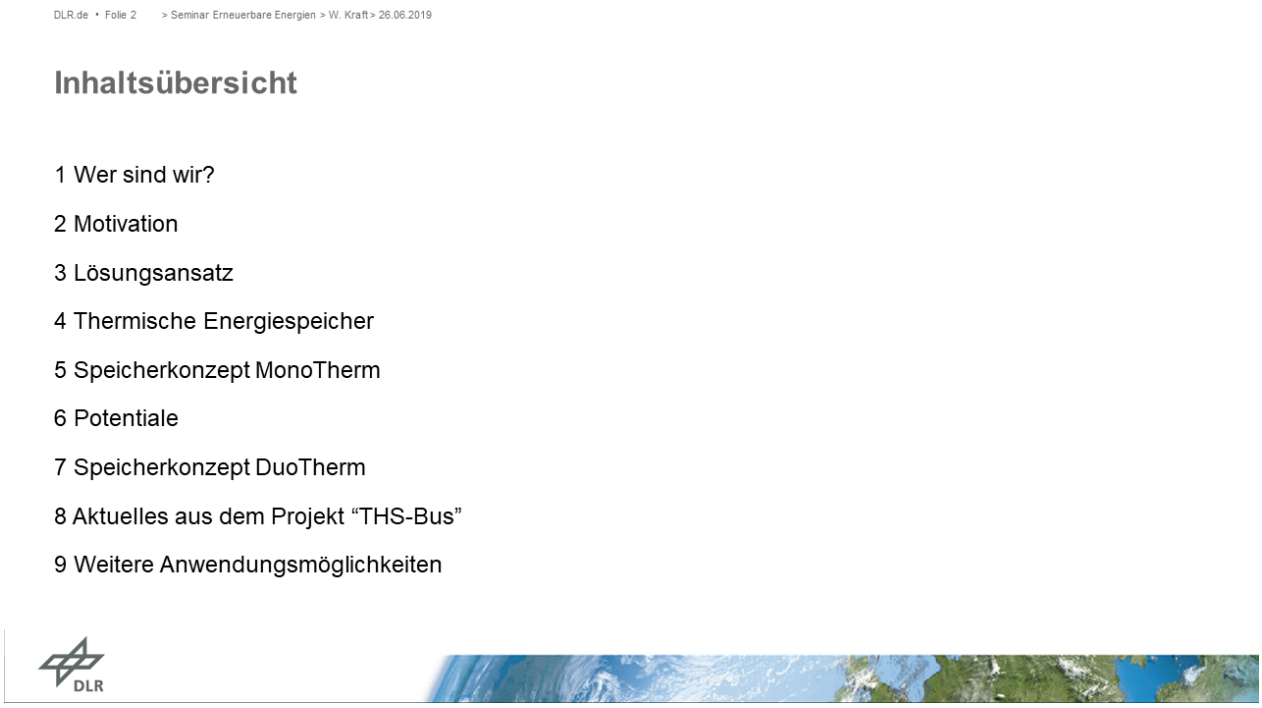


Abbildung 32: Modularer Aufbau des Speichersystems

Unabhängig vom Leitkonzept soll grundsätzlich ein modularer Aufbau des Speichersystems erfolgen. Dieser wird in Abbildung 32 angedeutet. Das vorher definierte Leitkonzept ist dabei als einzelnes Speichermodul zu betrachten. Bei einer zentralen Positionierung des Speichersystems im Fahrzeug könnten die einzelnen Speichermodule wir dargestellt angeordnet werden.

Anhang

Folien zur Veröffentlichung beim „Seminar Erneuerbare Energien“ am 26.06.2019 an der Hochschule Karlsruhe



Wer sind wir?

Wer sind wir?
DLR

Das DLR ist das Forschungszentrum der Bundesrepublik Deutschland für Luft- und Raumfahrt.
Ca. 8.000 Mitarbeiter arbeiten in Forschungsinstituten und Einrichtungen an 20 Standorten.

- Luftfahrt und Raumfahrt
- **Energie und Verkehr**
- Digitalisierung und Sicherheit
- Planung und Umsetzung der deutsche Raumfahrtaktivitäten
- Projektträger zur Forschungsförderung

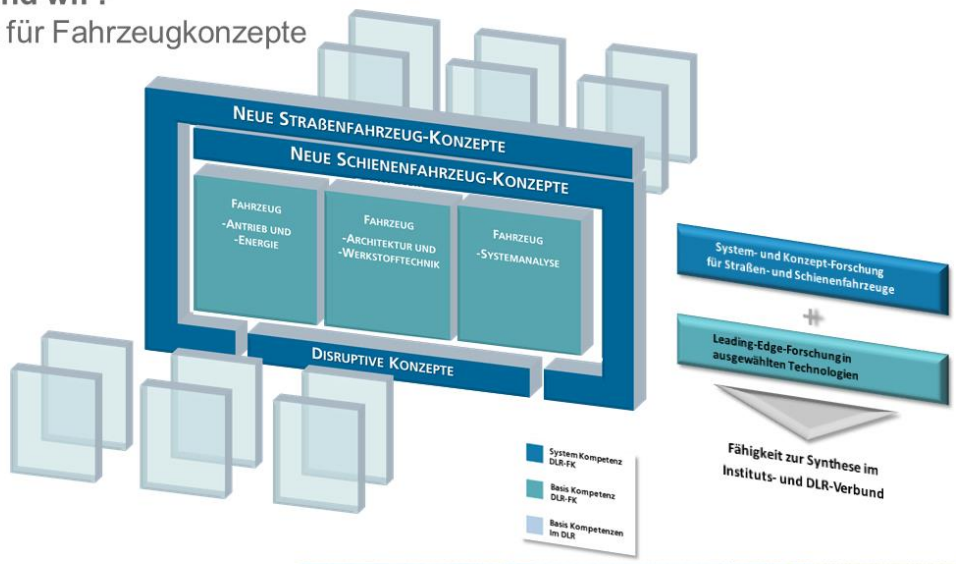
Wer sind wir?
Institut für Fahrzeugkonzepte

…im STEP Engineering Park…

…und in Berlin…

… und in der ARENA2036

Wer sind wir?
Institut für Fahrzeugkonzepte



Wer sind wir?
Kompetenzfeld

Institut für **Fahrzeugkonzepte**

Abteilung **Alternative Energiewandler**

Kompetenzfeld **Thermische Hochleistungsspeicher** für mobile Anwendungen

Tim Lanz

Veronika Jilg

Peter Vetter

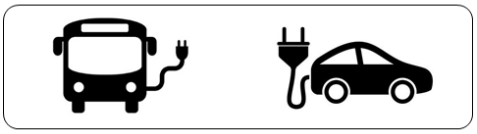
Werner Kraft

Motivation

Motivation
Elektrifizierung Verkehr

[1] [2]

Antriebsstrang
Trend



[3] [4]

[1]: menschen-in-dresden.de [2]: nw.de
[3]: de.fotolia.com [4]: www.pressebox.de

ÖPNV
- Laufende Erneuerung der Fahrzeugflotten
- Förderung der Anschaffung elektrifizierter Fahrzeuge
- Motivation der Verkehrsbetreiber einer lokal emissionsfreien Fahrzeugflotte

⇨ **Nahezu vollständige Elektrifizierung bis 2030**

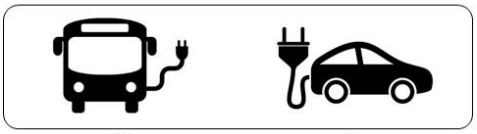
Individualverkehr
- Ziel 1 Mio. Elektrofahrzeuge bis 2022 (Elektro + Plug-In) (aktuell ca. 150 000; Stand 01/2019 laut KBA)
- Vorbehalte der Nutzer: hohe Kosten, geringe Reichweite

⇨ **Allmähliche Elektrifizierung über längeren Zeitraum**

Motivation
Elektrifizierung Verkehr

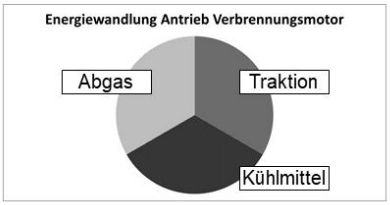
[1] [2]

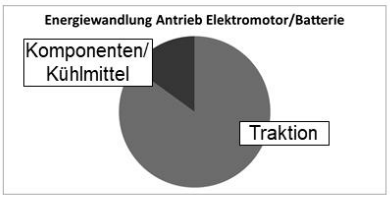
Antriebsstrang
Trend



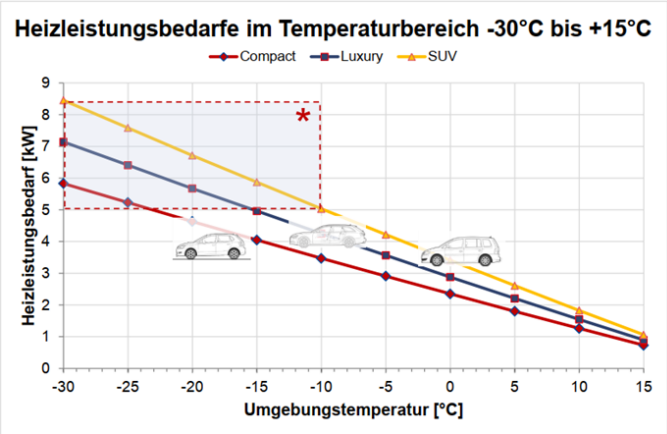
[3] [4]

[1]: menschen-in-dresden.de [2]: nw.de
[3]: de.fotolia.com [4]: www.pressebox.de





Motivation
Heizbedarf – Beispiel PKW



Quelle: Webasto – Notwendige Zuheizleistung unterschiedlicher Hybridisierungsstufen, VDI-Thermomanagement, 2014

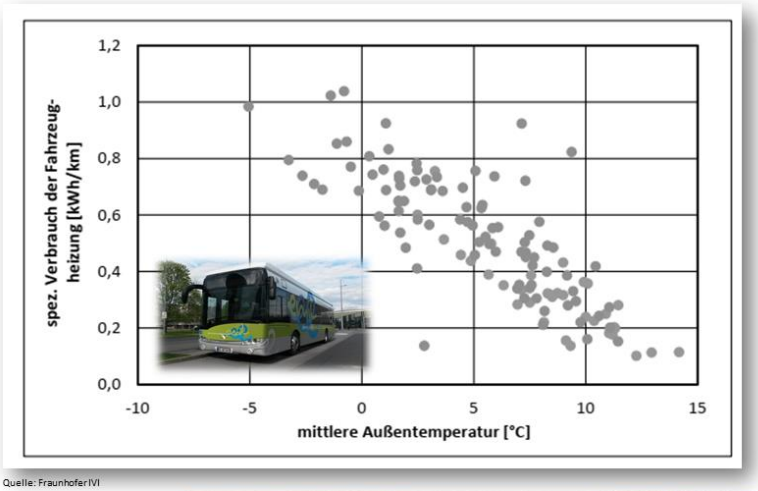
Beispiel Mitsubishi i-MiEV:

- Leistungsbedarf ohne Klimatisierung von ca. **7 kW** in Referenzzyklus mit Anteilen aus Stadt-, Überland- und Autobahn
- Heizleistung von ca. **4 kW** bei **-10 °C**

Anteil Heizleistung ca. 36 %

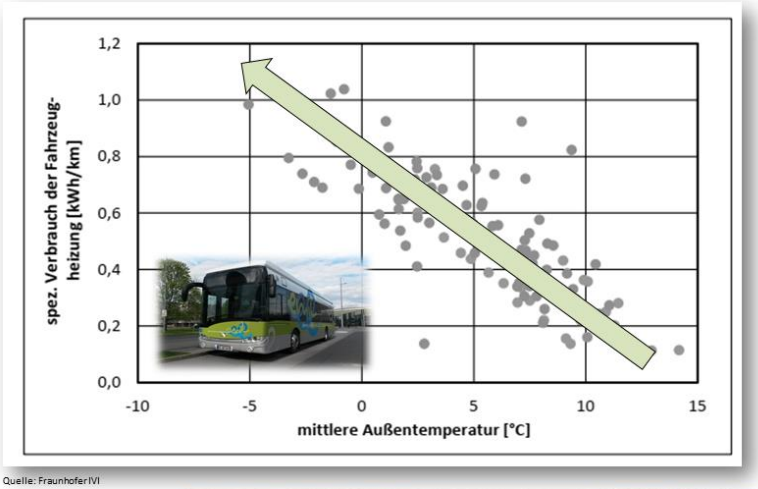
Quelle: ÖVK – Batterieelektrische Fahrzeuge in der Praxis, 2012

Motivation
Heizbedarf – Beispiel Bus



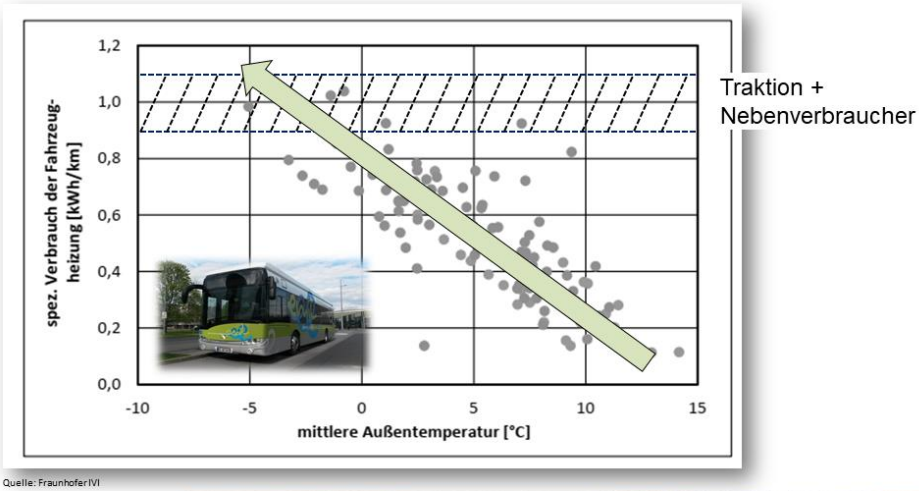
Quelle: Fraunhofer IVI

Motivation
Heizbedarf – Beispiel Bus



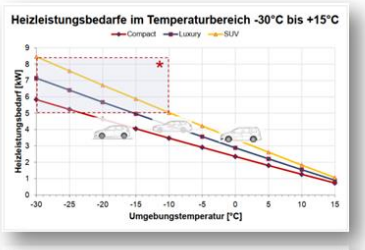
Quelle: Fraunhofer IVI

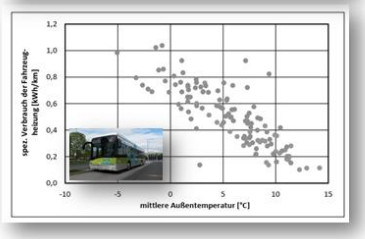
Motivation
Heizbedarf – Beispiel Bus



Quelle: Fraunhofer IVI

Motivation
Heizbedarf – Zusammenfassung





Heizwärmebedarf kann nicht durch
Abwärme Komponenten
Antriebsstrang bereitgestellt werden

Unabhängige Heizlösungen erforderlich!

Motivation
Stand der Technik - Heizsysteme

Elektrische Heizer
- Im PKW-Bereich nahezu ausschließlich PTC-Heizer
- Wandlung elektrischer Energie aus Batterie in thermische Energie
- Coefficient of Performance (COP) ≈ 0,9

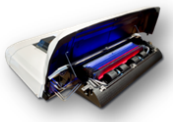
Quelle: Eberspächer

Quelle: Valeo

Kraftstoff-Heizgerät
- Wandlung chemischer Energie in thermische Energie
- Überwiegend Verwendung von Diesel als Kraftstoff
- Wirkungsgrad von 80 bis 85 %

Quelle: Eberspächer

Wärmepumpe
- Nutzung thermischer Energie aus Umgebung oder Kühlmittel
- Wandlung elektrischer Energie aus Batterie am Verdichter
- COP in Abhängigkeit der Temperatur der Energiequelle (COP ≈ 1 bis 4)
- Verwendete Kältemittel: R134a (GWP[1] 1430, seit 2017 verboten)
  R1234yf (GWP 4, entzündlich, Bildung Flusssäure)
  R744a bzw. CO2 (GWP 1)


Quelle: Konvekta

1: GWP = Global Warming Potential

Motivation
Stand der Technik - Heizsysteme

Elektrischer – Heizer
- Hoher Reichweitenverlust bei niedrigen Umgebungstemperaturen
- Nachteile einer hohen Batteriekapazität (Kosten, Masse/Volumen, Umweltaspekte)

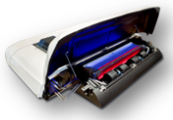
Quelle: Eberspächer

Quelle: Valeo

Kraftstoff - Heizgerät
- Lokaler Ausstoß von Schadstoffen und CO_2
- Verbrauch bis ca. 15 l pro 100 km Diesel (12 m – Bus)

Quelle: Eberspächer

Wärmepumpe
- Reichweitenverlust abgeschwächt bei moderaten Umgebungstemperaturen
- Hoher Reichweitenverlust bei niedrigen Umgebungstemperaturen
- Heizleistung nicht ausreichend bei Umgebungstemperaturen < 0 °C (R134a) bzw. < -10 °C (R744a)
- Zusätzlich elektrischer Heizer oder Dieselheizer notwendig


Quelle: Konvekta

⇨ **Keine zufriedenstellenden Heizlösungen verfügbar**

Lösungsansatz

Lösungsansatz
Verwendung thermischer Energiespeicher

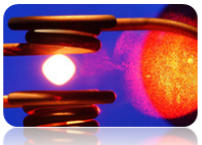
Traktionsbatterie
- Teure Komponente
- Relativ hohes Gewicht und Volumen
- Ökologische Auswirkungen ungeklärt

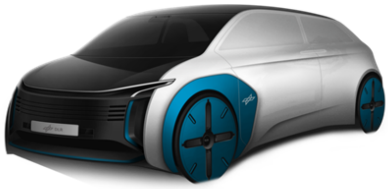
→ **Verwendung für Traktion**

[1]

Thermischer Speicher
- Potentiell günstig
- Potentiell klein / leicht
- Potentiell umweltfreundlicher als Batterie

→ **Verwendung für Beheizung**

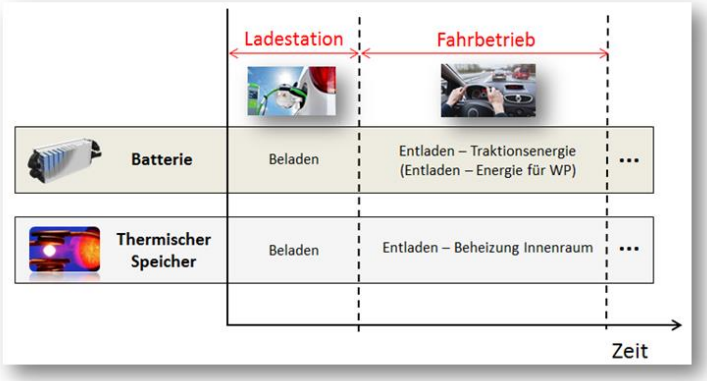




[1]: "Traction battery" (Online). Available: http://www.cenewsautomotive.com/sites/default/files/images/01-edit-photo-uploads/2014/2014-06-june/akku.png (Last access on 29th of August 2017).

Lösungsansatz
Verwendung thermischer Energiespeicher

- Bedarfsgerechte Beladung vor Fahrtbeginn
- Beheizung Innenraum während der Fahrt (alleiniges Heizsystem oder Ergänzung zur WP)



[1]: https://www.impulse.de/auto/stromtankstellen/2106427.html [2]: https://www.ndr.de/ratgeber/gesundheit/Auto-fahren-birgt-Gefahren-fuer-Allergiker,autofahren138.html

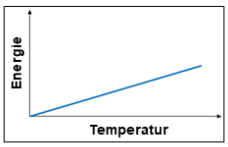
Thermische Energiespeicher

Thermische Energiespeicher
Sensible Thermische Energiespeicherung

Grundprinzip

Energieeintrag hat Temperaturänderung zur Folge
Spezifische Wärmekapazität **cp** als maßgebliche Stoffeigenschaft

$$Q = m \cdot \mathbf{cp} \cdot (\vartheta 1 - \vartheta 2)$$



Beispiele

[1]

[2]

[3]

Medium	Anwendungstemperatur [°C]	Spezif. Wärmekapazität [kJ/kgK]	Vol. Wärmekapazität [kJ/m³K]
Wasser	0 - 100	4,19	4175
Kies, Sand	0 - 800	0,71	1278 - 1420
Beton	0 - 500	0,8 – 1,2	1672 - 2074
Salzschmelze	150 - 450	1,3	1970 - 1725

[4]

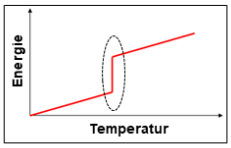
[1]: https://www.si-shk.de/strengere-daemmvorgaben-fuer-warmwasserspeicher/150/10004/338010
[2]: https://www.gesundheits-laden.de/Waermeflasche-Gummi-2Ltr-Doppellamelle
[3]: Vorlesungsunterlagen ITW – Thermische Energiespeicher
[4]: DLR Blog – 18.10.2015

Thermische Energiespeicher
Latente Thermische Energiespeicherung

Grundprinzip

Energieeintrag hat Phasenwechsel zur Folge
Schmelzenthalpie **hs** als maßgebliche Stoffeigenschaft

$$Q = m \cdot \mathbf{hs}$$

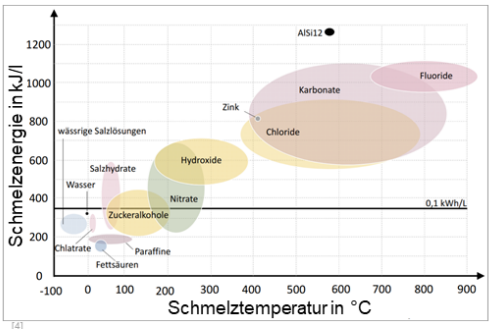


Beispiele

[2]

[1]

[3]



[4]

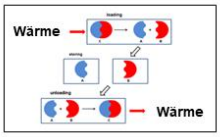
[1]: https://www.pearl.de/a-SD66-5005.shtml
[2]: https://www.ebay.de/itm/273404778464?ul_noapp=true
[3]: https://www.daserste.de/information/wissen-kultur/w-wie-wissen/sendung/2011/intelligente-fassaden-100.html
[4]: Mehling – "Latentwärmespeicher", BINE 4, 2002

Thermische Energiespeicher
Thermochemische Energiespeicherung

Grundprinzip

Reaktionsenergie eines chemischen Prozesses
Reaktionsenthalpie $\Delta_R H$ als maßgebliche Eigenschaft

$$\text{Reaktant 1} + \text{Reaktant 2} \leftrightarrow \text{Reaktionsprodukt} + \Delta_R H$$



Beispiele

[1]

[2]

Reaktion	Temperatur [°C]	Reaktionsenthalpie [kJ/kg]
Reversible Wasserabspaltung $CaCl_2 \cdot 2H_2O \leftrightarrow CaCl_2 \cdot H_2O + Dampf$ $Ca(OH)_2 \leftrightarrow CaO + Dampf$	258 479	555 1473
Reversible Zersetzung von Metallhydriden $MgH_2 \leftrightarrow Mg + H_2$	280 - 500	2885
Adsorption von Wasser und Silicagel *Silicagel + Dampf ↔ Silicagel feucht*	40 - 100	991

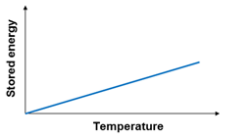
[3]

[1]: https://www.klimakoenner.de/erfuellungsoptionen/solar
[2]: https://eneff-industrie.info/projekte/2015/waerme-faehrt-mit-dem-sattelschlepper-zum-abnehmer/
[3]: Vorlesungsunterlagen ITW – Thermische Energiespeicher

Thermische Energiespeicher
Übersicht Grundprinzipien

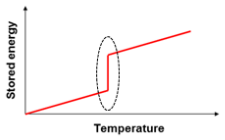
Sensible Wärmespeicherung
Energieeintrag hat Temperaturänderung zur Folge

$$Q = m \cdot \mathbf{cp} \cdot (\vartheta 1 - \vartheta 2)$$



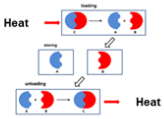
Latente Wärmespeicherung
Energieeintrag hat Phasenwechsel zur Folge

$$Q = m \cdot \mathbf{hs}$$

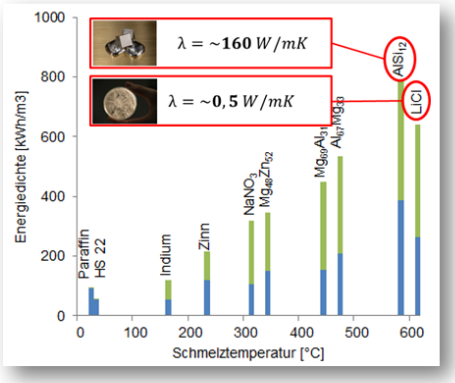


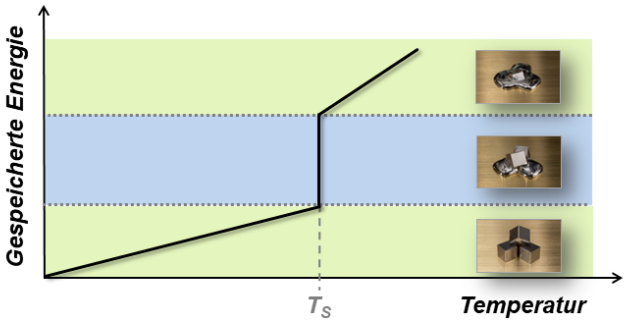
Thermochemische Wärmespeicherung
Reaktionsenergie eines chemischen Prozesses

Reaktant 1 + Reaktant 2 ↔ Reaktionsprodukt + $\mathbf{\Delta_R H}$



Thermische Energiespeicherung
Metallische Phasenwechselmaterialien





Stoffeigenschaften AlSi12
λ ≈ 160 W/mK
c_p ≈ 1000 J/kgK
h_s ≈ 511 kJ/kg
T_m ≈ 577 °C

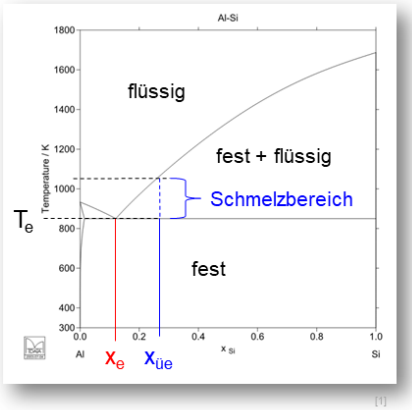
Thermische Energiespeicherung
Metallische Phasenwechselmaterialien

Potentiale

- Hohe Wärmeleitfähigkeit: ca. 50 bis 200 W/mK
- Definierter Schmelzpunkt bei eutektischer Zusammensetzung
- Keine Zersetzung bei Überhitzung
- Potentiell hohe Zyklenbeständigkeit

Herausforderungen

- Reaktivität im flüssigen Zustand
- Bildung von Lunker und Poren



[1]

[1]https://www.researchgate.net/publication/321576842_Faceted_and_dendritic_morphology_change_in_alloy_solidi_cation/figures?lo=1[Last access on 15rd of March 2019].

Thermische Energiespeicherung
Metallische Phasenwechselmaterialien

Materialentwicklung im Labormaßstab

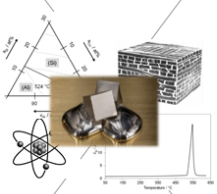
Materialuntersuchung im Anwendungsmaßstab

DLR Institut für Materialphysik im Weltraum

DLR Institut für Bauweisen und Strukturtechnologie

DLR Institut für Fahrzeugkonzepte

- Metallisches Phasenwechselmaterial
  - Datenbank Screening
  - Thermophysikalische Analyse (DSC[1], LFA[2])
- Einhausungsmaterial
  - Phasendiagramm-Analyse
  - Reaktivitätsanalyse (Reaktionsofen, Elektronenmikroskop, Röntgentomografie, Benetzungsanalyse)

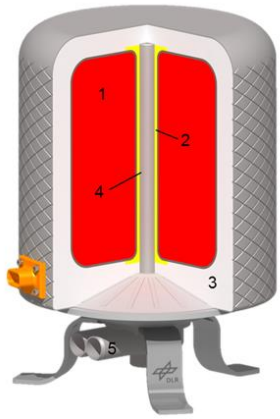


- Metallisches Phasenwechselmaterial + Einhausungsmaterial
  - Thermophysikalische Charakterisierung (Prüfstand für Wärmespeichersysteme)
  - Zyklierversuche für Langzeitverhalten
- Einhausungskomponente
  - Design mit Erfahrung aus Material- und Konzeptentwicklung

1: DSC = Dynamische Differenzkalometrie
2: LFA = Laser Flash Analyse

Speicherkonzept MonoTherm

Speicherkonzept
MonoTherm



Speichermaterial
und Einhausung

Elektrischer
Widerstandsheizer

[1]

Wärmedämmung

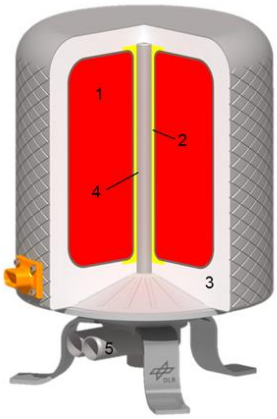
[2]

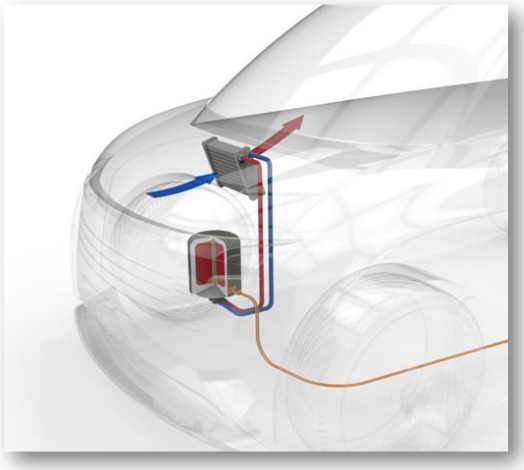
Wärmeaustragssystem oder
Luft - Wärmeübertrager

[3]

(1): https://www.hotset.com/de/komponenten/heizrod-heizpatronen/; Letzter Zugriff: 15.03.2019
(2): https://www.promat-hpi.com/de-de/anwendungen/energiegewinnung/solar/microtherm-mps-parabolrinnen-de; Letzter Zugriff: 15.03.2019
(3): https://www.chemanager-online.com/themen/thermische-verfahrenstechnik/verdampfung-eine-zentrale-grundoperation-stellt-sich-vor; Letzter Zugriff: 15.03.2019

Speicherkonzept
MonoTherm





Potentiale

Potentiale
Thermischer Hochleistungsspeicher

Potentiale gegenüber Batterie

	THS	Batterie
Kosten	< 60 €/kWh	> 150 - 700 €/kWh
Grav. Energiedichte	> 200 Wh/kg	ca. 90 – 130 Wh/kg
Vol. Energiedichte	> 300 Wh/l	ca. 100 – 250 Wh/l

- Verzicht auf kritische Rohstoffe (Lithium, Kobalt)
- Hohe Recyclebarkeit / Verwendung recycelter Rohstoffe
- Geringerer Energieaufwand für Herstellung (bis Faktor 20 bei Verw. recyceltes AlSi)
- Höhere Langzeitstabilität (muss noch validiert werden)

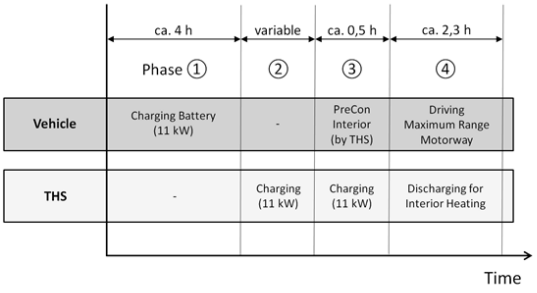
[1]

[1]: https://www.filcom-technik.de/hd-kolben-komplett-fur-mahle-kolbenkompressor-50179892.html, Letzter Zugriff: 15.03.2019

Potentiale
Referenzszenario

Auslegung MonoTherm-Speicher für:

- Langestreckenfahrt auf Autobahn bei -10 °C
- Winterliche Bedingungen mit Heizleistung von ca. 5 kW
- Beheizung Innenraum mit thermischen Speicher



[1]

[2]

1: Beladen der Batterie

2: Beladen des thermischen Speichers

3: Vorkonditionierung Innenraum

4: Zurücklegen der maximalen Reichweite
Angenommener Verbrauch Traktion: 20 kWh/100 km
Angenommene Batteriekapazität: 45 kWh

[1] : https://deavita.com/dekoration/weihnachtsdeko-ideen/weihnachtsbaum-festlich-schmucken-spass-fur-die-ganze-familie.html [Last access on 23rd of October 2018]
[2]: https://www.hotelaustria.com/[Last access on 23rd of October 2018].

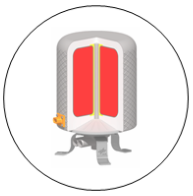
Potentiale
Referenzszenario

Auslegungsbedingungen

- Langstreckenfahrt auf Autobahn
- Gleiche Reichweite durch thermischen Speicher oder Batterie + PTC
- Benötigte Heizenergie ca. 11,25 kWh

[1]

VS.



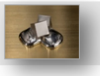
Masse	95 kg	- 42 % →	55 kg
Volumen	50 l	- 26 % →	37 l
Kosten	1856 €	-57 % →	792 €

[1] https://publicdomainvectors.org/de/kostenlose-vektorgrafiken/ClipArt-von-Braun-und-schwarz-Akku/35235.html [Letzter Aufruf 06.06.2019]

Annahme: Batterie + PTC: COP = 0,9; q_{Batt} = 130 Wh/kg; q_{Luft} = 250 Wh/l; k = 150 €/kWh

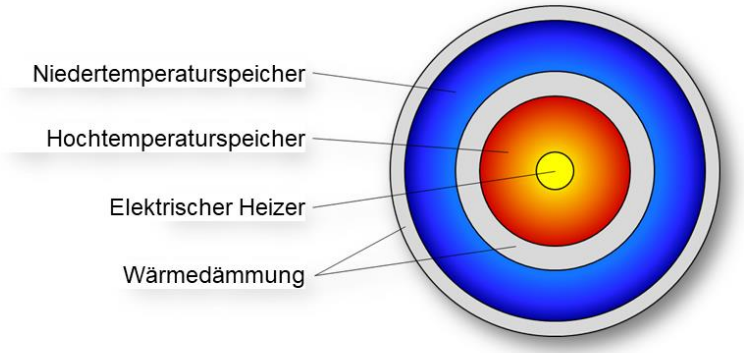
Speicherkonzept DuoTherm

Speicherkonzept DuoTherm
Grundprinzip

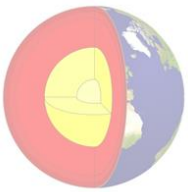
Latente Wärmespeicherung	
Niedertemperaturspeicher	**Hochtemperaturspeicher**
	
Niedrige spezifische Wärmekapazität	Hohe spezifische Wärmekapazität
Niedrige thermische Leistung	Hoher thermische Leistung
Gute Kopplungsmöglichkeit für Kühlsystem	Hohe thermische Verluste

VERTRAULICH

Speicherkonzept DuoTherm
Grundprinzip

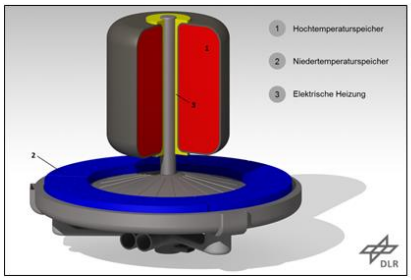


(DE102015111235 A1)



VERTRAULICH

Speicherkonzept DuoTherm
Anwendung



DLR + ZAE BAYERN

Anwendungsmöglichkeiten
- Batteriekühlung
- Thermische Verluste Ladegeräte

⇨ Energetisches Potential in Abhängigkeit der Randbedingungen

DLR VERTRAULICH

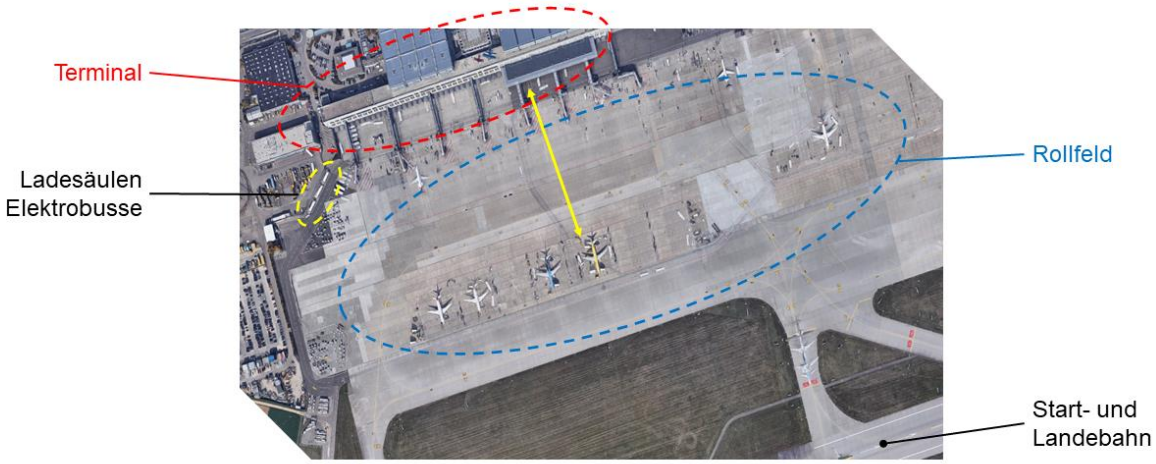
Aktuelles aus dem Projekt THS-Bus

DLR

Projekt THS-Bus
Übersicht

Ziel: Aufbau und Untersuchung Funktionsmuster für Flughafenbus
Zeitraum: 07/2018 bis 06/2021
Projekthomepage: Aktuell noch im Aufbau

Projekt THS-Bus
Übersicht Betriebsszenario



Projekt THS-Bus
Übersicht Elektrobus und Ladeinfrastruktur

Bus
- Elektrobus der Fa. COBUS
- Batteriekapazität ca. 84 kWh, Lithium-Titan-Oxid-Batterien
- Max. ca. 110 Passagiere, überwiegend Stehplätze
- Getrennte Belüftung und Klimatisierung von Fahrer- und Fahrgastraum
- Beheizung mit elektr. Heizer (20 kW), zusätzlich elektr. Standheizer (7 kW)

[1]

Ladeinfrastruktur
- Hersteller Siemens
- Zentrale Anordnung, insgesamt 16 Ladepunkte
- 690 VDC, 60 kW über Stecker
- 400 VAC, 11 kW über Stecker

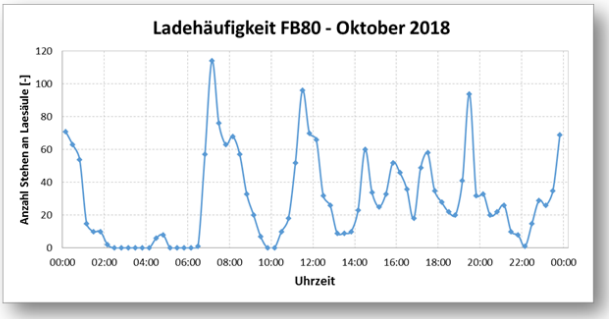
[2]

[3]

[1]: https://www.philipsschirec.de/portfolio/cobus/
[2]: https://www.cobus-industries.de/produkte/e-cobus/
[3]: https://www.stuttgarter-nachrichten.de/inhalt.flughafen-stuttgart-elektrobus-bringt-passagiere-zum-jet.f6a63b6-4c74-4740-8a41-1cd7554f4b15.html

Projekt THS-Bus
Betriebsszenario

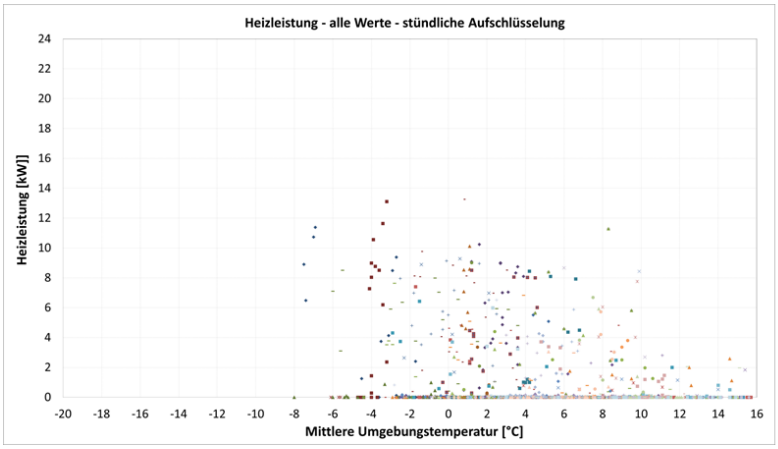
Fahr- und Ladeszenario
- Pro Tag etwa 3 bis 4 Zwischenladungen
- Abstand zwischen Ladungen ca. 2 bis 4 Stunden
- Ladedauer im Mittel ca. 30 Minuten
- Lange Standzeit über Nacht ohne Beladung
- Sehr niedrige Durchschnittsgeschw. (4,6 km/h)
- Sehr lange Türöffnungszeiten



➢ **Beladung THS über Nacht (ca. 4 bis 5 h)**

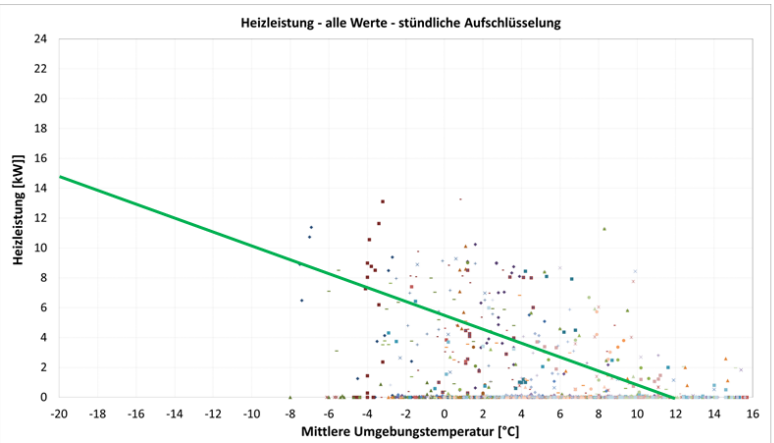
➢ **Bedingt auch Zwischenladung tagsüber möglich**

Projekt THS-Bus
Messung Heizleistung



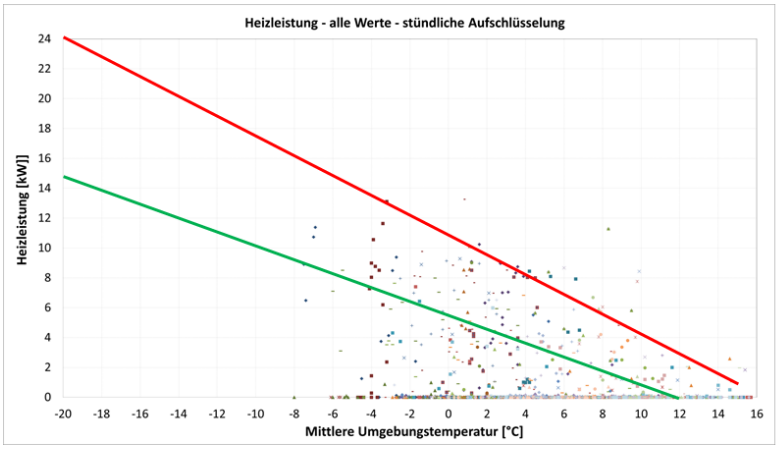
- **Häufig keine Heizleistung**
  - Bus war nicht in Betrieb
  - Kein Heizbedarf
- **Hohe Varianz der Heizleistung**
  - Türöffnung
  - Sonneneinstrahlung
  - Windgeschwindigkeit
  - Standort Bus
  - Anzahl Fahrgäste
  - Komfortbedarf Fahrer

Projekt THS-Bus
Messung Heizleistung



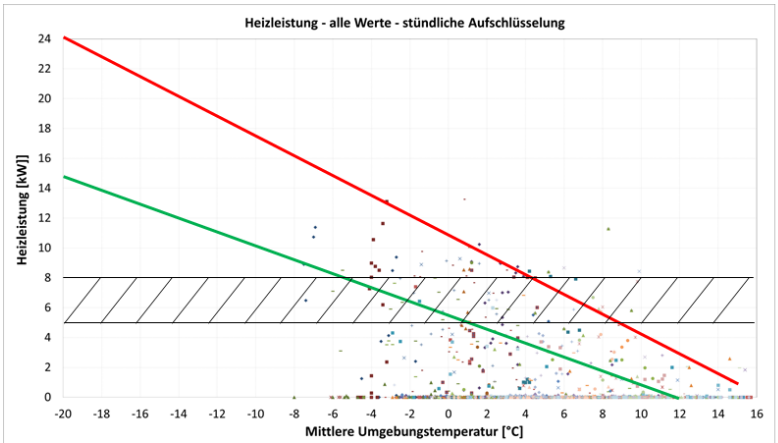
- **Mittelwert Heizleistung**
  - 4 kW @ +5 °C
  - 6 kW @ 0 °C
  - 8,5 kW @ -5 °C
  - 11 kW @ -10 °C
  - 13 kW @ -15 °C
  - 15 kW @ -20 °C

Projekt THS-Bus
Messung Heizleistung



- **Mittelwert Heizleistung**
  - 1 kW @ +10 °C
  - 4 kW @ +5 °C
  - 6 kW @ 0 °C
  - 8,5 kW @ -5 °C
  - 11 kW @ -10 °C
  - 13 kW @ -15 °C
  - 15 kW @ -20 °C
- **Maximalwert Heizleistung**
  - 4 kW @ +10 °C
  - 8 kW @ +5 °C
  - 11 kW @ 0 °C
  - 14 kW @ -5 °C
  - 17 kW @ -10 °C
  - 21 kW @ -15 °C
  - 24 kW @ -20 °C

Projekt THS-Bus
Messung Heizleistung



- Leistungsbedarf für Traktion und sonstige Verbraucher zwischen 5 und 8 kW
- Heizleistungsbedarf bereits bei moderaten Umgebungs-temperaturen ähnlich hoch wie Leistungsbedarf für Traktion
- Höherer Heizleistungsbedarf bei niedrigen Umgebungs-temperaturen im Vergleich zum Leistungsbedarf für Traktion

Weitere Anwendungsmöglichkeiten

Weitere Anwendungsmöglichkeiten

[1]

Bahn

[3]

Industrieprozesse

[6]

[5]

Gebäudeheizung / Erneuerbare Energien

[2]

Schiff

[4]

Portable Wärme

[1] : https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Bahn_aus_Zusatzzeichen_1024-15.svg; Letzter Zugriff: 15.03.2019
[2]: https://www.royalcaribbean.com/deu/de/cruise-ships; Letzter Zugriff: 15.03.2019
[3]:https://de.dreamstime.com/stock/black-factory-icon-1764723.html; Letzter Zugriff: 15.03.2019
[4]: https://de.kisspng.com/png-dhoryk/; Letzter Zugriff: 15.03.2019
[5]: https://de.kisspng.com/png-v1onbp/; Letzter Zugriff: 15.03.2019
[6]: https://gamesagoddon.com/stock/media?id=33814672/; Letzter Zugriff: 15.03.2019

Werner Kraft M.Sc.

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)
Institut für Fahrzeugkonzepte
Pfaffenwaldring 38-40
70569 Stuttgart
werner.kraft@dlr.de
+49 (0)711 6862 - 273

Short-Paper zur Konferenz „TRA Helsinki 2020“

Proceedings of 8th Transport Research Arena TRA 2020, April 27-30, 2020, Helsinki, Finland

Thermal high-perfromance storages as heating systems for electric buses

Werner Kraft[a]*, Anthony Rawson[b], Veronika Stahl[a], Peter Vetter[a], Florian Kargl[b], Michael Sonnekalb[c], Pascal Best[c]

[a]*Institute for Vehicle Concepts – German Aerospace Centre (DLR), Pfaffenwaldring 38-40 Stuttgart 70569, Germany*
[b]*Institute for Material Physics in Space – German Aerospace Centre (DLR), Linder Höhe, Cologne 51147, Germany*
[c]*Kamekta AG, Am Nordbahnhof 5, 34613 Schwalmstadt, Germany*

Abstract

Heat generated by combustion engines in vehicles may be seen as a necessary inefficiency, but it is valuable for cabin heating purposes. Electric vehicles are efficient in energy conversion from battery to mechanical drive. However the absence of plentiful waste heat presents a challenge in efficiently maintaining appropriate temperatures for passengers and sensitive equipment. Direct resistive heating or heat pump operation draws battery capacity that could be used for driving, reducing the range of the vehicle. Using combustion heaters for cabin heating might maintain range, however local emissions are generated. A Thermal High Performance Storage is proposed to overcome these issues. Using an aluminium-silicon eutectic alloy, Thermal High Performance Storages can provide an energy dense, economical solution for space heating in electric vehicles. A case study of electric buses at the Stuttgart Airport is utilised to demonstrate the benefits of Thermal High Performance Storages and propose future research opportunities.

Keywords: Thermal Storage; Thermal Management; Metallic Phase Change Materials; Electric Buses; Public Transport

* Werner Kraft. Tel.: +49-711-686-2273;
E-mail address: Werner.Kraft@dlr.de

1.1.1. Nomenclature

DLR	German Aerospace Center
mPCM	metallic **P**hase Change Material
THS	**T**hermal **H**igh **P**erformance Storage
ZAE	**B**avarian Center for Applied **E**nergy Research

2. Introduction

Current figures suggest that the uptake of electric vehicles in Germany is progressing relatively slowly. Bandelin (2018) wrote that although the number of new electric passenger vehicle registrations has increased in recent years, the uptake rate is not sufficient to achieve the goal of 1 million electric vehicles by 2022 desired by the German government. This stems from high capital cost, lack of availability and modest driving range of the vehicles.

Similar to electric vehicles for private transport, the adoption of electric vehicles for public transport has been slow. According to the most recent figures from the German Federal Motor Transport Authority (2018), only 0.23% of all buses registered in Germany currently have a local emission free, electric drive. However policy decisions are acting to accelerate the implementation of electric public vehicles. A funding initiative from the German government, promoting the purchase of buses with electrified drives, is already established. Fully electrified buses are subsidised by up to 80 % and plug-in hybrid electric buses by up to 40 % of the extra investment cost compared to conventional diesel buses. Additionally, charging infrastructure and extra measures necessary for the implementation of electric buses (e.g. qualification of mechanics or workshop infrastructure) is being promoted, as published by the German Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (2018).

Relative to electric cars, comparatively low ranges limit the operability of electric buses. According to Fig. 1, a range of about 400 km is necessary to cover 99 % of the routes operated by buses in Germany's public transport system. Looking at the range of currently available electric buses like the eCitaro (manufactured by EvoBus), a maximum range of about 280 km at ideal conditions can be reached according to EvoBus GmbH (2019), which is sufficient to cover about 70 % of all routes. However, operating the bus during non-ideal conditions can lead to tremendous issues in operation. Especially during winter conditions when the passenger space must be heated. Measurements of ÜSTRA (2018) show that heating requirements on winter days can be significantly higher than that required for driving if the heat is provided by electric heaters using the energy from the battery. The range of the aforementioned eCitaro would be cut in half due to interior heating if these assumptions were utilized. The vehicles range would fall below 150 km, the minimum range a city bus must offer. Due to this, the bus wouldn't be able to cover the range of any route without being recharged en route.

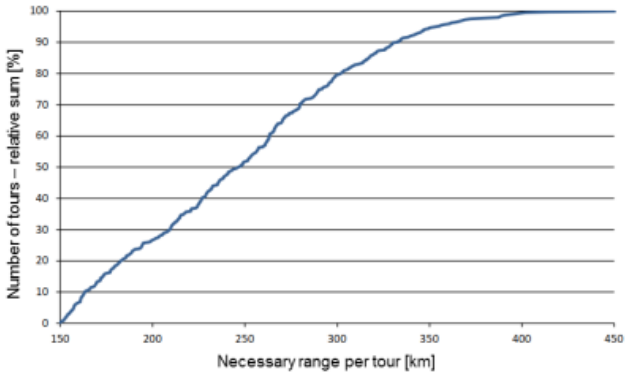


Fig. 1: Relative sum of the number of tours over the range per tour by Knote (2017)

To prevent the [illegible] oin heating in electric

applications. The shown values for the THS are a rough estimate derived from the concept given in the introduction.

Table 1: Relevant properties of Thermal High Performance Storages and common battery systems, used in electric buses

Property	Thermal Storage	Battery System	Reference
Specific cost	< 60 €/kWh	750 - 1000 €/kWh	Knote (2017)
Gravimetric energy density	> 200 Wh/kg	127 - 143 Wh/kg	AKASOL (2019)
Volumetric energy density	> 300 Wh/l	185 Wh/l	AKASOL (2019)

The cost of a THS is estimated as less than 60 €/kWh, which is less than one tenth of the cost of current battery systems used in electric buses. Development in battery technology in the future is unlikely to reduce the specific cost below that of thermal storage. Considering the cost of the whole vehicle may help to emphasize the economic benefit of THS. Knote estimated in 2017 that a conventional 12 meter diesel bus costed approximately € 240,000 whilst an equivalent electric bus costed approximately € 500,000, more than twice as much. These high costs are primarily due to expensive drive batteries. Assuming a battery price of 750 € / kWh and a battery capacity of about 250 kWh (typical for current electric buses, as shown by BMVI (2019)), the battery would contribute costs of 187,500 €, which is approximately 38% of the total cost of the bus. Should the battery capacity afforded to heating be replaced with THS, a significant reduction in the overall cost of an electric bus could be realised.

The gravimetric energy density of a THS using Al-12.7 wt. % Si as mPCM exceeds that of a typical drive battery by a factor around 1.5, reaching values of potentially more than 200 Wh/kg. The volumetric energy density of a THS (estimated as more than 300 Wh/l) exceeds that of typical batteries by a factor of more than 1.6. Replacing the battery capacity required for heating by a THS therefore could decrease overall mass and volume. Mass reduction could lead to lower energy consumption for traction, increase the maximum number of allowed persons in a bus or create extra space that could be used in a variety of positive ways.

In addition to the economic and technological opportunities, several environmental benefits could result from the reduction of battery capacity accompanied with the use of a THS to heat electric buses. The elements required for construction of battery cells are relatively rare compared to the materials used in the proposed THS. The production process of batteries also suffers from a high embodied energy of 97 to 180 kWh/kW as shown by Romare et. al. (2017). If the THS were made from recycled sources (and using the numbers of Hustadt et al. (1995)), the embodied energy would be around 5% of the numbers above. In addition, the metals used in batteries are difficult to recycle. Thermal storage mPCM systems may be produced with existing casting methods from recycled raw material and salvaged at the end of the design life. As a final point, the mass production of batteries in the future poses significant challenges regarding the availability of raw materials, as described by Lindinger (2018) and the Science Media Center (2017).

3.2. Case Study – Thermal High Performance Storage for electric buses at the Stuttgart Airport

3.2.1. Required Heating Capacity

As mentioned in the introduction, supplanting the battery heating duty with a THS removes the most energy intensive auxiliary draw from the battery. This leaves the energy storage in the battery for vehicle traction and other much less energy intensive functions. A recent example of the energy required for heating compared to traction and other loads is shown in Fig. 3. The diagram plots, as points, the average heating capacity per day of an electric airport bus at the Stuttgart airport as a function of ambient temperature. From this data an average heating capacity is calculated, represented by the linear regression plotted in red. Additionally, the minimum and maximum loads for traction and other consumption, 5 and 8 kW respectively, are represented by the dashed lines. All data shown in the diagram are measurements made by the DLR.

buses with a diesel combustion heating system. These buses do not suffer a range reduction from heating but can no longer be considered as emission-free. In traffic dense urban cores air quality can be severely degraded due to combustion emissions, negatively affecting quality of life, as outlined by the Environmental Action Germany (2018). The use of combustion for heating negates the air quality benefits of an electric vehicle. Due to this, the use of combustion heaters is not regarded as a sustainable solution for interior heating.

The latest developments regarding cabin heating include the use of heat pumps, of particular interest are those using CO2 (R744a) as the refrigerant. Heat pumps provide heat more efficiently than resistive heaters, however they still draw power from the drive battery. Additionally, at ambient temperatures of less than -10 ° C, the performance of a heat pump system is typically insufficient to meet heating requirements in a bus, as shown by Valeo (2017). Therefore, a reserve heater (diesel heating system or electric heater) is required to keep the cabin temperature at a comfortable level.

Since the current state of the art heating solutions face the described limitations, recent work at the German Aerospace Centre (DLR) has focused on technology, where small, light and cost effective thermal storage can provide cabin heating. This can remove the need for additional battery draw or the introduction of diesel heating in the vehicle. A common aluminum-silicon alloy, ubiquitous in many cast components (including internal combustion engine pistons), has proven to be an excellent candidate for thermal storage as already mentioned by several authors like Kotzé (2014) or Kraft (2016). The alloy (Al-12.7 weight % Si, referred to as Al-12.7 wt. % Si henceforth) may be heated from room temperature, through the melting point, up to 650 °C storing heat in temperature change and the phase transformation. When used in this way the alloy might be referred to as a metallic phase change material (mPCM). A potential arrangement for thermal storage utilizing an mPCM is shown in Fig. 1 below:

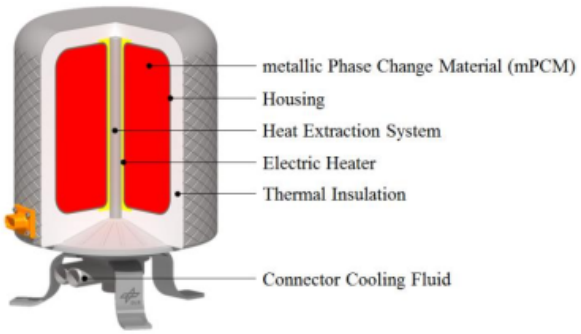


Fig. 2: Potential arrangement showing the relevant components of a Thermal High Performance Storage as already published by Kraft et. al. (2018)

It should be mentioned that the arrangement above is conceptual and provided to demonstrate the necessary components of a Thermal High Performance Storage (THS). Geometry, design and specification of the components as well as the overall assembly are part of a continuous development process and depend strongly on the assumed boundary conditions of the reference scenario.

3. Discussion

3.1. Potentials of Thermal High Performance Storages

The advantages of thermal storage in electric vehicles can be framed quantitatively in driving range recovery, space or mass requirements and cost reduction, and qualitatively in terms of environmental and social benefits. Reduction of the volume and mass required for heating systems can have a positive impact on the functionality and operating range of electric buses. Lowering the cost of electric buses will enable increased employment in public transport networks. The environmental and social benefits of improved air quality and personal mobility that stem from local emission free buses are also considerable. Table 1 shows the specific cost, gravimetric energy density and volumetric energy density of the THS Storage and of battery systems, currently used in bus

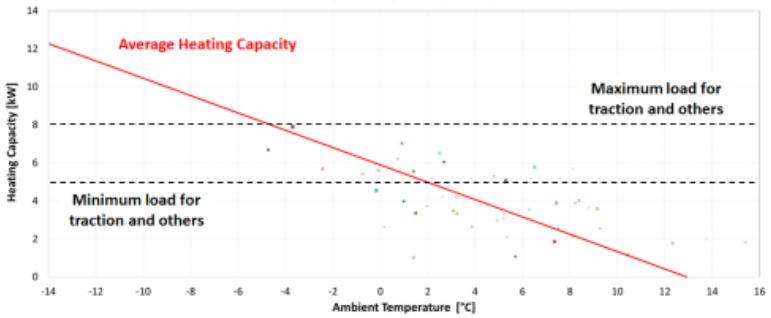


Fig. 3: Heating Capacities and loads for traction and others in dependence of the ambient temperature, for an airport bus at the Airport Stuttgart – data elevated by own measurements

It can be seen, that the average heating capacity equals the load for traction at only moderate temperatures between -4 °C and +2 °C. With decreasing temperature, the ratio changes and the heating capacity exceeds that for traction. Since the buses are currently heated with electric resistance heaters, range can be dramatically cut to much less than half that reached at ambient temperatures. For example, at an ambient temperature of -10 °C, the heating capacity would account for 57 % to 65 % of the buses overall energy consumption.

Exceptionally high heating capacities not shown in the diagram were also detected. Reasons for high heating capacities occurring were for example long door opening times, a cold start for a bus parked outside overnight, wind chill or a higher comfort demand from the driver (the driver's cabin is heated separately from the passenger's cabin). For an ambient temperature of 0 °C the maximum detected heating capacity was 11 kW, for -5 °C, 14 kW, for -10 °C 17.5 kW and for -14 °C 20 kW. Heating capacity can significantly exceed the average rates on overall energy consumption shown before.

3.2.2. Operating scenario of the Stuttgart airport buses

Besides the measurement of heating capacity, an analysis of the operating scenarios of the Stuttgart Airport buses was performed. The driving times, charging times, charging power and other data were measured and analysed. The main results of those studies are the following:

- The start of service was between 5:15 a.m. and 5:30 a.m.
- The end of service was between 10:15 p.m. and 0:30 a.m.
- *Opportunity charging* during the day occurred mostly 4 to 5 times from 11 to 45 minutes with a maximum charging power of 60 kW (limit of the infrastructure) and an average charging time of 28,5 min
- Drive services between opportunity charging events during the day lasted around 2 to 3 hours
- *Night charging* after the last driving service was up to 1 hour with a maximum charging power of 60 kW
- Charging is finished around 4 hours before the start of service in the morning; however busses are still connected to the charging infrastructure

Out of this data, two different operating scenarios for the THS, called *opportunity charging* and *night charging*, can be derived. Designing for the *opportunity charging* scenario required the THS to heat up the interior within the driving periods for a maximum of 3 hours. Recharging afterwards would be done at the charging stop. The charging time is variable in dependence of the required heating capacity. For a heating capacity of 11 kW and a resulting energy amount of 33 kWh (compare next chapter), it would be 33 minutes. Within Fig. 4, the combination of those two periods is named with the letter C. C is executed n times until the end of service. The *night charging* scenario necessitated the THS to heat up the interior over the whole day of operation, which was a maximum of about 19 hours. Afterwards, the THS would be recharged until the beginning of service the next day. Both scenarios are visualized in Fig. 4 and Fig. 5.

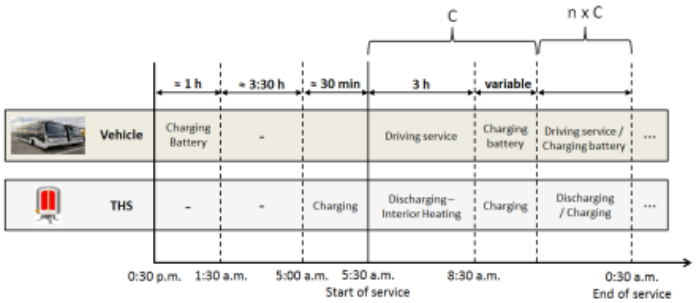


Fig. 4: Sequences of the scenario *opportunity charging*

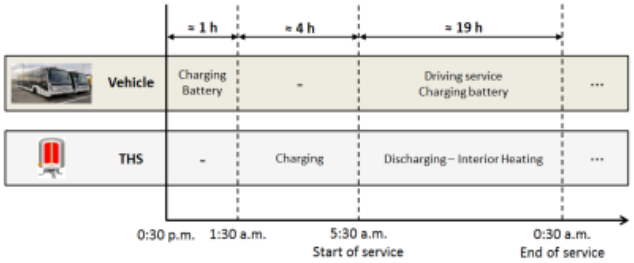


Fig. 5: Sequences of the scenario *night charging*

3.2.3. Comparison of the current heating system to the Thermal High Performance Storage

For both scenarios as described before, a rough estimate of the THS' properties was conducted with a design tool, the Dymola/Modelica software. This enabled a comparison of the THS to the properties of a battery offering the same capacity. Climatic conditions were considered to calculate the THS properties. Out of a data set provided by DWD (2018), the lowest temperature expected at Stuttgart Airport is -11.2 °C and the lowest day average temperature is expected to be -7.5 °C. Taking into account both temperatures defines the required heating capacities. The simple model derived from Fig. 3, leads to values of 11 kW for -11.2 °C and 9.2 kW for -7.5 °C. Combining these values with the relevant heating duration gives storage capacities of 175 kWh for night charging and 33 kWh for opportunity charging. To complete the required assumptions to design a THS, a maximum electrical power for heating of 60 kW was defined (matching the charging infrastructure) and a heat extraction rate of 18.25 kW was assumed (matching the maximum required heating capacity at -11.2 °C). The calculated properties of a THS for both scenarios and the properties of an equivalent battery are shown in table 2.

Table 2: Relevant properties of Thermal High Performance Storages and common battery systems, designed for both scenarios

Property	Night charging		Opportunity charging	
	THS	Battery	THS	Battery
Capacity	175 kWh	175 kWh	33 kWh	33 kWh
Mass	717 kg	1224 -1378 kg	155 kg	231 kg - 260 kg
Volume	471 l	946 l	107 l	178 l
Grav. energy density	244 Wh/kg	127 - 143 Wh/kg	213 Wh/kg	127 - 143 Wh/kg
Vol. energy density	371 Wh/l	185 Wh/l	308 Wh/l	185 Wh/l
Estimated cost	10500 €	131250 € - 175000 €	1980 €	24750 € - 33000 €

It can be seen that in both scenarios the THS offers a system with a lower mass, lower volume and higher energy density at a reduced cost. The THS cost estimate can be considered conservative as it disregards scaling effects, where higher capacity can lead to lower cost. Since the cost estimation was performed with a constant

assumption of 60 €/kWh, no scaling effects are expressed within the shown numbers. A more detailed cost estimation could demonstrate additional cost savings due to these scaling effects.

4. Conclusion and outlook

Thermal High Performance Storage represents a new solution for interior heating of electric buses. Its potential to overcome the shortcomings of current heating solutions such as local emissions (fuel heater) and range reduction (electric heater, partially heat pump) has been discussed. By replacing battery capacity with a Thermal High Performance Storage the investment costs for electric buses and the battery mass and volume can be reduced. A real world application at the Stuttgart Airport was presented demonstrating the potential of thermal storage for two potential operation strategies: *opportunity charging* and *night charging*. These two derived scenarios provided a basis to calculate the properties of the Thermal High Performance and compare them to an equivalent battery system. These scenarios give an insight to performance in city public transport networks.

Future research on Thermal High Performance Storages aims to adapt the shown concept to a more vehicle friendly design for application in buses. A modular storage concept is currently in development. Additional design tools are being created to make a more precise design possible, along with the introduction of an optimized standard designing process to quickly adapt the concept to new vehicles or conditions.

The DLR institutes of Vehicle Concepts and Material Physics in Space are currently involved in several projects with the goal of improving the technology. Projects including the 'THS Bus', 'Next Generation Car' and 'Lathe.Go' show the range of applications available (car, small buses, airport buses) and the capabilities of the DLR institutes and their project partners.

In addition to high temperature thermal storage in metals, the DLR is working together with the Bavarian Center for Applied Energy Research (ZAE) on a combined heat storage system (DuoTherm). This device combines high and low temperature storage materials to increase the efficiency of space heating. Waste heat generated during rapid battery charging could be captured in a low-temperature storage material surrounding the high temperature storage, to improve thermal insulation and may be used for space heating purposes. An investigation of this storage concept for a bus application will be performed in the near future.

Furthermore, DLR cooperates with Konvekta within the THS Bus project. Konvekta has already developed and tested a fast-charging latent heat storage system for an electric city bus in cooperation with the Fraunhofer IVI as part of the Heat2Go project. In this heat storage system, a paraffin wax is used as a phase change material. It is operated at a lower temperature level compared to the aforementioned thermal high performance storage, offering an energy density of more than 30 Wh/kg, as described by Best (2019).

References

AKASOL. (2019). Data-Sheet 15 OEM 50 PRC. Darmstadt: Akasol.

Bandelin, P. (2018). *1 Million Elektro-Pkw bis 2020: Studie hält Ziel für utopisch*. Von https://aiomag.de/1-million-elektro-pkw-schafft-deutschland-die-e-mobilitaetsziele-9321 abgerufen

Best, P. (2019). Entwicklung einer modularen und schnellladefähigen Wärmespeicherheizung für vollelektrische Stadtbusse. *Tagung Fahrzeugklimatisierung*. Essen: Konvekta AG.

BMVI. (2019). Marktübersicht Fahrzeuge und Infrastruktur - Programmbegleitforschung Bus. NOW Gmbh.

Environmental Action Germany. (2018). *Legal Actions for Clean Air*. Von https://www.duh.de/fileadmin/user_upload/download/Projektinformation/Verkehr/Luftreinhaltung/2018-06-15_Right-to-Clean-Air_Europe_Backgroundpaper_english.pdf abgerufen

EvoBus GmbH. (2019). Omnibus - Der vollelektrische Mercedes-Benz eCitaro - Special Edition. Stuttgart: EvoBus GmbH.

German Federal Ministry for the Environment, Natere Conservation and Nuclear Safety. (26. Februar 2018). *Das Bundesumweltministerium fördert Elektrobusse*. Von https://www.bmu.de/themen/luft-laerm-verkehr/verkehr/elektromobilitaet/bmu-foerderprogramm/foerderung-von-elektrobussen/ abgerufen

German Federal Motor Transport Authority. (2018). Fahrzeugzulassungen - Bestand an Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen zum 1. Januar 2018. Flensburg: Kraftfahrt-Bundesamt.

Grossmann, H. (2013). *Pkw – Klimatisierung – Physikalische Grundlagen und technische Umsetzung*. Berlin

Heidelberg: Springer.

Hustadt, D., Jahn, M., Meyer, S., Sander, J., Schäfer, M., Schröder, J.-H., . . . Teske, S. (1995). Betrachtung eienr Ökobilanz der Herstellung von Verpackungsstoffen aus Aluminium in der Schweiz. Schweiz: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL).

Knote. (2017). Ansätze zur Standardisierung und Zielkosten für Elektrobusse. Dresden: Fraunhofer IVI.

Kotzé, J. (2014). Thermal energy storage in metallic phase change materials (Diss.). Stellenbosch University South Africa: Faculty of Engineering.

Kraf, W., Jilg, V., Klein Altstedde, M., Lanz, T., Vetter, P., & Schwarz, D. (2018). Thermal High Performance Storages for use in vehicle applications. *iAV - ETA Tagung*. Berlin.

Kraft, W., & Klein Altstedde, M. (2016). Use of metallic Phase Change Materials (mPCM) for heat storage in Electric- and Hybrid Vehicles. *The 6th Hybrid and Electric Vehicle Conference*. London.

Lindinger, M. (2018). Der Preis der E-Mobilität. Frankfurt: FAZ.

Romare, M., & Dahllöf, L. (May 2017). The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries. Sweden: IVL - Swedish Environmental Research Institute.

Science Media Center. (2017). *Lithium-Ionen-Batterien – Wie ressourcenabhängig ist Elektromobilität?* Von https://www.sciencemediacenter.de/alle-angebote/fact-sheet/details/news/lithium-ionen-batterien-wie-ressourcenabhaengig-ist-elektromobilitaet/ abgerufen

ÜSTRA. (2018). Evaluierung des Pilotprojekts mit drei Elektrobussen. Hannover.

Valeo Thermal Bus Systems. (2017). Beheizungsstrategien für Elektrobusse. Gilching.

Zwischenbericht Projekt „THS-Bus“

Verantwortlich:

Werner Kraft M.Sc.
Institut für Fahrzeugkonzepte
Pfaffenwaldring 38-40
70569 Stuttgart

Beteiligte:
Veronika Stahl M.Sc.
Peter Vetter M.Sc.

Datum: 30.06.2021

Inhalt

1 Einleitung 1
2 Aktueller Projektstand 1
2.1 Projektplan 1
2.2 Aktueller Stand der Arbeiten und Meilensteinerreichung 1
2.2.1 AP1 – Anforderungen und Randbedingungen 1
2.2.2 AP2 – Auslegungsmethodik und Auslegungswerkzeuge 1
2.2.3 AP3 – Physikalisch-Technische Grundlagen 2
2.2.4 AP4 – Adaption Speicherkonzept 2
2.2.5 AP5 – Funktionsmusterbau und Laboruntersuchung 2
2.2.6 AP6 – Bewertung und Ausblick 2
3 Darstellung der Arbeitsinhalte 2
3.1 AP 0 – Projektmanagement und Reporting 2
3.1.1 Austausch mit assoziierten Projektpartnern 2
3.1.2 Veröffentlichungen und Außendarstellung 2
3.2 AP 2 – Auslegungsmethodik und Auslegungswerkzeuge 3
3.2.1 Vollständig aufgebaute Teilmodelle 5
3.2.2 Teilweise aufgebaute Teilmodelle 6
3.3 AP 3 – Physikalisch – Technische Grundlagen 7
3.3.1 AP 3.1 Materialtechnische Grundlagen 7
3.3.2 AP 3.3 – Entwicklung anwendungsgerechtes Wärmeeintragssystem 14
3.4 AP 5 – Funktionsmusterbau und Laboruntersuchung 18
3.4.1 CAD - Modelle 18
3.4.2 Gefertigte Komponenten und Prüfstandsaufbau 19
Anhang 22

1 Einleitung

Der vorliegende Zwischenbericht soll den aktuellen Projektstand sowie die seit des letzten Zwischenberichts (30.06.2020) durchgeführten Arbeiten im Projekt „THS-Bus“ erläutern und darstellen. Neben den Ergebnissen der bisherigen Arbeiten werden auch die Arbeitsschritte beleuchtet, die zur Erreichung der jeweiligen Ergebnisse durchgeführt wurden. Der vorliegende Arbeitsbericht soll dabei einen zusammenfassenden Charakter aufweisen. Es wird daher darauf hingewiesen, dass die Darstellungen im Rahmen des vorliegenden Zwischenberichtes nicht den tatsächlich vorliegenden Tiefgang der durchgeführten Arbeiten wiedergeben können. Eine Einsicht in weitere Dokumentationen zu den jeweiligen Arbeitsschritten ist jedoch selbstverständlich möglich.

2 Aktueller Projektstand

2.1 Projektplan

Der Projektplan zum Projekt „THS-Bus“ ist in Abbildung 1 dargestellt. Gemäß des Projektplans sollte das Projekt zum Zeitpunkt des Zwischenberichts abgeschlossen sein. Aufgrund von Verzögerungen im Projekt wurde jedoch eine kostenneutrale Verlängerung bis 31.12.2021 beantragt und auch gewährt. Eine ausführliche Beschreibung zum aktuellen Stand der Arbeitspakete sowie zur Meilenstein- und Zielerreichung erfolgt im nachfolgenden Kapitel.

			2018				2019				2020				2021			
AP/MS	AP-Titel/MS-Titel	Verantwortlicher	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
AP 0	Projektmanagement und Reporting	FK-AEW																
AP 1	Anforderungen und Randbedingungen	FK-AEW Beteiligungen: Konvekta, Flughafen																
AP 1.1	Energetische, topologische und einsatzspezifische Anforderungen																	
AP 1.2	Betriebs- und sicherheitstechnische Anforderungen und Randbedingungen																	
MS 1	*Anforderungen und Randbedingungen definiert*					X												
AP 2	Auslegungsmethodik und Auslegungswerkzeuge	FK-AEW Beteiligungen: Konvekta																
AP 2.1	Auslegungsmethodik																	
AP 2.2	Auslegungswerkzeuge																	
MS 2	*Speicherkonzept ausgelegt*										X							
MS 3	*Auslegungswerkzeuge validiert*															X		
AP 3	Physikalische - Technische Grundlagen	FK-AEW																
AP 3.1	Materialtechnische Grundlagen potentieller Speichermaterialien und Einhausungsmaterialien																	
AP 3.2	Entwicklung anwendungsgerechtes Wärmeaustragssystem																	
AP 3.3	Entwicklung anwendungsgerechtes Wärmeeintragssystem																	
AP 4	Adaption Speicherkonzept	FK-AEW Beteiligungen: Konvekta																
AP 4.1	Kritische Designaspekte																	
AP 4.2	Konezptentwicklung																	
MS 4	*Speicherkonzept entwickelt*									X								
AP 5	Funktionsmusterbau und Laboruntersuchung	FK-AEW																
AP 5.1	Aufbau eines prototypischen Wärmespeichersystems																	
AP 5.2	Experimentelle Untersuchung des aufgebauten Wärmespeichersystems																	
MS 5	*Prototypisches Wärmespeichersystem aufgebaut*													X				
AP 6	Bewertung und Ausblick	FK-AEW Beteiligung: Konvekta, Flughafen																
AP 6.1	Bewertung des Wärmespeichersystems im Fahrzeugsystem																	
AP 6.2	Ausblick zu Potentialen thermischer Energiespeicher																	

Abbildung 1: Projektplan zum Projekt „THS-Bus“

2.2 Aktueller Stand der Arbeiten und Meilensteinerreichung

2.2.1 AP1 – Anforderungen und Randbedingungen

Dieses Arbeitspaket ist bereits abgeschlossen.

2.2.2 AP2 – Auslegungsmethodik und Auslegungswerkzeuge

Im Rahmen des AP2 wurde eine komplexe Auslegungsmethodik erarbeitet. Die zur Anwendung der Auslegungsmethodik benötigten Wwerkzeuge befinden sich aktuell noch teilweise im Aufbau. Aufgrund der hohen Komplexität der Auslegungsmethodik ist eine Fertigstellung sämtlicher hierfür benötigter Werkzeuge im Rahmen des Projekts nicht mehr möglich, wie auch bereits im Sachbericht vom 31.03.2021 erläutert. Im Rahmen des Projekts soll daher die Anwendung einer vereinfachten Auslegungsmethodik mit ebenfalls vereinfachten Auslegungswerkzeugen erfolgen. Der Meilenstein MS2 wird daher auch erst zum Ende des Projekts bedient. Die Erreichung der Ziele im AP5 bleiben hierdurch jedoch unberührt, da für die experimentelle Untersuchung ein skaliertes Funktionsmuster

aufgebaut wird. Der Meilenstein MS 3 kann erreicht werden, sobald die experimentellen Untersuchungen abgeschlossen wurden.

2.2.3 AP3 – Physikalisch-Technische Grundlagen

Die Arbeiten im Arbeitspaket 3 sind nun vollständig abgeschlossen. Im Bereich der materialtechnischen Untersuchungen wurde anstatt einer Zyklierung von Speicher- und Einhausungsmaterialien die Methodik zur selbigen erarbeitet. Außerdem ist zusätzlich eine Methode zur Auslegung anwendungsgerechter Einhausungsdesigns erarbeitet worden. Die ursprüngliche angedachte Zyklierung entfällt damit zugunsten beider genannten Inhalte. Im Bereich des Wärmeeintragssystems konnten die abschließenden experimentellen Untersuchungen nun durchgeführt werden.

2.2.4 AP4 – Adaption Speicherkonzept

Dieses Arbeitspaket ist bereits abgeschlossen.

2.2.5 AP5 – Funktionsmusterbau und Laboruntersuchung

Im Hinblick auf den Bau und die experimentelle Untersuchung eines Funktionsmusters im Labor sind gemäß Projektplan bereits einige Arbeitsschritte erfolgt. Eine Einhausung auf Basis von Graphit wurde bereits hergestellt. Die parallel zum Projekt im Aufbau befindliche Prüfstandsinfrastruktur befindet sich in den finalen Zügen der Inbetriebnahme. Die Untersuchung des Funktionsmuster ist für das Q3/2021 und Q4/2021 eingeplant.

2.2.6 AP6 – Bewertung und Ausblick

Die Bewertung der Technologie THS erfolgt, sobald die experimentellen Untersuchungen abgeschlossen werden konnten sowie eine erste Anwendung der Auslegungsmethodik mit Hilfe der noch fertigzustellenden Auslegungswerkzeuge möglich ist. Dies ist für das Q4/2021 eingeplant.

3 Darstellung der Arbeitsinhalte

3.1 AP 0 – Projektmanagement und Reporting

3.1.1 Austausch mit assoziierten Projektpartnern

Der Austausch mit den assoziierten Projektpartner hat im vergangen Jahr mittels regelmäßig stattfindenden Telefonkonferenzen stattgefunden. Der regelmäßige Turnus beträgt dabei 4 Wochen. Inhaltlich werden hierbei stets die Arbeiten der vergangenen 4 Wochen aufbereitet, dargestellt sowie anschließend mit den assoziierten Partnern diskutiert. Aufgrund der im vergangenen Jahr bearbeiteten Arbeitsinhalte die sich mit der Weiterentwicklung des Speichersystems beschäftigt haben, erfolgte primär eine Teilnahme von Konvekta an den Telefonkonferenzen. Der Stuttgarter Flughafen wird nach Vereinbarung wieder an den Telefonkonferenzen teilnehmen sobald erneut Themen besprochen werden, die mehr im Bezug zur Anwendung am Flughafen stehen.

3.1.2 Veröffentlichungen und Außendarstellung

Im Verlauf des vergangene Projektjahres kam es 3 Veröffentlichungen, die sich auch auf Basis der Ergebnisse im Projekt stützen. Im Rahmen eines Papers wurden Grundlagen zur Bus- und Speicheranwendung, welche bereits zu Beginn des Projektes erarbeitet wurden, veröffentlicht.

https://www.mdpi.com/1996-1073/13/11/3023

Eine weiter Veröffentlichung fand im Rahmen der nationalen Konferenz „Online-Fachtagung Fahrzeugklimatisierung“, die von der Technischen Akademie Esslingen ausgerichtet wurde statt.

https://www.hdt.de/fahrzeugklimatisierung-h070100806

Zuletzt wurden verschiedene Aspekte zur Thematik „Thermische Hochleistungsspeicher“ in Form von Poster-Präsentation und einer regulären Präsentation auf der Tagung „Enerstock2021“ vorgestellt. Auch diese Konferenz wurde Online abgehalten.

https://enerstock2021.org/

3.2 AP 2 – Auslegungsmethodik und Auslegungswerkzeuge

Im Rahmen des vergangenen Abschlussberichtes wurden die methodische Vorgehensweise sowie der Zweck der einzelnen Teilmodule dargestellt und erläutert. Innerhalb dieses Zwischenberichtes sollen die nun bereits vorliegenden Auslegungswerkzeuge (d.h. Teilmodelle) dargestellt werden. Zur besseren Einordnung des noch verbleibenden Arbeitsumfangs in diesem Arbeitspaket wird außerdem dargestellt, welche Auslegungswerkzeuge noch im Rahmen dieses Projekts umgesetzt werden sollen. Die Auswahl der noch umzusetzenden Werkzeuge orientiert sich dabei an der zwingenden Notwendigkeit, um erste Gesamtsystemsimulationen mit Hilfe dieser Tools zu ermöglichen. Nachfolgende Abbildung gibt hierzu eine Übersicht.

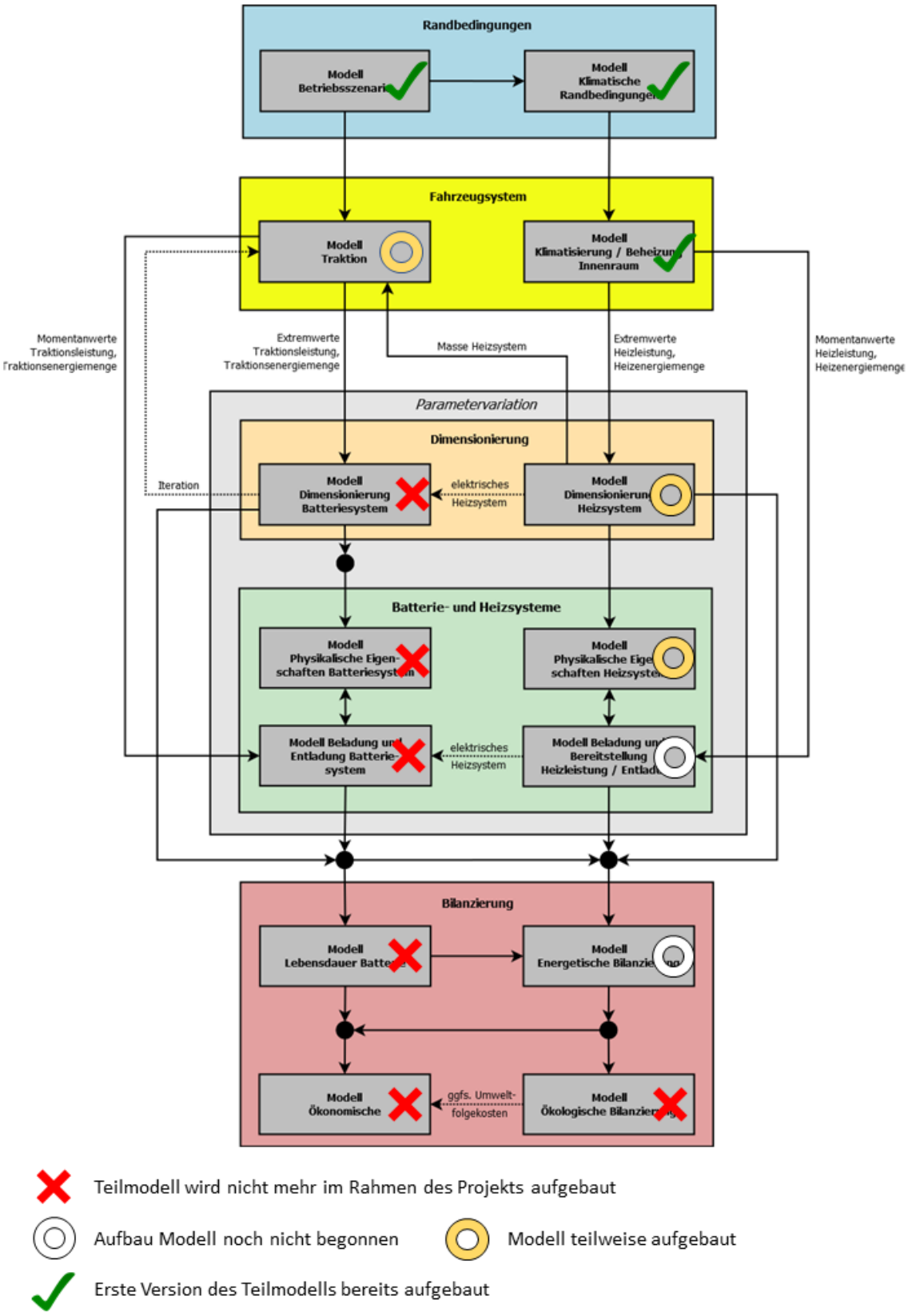


Abbildung 2: Übersicht über die bereits aufgebauten, sich im Aufbau befindlichen, noch nicht aufgebauten und nicht mehr aufzubauenden Teilmodelle

3.2.1 Vollständig aufgebaute Teilmodelle

3.2.1.1 Modell Betriebsszenario

Die nachfolgende Abbildung 3 und Abbildung 4 zeigen die Eingabeoberflächen der Teilmodelle „Betriebsszenario Nachtladen“ und „Betriebsszenario Gelgenheitsladen“. Durch die Abfrage der für das Betriebsszenario relevanten Randbedingungen wie z.B. Fahrbeginn, Fahrdauer, etc. wird es ermöglicht, ein festes Betriebsszenario zu definieren. Hierdurch wird die Information generiert, zu welchem Zeitpunkt das Fahrzeug fährt und zu welchem es steht, d.h. die Möglichkeit zum Laden besteht. Die Outputs beider Teilmodelle dienen als Input für die Teilmodelle „Klimatische Randbedingungen“ und „Traktion“ und werden dort zur Berechnung weiterer relevanter Randbedingungen genutzt.

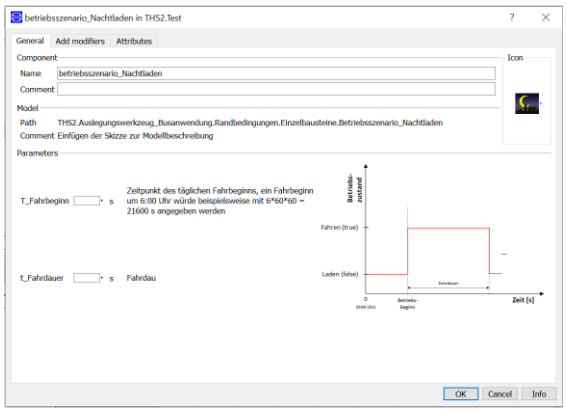


Abbildung 3: Eingabeoberfläche des Teilmodells „Betriebsszenario Nachtladen“

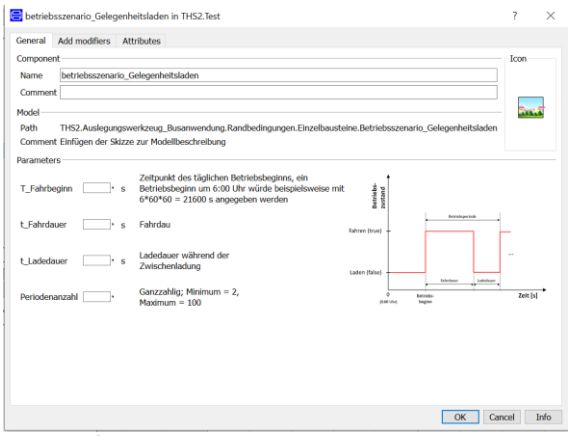


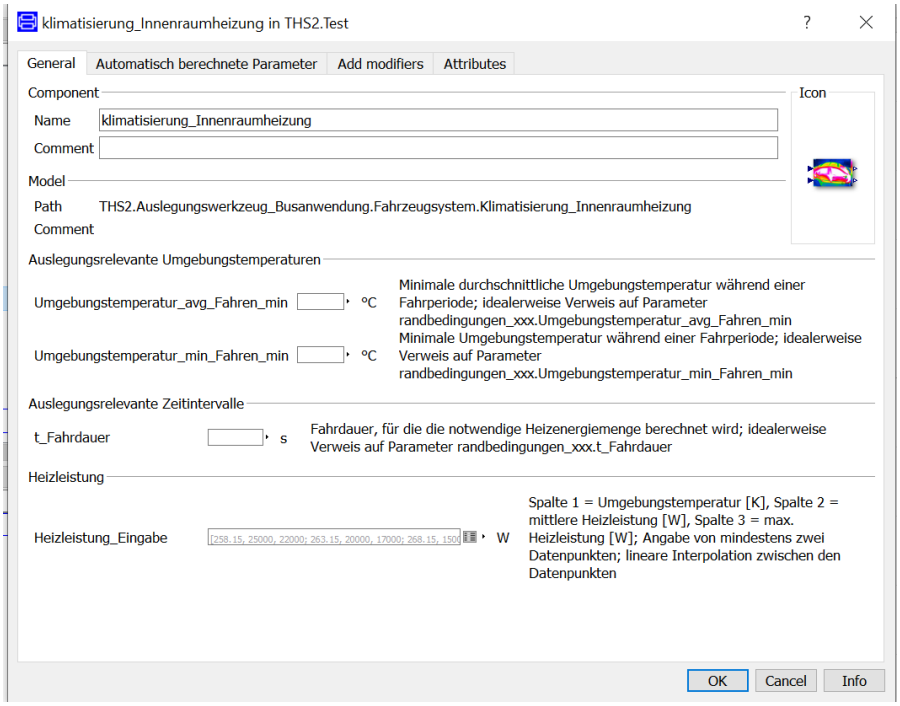
Abbildung 4: Eingabeoberfläche des Teilmodells „Betriebsszenario Gelegenheitsladen“

3.2.1.2 Modell Klimatische Randbedingungen

Innerhalb des Modells „Klimatische Randbedingungen“ erfolgt das Einlesen der relevanten klimatischen Randbedingungen. Zum aktuellen Zeitpunkt ist dies ausschließlich die Umgebungstemperatur. Diese kann im Modell auf Basis von Wetterdaten des DWD tabellarisch eingelesen werden. Die Auflösung erfolgt dabei stündlich, einzulesen ist ein Datensatz für ein komplettes Jahr hinweg, d.h. 8760 h. Innerhalb des Modells werden für die spätere Dimensionierung der Komponenten die Extremtemperaturen innerhalb der zugrunde liegenden Betriebszeiten abgelesen. Weiterhin kann in Kombination mit dem Modell „Betriebszenario“ die jeweilige mittlere Temperatur innerhalb des nächsten Fahrzeitraumes ausgegeben werden.

3.2.1.3 Modell Klimatisierung / Beheizung Innenraum

Im Modell Klimatisierung / Beheizung Innenraum erfolgt die Bestimmung des zugrunde liegenden Heizleistungs- und Heizenergiebedarfs des Fahrzeugs in Abhängigkeit der vorher definierten Umgebungstemperatur. Der Heizleistungsbedarf ist tabellarisch in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur anzugeben. Angegeben werden kann hierbei eine mittlere Heizleistung sowie eine maximale Heizleistung. Die mittlere Heizleistung wird zur Berechnung des Heizenergiebedarfs verwendet. Die maximale Heizleistung kann zur späteren Dimensionierung von Komponenten wie dem Wärmeaustragssystem genutzt werden. Zusätzliche anzugebende Parameter die zur Ermittlung der eben genannten Größen benötigt werden sind die die mittlere durchschnittliche Umgebungstemperatur während eines Fahrzeitraumes, die minimal während eines Fahrzeitraumes auftretende Umgebungstemperatur sowie die Fahrdauer. Idealerweise werden die drei zuletzt genannten Größen aus den vorher beschriebenen Modellen zum Betriebsszenario und der Umgebungstemperatur bezogen, sodass diese nicht manuell ermittelt und eingegeben werden müssen. Ein entsprechender Vereweis auf die relevanten Parameter ist in diesem Fall erforderlich, wie im unten gezeigten Eingabefenster beschrieben.



3.2.2 Teilweise aufgebaute Teilmodelle

3.2.2.1 Modell Traktion

Im Rahmen des Modells Traktion erfolgt die Bestimmung des Traktionsenergiebedarfes für das Fahrzeug. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf dem Masseneinfluss auf dieTraktion. Durch die unterschiedliche Dimensionierung der verschiedenen Energiespeicher (Batterie, THS) kann ein Fahrzeug durch einen THS als Heizsystem entsprechend leichter oder schwerer werden im Vergleich zu einem Referenzfahrzeug ohne THS. Um diesen Einfluss auf den späteren Energieverbrauch zu bestimmen, soll idealerweise ein Berechnungsfaktor, der aus Literaturdaten zu ermitteln ist, genutzt werden. Aktuell konnte noch kein entsprechender Faktor ermittelt werden. Sollte sich ein solcher Faktor auch weiterhin nicht in der Literatur finden, so kann gegenfalls eine Fahrdynamik-Betrachtung in das Modell integriert werden, um die Traktionsleistung zu bestimmen.

3.2.2.2 Modell Dimensionierung Heizsystem

Innerhalb des Teilmodells „Dimensionierung Heizsystem“ erfolgt die Auslegung der zur Beheizung des Innenraumes relevanten Komponenten. Dies sind allen voran der Thermische Hochleistungsspeicher, jedoch auch alternative Heizkomponenten wie der Elektrische Heizer, Kraftstoff-Heizer sowie die Wärmepumpe. Da im Falle eines elektrischen Heizers und der Wärmepumpe elektrische Energie benötigt wird, ist die Auslegung stets eng mit der Dimensionierung des Batteriesystemes verknüpft.

Hauptmodell ist naheliegenderweise das Modell zur Dimensionierung des Thermischen Hochleistungsspeichers. Dieses beinhaltet Teilmodelle zur Dimensionierung des Wärmeaustragssystems, des Wärmeeintragssystems, der thermischen Auslegung (Speicherkapazität), der Geometrie sowie ein Modell zur Dimensionierung des Schichtaufbaus. Letzteres ist insbesondere zur korrekten Abbildung der resultierenden Wärmeflüsse vom Speichermaterial durch die Komponenten an der Bodenfläche und damit zur korrekten Abbildung der Be- und Entladung des Speichersystems von Relevanz.

3.2.2.3 Modell Physikalische Eigenschaften Heizsystem

3.3 AP 3 – Physikalisch – Technische Grundlagen

3.3.1 AP 3.1 Materialtechnische Grundlagen

Ziel dieses Arbeitspakets ist die Bewertung geeigneter Speicher- und Einhausungsmaterialien. Die Prozessschritte für das Erreichen dieses Ziels sind in Abbildung 5 dargestellt.

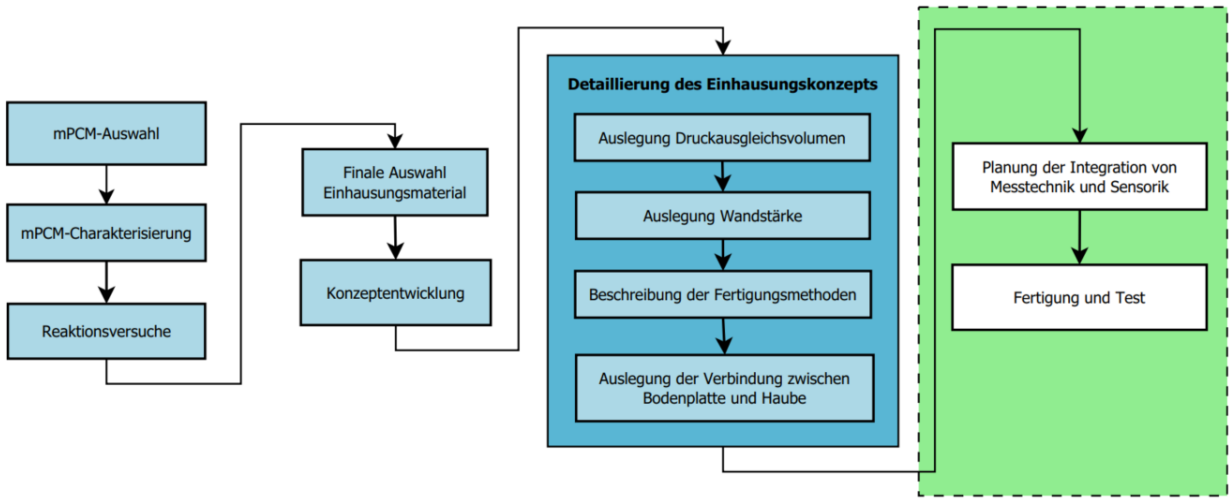
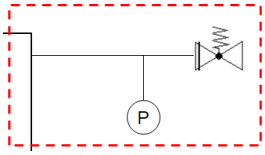


Abbildung 5: Prozess zur Bewertung geeigneter Speicher- und Einhausungsmaterialien. Blaue Prozessschritte: im ersten und zweiten Zwischenbericht erläutert. Prozessschritte im grünen Feld: In diesem Zwischenbericht erläutert.

Zunächst erfolgt ein kurzer Abriss zu den bereits erfolgten und berichteten Arbeitsschritten. Nach der Auswahl von $AlSi_{12}$ als mPCM erfolgte die finale Auswahl des Einhausungsmaterials. Anhand von Kompatibilitäts- und ökonomischen Kriterien fiel die Wahl auf Graphit, wobei Herausforderungen hinsichtlich Oxidationsschutz erwartet wurden. Dies wurde im Konzeptentwicklungsschritt durch das Vorsehen einer gasdichten Umhüllung adressiert. Das Konzept sieht eine wechselbare Schnittstelle zur funktionalen Bodenplatte, die zum Wärmeein- und -austrag dient, vor. Graphit selbst nimmt seinen Platz als Reaktionsbarriere in Form eines Liners ein. Bei der Detaillierung des Einhausungskonzepts wurde ein normiertes Behältervolumen von 1,2 ausgewählt, um die thermische Dehnung der Atmosphäre im Behälter und des mPCMs unter Einhaltung eines vorgegebenen

Maximaldrucks zu berücksichtigen. Eine Diskussion zur zukünftigen möglichen Reduktion der Druckbehälter-Wandstärke ist perspektivisch erfolgt. Für alle Graphit-Bauteile wurden nähere Betrachtungen zur Fertigung durchgeführt, wonach die Wahl für diesen prototypischen Aufbau auf das Fräsen aus isostatisch gepresstem Graphit in Kombination mit einer Graphit-Bodenplatte aus R7510 mit hoher Wärmeleitfähigkeit fiel. Zur Verbindung der Einhausungs-Druckbehälterhaube mit der funktionalen Bodenplatte wurde eine lösbare Schraubverbindung ausgelegt. Als Dichtung fungiert eine Graphit-Hochdruckdichtung mit Dichtlippe.

In diesem Bericht wird nun einerseits der Fokus auf die Planung der Integration von Messtechnik und Sensorik gelegt. Außerdem wird ein Fortschrittsbericht zur Fertigung gegeben und der geplante Testablauf der Komponente wird erläutert.



3.3.1.1Planung der Integration von Messtechnik und Sensorik

Sensoren, die während des Betriebs der Komponente an dieser angebracht sein müssen, um in-Situ Messungen und Regelung vornehmen zu können, sind in Abbildung 6 im Rohrleistungs- und Instrumenten-Fließschema dargestellt und werden im Anschluss einzeln erläutert. Weitere nicht-integrierte Messtechnik, die nicht im Betrieb sondern zu vorgesehenen Analysezeiträumen zusätzlich verwendet werden könnten, sind eine Waage beispielsweise zur Masseverlustbestimmung des Graphitliners oder ein Mikroskop zur Untersuchung potentieller Reaktionsprodukte.

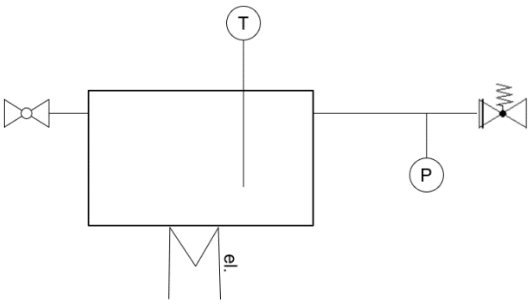
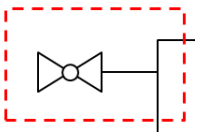


Abbildung 6: Rohrleitungs- und Instrumenten-Fließschema der Einhausungskomponente

Drucküberwachung:

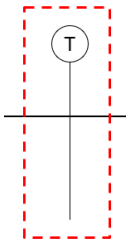
Die Messung und Überwachung des Behälterinnendrucks sind aus zwei Gründen erforderlich. Zum einen ist es aus Sicherheitsaspekten notwendig, dass der Druckbehälter vor unkontrolliertem Bersten durch unerwarteten Überdruck geschützt wird. Dafür wird ein Sicherheitsventil vorgesehen. Zum anderen dient die Drucküberwachung mittels Druckmessumformer der Redundanz dieser Sicherheitskette, der Verifizierung der Behälterinnendruck-Vorbetrachtungen, der Analyse der Behälterdichtigkeit und der Beobachtung eines möglichen unerwarteten Druckanstiegs durch beispielsweise Mechanismen, die die Gasmolekül-Anzahl im Behälter ansteigen lassen (bspw. Entstehung von CO). Da weder Druckmessumformer noch Sicherheitsventile, die den thermischen Randbedingungen des Versuchsaufbaus standhalten, in kompakter Bauweise existieren, werden die beiden Komponenten nicht direkt an der Einhausung angebracht. Das Messgas durchströmt vielmehr zunächst ein Kapillarrohr, durch das auf dem Weg zur Sensorik Wärme mittels freier Konvektion und Strahlung an die Umgebung abgeführt wird. Die gasdichte Anbindung des Kapillarrohrs an die Einhausung erfolgt mittels einer angeschweißten Klemmverschraubung.

Schutzgas-Befüllung:



Um eine Oxidation des Graphit-Liners während des Betriebs bei hohen Temperaturen zu vermeiden, wird der Druckbehälter mit Argon-Schutzgas befüllt. Als Ausgangsdruck bei Raumtemperatur wurde ein Absolutdruck von 0,4 bar ausgewählt, um den Maximaldruck bei hohen Betriebstemperaturen zu reduzieren. Zur Befüllung selbst ist eine Argon-Gasflasche mit Druckminderer notwendig und zur vorherigen Evakuierung der Füllleitungen und des Behälters sowie zur Einstellung des leichten Unterdrucks wird eine Vakuumpumpe benötigt. Zur Ankopplung der Einhausungs-Komponente an diese Argon-Befüllvorrichtung ist ein Kugelhahn vorgesehen, der analog zur Drucküberwachung mit einer Temperatur-Puffer-Leitung vor thermischer Überbeanspruchung geschützt wird. Die Einhausung kann nach dem Befüllen bei geschlossenem Kugelhahn von der Befüllvorrichtung entkoppelt werden und in den Prüfstand integriert werden.

Temperaturmessung:



Die Temperatur des Prüflings sollte aus drei Gründen überwacht und gemessen werden:

1. Sicherheit: Vermeidung von Überhitzung.
2. Regelung: Zur Testung muss die Komponente thermisch beladen werden. Dies erfolgt durch eine elektrische Heizeinrichtung, deren Leistung in Abhängigkeit einer definierten Zieltemperatur geregelt wird.
3. Analyse: Aus den Zeit-Temperaturverläufen verschiedener Messstellen lassen sich zahlreiche Aussagen über die Performance der Komponente schließen. Beispielsweise können die qualitative Entwicklung der Speicherkapazität, die Entwicklung der Schmelztemperatur oder Veränderungen im thermischen Widerstand zwischen Speichermaterial und Heizeinrichtung beobachtet werden.

Temperaturmessstellen in der Heizeinrichtung oder an der Oberfläche der Einhausung sind unproblematisch, da sie sich nicht im Inneren des Druckbehälters befinden und somit keine gasdichten Anschlüsse erforderlich sind. Außerdem sind sie keiner korrosiven Umgebung ausgesetzt. Es werden Thermoelemente des Typs N eingesetzt.
Anders sieht es für die Temperaturmessung des mPCMs selbst aus. Aufgrund der korrosiven Eigenschaften von $AlSi_{12}$ sind die Temperaturfühler (ebenfalls Typ N Thermoelemente) vor einer chemischen Beeinflussung zu schützen. Dazu werden Graphit-Tauchhülsen verwendet, die in Löcher im Graphit-Liner eingehängt werden können. Dies ermöglicht, im Gegensatz zu einer Lösung mit beschichteten Thermoelementen, die Austauschbarkeit der Fühler. Außerdem ist eine gasdichte Führung der Fühler aus der Einhausung heraus notwendig. Dies wird durch Klemmverschraubungen realisiert, die in die Oberseite des Druckbehälters eingeschweißt werden. Eine Skizze aus Thermoelement, Graphit-Tauchhülse und Klemmverschraubung ist in Abbildung 7 dargestellt.

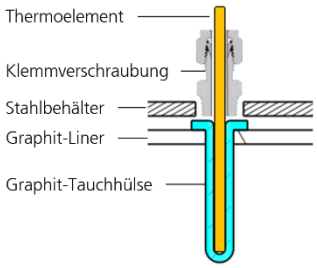
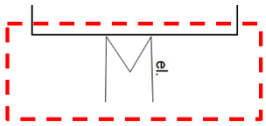


Abbildung 7: Schema der Temperaturmessung im mPCM

Heizung:



Um die Einhausungskomponente zu Testzwecken einem Temperaturprogramm zu unterziehen, ist eine Wärmequelle notwendig. Zu diesem Zweck wird die modulare Bodenplatte als Heizplatte ausgeführt. Zur Dimensionierung der Heizleistung wird neben der zu beladenden Speicherkapazität des mPCM auch die Kapazität der Einhausungskomponente selbst berücksichtigt. Unter Vernachlässigung von Wärmeverlusten wird die Heizplatte für die Beladung einer Gesamtkapazität von 1,55 kWh ausgelegt. Um den Aufbau innerhalb einer Stunde auf Maximaltemperatur zu bringen, werden daher vier 500 W-Hochleistungsheizpatronen (HLP) eingesetzt. Die HLP besitzen eine beheizte Länge von 180 mm am Blindende und eine Gesamtlänge von 270 mm bei einem Durchmesser von 6,5 mm. Die

zusätzliche unbeheizte Länge der HLP dient dazu, die erlaubte Maximaltemperatur von 400 °C an den Anschlusslitzen nicht zu überschreiten. In der Heizplatte werden zwei Bohrungen zur Positionierung von Thermoelementen vorgesehen, die zur Temperaturüberwachung und Regelung der Heizleistung verwendet werden können. Zusätzlich sollen noch Heizelemente mit integrierten Temperaturmessstellen beschafft werden, um weiterhin die Möglichkeit zur Bestimmung des thermischen Kontaktwiderstandes zwischen Heizplatte und den anliegenden Komponenten zu bestimmen.

3.3.1.2 Aktueller Fortschritt der Fertigung

Es folgt ein Überblick über die bereits gefertigten Teil-Komponenten (Abbildung 8 bis Abbildung 12).

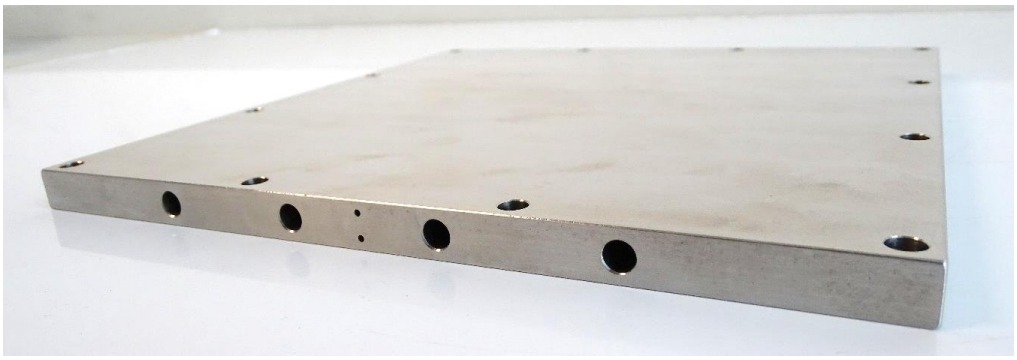


Abbildung 8: Beheizbare Bodenplatte aus hochwarmfestem Edelstahl 1.4980 mit vier Tiefbohrungen mit H6-Passung für die Heizpatronen, zwei Bohrungen für Thermoelemente und zwölf senkrechten Bohrungen für die Verschraubung

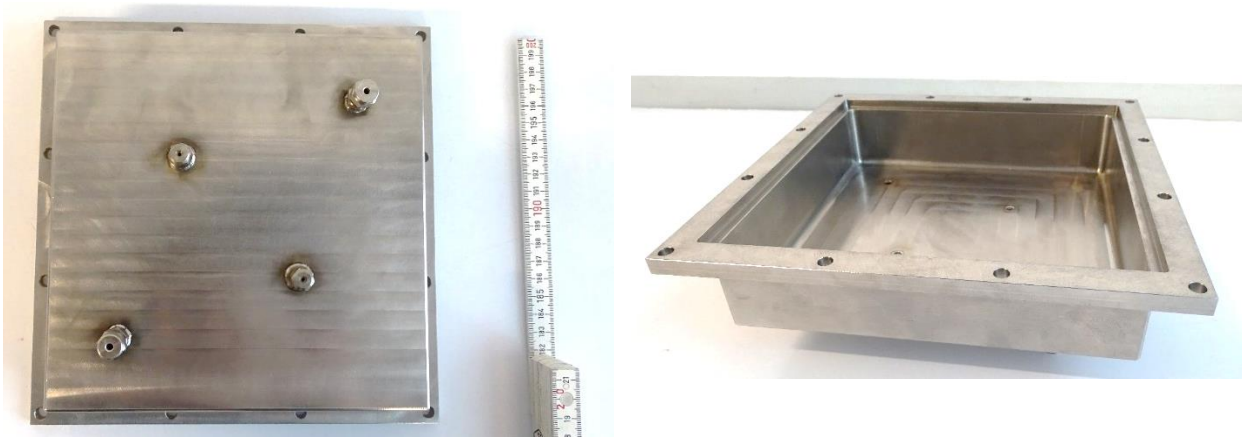


Abbildung 9: Gefräste Druckbehälter-Haube aus hochwarmfestem Edelstahl 1.4980 mit vier angeschweißten Klemmverschraubungen für Thermoelemente und Kapillarrohre und mit Flanschblatt mit zwölf Bohrungen für die Verschraubung.

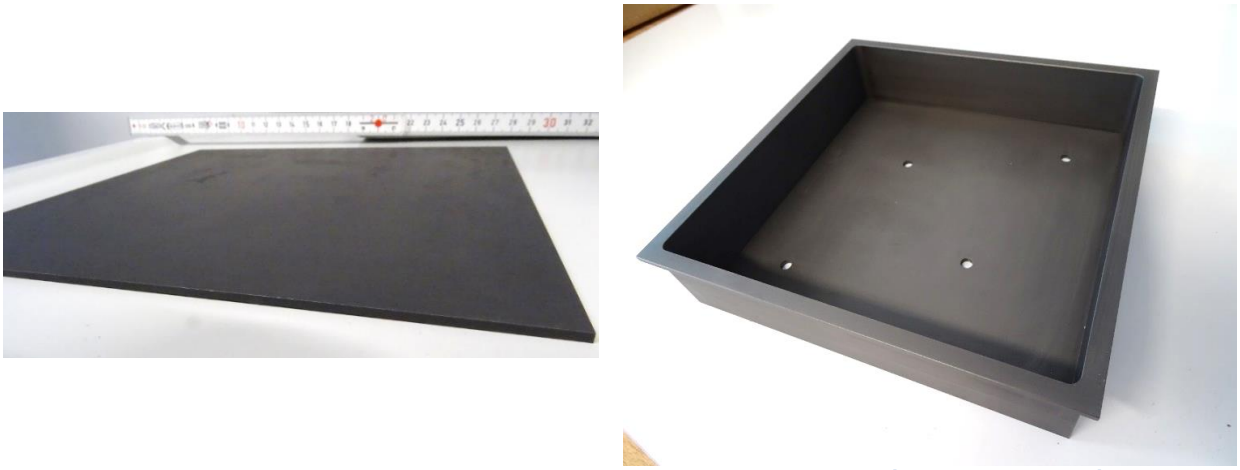


Abbildung 10: Graphit-Liner bestehend aus einer 3 mm starken Graphitplatte (R7510, R_z = 19 µm) und einer gefrästen Graphit-Haube (R7660).

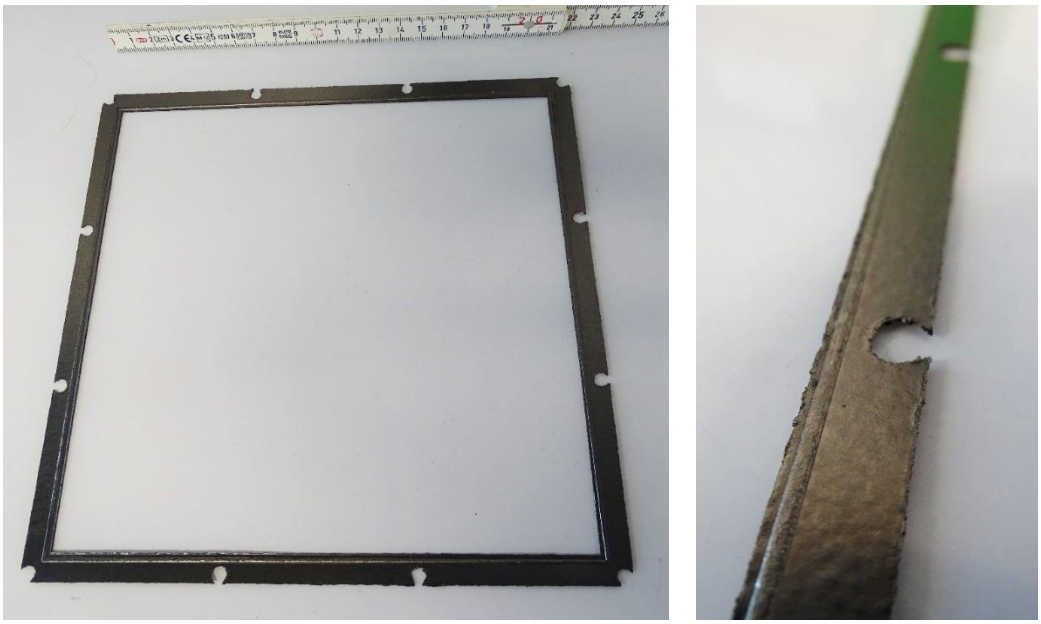


Abbildung 11: Vorverpresste Graphit-Hochdruckdichtung mit 1 mm breiter Dichtlippe und Teillochbild

Abbildung 12: Graphit-Tauchhülsen (R7660) zur korrosionsgeschützten Thermoelement-Integration ins mPCM

Bisher nicht beschrieben wurde die Auslegung der Dämmung. Um auch nach mehreren (De-)Montage-Schritten eine reproduzierbare Dämmwirkung zu gewährleisten, wurde ein formstabiler Dämmstoff ausgewählt. Da das Dämm-Bauteil keinen größeren mechanischen Kräften ausgesetzt sein wird, handelt es sich um keinen druckstabilen Werkstoff. Die Auswahl viel auf den mikroporösen

Dämmstoff TH 1000+ der Firma Thermoline Manufaktur. Dieser Werkstoff besteht hauptsächlich aus hochdisperser Kieselsäure und weist bei Raumtemperatur eine Wärmeleitfähigkeit von 0,018 W/m·K auf (0,031 W/m·K bei 600 °C). Da das Material bei der Handhabung leicht bröseln kann, werden die äußeren Flächen mit einem Glasgewebe kaschiert. Die Dicke der Dämmung wurde mit der Randbedingung von maximal 60 °C an der Außenseite bei Maximaltemperatur der Einhausung ausgelegt und resultierte in einer Stärke von 5 cm. Die Dämmung ist in drei Bauteile geteilt: Eine Bodenplatte mit Aussparungen für Schrauben, Heizpatronen und Thermoelemente sowie einem zweigeteilten Deckel mit Aussparungen für Klemmverschraubungen. Der Deckel kann wie zwei Puzzle-Teile horizontal ineinandergesteckt werden. Die gefertigten Bauteile sind in Abbildung 13 dargestellt.

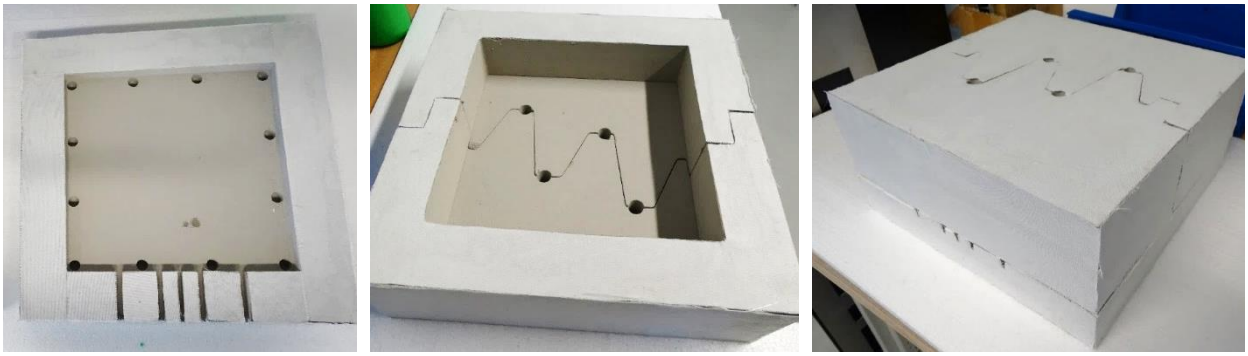


Abbildung 13: Dämmung aus mikroporösem Dämmstoff TH 1000+ bestehend aus einer Bodenplatte und einem zweigeteilten Deckel.

Weitere gefertigte und gelieferte Komponenten, die nicht abgebildet sind, sind:

- Hochwarmfeste Schrauben M6x40 inkl. Muttern und Unterlegscheiben, alle aus 1.4980
- Sicherheitsventil
- Druckmessumformer
- Thermoelemente Typ N
- Heizpatronen
- Messleitung

3.3.1.3 Experimentelle Versuchsplanung

Versuchsziele

Übergeordnetes Versuchsziel dieses Arbeitspakets ist die Untersuchung der Interaktion zwischen mPCM und Einhausung in Bezug auf die Entwicklung thermophysikalischer und struktureller Eigenschaften über mehrere Zyklen *n* hinweg. In Tabelle 1 folgt eine Auflistung verschiedener Größen, die nach dem Versuch zur Bewertung der Interaktion herangezogen werden können und der entsprechenden Messgrößen, die zur Ableitung dieser Größen aufgenommen werden müssen. Manche Messgrößen können in-situ während des Zyklus gemessen werden, andere Messgrößen müssen ex-situ nach einer Demontage zwischen den Zyklen untersucht werden.

Tabelle 1: Messgrößen zur Ableitung der Größen zur Bewertung der Entwicklung der thermophysikalischen und strukturellen Eigenschaften nach Interaktion zwischen mPCM und Einhausung nach mehreren Zyklen *n*.

	Bewertungsgröße	Messgröße	
Thermophysikalische Eigenschaften	Schmelztemperatur	Onset der mPCM-Temperatur beim Schmelzpeak	In-situ
	Speicherkapazität (Qualitativ)	mPCM-Temperatur und Heizleistung mittels Halteverfahren	In-situ

	Reaktion zwischen mPCM und Graphit-Liner	Optische/Mikroskopische Begutachtung	Ex-situ
	Kontakt zwischen mPCM und Edelstahlhülle verhindert	Optische/Mikroskopische Begutachtung	Ex-situ
Strukturelle Eigenschaften	Oxidation des Graphit-Liners	Masse	Ex-situ
	Strukturelles Versagen der Edelstahlhülle	Druckmessung Optische Begutachtung	In-situ Ex-situ
	Thermischer Gesamtwiderstand (n)	Messung der Heizleistung Ungünstige Lunkerbildung, Verformung von Teilen: Optisch, CT	In-situ Ex-situ

Versuchsvorbereitung

Neben der Fertigung und Beschaffung der Einhausungskomponente selbst, sind weitere Tätigkeiten vorbereitend durchzuführen.

Die Befüllung des mPCM erfolgt mittels Zuschnitts und Einlegens fester mPCM-Stücke in den Graphit-Liner. Der Kontakt zur Heizplatte ist daher beim erstmaligen Aufheizzyklus noch nicht optimal, so dass dieser mit einer limitierten Heizleistung durchgeführt werden sollte.

Des Weiteren ist die Integration des Prüflings in den Prüfstand zu planen. Die mechanische Integration erfolgt mittels eines Rahmens aus Aluminiumprofilen. Weitere Schnittstellen zum Prüfstand sind Anschlüsse für Heizpatronen, Druckmessumformer und Thermoelemente.

Das Einbringen der Heizpatronen erfolgt einmalig bei der Vorbereitung des Prüflings mithilfe von Wärmeleitpaste.

Vor Versuchsdurchführung sollte eine Kalibrierung der gesamten Temperaturmessstrecken vom Sensor bis hin zur Messdatenerfassung des Prüfstands erfolgen. Außerdem sollte der Heizleistungsregler des Prüfstands passend zum Prüfling und der gewählten Regelgröße parametrisiert werden.

Die Ausgangs-Masse aller Komponenten sollte vor Versuchsbeginn dokumentiert werden.

Geplanter Versuchsablauf

Da einige der Messgrößen zur Bewertung der strukturellen Eigenschaften Ex-Situ erfolgen müssen, ist ein zyklischer Versuchsablauf mit regelmäßiger Demontage des Prüflings vorgesehen. Die vier Stufen eines Zyklus sind in Abbildung 14 dargestellt.

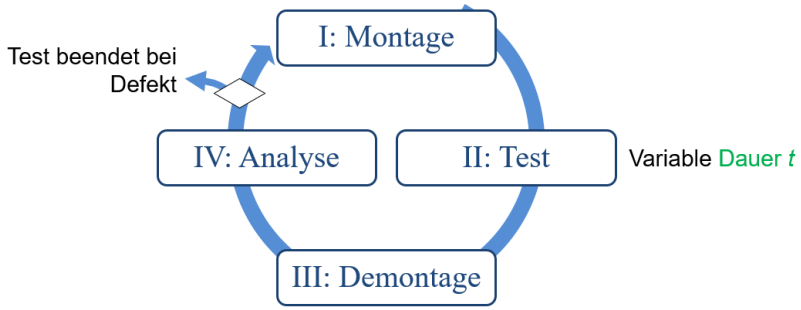


Abbildung 14: Die vier Stufen eines Versuchszyklus.

In *Stufe I: Montage* werden die verschiedenen Bauteile in folgender Reihenfolge von unten nach oben ineinander gesetzt: Beheizte Bodenplatte → Graphitplatte → Graphitfolie → Graphithaube mit mPCM → Graphit-Tauchhülsen → Graphit-Hochdruckdichtung (nach Reinigung der Dichtflächen) →

Stahlhaube. Anschließend werden die beheizte Bodenplatte und die Stahlhaube mittels hochwarmfester Schrauben, Muttern und Unterlegscheiben verschraubt. Da die Schrauben im heißen Betriebszustand thermisch gedehnt sind, ist beim Anziehen im kalten Zustand eine ausreichend hohe Vorspannung aufzubringen. Pro Schraube wird eine Montagevorspannkraft von 5,8 kN benötigt. Es wird ein drehmomentgesteuertes Anziehen der Schraubverbindung mit 6 - 8 Nm empfohlen. Anschließend werden die Kapillarrohr-Messleitungen und Thermoelemente in den Klemmverschraubungen fixiert. Im nächsten Schritt wird die Einhausung mit Argon befüllt und ein Ausgangsdruck von 0,4 bar abs. eingestellt. Zuletzt wird die Einhausungskomponente gemeinsam mit der Dämmung in den Prüfstand gesetzt sowie Thermoelemente, Heizpatronen und der Drucksensor werden mit dem Prüfstand gekoppelt.

In *Stufe II: Test* wird der Prüfling auf eine Zieltemperatur von 600 °C im mPCM aufgeheizt und das Speichermaterial somit aufgeschmolzen. Anschließend wird die Zieltemperatur für eine gewählte Dauer *t* gehalten. Dies dient unter anderem der späteren Wärmeverlustbestimmung bei dieser Temperatur durch Messung der Heizleistung. Abschließend wird die Heizleistung auf Null gesetzt und gewartet, bis der Prüfling abgekühlt ist.

In *Stufe III: Demontage* erfolgt im kalten Zustand der Druckausgleich des Prüflings zur Umgebung durch Öffnen eines Ventils. Anschließend wird die Komponente vom Prüfstand abgekoppelt, die Verschraubung gelöst und die Bauteile auseinandergesetzt.

In *Stufe IV: Analyse* erfolgt die Bestimmung aller Ex-Situ Messgrößen. Dies umfasst hauptsächlich das Wiegen der Graphitteile sowie die optische Begutachtung aller Teilkomponenten. Sollten Anzeichen unerwünschter Reaktionen oder Defekte beobachtet werden, wird eine weitere Detailanalyse beispielsweise mittels mikroskopischer Methoden empfohlen.

Im Anschluss erfolgt eine Entscheidung: Wurde ein Anzeichen für Versagen festgestellt, das fortschreitenden Versuchen entgegen steht? Falls ja, wird der Test beendet. Falls nein, beginnt der Zyklus von vorne. Gegebenenfalls kann im nächsten Zyklus die Haltedauer *t* erhöht werden. Aufgrund dieser Vorgehensweise kann nicht vorhergesagt werden, über wie viele Zyklen und welche Betriebsdauer die Komponente geprüft werden kann.

3.3.2 AP 3.3 – Entwicklung anwendungsgerechtes Wärmeeintragssystem

Wie im Zwischenbericht II erläutert, wurde für den weiteren Projektverlauf die Verifizierung von den auf Literaturwerten, Herstellerangaben und eigenen Abschätzungen basierenden Annahmen fokussiert. Während im letzten Zwischenbericht die Grundlagen der indirekten Widerstandserwärmung sowie die Realisierung THS-kompatibler Heizplattengeometien im Vordergrund standen, wird im vorliegenden Bericht (Wie bereits im Sachbericht III angekündigt) die experimentelle Untersuchung zum Wärmeeintrag schwerpunktmäßig dargestellt und erläutert.

Versuchsplanung und Versuchsaubau

Es wurde sich für die experimentelle Untersuchung der Heizplatten-Varianten mit geteilten Heizpatronen (GHP) und keramischen Flachheizern (KFH) entschieden. Hierfür wurde ein Prüfstand zur Untersuchung Thermoelektischer Generatoren (TEG) angepasst und um eine Leistungselektrische Kopplungseinheit erweitert. Abbildung 15 zeigt den schematischen Versuchsaufbau sowie die beiden Heizplatten-Varianten. Primäres Versuchsziel war die Ermittlung des Nutzwärmestroms, welcher von den Heizplatten (3) auf einen Referenzblock (4) übertragen wird. Mithilfe eines Hydraulikzylinders (7) und einem entsprechenden Druck-Sensor (6) konnte die Kühlplatte (5), welche mittels eines externen Temperiergerätes gekoppelt wurde, gegen die statische Endplatte (1) verfahren werden. Dadurch war

es möglich verschiedene Anpressdrücke einzustellen. Sekundäres Versuchsziel war die Untersuchung der Auswirkungen des Anüpressdruckes auf den Wärmetransport zwischen Heizplatten und Referenzblock.

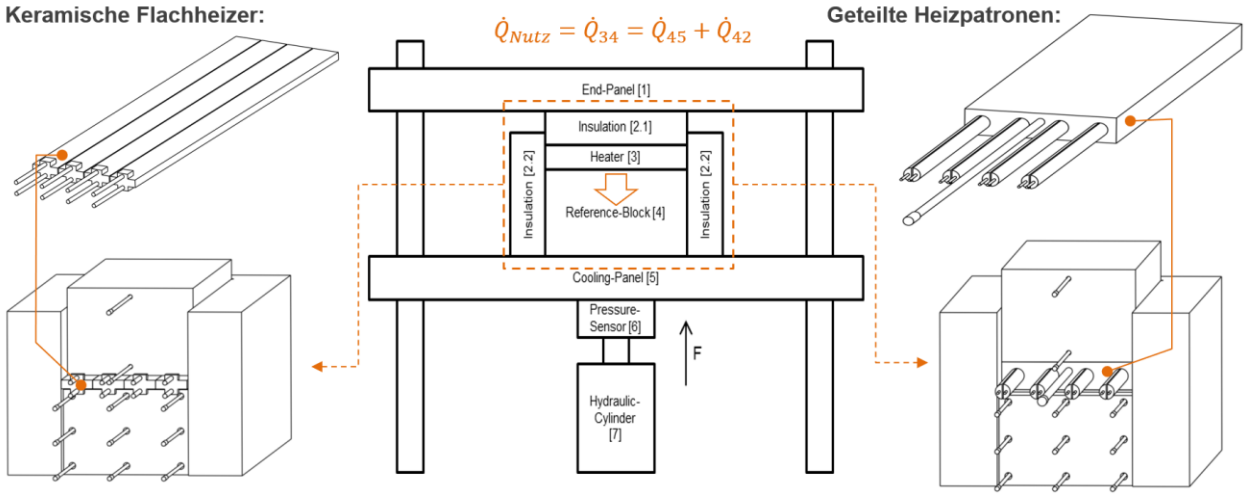


Abbildung 15: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus und Nutzwärmestrom

Abbildung 16 links zeigt die leistungselektrische Kopplungseinheit, welche zur Kopplung der Heizelemente an den vorhandenen Heizleistungsregler des Prüfstands angefertigt wurde. Dadurch konnte während des Versuchs ein ausreichender Berührungsschutz sichergestellt werden. Das rechte Bild der Abbildung zeigt den Prüfstand mit dem Hauptschaltschrank, der geschlossenen Kopplungseinheit und dem Heizleistungsregler. Im Hintergrund ist das externe Temperiergerät zu sehen.

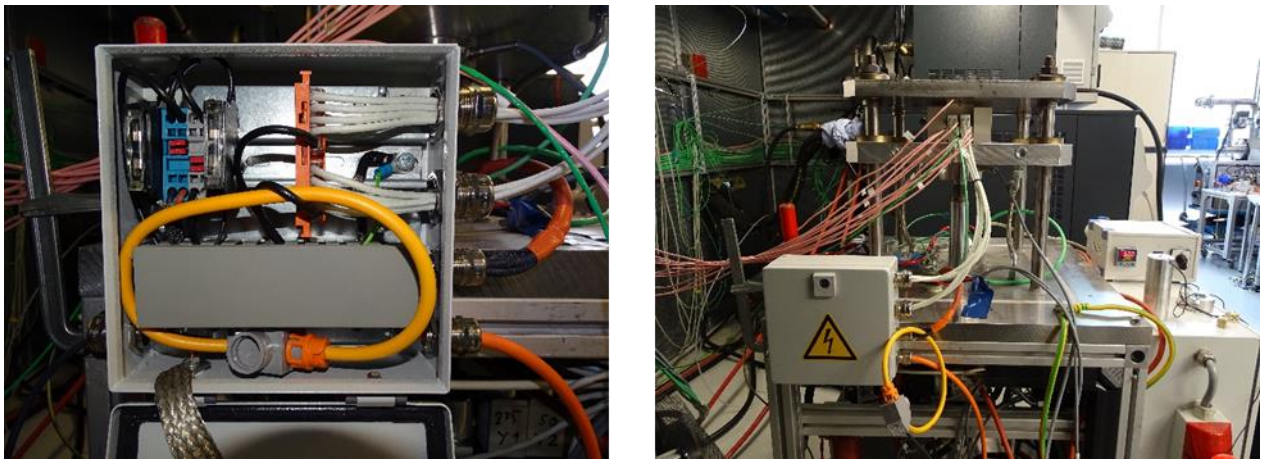


Abbildung 16: Leistungselektrische Kopplungseinheit zur Kopplung der Heizelmente mit dem Prüfstand-Heizleistungsregler (links), Prüfstand im Betriebszustand (rechts)

Die Heizplatten wurden zwischen einer oberen Dämmung und dem Referenzblock (Material: 1.4828), welcher mit Thermolementen zur Wärmestromermittlung ausgestattet wurde, verpresst (Abbildung 17). Zur Optimierung des thermischen Kontaktes wurde zwischen den Heizplatten und dem Referenzblock sowie zwischen der Kühlplatte und Referenzblock eine 0,2 mm starke Graphitfolie eingebracht. Das linke Bild zeigt den Versuchsaufbau mit vollkeramischen Flachheizern und abgenommener Seitendämmung. Auf dem rechten Bild ist der betriebsbereite Versuchsaubau mit Seitendämmung dargestellt. Weiterhin ist die wassergekühlte Kühlplatte zu erkennen.

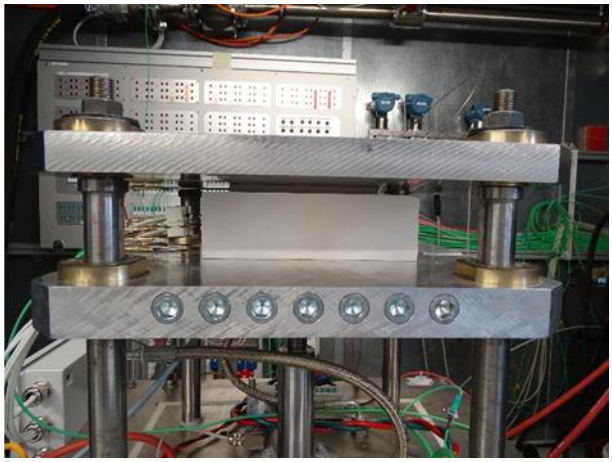


Abbildung 17: Versuchsaufbau mit vollkeramischen Flachheizern (links, ohne Seiten-Dämmung), Verscuhsaufbau mit Seitendämmung (rechts)

Auf Abbildung 18 ist der Versuchsaufbau mit geteilten Heizpatronen während des Versuchs (links) und nach dem Versuch (rechts) abgebildet. Die Heizpatronen wurden mit einer unbeheizten Länge von 100 mm gewählt. Auf dem linken Bild ist die aus der Erwärmung resultierende Verfärbung der Heizpatronen deutich zu erkennen.

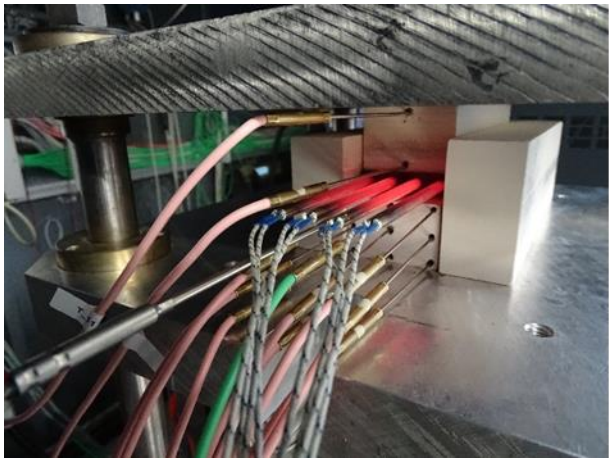


Abbildung 18: Versuchsaufbau mit geteilten Heizpatronen bei Maximaltemperatur (links), Versuchsaufbau während der Montage (rechts, ohne Seitendämmung)

Versuchsauswertung

Der Nutzwärmestrom wurde mithilfe der Wärmeleitfähigkeit des Referenzblocks, der gemessenen Temperaturdifferenzen im Referenzblock, dem Abstand der Temperaturmesspunkte zueinander sowie der Kontaktfläche nachfolgender Gleichung ermittelt:

$$\dot{Q}_{\mathrm{Nutz}} = \frac{\lambda \cdot A \cdot \Delta T}{l}$$

Der Referenzblock wurde stufenweise bis auf 600 °C erwärmt. Abbildung 19 zeigt den dabei ermittelten Nutzwärmestrom. Da die Temperatur der Kühlplatte auf 400 °C limitiert war, konnten keine höheren Temperaturen als 600 °C im Referenzkörper angefahren werden. Weiterhin konnte festgestellt werden, dass der Nutzwärmestrom in erster Linie durch die Kühlleistung limitiert wurde. Ab einer Temperatur von ca. 230 °C konnte jedoch mit beiden Heizplattenvarianten eine ausreichende Temperaturdifferenz realisiert werden, um den Auslegungspunkt (7,5 W/cm²) zu erzielen.

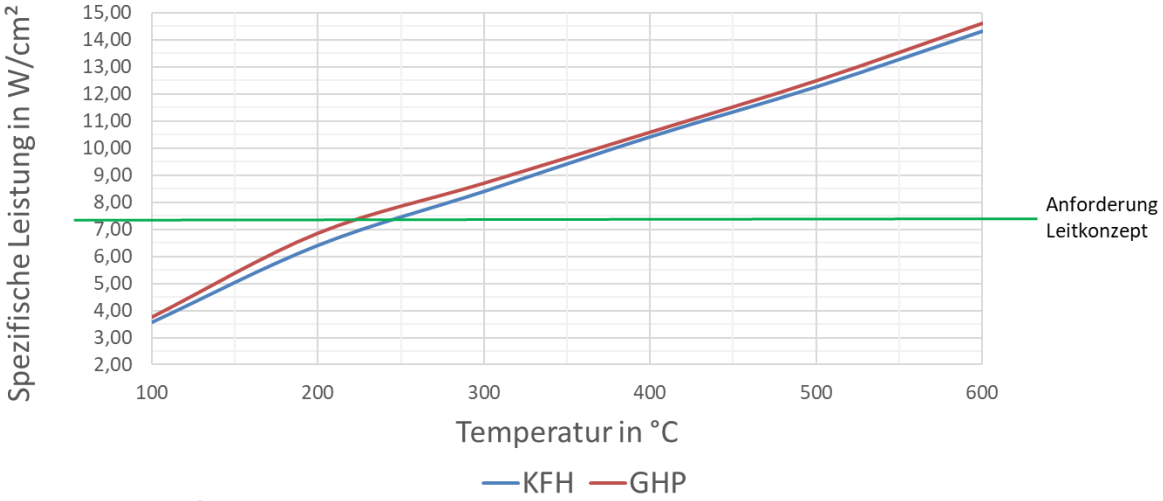


Abbildung 19: Spezifischer Nutzwärmestrom

Um den Einfluss des Anpressdrucks auf den Wärmetransport zu untersuchen wurden die Versuche mit unterschiedlichen Drücken (Anpresskräfte: 23,4 kN, 47,2 kN und 71,3 kN) durchgeführt. Dabei konnte ein Anstieg des Nutzwärmestromes von ca. 0,4 %/kN beobachtet werden. Aufgrund der unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten der Heizplatten als auch der angrenzenden Schichten ist absehbar, dass sich die aus der thermischen Expansion resultierende Änderung des Anpressdrucks erheblich auf die Wärmeeintragsleistung auswirken kann.

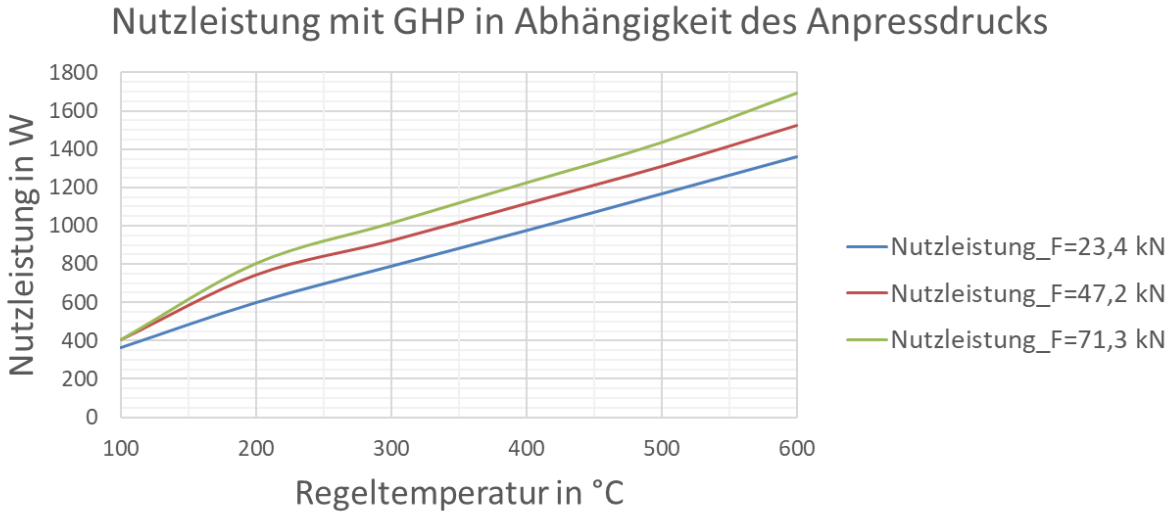


Abbildung 20: Nutzleistung über die Regeltemperatur bei verschiedenen Anpressdrücken

Fazit

Im Rahmen der Untersuchungen konnte die geforderte spezifische Leistung von 7,5 W/cm² für beide Heizplatten-Varianten erreicht werden. Es konnte zudem gezeigt werden, dass die Erwärmung der elektrischen Heizelementanschlüsse in der gewählten Konfiguration unkritisch ist.
Da die Temperatur durch die Kühlleistung des Prüfstandes limitiert wurde, ermöglichen die Ergebnisse keine Bestimmung der Maximalleistung. Es ist jedoch davon auszugehen, dass selbst bei hohen mPCM-Temperaturen oberhalb der Phasenwechseltemperatur eine ausreichende Wärmeeintrags-Leistung gewährleistet werden kann. Um dies nachzuweisen sollte im nächsten Schritt die experimentelle Untersuchung im Gesamtspeichersystem erfolgen. Dadurch ist es zudem möglich den Einfluss der internen Wärmetransportmechanismen des mPCM's (Bewegliche Schmelzfront, Konvektion) auf die Wärmeeintragsleistung zu ermitteln. Im Rahmen des Projekts werden die Untersuchungen zum Wärmeeintragssystem jedoch als abgeschlossen betrachtet.

3.4 AP 5 – Funktionsmusterbau und Laboruntersuchung

Im vorliegenden Kapitel wird der Gesamtaufbau des Funktionsmusters, welches im Rahmen der experimentellen Untersuchung untersucht werden soll, dargestellt. Zunächst erfolgt eine Darstellung der CAD – Modelle, anschließend der bereits gefertigten Komponenten sowie des Prüfstandsaufbaus.

3.4.1 CAD - Modelle

In der nachfolgenden Abbildung 21 ist das zusammengebaute Funktionsmuster ohne Dämmung in der Außenansicht dargestellt, in Abbildung 22 selbiges in einer Schnittansicht. Von außen sind dabei die Edelstahlhaube und Bodenplatte aus Edelstahl, die Schrauben und Muttern zur Verschraubung von Haube und Bodenplatte, die in die Bodenplatte eingesteckten zylindrischen Heizpatronen sowie die in die Haube eingeschweißten Verschraubungen zur Aufnahme zweier Thermoelemente, eines Röhrchens welches zur Befüllung mit Schutzgas verwendet wird sowie eines gewendelten Röhrchens, welches zum Anschluss eines Drucksensors und damit zur Druckmessung verwendet wird. In der Schnittansicht sind zusätzlich der beheizte Anteil der Heizpatronen farblich hervorgehoben sowie die Bodenplatte und Haube aus Graphit zu erkennen. Zusätzlich ist einer der beiden Tauchhülsen dargestellt, in die die Thermoelemente aus Gründen des Korrosionsschutz eingebracht werden.

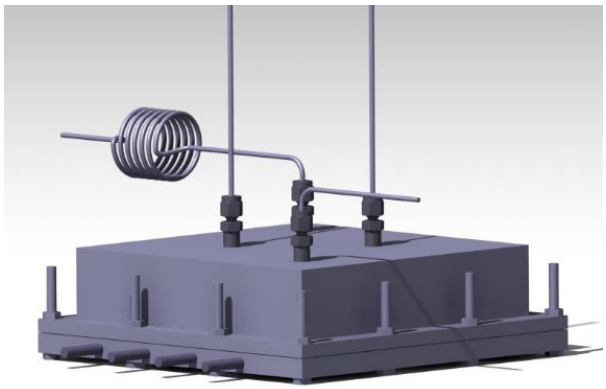


Abbildung 21: CAD-Modell des Funktionsmusters

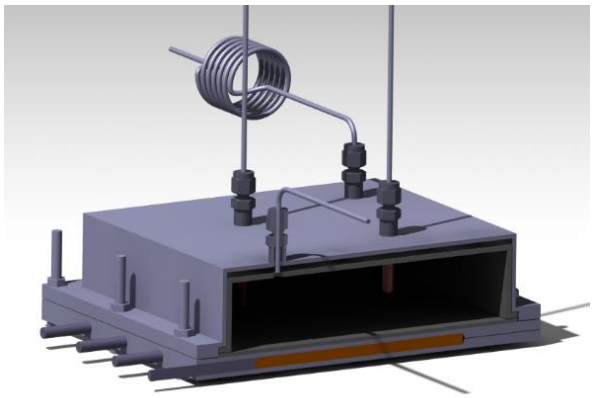


Abbildung 22: Funktionsmuster in Schnittansicht

Abbildung 23 zeigt das bereits dargestellte Funktionsmuster, ergänzt um die Dämmung. Diese besteht aus ca. 50 mm verpresstem mikroporösem Material und umschließt den Aufbau vollständig. Ausschließlich Bohrungen für Anschlussleitungen, Sensorik und Heizelemente bilden Öffnungen im ansonsten geschlossenen Aufbau.

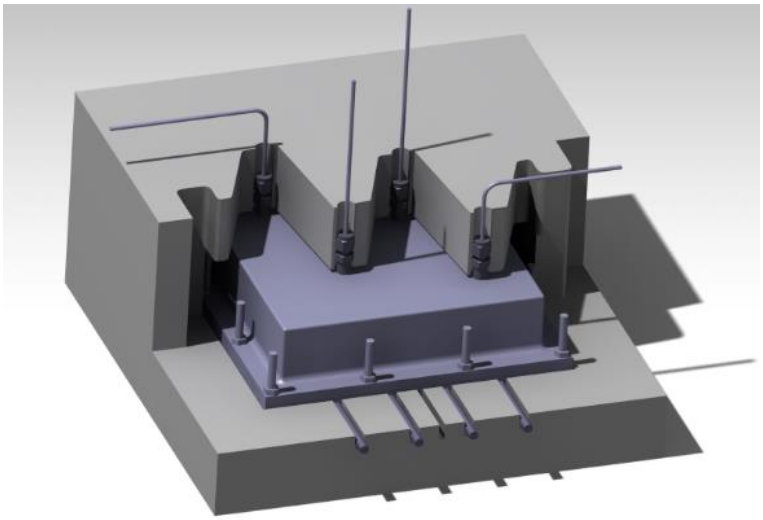


Abbildung 23: Funktionsmuster mit Dämmung (zur Anschauung teilweise entfernt)

3.4.2 Gefertigte Komponenten und Prüfstandsaufbau

Abbildung 24: Außenansicht des vormontierten Funktionsmusters

Abbildung 24 zeigt das gerfertigte, vormontierte Funktionsmuster von außen. Die hierauf sichtbaren Komponenten wurden bereits bei der Darstellung des CAD-Modells im vorherigen Kapitel erläutert.

Abbildung 25: Funktionsmuster im Aufbau

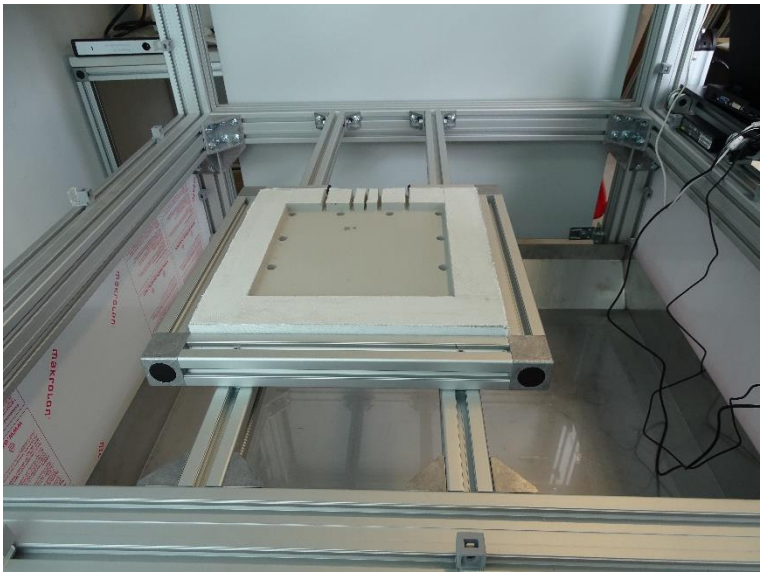


Abbildung 26: Versuchsraum des Prüfstandes mit Speicheraufnahme und Dämmplatte (Boden)

In Abbildung 26 ist der Versuchsraum des im Aufbau befindlichen Prüfstands zu erkennen mit integrierter Speicheraufnahme. Vom Speicher selbst ist im Bild ausschließlich deie Dämmung der Bodenplatte bereits integriert. Zur Integration des Speichers in den Prüfstand wurde eine Konstruktion aus Bosch-Profilen im Versuchsraum aufgebaut. Auf diese Konstruktion wurde eine im Bild nicht erkennbare Bodenplatte gelegt, die wiederum als Tragekonstruktion für den kompletten Speicher dient.

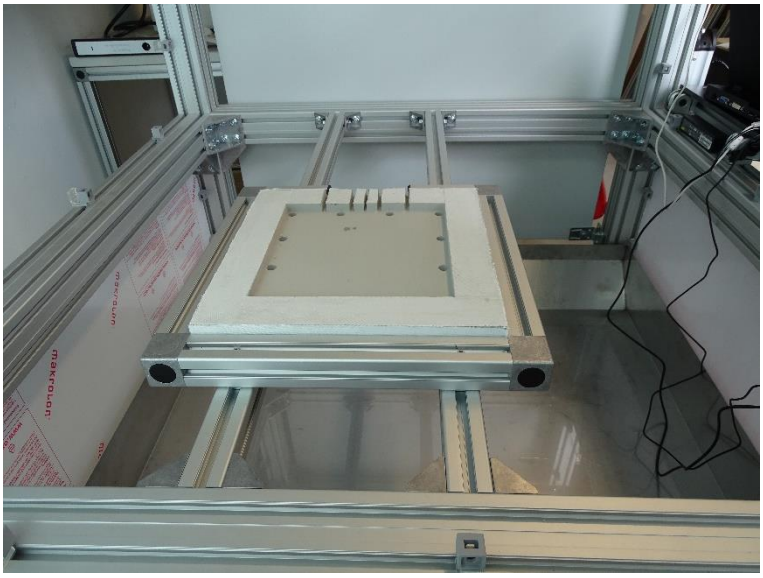


Abbildung 27: Versuchsraum des Prüfstandes mit integrierter Speicheraufnahme (ausschließlich Bodendämmung abgebildet)

Abbildung 11 zeigt die Klemmleiste des Prüfstands, zum Anschluss der Messsensorik. Die Klemmleiste wurde so gestaltet, dass Ausschließlich Komponenten welche mit Niederspannung von max. 24 V dort angeschlossen werden können. Dies ermöglicht ein einfacheres, komfortableres Handling des Prüfstands ermöglicht, da keine Elektrofachkraft benötigt wird. Weiterhin erlaubt die relativ große Anzahl an verschiedenen Anschlussmöglichkeiten den Einsatz nahezu beliebiger Sensorik. Hierdurch ermöglicht der Prüfstand außerdem die experimentelle Untersuchung deutlich größerer Funktionsmuster als im Rahmen dieses Projekts.

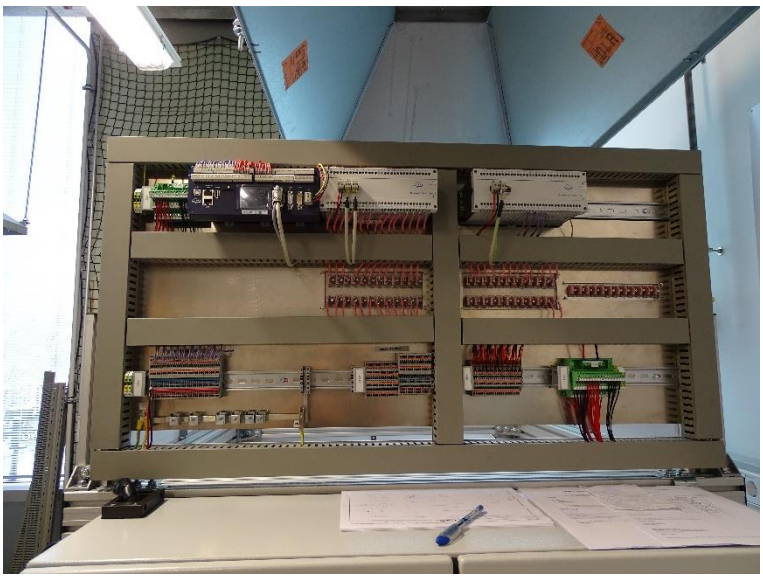


Abbildung 28: Klemmleiste am Prüfstand zum Anschluss der Sensorik

Anhang

Paper im Journal „Energies“ des MDPI - Verlages

energies

MDPI

Review

Thermal Storage Using Metallic Phase Change Materials for Bus Heating—State of the Art of Electric Buses and Requirements for the Storage System

Werner Kraft *, Veronika Stahl and Peter Vetter

German Aero Space Center, Institute of Vehicle Concepts, 70569 Stuttgart, Germany; veronika.stahl@dlr.de (V.S.); peter.vetter@dlr.de (P.V.)
* Correspondence: werner.kraft@dlr.de; Tel.: +49-711-6862-273

Received: 12 March 2020; Accepted: 27 April 2020; Published: 11 June 2020

check for updates

Abstract: Battery-powered electric buses currently face the challenges of high cost and limited range, especially in winter conditions, where interior heating is required. To face both challenges, the use of thermal energy storage based on metallic phase change materials for interior heating, also called thermal high-performance storage, is considered. By replacing the battery capacity through such an energy storage system, which is potentially lighter, smaller, and cheaper than the batteries used in buses, an overall reduction in cost and an increase of range in winter conditions could be reached. Since the use of thermal high-performance storage as a heating system in a battery-powered electric bus is a new approach, the requirements for such a system first need to be known to be able to proceed with further steps. To find these requirements, a review of the relevant state of the art of battery-powered electric buses, with a focus on heating systems, was done. Other relevant aspects were vehicle types, electric architecture, battery systems, and charging strategies. With the help of this review, requirements for thermal high-performance storage as a heating system for a battery-powered electric bus were produced. Categories for these requirements were the thermal capacity and performance, long-term stability, mass and volume, cost, electric connection, thermal connection, efficiency, maintenance, safety, adjustment, and ecology.

Keywords: electric buses; thermal energy storage; latent heat storage; metallic phase change material; cabin heating

1. Introduction

The latest reports on global warming show a significant increase in the worldwide average surface temperatures on earth compared to the pre-industrial era. Since this effect is related mainly to the rise of human CO_2 emissions from burning fossil fuels, such as coal, oil, or gas, reducing the use of them seems to be a way to restrict global warming.

In terms of public transport, buses using diesel fuel are the dominant vehicle category. Out of the 80,519 buses registered in Germany, a total of 78,472 (a relative portion of 97.5%) are diesel-fueled buses, amounting to a large majority. Toward the aim of protecting the climate and reducing local emissions like NO_x or noise, replacing diesel-fueled buses with battery-powered electric buses could have positive effects. However, the number of fully electric buses, which is 228 and therefore contributing to an amount of 0.28% to the total amount of buses, is currently insignificant [1].

Since public transport is often uneconomical and has to be subsidized, low costs for the acquisition, energy consumption, and maintenance of public transport are highly relevant. However, prices for electric buses are currently roughly double that of diesel buses. Additionally, high investments in the charging infrastructure are necessary. Besides the costs, the range of electric buses is limiting the

application possibilities in public transport, since not every tour can be served if the buses cannot be readily charged. Since the interior heating capacity can exceed the necessary power for traction in low ambient temperatures, the range issue becomes even worse if interior heating is required on low ambient temperatures and heating systems using electric energy are used. A further description of these challenges is given in Section 2.4. As an example, the dependence of the required heating capacity on the ambient temperature of a 12 m city bus is shown in Figure 1. By way of comparison, the energy demand for the traction of a 12 m city bus is in the magnitude of 1.1 kWh/km. [2]

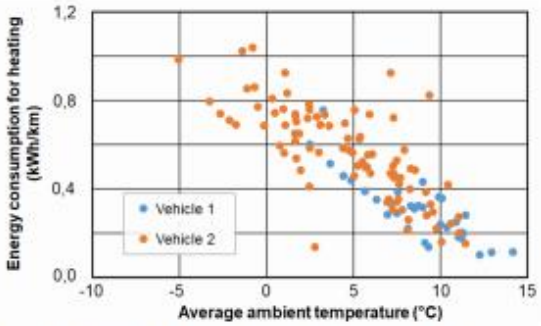


Figure 1. Dependence of the specific heating demand of a 12 m bus on the ambient temperature [2].

Since the prices for batteries are high (up to approx. 930 €/kWh, see Section 2.1.3) and the energy densities are limited (up to 160–180 Wh/kg, see Section 2.1.3), using a high battery capacity is part of the two described issues and currently low usage of electric busses. Therefore, replacing the battery capacity with a more lightweight and more affordable energy storage method could be a solution to solve this problem.

As mentioned, interior heating has a huge contribution to the energy consumption of an electric bus in winter conditions. To overcome the problem of the high cost and limited range in winter conditions, the use of thermal high-performance storage (THS) made of metallic phase change materials (mPCM) could be a potential solution, as already described in past publications. The idea is to charge the THS and the battery simultaneously, where the energy stored in the THS is provided to the cabin while driving. By doing so, no electric energy from the battery has to be used and therefore the range can be increased. Furthermore, no battery capacity needs to be available for heating and therefore can be designated only for driving. Metallic phase change materials are selected as the main choice since they offer high thermal conductivities at high energy densities and low cost. The high thermal conductivity enables the potential for fast charging, which can be very relevant. The maximum storage temperatures are intended to be 600–700 °C [3,4].

Since the application of THS as a heating unit in electric buses is a new approach, the requirements for such a system must first be known to be able to proceed with further steps, such as conceptual designing or experimental investigation. Therefore, this review aimed toward finding these requirements. To do so, first, the relevant state of the art of battery-powered electric buses is shown. The relevant aspects are vehicle types, electric architecture, battery systems, charging strategies, and especially heating systems. With the help of this knowledge, the requirements for THS are established and discussed.

2. State of the Art of Electric Buses

2.1. Electric Buses in General

2.1.1. Common Vehicle Types

Buses can be generally divided into different categories, which mainly comes from their use case or their size. In terms of their use case, categories are airport buses, city buses, regional buses, and coaches for traveling. The main differences between these kinds of buses are, e.g., the range, comfort for passengers, door sizes, engine power, and the type of construction (low floor or high floor) [5–8]. In terms of size, buses can be categorized into small buses (<6 m), mini-buses (6–8 m), midi-buses (8–10.6 m), standard buses with two axles, (10.6–13.5 m), double-decker buses (10–11 m), standard buses with three axles (13.5–15 m), articulated buses (17.5–19 m), and double-articulated buses (21–26.2 m) [9]. Since battery-powered electric buses have mainly been used as city buses, the focus will be put on this category. A detailed overview of battery-powered electric buses that are currently available on the market is given by Faltenbacher et al. [9]. As the state of the art in this category, the EvoBus eCitaro is highly regarded in the authors' view. The eCitaro comes with a maximum battery capacity of 292 kWh, offering a maximum range of about 280 km under ideal conditions. Additionally, innovative features are, e.g., the detection of occupancy by using mass sensors integrated into the axles, which is used for thermal management purposes, or the use of a CO_2 heat pump, as further described in Section 2.3.3 [10].

2.1.2. Electric Architecture

Regarding the electric architecture, a DC intermediate circle is typically used in combination with DC/DC converters and DC/AC converters for the electric consumers. The typical voltages are 650 to 750 VDC for the battery relative to the intermediate circle. The typical voltages of electric consumers, such as an air conditioner or air compressor, are 400 VAC. Additionally, there is a 24 VDC voltage level for electric consumers that have a lower electric power demand. Components with high power consumption, such as a fully electric resistance heater (see also Section 2.3.2), are typically operated with high voltages, either on the high voltage DC level or with the 400 VAC level. An example of a battery-powered bus electric architecture is shown in Figure 2 [2,11].

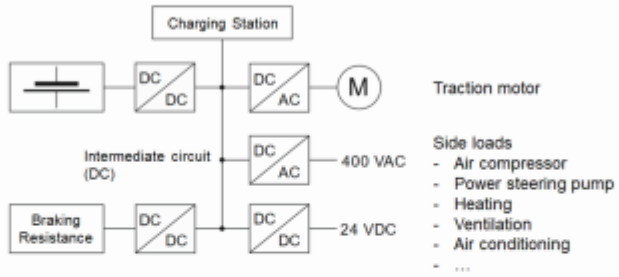


Figure 2. The basic setup of the electric architecture of a battery-powered electric bus (without a control system) [2].

2.1.3. Battery Systems Used in Electric Buses

Regarding battery systems in battery-powered electric buses, only battery systems based on lithium-ion batteries are currently used. A basic distinction is made for high-energy batteries and high-power batteries. High-energy batteries typically have higher energy at a lower power density. High-power batteries typically have higher power densities but lower energy densities. An overview of electric energy storage technologies with a focus on battery technology is shown in Figure 3.

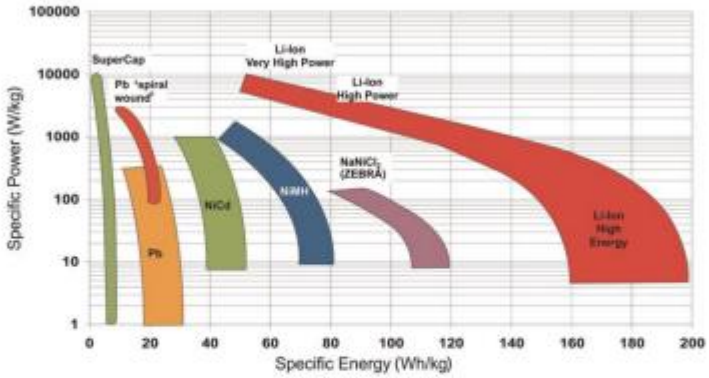


Figure 3. The energy density and power density of different electric energy storage systems with a focus on battery technology, plotted as a Ragone diagram [12].

As one state-of-the-art manufacturer of batteries for bus applications, Akasol is highly regarded in the authors' view, and is the battery supplier for the aforementioned EvoBus eCitaro, among others. Batteries from this supplier that are used in buses can use either NMC (lithium nickel manganese cobalt oxide) for high-energy batteries or LTO (lithium titanate) for high-power batteries, or a combination of both [13]. The cost for NMC is stated to be approx. 420 $/kg (≈389 €/kWh), and for LTO, the cost is approx. 1005 $/kg (≈931 €/kWh) [14]. Another battery type that is often used is LFP (lithium iron phosphate) [9]. The price of this type of battery is stated to be 580 $/kWh (≈537 €/kWh).

Regarding an ultra-high-energy battery, Akasol is offering the AKM CYC battery system with a capacity of 42 kWh, a mass of 230 to 260 kg, and a volume of 17.85 L per battery pack, resulting in a gravimetric energy density of 162 to 183 Wh/kg and a volumetric energy density of 235 Wh/L. A continuous performance of 20 to 32 kW is stated, resulting in a power density of 77 W/kg to 139 W/kg. These values are in good agreement with the numbers for the high-energy batteries shown in Figure 3 [15]. Regarding an ultra-high-power battery system, Akasol is offering the AKM POC battery system. For the AKM 53 POC, a capacity of 35.3 kWh at a weight of 333 kg, a volume of 25.05 L, and a continuous performance of 60 kW are stated. This results in a gravimetric energy density of 106 Wh/kg, a volumetric energy density of 141 Wh/L, a gravimetric power density of 180.2 W/kg, and a volumetric power density of 240 W/L. However, the peak performance of discharging is stated as being 270 kW, leading to a power density of 811 W/kg (1078 W/L). For charging, the peak performance is 106 kW, offering a power density of 318 W/kg (423 W/L). The peak performance of this battery system is in agreement with the numbers given in Figure 3 [16].

Furthermore, the latest numbers regarding future estimations of battery systems for electric buses are given in the literature. For the batteries of the eCitaro, Akasol is planning to raise the capacity in 2020 by replacing the currently used battery packs with the latest battery technology, enabling a maximum capacity of 330 kWh. Another step that might be taken within the next few years is to replace the currently used NMC batteries with solid oxide batteries. This would allow for a maximum capacity of up to 400 kWh within the same space due to a higher gravimetric energy density, according to EvoBus [10].

One last thing that must be considered regarding batteries for electric buses is their lifetime. Buses are typically in operation for 12 to 14 years, as reported by Schwarzer [17]. Due to degradation, the batteries have to be changed after about half of the bus's operation time. As a criterion for changing the battery, a state of charge (SOC) of 80% is recommended. Factors to consider that come along with changing the battery are the high cost for a new battery and ecological aspects, such as high CO_2 emissions during the production process. To at least partially overcome this, batteries from electric buses are considered to be used as stationary energy storage as a second-life application [2,18].

2.2. *Charging Strategies for Electric Buses*

2.2.1. Overnight Charging

In an overnight charging scenario, buses are fully charged at the bus terminal. Since the charging is typically done at night, outside the service hours of city buses, it is called overnight charging. In this scenario, the energy needed for the whole service is stored within one charge. Regarding the charging infrastructure, only one location, which is normally the bus terminal, needs to be equipped. However, buses suitable for this scenario require high energy storage capacities. For this reason, the battery types used for this scenario are high-energy batteries (see Section 2.1.3). A visualization of the described charging scenario is shown in Figure 4 [2].

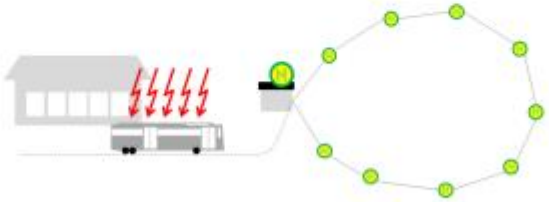


Figure 4. Illustration of the overnight charging strategy with the charging infrastructure located at the bus terminal [2].

2.2.2. Opportunity Charging at Final Stops

During opportunity charging at final stops, in addition to the charging at the bus terminal, charging is done at the final stop of a city bus´s route. For this, the regular stop at the final stop is used. Stop times at final stops can be within the range of a few minutes up to 20 or 30 min, according to Berthold [19]. Buses being operated in such a scenario require lower energy storage capacities compared to buses operated in an overnight charging scenario. However, the effort required for the installation of the charging infrastructure rises since more locations than just the bus terminal have to be equipped. For this scenario, high-power batteries are typically used (see Section 2.1.3). A visualization of the described charging scenario is shown in Figure 5 [2].

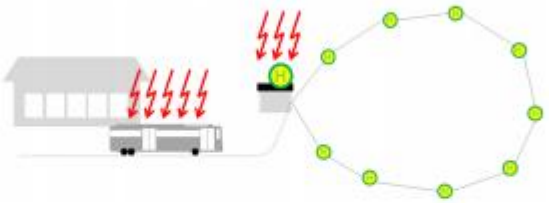


Figure 5. Illustration of the overnight charging strategy combined with opportunity charging at a final stop, with the charging infrastructure located at the bus terminal and the final stop [2].

2.2.3. Opportunity Charging at Multiple Stops

Another variation of the opportunity charging scenario is the opportunity charging scenario taking place at multiple stops, as illustrated in Figure 6. Besides the installation of the charging infrastructure at the bus terminal and the final stops, the charging infrastructure at regular bus stops is installed. Since the stop times at regular stops are pretty short (typically within the range of 20 to 90 s, according to Cundill and Watts [20]), high charging powers are required to be able to recharge significant amounts of energy. Regarding the charging infrastructure, an even higher amount of effort is necessary since more locations have to be equipped; however, the storage capacities of the buses can be lowered. For this charging scenario, ultra-high-power batteries are required (see Section 2.1.3) [2].

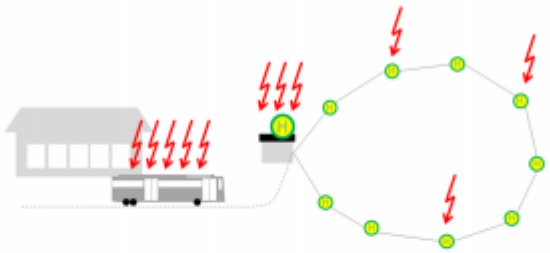


Figure 6. Illustration of the overnight charging strategy combined with opportunity charging at intermediate stops and the final stop, with charging infrastructure located at the bus terminal, at intermediate stops, and the final stop [2].

2.3. *Heating Systems for Electric Buses*

For providing the high thermal capacity necessary for interior heating, as shown in Figure 1, three main solutions are currently used in battery-powered electric vehicles. These solutions are fuel heaters, electric heaters, and heat pumps. Another solution found in the literature and regarded as relevant for conducting the requirements of THS is thermal energy storage proposed by Fraunhofer (Kratzing) and Konvekta (Best). However, this solution is currently in the development and field testing stage. The three state-of-the-art heating solutions and the thermal energy storage in development are further described within the next sections. Additionally, the typical architecture of the thermal management system of a battery-powered electric bus is shown.

2.3.1. Fuel Heater

Fuel heaters burn a liquid fuel and provide the released heat of the burning process to the air, or in most cases, to the vehicle's cooling fluid. Regarding the fuels used, in general, all kinds of liquid fuels, such as diesel, gas, ethanol, bio-fuel, etc., can be used. However, diesel is usually considered as the main choice. The benefit of using fuel heaters as the heater for battery-powered electric buses is the fact that no electric energy from the battery is needed for heating purposes. A negative aspect of burning fuels is local emissions, which is in contradiction with the local emission-free purpose of using an electric bus. The fuel consumption of a fuel heater for a 12 m standard bus is about 2.9 L/h, with a thermal output of 24 kW, according to the manufacturer, at an efficiency of about 76.5% to 79.5%, according to Sonnekalb et al. [21,22]. Considering a city bus's average speed of 12 km/h (SORT (Standardised on-road test cycles) heavy urban cycle [23]), this would result in fuel consumption of 24.2 L/100 km.

Typically, fuel heaters are available with different performance levels. Adjustment is mostly done using a simple ON/OFF operation. Regarding the conditions for switching on or off, the temperature of the cooling fluid is measured. According to Valeo, switching on is done when the cooling fluid temperature falls below 70 °C, while switching on is done when it goes above 85 °C. Communication with the vehicle is realized by using the CAN (Controller area network) interface, and the electric power supply is provided by connecting to the 24 V supply of the vehicle [22,24].

When it comes to maintenance, fuel heaters require at least a yearly service. However, due to the formation of soot, cleaning can be necessary more often. To keep this cleaning frequency as low as possible, a minimum burning period of 2 min is implemented during operation. Regarding maintenance and self-protection of the heater, a minimum volume flow of the cooling fluid through the heater is required to ensure a high enough heat transfer and to prevent the heater from overheating. Furthermore, a bimetal switch is used to realize a switch-off function at a temperature of 135 °C. Figure 7 shows the assembly of a fuel heater from Eberspächer (Esslingen, Germany) [24].

The dimensions of a fuel heater by Eberspächer with a thermal output of 24 kW are 600 mm × 230 mm × 222 mm, which is a volume of 30.6 L. The mass of such a system is stated to be 18 kg [22].

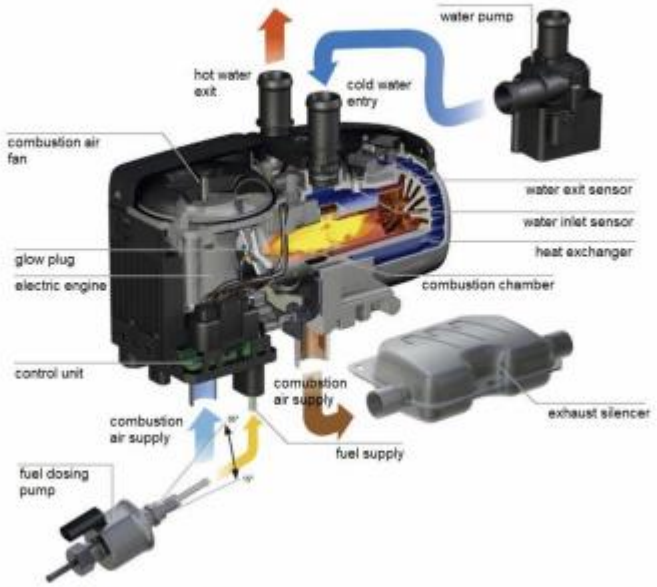


Figure 7. Detailed view of the assembly of a fuel heater from Eberspächer [22].

2.3.2. Electric Heater

Electric heaters, as shown in Figure 8, transform electric energy into thermal energy, which is transferred to the air or the vehicle's cooling fluid. Regarding heating elements, PTC (Positive Temperature Coefficient)-heaters or resistance heaters are used. The benefit of electric heaters is that it is an easy technology and there is a lack of emissions from heating. However, electric energy from the battery is used, leading to a potentially high range reduction when heating is required due to the direct transformation of electric energy to thermal energy (at an efficiency of about 98% without considering the battery's efficiency).

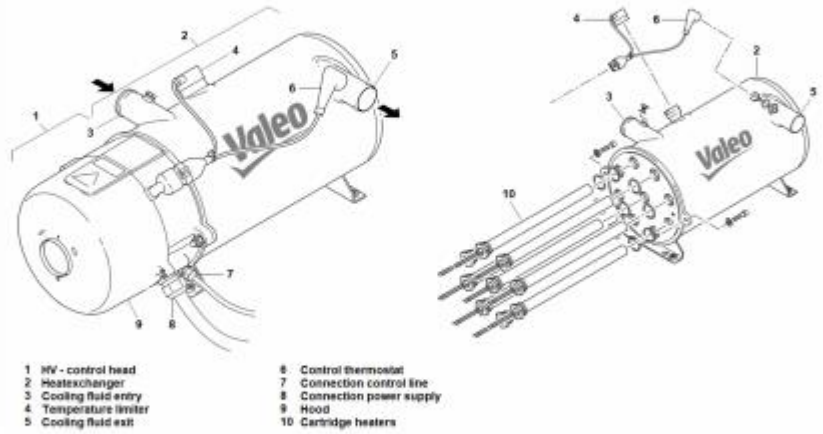


Figure 8. Detailed view on the assembly of the electric water heater Thermo AC/DC from Valeo [25].

Just as with the aforementioned fuel heaters, electric heaters are available with different performance levels. Furthermore, adjustment is typically done using ON/OFF operation with switch-on

and switch-off temperature thresholds (e.g., 68 °C and 75 °C, respectively, for the Valeo Thermo AC/DC). For the electric power supply, electric heaters can either be connected to a DC with typical voltages of 600 to 750 VDC or to 400 VAC. For communication with the vehicle, the CAN interface is used, as well as the 24 V power supply of the bus [11,25].

Regarding maintenance, at least a yearly service is required. To simplify servicing, typical wearing parts, such as cartridge heaters, are designed to be exchangeable, as shown in Figure 8. Regarding the self-protection of the heating unit, a minimum volume flow of the cooling fluid, a trail of the cooling fluid pump of at least 2 min, and a switch-off threshold of 125 °C are implemented [25].

The dimensions of an electric heater from Valeo with a thermal output of 20 kW are 578 mm × 247 mm × 225 mm, which is a volume of 32.1 L. The mass of such a system is stated to be 15 kg [11].

A special version of an electric heater uses braking resistance. Every bus should have a continuous braking unit according to German traffic regulations. In terms of electric buses, this continuous braking unit is typically conducted as an electric resistance heating unit. In the case of the EvoBus eCitaro, it is connected to the vehicle's cooling fluid circle. Due to this, it can be used for heating purposes. Further description of this is given in Section 2.3.5 [26,27].

2.3.3. Heat Pump

By using heat pumps, the heating capacity can be provided with a COP (Coefficient of performance) of greater than 1 due to the use of a refrigerant circle that is mostly driven by an electric compressor [28]. Regarding the heat source, ambient air is used, while the heat sink is the air provided to the cabin. The electric energy for powering the compressor is taken from the vehicle's traction battery. Most heat pumps used within existing vehicles nowadays use R134a as a refrigerant; however, the use of R134a has been prohibited in newly registered vehicles since 2017 due to its high global warming potential (GWP). Recently introduced heat pumps use CO_2 as the refrigerant [28–33].

Using CO_2 as a refrigerant requires higher process pressures; however, this leads to benefits regarding the thermal output. The COP values stated by Konvekta are 4 for an ambient temperature of 15 °C, 2.5 at 0 °C, 2.2 at −5 °C, and 2 at −10 °C [28,34]. Figure 9 shows a comparison of the performance as a function of the ambient temperature between heat pumps designed for buses with R134 and R744 (which is CO_2) as the refrigerant. It can be seen that the thermal output that can be provided by a CO_2 heat pump is higher compared to a heat pump using R134a. Additionally, the thermal output can be provided for temperatures as low as −20 °C, while for the heat pump using R134a, a thermal output for temperatures as low as about −5 °C is stated. Referring to Basile et. al, the operation of a heat pump using R134a as refrigerant is not useful [34]. However, Lee [35] states that for electric vehicles (not buses), the operation of a heat pump using R134 could be possible, even below, even below −10 °C. Besides the positive effect of an overall reduction in energy consumption for heating using heat pumps, the range reduction is less compared to using electric heaters for heating. However, electric energy from the battery still must be used for heating. Additionally, the efficiency of a heat pump decreases with decreasing ambient temperature, which increases the heating demand. Furthermore, for very low temperatures of around −10 °C or less, an additional heating system is required, even when using a CO_2 heat pump, since the thermal output cannot fulfill the heating demand of the vehicle anymore. Another aspect that must be considered is the icing of outer heat exchangers within specific temperature ranges, which leads to a reduction in efficiency and requires a defrosting system [28,36].

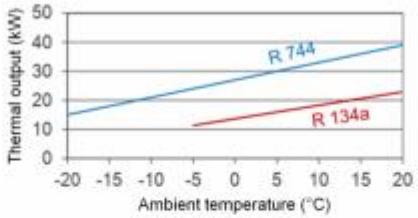


Figure 9. Comparison of the thermal outputs of heat pumps for bus heating using R134a vs. R744 as the refrigerant [37].

Regarding the adjustment of the thermal output, several performance levels can typically be set. This is done via frequency adjustment of the compressor. An optional infinitely variable control is possible, too. When the adjustment is done using defined performance levels, surplus produced heat must be extracted to the ambient air. For the electric power supply, the heat pump system is connected to the DC level. Since the compressor is working with three-phase 400 AC, a frequency converter is used in between. Communication with the vehicle is done via the CAN-interface [31,38].

Since a heat pump is a more complex system than a fuel heater or an electric heater, as seen in Figure 10, maintenance is essential. Regular maintenance is required on a six-monthly basis. For safety reasons, permanent monitoring of all sensors and checks of the plausibility of the measured values is done. In case of any irregularities, the heat pump will be switched off [38,39].

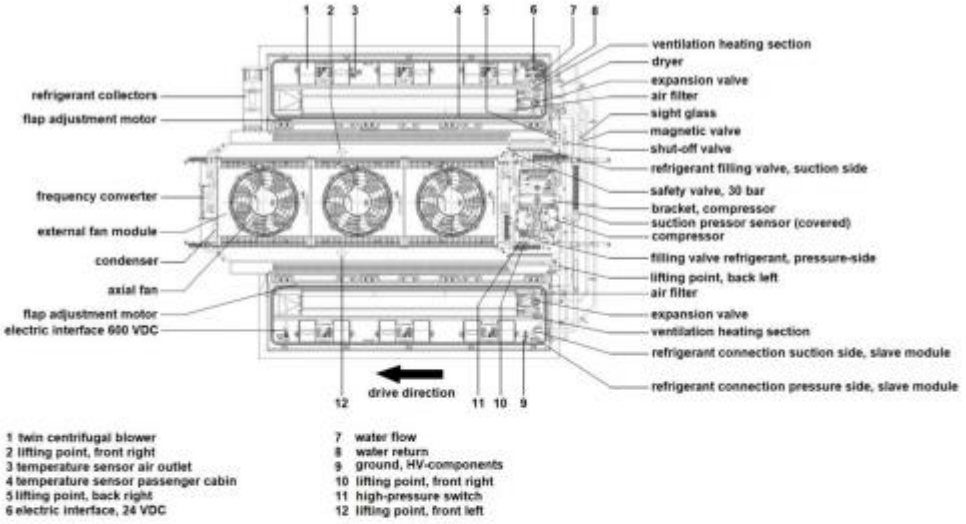


Figure 10. Detailed view of the assembly of the Revo-E heat pump from Valeo [38].

The dimensions of a REVO-E heat pump from Valeo with a thermal output of 16 kW (cooling power of 25 kW) and R134a as the refrigerant are 2800 mm × 2091 mm × 406 mm, which is a volume of 2377 L. The mass of such a system is stated to be 272 kg [29]. The dimensions of an UltraLight 500 heat pump from Konvekta with a thermal output of 18.2 kW (cooling power of 20 kW) and CO_2 as the refrigerant are 2124 mm × 2045 mm × 366 mm, which is a volume of 1590 L; the mass of this heat pump could not be found in the design proposal [33].

2.3.4. Thermal Energy Storage

Very recently, a thermal energy storage system for the interior heating of an electric city bus was proposed by Fraunhofer and Konvekta. The basic idea is the same as it is for the use of THS. The thermal energy storage and the battery can be electrically charged simultaneously, where the stored heat is used for interior heating to keep the electric energy stored in the battery for driving. For this thermal energy storage, a prototype was built and investigated in a laboratory. A field test on a real bus is planned but has not been conducted yet [40,41].

Regarding the storage material, paraffin wax is used within this storage system. The melting temperature of this material is about 69–71 °C, the storage capacity is 260 kJ/kg (sensible and latent heat within the temperature range of 62–77 °C), the densities are 0.88 kg/L (solid) and 0.77 kg/L (liquid), the heat conductivity is 0.2 W/mK, and the maximum working temperature is 100 °C [40].

The storage is designed to be in a rectangular shape. For charging, electric resistance heaters (720 VDC) are used, while for discharging, pipe–slat heat exchangers are brought directly into the storage material. Regarding the discharging medium, the cooling fluid of the vehicle is used. The conceptual design of the storage setup is shown in Figure 11, while an outer view of the installed storage is shown in Figure 11.

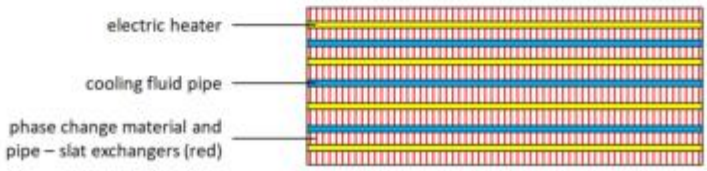


Figure 11. Conceptual design of the thermal energy storage prototype using paraffin wax for heating an electric bus from Fraunhofer and Konvekta [40].

For integration into the bus, a modular design with six modules is planned. Each module should have a storage capacity of 2.25 kWh, a charging power of 20 kW at 680 VDC, and a storage density of 39 Wh/kg. The positioning of the storage modules is intended to be spread over the interior of the vehicle, as shown in Figure 12 [40].

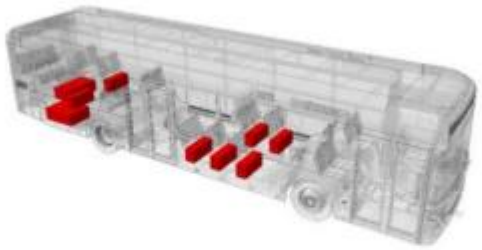


Figure 12. Intended positions of the thermal energy storage modules (red) within the interior of a bus [40].

Regarding the potential benefits of the storage system, a high lifetime with more than 16,000 full cycles, no need for an exchange due to degradation, and a much lower cost compared to batteries is stated. However, with a very low gravimetric energy density of 39 Wh/kg, the weight is a potential disadvantage of this system. Furthermore, the volumetric energy density of the storage system could be quite low since the density of the phase change material itself is low and the need for slats for improving the charging and discharging behavior requires volume as well. A specific volumetric energy density is not given within the design proposal [40].

2.3.5. Thermal Management Architecture

To give an idea of how the aforementioned components are implemented into an electric-powered city bus, the architecture of the thermal management is described within this section. As an example, the thermal management architecture of the EvoBus eCitaro is shown in Figure 13.

The relevant components for the interior heating are the CO_2 heat pump on the roof of the bus, the braking resistance in the rear, the additional heater in the rear, the floor heater, and the frontbox. The other components shown in Figure 13 are more connected to cooling functions and thermal management of the battery, and therefore are not further described. The CO_2 heat pump on the roof delivers heat to the interior through the air that flows into the cabin from the top. The braking resistance serves to heat the interior, alongside its use for energy recuperation and emergency braking. The additional heater is used as a fuel heater burning diesel fuel (or biodiesel fuel in the case of second-generation heaters). The additional heater can be used at very low temperatures when the thermal capacity of the heat pump is not sufficient and no extra electric energy should be used for heating to maintain the range of the bus. To bring the heat from the braking resistance and the additional heater into the interior of the vehicle, both are connected to a cooling fluid circle. The cooling fluid circle is connected to floor heaters within the passenger cabin and to the frontbox within the driver's cabin, which are heat exchangers used to bring the heat from the cooling fluid into the cabin [26].

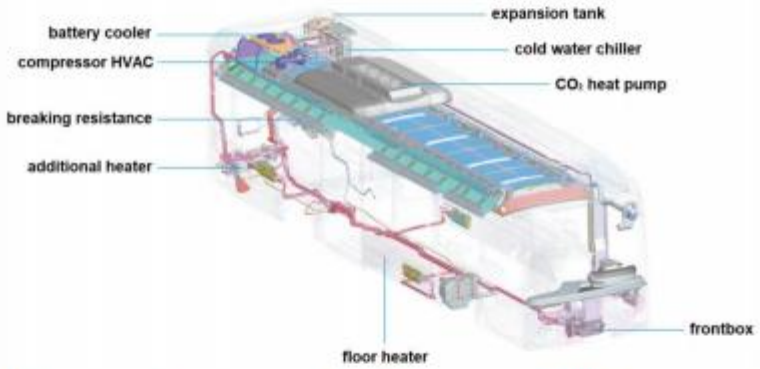


Figure 13. Thermal management architecture of the EvoBus eCitaro [26]. HVAC: heating, ventilation, and air conditioning.

2.4. Challenges Regarding the Use of Electric Buses

As reported in the introduction, the spread of electric buses is currently very limited. Reasons for this are, in the authors' opinion, two main facts: the high investment costs and the limited ranges, which are dependent on the ambient temperature, especially when heating is required. To emphasize both aspects, this section provides further information beyond that which is provided in the introduction.

The first challenge to be discussed is the high investment cost for battery-powered electric buses compared to conventional diesel buses. As reported by Knote, prices are roughly twice as high for battery-powered electric buses compared to diesel buses [2]. Since public transport is not economical for traffic enterprises in most cases, subsidization is mostly required to keep a high level of public transport services. A reason for the high investment cost of battery-powered electric buses is the high prices for the batteries, as described in Section 2.1.2. When considering a battery price of 500 €/kWh, which is at the lower end of the range given in Section 2.1.2, the battery price for the discussed example of the eCitaro would be about €146,000. Since a 12 m diesel bus costs approx. €240,000 to €350,000 [2], the battery alone accounts for about half of the cost of a whole conventional diesel bus.

The second challenge to be discussed is the insufficient range of battery-powered electric buses in non-ideal ambient conditions, especially in winter conditions when interior heating is required. A further explanation of this issue is given in Figure 14. On the x-axis of Figure 14, the distance of a city bus's daily tour relative to the range of a battery-powered electric city bus is given. On the y-axis, the number of tours relative to the tours that can be covered is given. Therefore, the blue line represents the relative number of tours covering the given distance as a function of the relative number of tours that can be covered with a city bus offering the range given on the x-axis. To show the number of tours that electric city buses can cover, grey bars are given using the EvoBus eCitaro as an example. As before mentioned, this bus is offering a range of 280 km under ideal ambient conditions, which is stated to be 20 °C. Referring to the diagram, a range of 280 km is sufficient to cover 70% of all tours within the German bus transport system. However, when interior heating is required, the range of the bus decreases if heaters consuming electric energy are used, and therefore the number of tours that could be covered with the bus decreases as well. Using an ambient temperature of about −10 °C as an example, interior heating of about 1.4 kWh/km is required, according to Figure 1. Since the eCitaro is offering an electric CO_2 heat pump, the electric energy consumption is reduced. According to the manufacturer, a COP of about 2 can be reached at an ambient temperature of −10 °C, leading to energy consumption of about 0.7 kWh/km for heating [33]. Together with an energy consumption of 1.04 kWh/km for traction (calculated based on the battery capacity and maximum range), the overall energy consumption would be approx. 1.74 kWh/km, leading to a maximum range of approx. 167 km. As can be seen in the diagram, a range of 167 km would be sufficient for only about 10% of all tours.

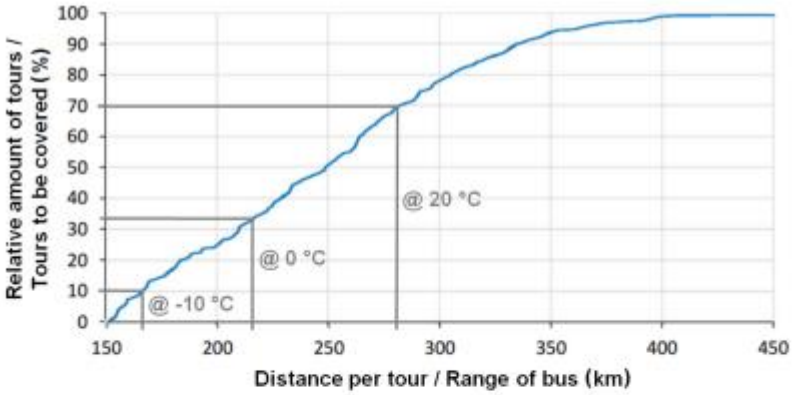


Figure 14. The distance of daily tours in the German bus transport system that need to be covered as a function of the relative number of tours that can be covered by a bus with the given range [2].

Due to the described range reduction when interior heating is required, the usability of electric city buses is strongly dependent on the ambient conditions. For traffic enterprises, this would mean that electric buses can only be used on tours with low distances if the buses are to be used throughout the year and no charging infrastructure for opportunity charging is to be built.

Based on the above discussion regarding the challenges faced, it can be concluded that providing a low-cost energy storage system for interior heating can have a major impact on the spread of battery-powered electric buses. Besides lowering the cost for the buses itself, it could reduce the necessity of installing opportunity charging infrastructure, which is currently vital if relevant ranges are to be offered independent of the ambient conditions. However, installing opportunity charging infrastructure is neither possible at any location nor affordable.

3. Requirements for Thermal High-Performance Storage

The requirements for THS are separated into eleven different categories. The derivation for each category is described within each respective section.

3.1. Thermal Capacity and Performance

Thermal capacity and performance are described together within one section since both are influenced by the same parameters, where performance refers to the charging (electric power) and discharging (thermal output) performances. Both are influenced by the purpose, vehicle size, climate conditions, and charging strategy. Figure 15 visualizes the influence of these parameters.

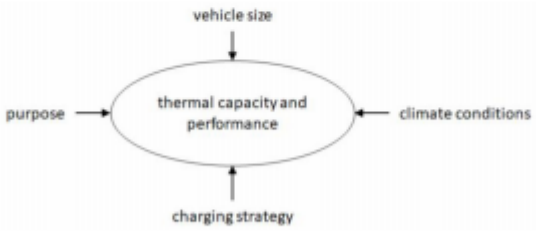


Figure 15. Influencing parameters regarding the requirements for thermal capacity and performance of THS.

The term "purpose" refers to whether the THS is used as the only heating system within the vehicle or whether it should be used as an additional heating system complementing the heat pump. If it is used as the only heating system, it has to cover any heating demand from the vehicle. If it is used as a complementary system, it only has to cover the gap between the maximum thermal output of the heat pump and the heating demand of the vehicle.

The vehicle size is highly relevant since the heating demand of a vehicle is strongly dependent on its interior volume, as described by Grossmann [42]. Since this fact is regarded as trivial, no further description is given.

Regarding climate conditions, two basic thoughts must be considered. The first one is that a bus, especially a city bus, is typically used in one fixed location. Since the climate conditions for one location are well known and do not change significantly over the typical lifetime of a bus, THS can be adopted precisely for these conditions. However, climate conditions can vary greatly between locations. For example, there would be a huge difference between the climate conditions of a city in Scandinavia, such as Oslo or Stockholm, and a city in southern Europe, such as Rome or Madrid. The second thought to be considered is that the thermal output for heating varies greatly depending on the ambient temperature, as already shown in Figure 1. Since a bus is used throughout the year, as well as typically throughout the day, the heating demand can vary greatly throughout both a year and a day. A very strong variation over the year is typically connected to areas with a very continental climate, such as in Central Northern America (e.g., Winnipeg in Canada) or central Asia (e.g., Astana in Kazakhstan). High variations of the temperature throughout a day often occur in desserts, and therefore in cities built in desserts, e.g., in Las Vegas (USA) or Tehran (Iran) [43–46].

To clarify the effect of different charging strategies on THS, some basic calculations were conducted based on the assumptions on two extreme scenarios: one extreme overnight charging scenario and one extreme opportunity charging scenario. For the extreme overnight charging scenario, it was assumed that the overall daily drive time of a bus was 17 h and the following time for charging was 7 h. Assuming a very cold winter day with a very low ambient air temperature (e.g., in Scandinavia, Canada, etc.), this led to an energy demand for heating of 425 kWh (assumed required thermal output of 25 kW, which is sufficient for −25 °C, according to Valeo; assuming an average speed of 17 km/h (SORT easy urban), this would lead to a heating demand of 1.47 kWh/km, which would be sufficient for about

Deutsches Zentrum
DLR für Luft- und Raumfahrt

−15 °C according to Figure 1). To charge THS with such a high capacity within 7 h, a charging power of 60.7 kW would be necessary. Out of these values, two indicators can be calculated that relate the storage capacity to the charging power vs. the discharging power. For charging power, it is 7 kWh/kW, while for discharging, it is 17 kWh/kW. The boundary conditions for the extreme opportunity charging scenario are a drive time of 0.47 h (28 min) and a charging time of 0.05 h (3 min), according to data regarding public transport in Amsterdam [47]. Using the same climate conditions as described for the extreme overnight charging scenario, the required storage capacity and charging power are 11.7 kWh and 234 kW, respectively. The aforementioned indicators were calculated to be 0.05 kWh/kW for charging and 0.47 kWh/kW for discharging. Comparing the indicators for both scenarios, there is a factor of about 140 for the charging indicator and 36 for the discharging indicator between both scenarios. Based on this, it can be concluded that the requirements for THS regarding storage capacity and charging/discharging performance vary greatly depending on the charging scenario.

From the given descriptions, it can be concluded that no specific requirement regarding capacity and performance can be stated. Capacity and performance have to be specifically chosen for the given scenario such that the THS is neither oversized nor undersized. Due to this, THS has to be designed to meet its specific purpose.

3.2. Long-Term Stability

The parameters that influence the long-term stability of THS are visualized in Figure 16. The main influences are the climate conditions, purpose, lifetime of the bus, and a potential substitution during the lifetime.

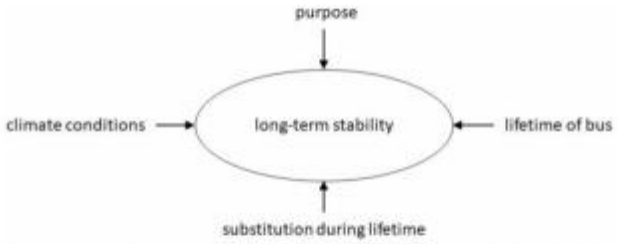


Figure 16. Influencing parameters on the requirements for the long-term stability of THS.

The first parameter is the climate conditions, which significantly influence THS since they determine whether there is a heating demand at all (heating demand only occurs below an ambient temperature of 15 °C according to Figure 1). If there is no heating demand, the THS does not need to be in operation.

The second parameter is the purpose. If the THS is used as the only heating system, it is in operation any time there is a heating demand. If it is used in addition to a heat pump, it is regularly only used if the thermal output of the heat pump is insufficient. To emphasize the influence of this, the climate data of Stuttgart is considered as an example. According to a test reference year dataset from the German Meteorological Service, temperatures of 15 °C or below occurred for 73% of that year. However, temperatures of −10 °C or below (the minimum temperature a CO_2 heat pump is sufficient as the only heating system according to Section 2.3.3) only occurred for 0.05% of that year.

The third parameter is the typical use time of a bus. With a yearly average mileage of about 57,000 km, according to Goebelt, an overall expected mileage over the lifetime of a bus (see Section 2.1.3) is 684,000 km to 798,000 km [48]. Considering an average speed of 12 km/h according to the SORT heavy urban cycle, the overall expected use time for a bus is 57,000 to 66,500 h [23].

Based on the aforementioned aspects, the expected lifetime was calculated based on use in Stuttgart for both cases. Considering a use time of the bus of 66,500 h and the probability of a heating demand of 73%, an overall long-term stability of 48,545 h would be required, which expresses an extreme

maximum value for this location. Combining the lifetime of 57,000 h with the probability of 0.05%, a long-term stability of 28.5 h would be the result, which expresses an extreme minimum value for this location. A final thought on the long-term stability is the fact that THS could be substituted within the lifetime of a bus, similar to what is done with a battery, as described in Section 2.1.3. The parameter influencing this decision would probably be the cost. If it is cheaper to replace the THS after a while than manufacturing new THS that would last for the whole lifetime of a bus, a replacement would probably be preferred.

Based on the aforementioned discussion, it was concluded that the requirement for long-term stability cannot be generally described. Some particular use cases might not need much long-term stability. However, there are potentially many use cases that require long-term stabilities of several thousand or even tens of thousands of hours. Since the development of THS should be done in a way that as many use cases as possible can potentially be covered, long-term stability of several thousand or tens of thousands of hours is stated as the primary requirement in this category.

3.3. *Mass and Volume*

As is generally known, mass and volume are properties of high relevance in mobile applications, especially for vehicles. However, a more detailed look at both factors for buses leads to the conclusion that mass is regarded as more relevant for application in battery-powered electric buses than volume. Following reasons were found to explain why volume should not be rated as high as mass:

- The roof of a bus, which offers lots of space, is typically used for components like the air conditioner/heat-pump and for energy storage, such as batteries. Furthermore, THS could be placed on the roof.
- Components like ticket machines are sometimes installed within the interior of a bus, leading to a reduction in the number of seats. Due to this, installing extra components within the interior does not seem to matter much.
- Seats above wheel cases are often less spacious compared to the other seats within a bus and therefore are often less comfortable for passengers. Replacing these seats with other components should therefore not matter significantly.
- The space below seats often is not used at all.
- Battery electric buses typically have a higher weight compared to diesel buses, leading to a reduction of the vehicle's load capacity and therefore to a reduced number of allowed passengers. Comparing the EvoBus eCitaro (with 10 battery packs) with the regular Citaro (12 m standard-bus with two doors) as examples, the empty weight is 13,700 kg compared to 11,415 kg and the maximum number of passengers is 89 compared to 105. Therefore, mass seems very relevant for battery-powered buses [49–52].
- Mass affects energy consumption during traction. Since energy consumption correlates with the CO_2 footprint and operating cost, the mass of the vehicle should be as low as possible.

Based on the above reasons, a requirement for THS is that the mass needs to be minimized. Volume should also be kept as low as possible; however, this is regarded as a secondary concern.

Since the intention is to replace the state-of-the-art heating systems with THS, it can also be concluded that THS should be more lightweight than these systems. In the case of replacing an electric heater, the mass of the THS has to be lower than the mass of the electric heater plus the required battery capacity. Since the energy densities of batteries vary greatly between battery types (see Section 2.1.3), no general conclusion can be given. However, two examples were calculated for the extreme charging scenarios described in Section 3.1 to determine whether THS should replace an electric heater.

For the opportunity charging scenario, 11.7 kWh is required for heating. Since it is a quick charging scenario, high-power batteries are assumed to be used with a gravimetric energy density of 106 Wh/kg, leading to a battery mass of 110.4 kg. Adding the weight of the electric heater of 15 kg leads to an overall weight of 125.4 kg for the heating system, which would be a gravimetric energy density of

about 93.3 Wh/kg overall. Therefore, switching to THS in this scenario would require a higher energy density than 93.3 Wh/kg. For the overnight charging scenario, 425 kWh is required for heating. In this case, high-energy batteries would be used with an assumed energy density of 170 Wh/kg, leading to a battery mass of 2500 kg. Together with the electric heater, an overall mass of 2515 kg and an overall gravimetric energy density of 169 Wh/kg would result. Therefore, switching to THS in this scenario would require a higher gravimetric energy density than 169 Wh/kg.

3.4. Cost

Regarding the cost, it is important what viewpoint is taken to determine the requirements. Possible viewpoints could be the one of a manufacturer of the heating system, a manufacturer of a bus, or the user of a bus, which is normally the transport operator. For a manufacturer, it would, e.g., be important to produce THS as cheap as possible to be able to offer attractive prices and keep the margin as high as possible. In the authors' view, the cost borne by the end user is regarded to be relevant, since the end user is the one that decides what kind of heating system they would like to have. In terms of buses, the end user would be the transport operator. For a transport operator, the total cost of ownership is relevant. The main influences on this are the cost for purchase and therefore the manufacturing cost, the energy cost while in operation, the maintenance cost, and the decomissioning cost. The influence of these four parameters is expressed in Figure 17.

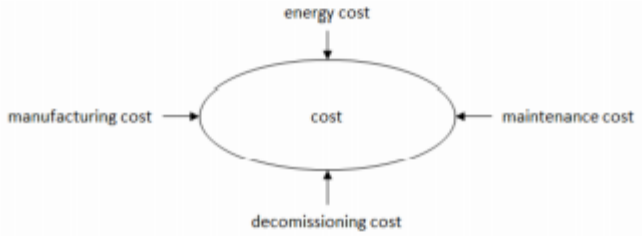


Figure 17. Influencing parameters regarding the cost requirements of THS.

The requirement for a THS is to keep the sum of these four cost categories as low as possible. However, the cost of manufacturing and the cost of maintenance are in tension with each other. A product of higher quality typically requires higher manufacturing effort and therefore a higher cost but could lead to lower demand for maintenance and therefore a lower maintenance cost. Regarding the energy cost, the primary energy cost, which is defined as the consumption of electric energy for heating, and the secondary energy cost must be considered. Regarding the secondary energy cost, a possible example is the energy consumption from traction due to weight penalties or advantages is meant. Decommissioning could either result in a cost or an income since used batteries are often used for second-life purposes.

3.5. Electric Connection

Out of the descriptions within Section 2.1.2, the heating system for charging the THS should preferably be operable at the 650 to 750 VDC level. A second option could be to use a DC/AC converter and operate at 400 VAC if having a DC-compatible heating system is inefficient or not possible. Furthermore, it should be connectable to a 24 VDC level for the energy supply of minor energy consumers, such as sensors or control electronics. Additionally, communication with the vehicle should be possible via the CAN interface.

3.6. Thermal Connection

Integration into the thermal management system can be done using two different solutions. The first one is to directly heat the air blown into the vehicle's cabin, while the second one is to

transfer heat into a cooling fluid circle, which spreads the thermal energy throughout the interior of the bus. Both solutions could lead to sufficient results. Since the THS is more intended to replace a fuel heater or an electric heater in 12 m or larger buses, an integration that involves a connection to the cooling fluid of the vehicle is regarded as the preferred solution and therefore considered to be the primary requirement.

3.7. Efficiency

The efficiency of a heating system, i.e., the ratio of used thermal energy to charged electric energy, is directly connected to the consumption of electrical energy or fuel. Since lower consumption has positive ecological and economic effects, the efficiency of THS should be as high as possible. To give a specific number, the efficiency of an electric heater powered using a battery is considered. Considering a heater with an efficiency of 98% (see Section 2.3.2) and battery losses of 6.9%, according to the measurements of Berthold, an overall efficiency of about 91.2% would be the result [19]. Therefore, THS should have an efficiency of at least about 90%.

3.8. Maintenance

As discussed earlier, maintenance is conducted for all heating solutions currently used within a bus. Based on this, it was concluded that maintenance should be necessary for THS. As such, the related requirement for THS is that it should be designed in a way that means maintenance is as easy as possible, especially for wearing parts, where the wearing parts in THS could be, e.g., the electric heaters or the housing of the phase change material.

3.9. Safety

Since THS liquid metals with temperatures that are potentially higher than 600 °C are used, safety is an important criterion, in particular regarding the risk of fire or burns. Regarding the risk of fire in buses, some guidelines are given within the VDV 2303 regulations. Other relevant documents for the safety of buses are the European guidelines 2001/85/EG and 95/28/EWG. One basic conclusion drawn from these guidelines is that components with high surface temperatures or hot liquids have to be kept away from burnable parts within the interior of buses. For THS that is, e.g., positioned within the interior of the vehicle, this would become relevant and has to be considered. Other important considerations regarding safety are to prevent liquid metal from flowing out uncontrollably from the storage and to manage the isolation of electric components that are relevant for the charging of the THS [53–55].

Another safety aspect is the protection of storage from unwanted damage. Just as with the state-of-the-art heating systems, the safety mechanism that, e.g., keeps the THS from overheating needs to be implemented.

3.10. Adjustment

Looking at the adjustment of the known heating solutions, it is noticed that it is typically kept simple. Because of this, the adjustment of a THS regarding thermal output should also be kept as simple as possible; a kind of on/off solution seems sufficient.

3.11. Ecology

The last requirement for THS is that it should be as ecologically safe as possible. In particular, no critical raw materials or toxic materials should be used. Furthermore, the CO_2 footprint should be as low as possible. Besides the energy consumption in operation, the energy consumption during the manufacturing process should also be as low as possible. Additionally, recyclable materials should be used wherever possible.

4. Conclusions

The present paper provides the basics for the development of thermal energy storage using metallic phase change material for use within a heating system in battery-powered electric buses. This was done by providing a review of selected topics on battery-powered electric buses, leading to the following conclusions:

- Current battery-powered electric buses have drawbacks compared to conventional diesel buses due to their high investment costs and limited range. The investment costs are typically double that of conventional diesel buses. The range is typically limited to below 300 km and becomes even lower when interior heating is required and electric heating systems are used for heating; in such a case, the range can be cut by more than half, which can lead to ranges that prevent electric buses from a year-round use. Because of this, the spread of battery-powered electric buses is currently very low (e.g., only 0.28% of buses within Germany are battery-powered).
- The described limitations mainly result from the use of costly battery systems, which can easily cost €100,000–200,000, about half of the overall cost of a conventional diesel bus.
- The charging of a battery-powered electric bus can either be done using "overnight charging," which requires lower installation costs for the charging systems but requires high-capacity energy-storage systems. The other charging strategy is "opportunity charging," which leads to higher installation costs for the charging systems but requires low-capacity energy-storage systems. Depending on the charging scenario, either high-energy batteries or high-power batteries should be used.

By utilizing knowledge of the state of the art on battery-powered electric buses, requirements regarding thermal energy storage with metallic phase change material were produced. The main requirements are the following:

- The storage capacity and performance of a thermal energy storage system with metallic phase change material has to be easily adaptable since it is strongly dependent on the given scenario; storage capacities might vary between 11.7 kWh and 425 kWh, with the installed electric charging power varying between 60.7 kW and 235 kW.
- The long-term stability of thermal high-performance storage should allow for at least several thousand hours of use. However, maintenance is allowed to reach this, where the ease of maintenance for wearing parts should be considered.
- Mass and the associated gravimetric energy density is regarded as being more relevant than volume and the associated volumetric energy density since volume for additional components seems to be readily available in a bus; however, mass limits the maximum number of passengers and affects energy consumption for traction. The gravimetric energy density of THS should reach values higher than about 100 Wh/kg for extreme opportunity charging scenarios and values higher than about 180 Wh/kg for extreme overnight charging scenarios to be comparable with a conventional electric heater using electric energy from the traction battery.
- The integration into the thermal management architecture could either be done via integration into the airflow provided to the vehicle's interior or via integration into the liquid cooling circle; however, integration into the liquid cooling circle is regarded as the preferred solution since most of the currently used heating systems are integrated into the liquid cooling circle. Thermal energy storage using metallic phase change materials could simply replace the current heating systems if integration into the liquid cooling circle is possible.
- The efficiency of a thermal energy storage system using metallic phase change materials should be as high as possible, namely in the range of 90% or more, if possible.
- The heat supply system of the storage system should ideally be adaptable to a DC intermediate circle with voltages of about 650 to 750 VDC; alternatively, a connection to a 400 VAC level could also be possible.

- The use of thermal energy storage using metallic phase change materials should aim to minimize the overall cost, which is made up of the manufacturing cost, energy cost, maintenance cost, and decommissioning cost.
- Thermal energy storage using metallic phase change materials should be designed in such a way that no safety issues, especially regarding burning or leakage of liquid metal can occur; also, it should be equipped with safety devices to prevent the system from overheating, for example.
- Ecological aspects must be considered when designing thermal high-performance storage: if possible, recyclable raw materials, no toxic materials, and no critical raw materials should be used; additionally, the energy costs during manufacturing should be as low as possible.

Author Contributions: The contribution of the author P.V. refers to the Sections 2.1.2, 2.3.2 and 2.3.5. Main contribution was the support of the literature research in these paragraphs. The contribution of the author V.S. refers to the Sections 3.2 and 3.9. Main contrtibutions were the calculation of the lifetime and the definition of the requirements regarding safety as well as the search for relevant safety regulations. All other contributions come from the author W.K. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by the EFRE (Europäischer Fonds für regionale Entwicklung) Leitmarktwettbewerb NRW (Nordrhein-Westfalen) Mobilität.Logistik within the project "Lathe.Go" and by Baden-Württemberg´s Department of Trade and Industry within the project "THS-Bus."

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

References

1. Kraftfahrt- Bundesamt (KBA). *Fahrzeugzulassungen - Bestand an Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen*; Kraftfahrt- Bundesamt (KBA): Flensburg, Germany, 2019.
2. Knote, T. *Ansätze zur Standardisierung und Zielkosten für Elektrobusse*; Fraunhofer IVI: Dresden, Germany, 2017.
3. Kraft, W.; Jilg, V.; Altstedde, M.K.; Lanz, T.; Vetter, P.; Schwarz, D. Thermal High Performance Storages for use in vehicle applications. In *IAV - ETA Tagung*; IAV: Berlin, Germany, 2018.
4. Kraft, W. *Metallische Latentwärmespeicher als Heizsystem für die Anwendung in Batterieelektrischen PKWs und Bussen*; Hochschule für Technik - Seminar Erneuerbare Energien: Karlsruhe, Germany, 2019.
5. Wikipedia. Vorfeldbus. Available online: https://de.wikipedia.org/wiki/Vorfeldbus (accessed on 22 January 2020).
6. Wikipedia. Stadtbus (Fahrzeug). Available online: https://de.wikipedia.org/wiki/Stadtbus_ (accessed on 22 January 2020).
7. Wikipedia. Regionalbus. Available online: https://de.wikipedia.org/wiki/Regionalbus (accessed on 22 January 2020).
8. Wikipedia. Reisebus. Available online: https://de.wikipedia.org/wiki/Reisebus (accessed on 22 January 2020).
9. Faltenbacher, M.; Eckert, S.; Kupferschmid, S.; Klingenberg, H.; Burkhardt, J.; Schärzel, C.; Kiepsch, M.; Ramme, J.; Knote, T.; Jehle, C.; et al. *Marktübersicht Fahrzeuge und Infrastruktur - Programmbegleitforschung Bus*; BMVI: Leinfelden-Echterdingen, Germandy, 2019.
10. EvoBus GmbH. *Omnibus - Der vollelektrische Mercedes-Benz eCitaro - Special Edition*; EvoBus GmbH: Stuttgart, Germany, 2019.
11. Valeo. *Thermo AC/DC*; Valeo: Gilching, Germany, 2017.
12. Budde-Meiwes, H.; Drillkens, J.; Lunz, B.; Muennix, J.; Rothgang, S.; Kowal, J.; Sauer, D. A review of current automotive battery technology and future prospects. *J. Automob. Eng.* **2013**, *227*, 761–776. [CrossRef]
13. Bünnagel, C. *Interview mit Sven Schulz, CEO von Akasol*; Busplaner.de: Munich, Germany, 2019; pp. 28–31.
14. Batteryuniversity.com. BU-205_ Types of Lithium-ion. Available online: https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion (accessed on 19 February 2020).
15. Akasol. Akasystem AKM CYC - Ultra-Hochenergietechnologie für Langstreckenanwendungen. Available online: https://www.akasol.com/de/akasystem-akm-cyc (accessed on 19 February 2020).
16. Akasol. AKASYSTEM AKM POC. Available online: https://www.akasol.com/de/akasystem-akm-poc (accessed on 19 February 2020).

17. Schwarzer, M. Linienbusse unter Strom. ZEIT ONLINE, Bde. %1 von %2. Available online: https://www.zeit.de/auto/2010-04/linienbusse-strom (accessed on 19 February 2016).
18. Verkehrsbetriebe Hamburg-Holstein GmbH. Das zweite Leben der Elektrobus Batterien. Available online: https://vhhbus.de/second-life-energiespeicher/ (accessed on 8 April 2020).
19. Berthold, K. Techno-ökonomische Auslegungsmethodik für die Elektrifizierung urbaner. Busnetze. Dissertation, Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik, Karlsruhe, Germany, 2019.
20. Cundill, M.; Watts, P. *Bus Boarding and Alighting Times*; Transport and Road Research Laboratory: Crowthorne, UK, 1973.
21. Sonnakalb, M.; Tegethoff, W.; Försterling, S. *CO2 basierte Air-Condition und Heizung für Stadtbusse*; Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt, gefördert unter dem Aktenzeichen Az: 23864 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt: Braunschweig, Germany, 2008.
22. Eberspächer. Eberspächer Wasserheizung Hydronic. 2019. Available online: https://www.eberspaecher.com/produkte/fuel-operated-heaters/produktportfolio/wasserheizungen.html (accessed on 6 March 2019).
23. UITP Bus Committee. Standardised On-Road Test Cycles - SORT. In Proceedings of the 54th UITP International Congress, London, UK, 20–25 May 2001.
24. Valeo. *Werkstatthandbuch Thermo Plus*; Valeo: Gilching, Germany, 2018.
25. Valeo. *Werkstatt-Handbuch Thermo AC/DC*; Valeo: Gilching, Germany, 2018.
26. Bareiß, M.; Vorgerd, D. Thermomanagement für elektrisch angetriebene Stadtbusse. *ATZ* **2019**, *121*, 52–55. [CrossRef]
27. Bundesamt für Justiz, Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO) - § 41 Bremsen und Unterlegkeile. 2012. Available online: https://www.gesetze-im-internet.de/stvzo_2012/__41.html (accessed on 7 April 2020).
28. Jefferies, D.; Ly, T.-A.; Kunith, A.; Göhlich, A. *Energiebedarf Verschiedener Klimatisierungssysteme für Elektro-Linienbusse*; DKV-Tagung: Dresden, Germany, 2015.
29. Valeo. *RevoE*; Valeo: Gilching, Germany, 2017.
30. Konvekta, AG. *CO_2 Wärmepumpe für Elektrobusse*; Konvekta: Schwalmstadt, Germany, 2017.
31. Konvekta, AG. *UltraLight 500 CO_2 Wärmepumpe*; Konvekta: Schwalmstadt, Germany, 2018.
32. Wirtschaftswoche, Die Krux mit dem Kältemittel in Auto-Klimaanlagen. 26 Juni 2018. Available online: https://www.wiwo.de/technologie/mobilitaet/umweltbundesamt-warnt-die-krux-mit-dem-kaeltemittel-in-auto-klimaanlagen/22735826.html (accessed on 8 April 2020).
33. Konvekta, AG. *Datenblatt Ultralight 500 EM / 600 EM/700 EM - 2. Gen.*; Konvekta: Schwalmstadt, Germany, 2018.
34. Basile, R.; Scheid, H.; Tanke, D.; Moeseler, M.; Häring, R. Beheizungsstrategien für Elektrobusse. In *Transport Innovation for Sustainable Cities and Regions (POLIS)*; Valeo: Brussels, Belgium, 2017.
35. Lee, M.; Lee, H. Steady state and start-up performance charactersitics of air source heat pump for cabin heating in an electric passenger vehicle. *Int. J. Refrig.* **2016**, *69*, 232–242. [CrossRef]
36. Miller, W. Laboratory examination and seasonal analysis of frosting and defforsting for an air-to-air heat pump. *Ashrae Trans.* **1987**, *93*, 1474–1489.
37. Valeo. Heizsysteme. Available online: https://www.valeo-thermalbus.com/eu_de/Produkte/Heizsysteme (accessed on 17 April 2019).
38. Valeo. *Werkstatt-Handbuch REVO-E*; Valeo: Gilching, Germany, 2016.
39. Valeo. *Wartungs- und Serviceplan REVO-E Wärmepumpe*; Valeo: Gilching, Germany, 2017.
40. Best, P. Entwicklung ener moudlaren und schnellladefähigen Wärmespeicherheizung für vollelektrische Stadtbusse. In 3. *Tagung Fahrzeugklimatisierung*; Haus der Technik e.V.: Essen, Germany, 2019.
41. Kratzing, R. *HEAT2GO - Entwicklung eines schnellladefähigen Latentwärmespeichers für die Beheizung von Elektrobussen*; Fraunhofer Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI: Dresden, Germany, 2017.
42. Grossmann, H. *Pkw – Klimatisierung – Physikalische Grundlagen und technische Umsetzung*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2013.
43. Climate-Data.org. Klima Winnipeg. Available online: https://de.climate-data.org/nordamerika/kanada/manitoba/winnipeg-982/ (accessed on 5 March 2020).
44. Climate-Data.org. Klima Astana. Available online: https://de.climate-data.org/asien/kasachstan/astana/astana-491/ (accessed on 5 March 2020).
45. Climate-Data.org. Klima Las Vegas. Available online: https://de.climate-data.org/nordamerika/vereinigte-staaten-von-amerika/nevada/las-vegas-723/ (accessed on 5 March 2020).

46. Climate-Data.org. Klima Teheran. Available online: https://de.climate-data.org/asien/iran/teheran/teheran-198/ (accessed on 5 March 2020).
47. Beekman, R.; van den Hoed, R. Operational demands as determining factor for electric bus charging infrastructure. In Proceedings of the Hybrid and Electric Vehicle Conerence, London, UK, 2 November 2016.
48. Goebelt, R. *TÜV Bus-Report 2018*; Verband der TÜV e.V.: Berlin, Germany, 2018.
49. Forster, O. Mercedes-Benz eCitaro - Ausfahrt auf leisen Sohlen. *Busmagazin* **2019**, 7–10.
50. Görgler, J. Mercedes-Benz Citaro (Euro 6) - Sparsam unterwegs. *Busmagazin* **2014**, 6–10.
51. EvoBus GmbH. *Der Neue eCitaro - Technische Informationen*; EvoBus GmbH: Stuttgart, Germany, 2019.
52. EvoBus GmbH. *Die Citaro Stadtbusse*; EvoBus GmbH: Stuttgart, Germany, 2019.
53. Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV). *VDV-Mitteilung 2303 - Empfehlung zur Verhinderung von Brandschäden bei Linienbussen*; Beka Verlag: Köln, Germany, 2012.
54. Das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union. *Richtlinie 2001/85/EG des europäischen Parlaments und des Rates*; Das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union: Brusseles, Belgium, 2012.
55. Das europäische Parlament und der Rat der europäischen Union. *Richtlinie 95/28/EG*; Das europäische Parlament und der Rat der europäischen Union: Brusseles, Belgium, 1995.

© 2020 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Veröffentlichung bei der HDT-Tagung

Thermische Hochleistungsspeicher zur bedarfsgerechten Beheizung batterieelektrischer Omnibusse

Peter Vetter M.Sc. (peter.vetter@dlr.de)
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)
Institut für Fahrzeugkonzepte

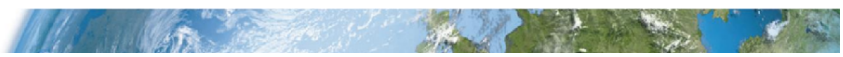
Werner Kraft	DLR
Veronika Stahl	DLR
Michael Sonnekalb	Konvekta AG
Pascal Best	Konvekta AG

Gliederung

1. Vorstellung DLR & Institut für Fahrzeugkonzepte
2. Beheizung batterieelektrischer Omnibusse
3. Lösungsansatz am DLR
4. Thermische Hochleistungsspeicher
5. Untersuchungen am Flughafen Stuttgart
6. Zusammenfassung & Ausblick

Gliederung

1. **Vorstellung DLR & Institut für Fahrzeugkonzepte**
2. Beheizung batterieelektrischer Omnibusse
3. Lösungsansatz am DLR
4. Thermische Hochleistungsspeicher
5. Untersuchungen am Flughafen Stuttgart
6. Zusammenfassung & Ausblick



1. Vorstellung
2. Beheizung batterieelektrischer Omnibusse
3. Lösungsansatz am DLR
4. Thermische Hochleistungsspeicher
5. Untersuchungen am Flughafen Stuttgart
6. Zusammenfassung & Ausblick

1 Vorstellung
DLR

Forschungszentrum der BRD für Luft- und Raumfahrt sowie nationale Raumfahrtagentur

Forschungs- und Entwicklungsarbeit in den Bereichen:

- Luftfahrt
- Raumfahrt
- Energie
- Sicherheit
- Digitalisierung
- **Verkehr**

Institut für Fahrzeugkonzepte

1. Vorstellung
2. Beheizung batterieelektrischer Omnibusse
3. Lösungsansatz am DLR
4. Thermische Hochleistungsspeicher
5. Untersuchungen am Flughafen Stuttgart
6. Zusammenfassung & Ausblick

1 Vorstellung
Institut für Fahrzeugkonzepte

Systeminstitut zur ganzheitlichen Entwicklung von innovativen Fahrzeugsystemen für Straßen- und Schienenverkehr (ca. 100 Mitarbeiter)

Forschungsbereiche:

- Fahrzeugsysteme und Technologiebewertung
- Fahrzeug-Energiekonzepte
- Fahrzeug-Architekturen und Leichtbaukonzepte
- Werkstoff- und Verfahrensanwendungen Gesamtfahrzeug

- **Alternative Energiewandler** ►u.a. Thermische Hochleistungsspeicher für Fahrzeuganwendungen

Gliederung

1. Vorstellung DLR & Institut für Fahrzeugkonzepte
2. **Beheizung batterieelektrischer Omnibusse**
3. Lösungsansatz am DLR
4. Thermische Hochleistungsspeicher
5. Untersuchungen am Flughafen Stuttgart
6. Zusammenfassung & Ausblick

1. Vorstellung
2. **Beheizung batterieelektrischer Omnibusse**
3. Lösungsansatz am DLR
4. Thermische Hochleistungsspeicher
5. Untersuchungen am Flughafen Stuttgart
6. Zusammenfassung & Ausblick

2 Beheizung batterieelektrischer Omnibusse
Herausforderungen

Batterieelektrische Omnibusse etablieren sich nur langsam

Neuzulassungen	BEV	HEV	DIESEL
2019	187	454	5717

Quelle: European Automotive Manufacturers Association (ECEA)

Hauptursachen:

- Hohe Anschaffungskosten (große und teure Batterien)
- Reichweitenverlust durch Kühlung im Sommer und Beheizung im Winter

1. Vorstellung
2. **Beheizung batterieelektrischer Omnibusse**
3. Lösungsansatz am DLR
4. Thermische Hochleistungsspeicher
5. Untersuchungen am Flughafen Stuttgart
6. Zusammenfassung & Ausblick

2 Beheizung batterieelektrischer Omnibusse
Herausforderungen

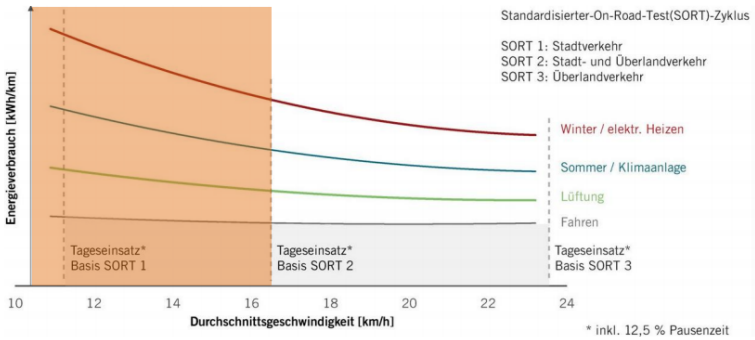
Batterieelektrische Omnibusse etablieren sich nur langsam

Neuzulassungen	BEV	HEV	DIESEL
2019	187	454	5717

Quelle: European Automotive Manufacturers Association (ECEA)

Hauptursachen:

- Hohe Anschaffungskosten (große und teure Batterien)
- Reichweitenverlust durch Kühlung im Sommer und Beheizung im Winter



Energieverbrauch über Durchschnittsgeschwindigkeit nach Verbrauchern und Jahreszeit (Quelle: Daimler Buses)

► **Witterungsabhängiger Reichweitenverlust erschwert die Elektrifizierung des ÖPNV (insbesondere in urbanen Fahrzyklen)**

1. Vorstellung
2. **Beheizung batterieelektrischer Omnibusse**
3. Lösungsansatz am DLR
4. Thermische Hochleistungsspeicher
5. Untersuchungen am Flughafen Stuttgart
6. Zusammenfassung & Ausblick

2 Beheizung batterieelektrischer Omnibusse
Stand der Technik

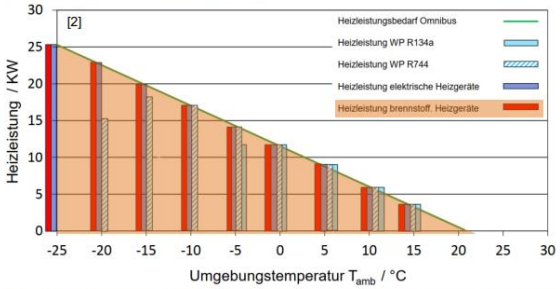
Brennstoffbetriebene Heizgeräte

Vorteile:

- Entlastung der Traktionsbatterien
- Konstante Leistungsfähigkeit
- Bioethanol potentielle Alternative zu Diesel

Nachteile:

- Keine lokale Emissionsfreiheit
- Ggf. Geruchsbelästigung
- Wartungsintensiv



[1] Daimler AG [2] + [3] Valeo Thermal Commercial Vehicles Germany GmbH

1. Vorstellung
2. **Beheizung batterieelektrischer Omnibusse**
3. Lösungsansatz am DLR
4. Thermische Hochleistungsspeicher
5. Untersuchungen am Flughafen Stuttgart
6. Zusammenfassung & Ausblick

2 Beheizung batterieelektrischer Omnibusse
Stand der Technik

Elektrische Heizgeräte

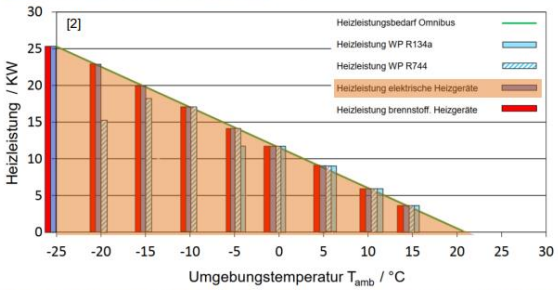
Vorteile:

- Lokale Emissionsfreiheit
- Konstante Leistungsfähigkeit
- Können Funktion der gesetzlich vorgeschriebenen Dauerbremse erfüllen (Bremswiderstand)

Nachteile:

- Geringe Effizienz ($1kW_{el} \triangleq 1\ kW_{th}$)

► Hohe Belastung der Traktionsbatterien (Reichweitenverlust)



[1] Daimler AG [2] + [4] Valeo Thermal Commercial Vehicles Germany GmbH

1. Vorstellung
2. **Beheizung batterieelektrischer Omnibusse**
3. Lösungsansatz am DLR
4. Thermische Hochleistungsspeicher
5. Untersuchungen am Flughafen Stuttgart
6. Zusammenfassung & Ausblick

2 Beheizung batterieelektrischer Omnibusse
Stand der Technik

Wärmepumpensysteme

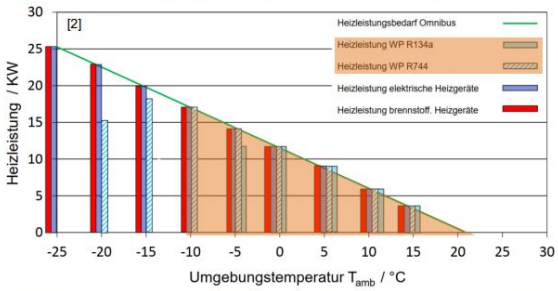
Vorteile:

- Hohe Effizienz ($1kW_{el} \triangleq$ bis zu $4\ kW_{th}$)
- Heizung und Kühlung möglich

Nachteile:

- Vergleichsweise hohe Investitionskosten
- Leistungsfähigkeit und Effizienz sinken bei tiefen Außentemperaturen
- Zusätzlich elektrische Heizeinrichtung erforderlich

► **Entlastung der Traktionsbatterien bei tiefen Umgebungstemperaturen?**



[1] Daimler AG [2] Valeo Thermal Commercial Vehicles Germany GmbH [5] Konvekta AG

Gliederung

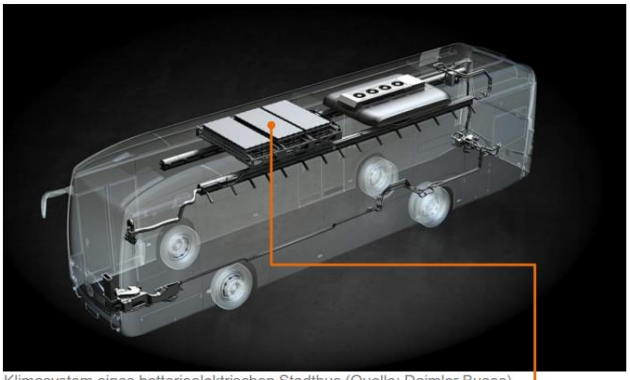
1. Vorstellung DLR & Institut für Fahrzeugkonzepte
2. Beheizung batterieelektrischer Omnibusse
3. **Lösungsansatz am DLR**
4. Thermische Hochleistungsspeicher
5. Untersuchungen am Flughafen Stuttgart
6. Zusammenfassung & Ausblick

1. Vorstellung
2. Beheizung batterieelektrischer Omnibusse
3. **Lösungsansatz am DLR**
4. Thermische Hochleistungsspeicher
5. Untersuchungen am Flughafen Stuttgart
6. Zusammenfassung & Ausblick

3 Lösungsansatz am DLR
Integration thermischer Speicherkapazität

Ziele:

- Entlastung der Traktionsbatterien, auch bei niedrigen Umgebungstemperaturen
- Hohe Energie- und Leistungsdichten
- Schnellladefähigkeit
- Kostengünstiges Gesamtsystem
- Ausschließliche Nutzung ökologisch unproblematischer Speichermaterialien



Klimasystem eines batterieelektrischen Stadtbus (Quelle: Daimler Buses)

► **Ergänzung bzw. partielle Substitution von Batteriekapazität durch thermischen Sekundärspeicher!**

Gliederung

1. Vorstellung DLR & Institut für Fahrzeugkonzepte
2. Beheizung batterieelektrischer Omnibusse
3. Lösungsansatz am DLR
4. **Thermische Hochleistungsspeicher**
5. Untersuchungen am Flughafen Stuttgart
6. Zusammenfassung & Ausblick

1. Vorstellung
2. Beheizung batterieelektrischer Omnibusse
3. Lösungsansatz am DLR
4. **Thermische Hochleistungsspeicher**
5. Untersuchungen am Flughafen Stuttgart
6. Zusammenfassung & Ausblick

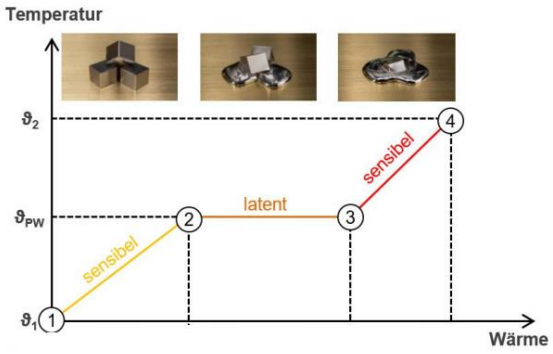
4 Thermische Hochleistungsspeicher
Speicherprinzip

Kombination aus sensibler und latenter Wärme:

1-2: Das mPCM wird bis zum Schmelzpunkt erwärmt (Speicherung sensibler Wärme)

2-3: Das mPCM wird vollständig geschmolzen (Speicherung latenter Wärme)

3-4: Das mPCM wird bis zur maximalen Speichertemperatur erwärmt (erneute Speicherung sensibler Wärme)



Besonderheiten:

- Hohe Wärmeleitfähigkeit
- Hohe spezifische Energiedichten
- Pot. kostengünstige ökologisch unbedenkliche Speichermaterialien

1. Vorstellung
2. Beheizung batterieelektrischer Omnibusse
3. Lösungsansatz am DLR
4. **Thermische Hochleistungsspeicher**
5. Untersuchungen am Flughafen Stuttgart
6. Zusammenfassung & Ausblick

4 Thermische Hochleistungsspeicher
Speicherkonzeption

Ziel:

- Ganzheitliche Auslegung gemäß Anwendungsszenario

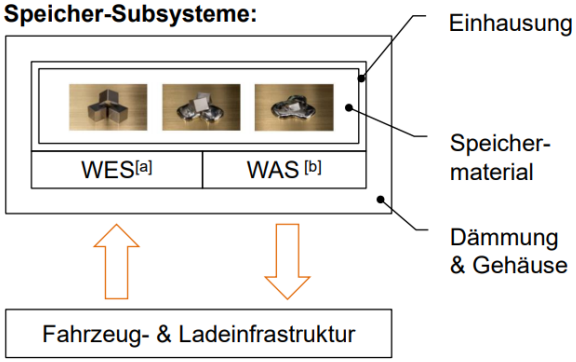
Wesentliche Herausforderung:

- Abhängigkeit von klimatischen, fahrzeug- bzw. einsatzspezifischen sowie technologischen Rahmenbedingungen

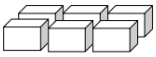
Forschungsschwerpunkte:

- Analyse von Fahrzeugsystemen und Einsatzszenarien
- Entwicklung von Fahrzeugintegrations- und Betriebsstrategien
- Entwicklung von Subsystemen
- Konzeption & Simulation Gesamtsystem

Speicher-Subsysteme:



► **Fokus auf skalierbare Speichermodule und bedarfsgerechte Betriebsstrategien**



[a] WES: Wärmeeintragsystem
[b] WAS: Wärmeaustragsystem

1. Vorstellung
2. Beheizung batterieelektrischer Omnibusse
3. Lösungsansatz am DLR
4. **Thermische Hochleistungsspeicher**
5. Untersuchungen am Flughafen Stuttgart
6. Zusammenfassung & Ausblick

4 Thermische Hochleistungsspeicher
Wärmeeintrag/Beladung

Ziel:

- Hohe spezifische Beladeleistung und Effizienz

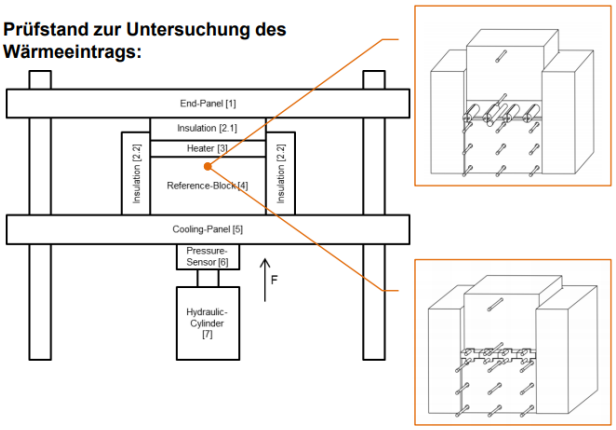
Wesentliche Herausforderung:

- Hohe Temperaturen (bis zu 700 °C)
- Thermische Kontaktwiderstände

Forschungsschwerpunkte:

- Grundlegende Untersuchung von Elektrowärmeverfahren
- Konzeption & experimentelle Untersuchung von Wärmeeintragsystemen
- Elektrische Fahrzeuganbindung

Prüfstand zur Untersuchung des Wärmeeintrags:



► **Fokus auf indirekte Widerstandserwärmung und DC-Versorgung**

1. Vorstellung
2. Beheizung batterieelektrischer Omnibusse
3. Lösungsansatz am DLR
4. **Thermische Hochleistungsspeicher**
5. Untersuchungen am Flughafen Stuttgart
6. Zusammenfassung & Ausblick

4 Thermische Hochleistungsspeicher
Speicher- und Einhausungsmaterialien

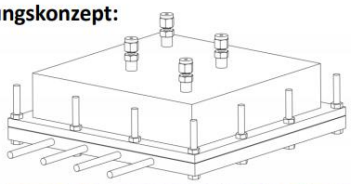
Ziel:
- Hohe grav. und vol. Energie- und Leistungsdichte
- Langzeitstabile Einhausung

Wesentliche Herausforderung:
- Reaktion zwischen Speicher- und Einhausungsmaterialien

Forschungsschwerpunkte:
- Thermophysikalische Analyse mPCM (DSC[1], LFA[2]) und Charakterisierung sowie Reaktivitätsanalyse
- Konzeption und experimentelle Untersuchung der Einhausungskonzepte

Institut für Fahrzeugkonzepte + Institut für Materialphysik im Weltraum

Einhausungskonzept:



► **Fokus auf $AlSi_{12}$ als Speichermaterial mit Graphit-Einhausung**

300 Wh/kg, 750 Wh/l (ΔT= 500K)
ca. 6,50 €/kWh
192 W/mK

1: DSC = Dynamische Differenzkalometrie
2: LFA = Laser Flash Analyse

1. Vorstellung
2. Beheizung batterieelektrischer Omnibusse
3. Lösungsansatz am DLR
4. **Thermische Hochleistungsspeicher**
5. Untersuchungen am Flughafen Stuttgart
6. Zusammenfassung & Ausblick

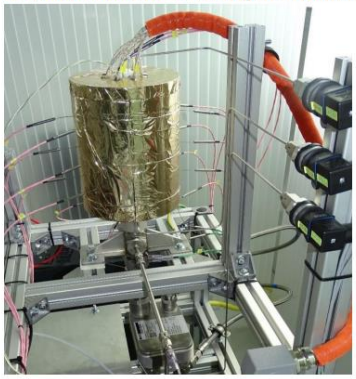
4 Thermische Hochleistungsspeicher
Wärmeaustrag/Entladung

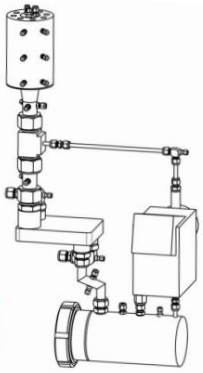
Ziel:
- Hohe spezifische Entladeleistung

Herausforderung:
- Großer Temperaturbereich (100 bis 700 °C)
- Thermische Kontaktwiderstände

Forschungsschwerpunkte:
- Grundlegende Untersuchung von Wärmeübertragungsverfahren
- Konzeption & experimentelle Untersuchung von Wärmeaustragsystemen
- Thermische Fahrzeuganbindung

Prüfstand zur Untersuchung des Wärmeaustrags:





► **Fokus auf geschlossene ein- und zweiphasige Arbeitsmittelkreisläufe und Wärmeübertragung auf Fahrzeugkühlwasserkreislauf**

Gliederung

1. Vorstellung DLR & Institut für Fahrzeugkonzepte
2. Beheizung batterieelektrischer Omnibusse
3. Lösungsansatz am DLR
4. Thermische Hochleistungsspeicher
5. **Untersuchungen am Flughafen Stuttgart**
6. Zusammenfassung & Ausblick

1. Vorstellung
2. Beheizung batterieelektrischer Omnibusse
3. Lösungsansatz am DLR
4. Thermische Hochleistungsspeicher
5. **Untersuchungen am Flughafen Stuttgart**
6. Zusammenfassung & Ausblick

5 Untersuchungen am Flughafen Stuttgart
Ausgangssituation

Projekt THS-Bus (2018 bis 2021)

Projektziele:
- Entwicklung eines modularen Speicherkonzepts & einer Auslegungsmethodik für batterieelektrische Busse
- Aufbau und Untersuchung eines Speicher-Prototyps in Laborumgebung

Besonderheiten am Flughafen Stuttgart:
- 16 batterieelektrische Vorfeldbusse
- 14 Ladesäulen (60 kW)
- Kein Fahrbetrieb zwischen 01:00 und 05:00 Uhr
- Keine Steigungen (i.d.R. alle Flughäfen)

Einsatzradius der Vorfeldbusse am Stuttgarter Flughafen (Quelle: Google Maps)

Gefördert durch[6]: Baden-Württemberg, Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau

Projektpartner[7]: KONVEKTA The Innovation Company., STUTTGART AIRPORT

[6] Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau Baden-Württemberg [7] Konvekta AG; Flughafen Stuttgart GmbH

1. Vorstellung
2. Beheizung batterieelektrischer Omnibusse
3. Lösungsansatz am DLR
4. Thermische Hochleistungsspeicher
5. **Untersuchungen am Flughafen Stuttgart**
6. Zusammenfassung & Ausblick

5 Untersuchungen am Flughafen Stuttgart
Rahmenbedingungen

Fahrzeuge:
- Keine Wärmepumpe/ Klimaanlage
- Hoher Fensteranteil
- Doppeltüren beidseitig und hinten
- Fahrer- und Fahrgastkabine vollständig getrennt
- 84 kWh Batteriekapazität (Lithium-Titan-Oxid)

Beheizung:
- Nächtliche Vorkonditionierung (< 5°C mit 7,5 kW AC)
- Ausschließlich elektr. Beheizung (20 kW DC)
- Temperierung Fahrgastraum lediglich auf 10 °C
- Temperierung Fahrerkabine manuell nach Fahrerwunsch

Vorfeldbusse am Stuttgarter Flughafen

► **Batterieelektrische Vorfeldbusse besitzen deutliche Unterschiede zu Stadt-/ Linienbusse**

1. Vorstellung
2. Beheizung batterieelektrischer Omnibusse
3. Lösungsansatz am DLR
4. Thermische Hochleistungsspeicher
5. **Untersuchungen am Flughafen Stuttgart**
6. Zusammenfassung & Ausblick

5 Untersuchungen am Flughafen Stuttgart
Ziele und Umsetzung

Ermittlung THS-relevanter Parameter:
- Spezifischer Heizenergiebedarf
- Leistungs- und Temperaturverläufe
- Ladecharakteristik
- Möglichkeiten zur Speicherintegration

Erfassung von:
- Betriebszustand Heizgerät
- Ladeleistung und Dauer
- Temperaturen von Fahrgast- und Fahrerraum sowie der Umgebung
- Türöffnungszeiten & Fahrzeugposition

Datenlogger im Hauptschaltschrank eines Vorfeldbusses

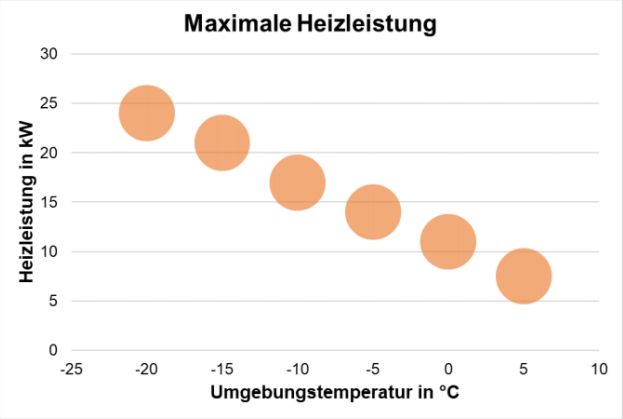
► **Ein Fahrzeug wurde im Zeitraum von Januar 2019 bis März 2019 mit Messtechnik ausgestattet**

1. Vorstellung
2. Beheizung batterieelektrischer Omnibusse
3. Lösungsansatz am DLR
4. Thermische Hochleistungsspeicher
5. **Untersuchungen am Flughafen Stuttgart**
6. Zusammenfassung & Ausblick

5 Untersuchungen am Flughafen Stuttgart
Ergebnisse

Ergebnisse:

- Heizleistungsbedarf ähnlich wie bei 12 m Stadtbussen (jedoch Fahrgastraumtemp. = 10 °C)
- Ca. **3 bis 4 Zwischenladungen** täglich
- Durchschnittliche **Ladedauer ca. 30 Minuten**
- Durchschnittliche **Fahreinsatzdauer 2 bis 4 h**
- **Durchschnittsgeschwindigkeit von 4,6 km/h** (<< Stadtbusse)

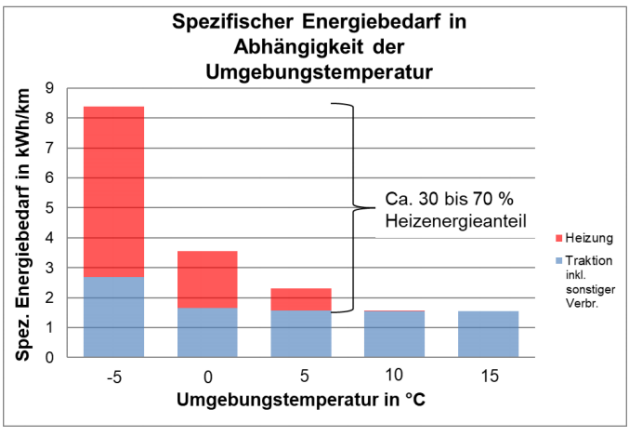


1. Vorstellung
2. Beheizung batterieelektrischer Omnibusse
3. Lösungsansatz am DLR
4. Thermische Hochleistungsspeicher
5. **Untersuchungen am Flughafen Stuttgart**
6. Zusammenfassung & Ausblick

5 Untersuchungen am Flughafen Stuttgart
Ergebnisse

THS-relevante Parameter:

- Im Temperaturbereich von -5 bis + 10 °C **ca. 30 bis 70 % Substitutions-Potential**
- Nacht- und Zwischenladung mit **bis zu 60 kW DC-Ladeleistung** möglich
- **Min. 20 kW Heizleistung** erforderlich
- **Substitution der elektrischen Heizgeräte**



Beispielszenario:
Ladung des THS und Vorkonditionierung des Innenraumes über Nacht (01 bis 05 Uhr) sowie bedarfsgerechte Ladung der Traktionsbatterien am Tag

Gliederung

1. Vorstellung DLR & Institut für Fahrzeugkonzepte
2. Beheizung batterieelektrischer Omnibusse
3. Lösungsansatz am DLR
4. Thermische Hochleistungsspeicher
5. Untersuchungen am Flughafen Stuttgart
6. **Zusammenfassung & Ausblick**

1. Vorstellung
2. Beheizung batterieelektrischer Omnibusse
3. Lösungsansatz am DLR
4. Thermische Hochleistungsspeicher
5. Untersuchungen am Flughafen Stuttgart
6. **Zusammenfassung & Ausblick**

6 Zusammenfassung und Ausblick
THS-Einsatz in batterieelektrischen Omnibussen

Fazit:

- THS grundsätzlich zur bedarfsgerechten Beheizung batterieelektrischer Omnibusse geeignet
- Zweckmäßigkeit stark von Standort, Fahrzeugtyp und Einsatzszenario abhängig

Potentiale steigen bei:

- Anwendungen mit primärem Heizbedarf
- Niedriger Durchschnittstemperatur
- Geringer Durchschnittsgeschwindigkeit
- Konstanz der Fahreinsätze

1. Vorstellung
2. Beheizung batterieelektrischer Omnibusse
3. Lösungsansatz am DLR
4. Thermische Hochleistungsspeicher
5. Untersuchungen am Flughafen Stuttgart
6. **Zusammenfassung & Ausblick**

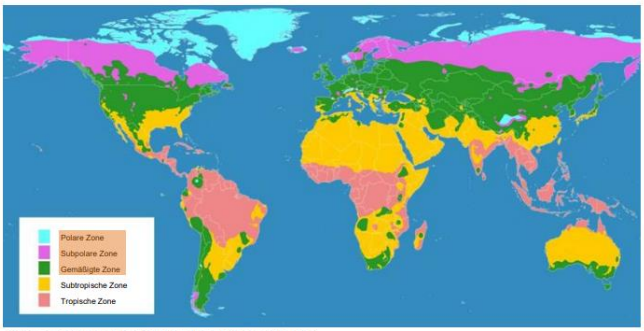
6 Zusammenfassung und Ausblick
THS-Einsatz in batterieelektrischen Omnibussen

Fazit:

- THS grundsätzlich zur bedarfsgerechten Beheizung batterieelektrischer Omnibusse geeignet
- Zweckmäßigkeit stark von Standort, Fahrzeugtyp und Einsatzszenario abhängig

Potentiale steigen bei:

- Anwendungen mit primärem Heizbedarf
- Niedriger Durchschnittstemperatur
- Geringer Durchschnittsgeschwindigkeit
- Konstanz der Fahreinsätze



Klimazonen der Erde (Quelle: Wikipedia.org)

► **Flughafen-Vorfeldbusse grundsätzlich für den THS-Einsatz in der gemäßigten und (sub-)polaren Zone prädestiniert!**

DLR

Veröffentlichungen bei der Enerstock Konferenz 2021

Poster 1

F. Nees*,[a], W. Kraft [a], V. Stahl [a], P. Vetter [a]

Impact of transient storage temperature on heat transport system design for a thermal energy storage unit in vehicle applications

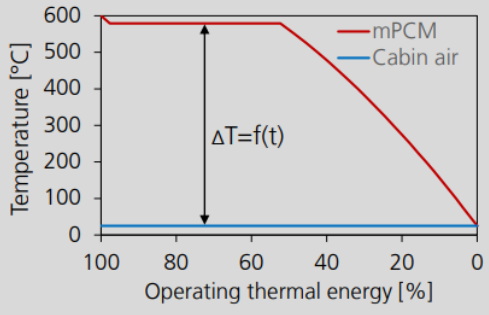
Motivation:

Thermal energy storage based on metallic phase change material (mPCM)

Maximum energy utilization for use in mobility

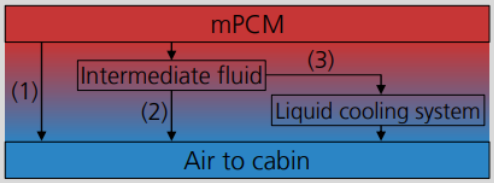
Usage of latent + sensible heat for heating

Transient heat transfer temperature difference



Results:

Basic heat transport system concepts (1-3):



Challenges of different design approaches for a defined and controllable heat flow:

- Boiling heat transfer ➡ Risk of boiling crisis
- Liquid heat transfer ➡ Risk of evaporation
- Air/Gases ➡ Low performance for small ΔT

Conclusion and Outlook:

- Transient storage temperature is a critical boundary condition for system design
- Further development ongoing

DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
*Author of Correspondence
E-Mail: frank.nees@dlr.de
[a] German Aerospace Center
Institute of Vehicle Concepts

ENERSTOCK 2021
This work was funded by:

Poster 2

V. Stahl*,[a], A. Rawson [b], W. Kraft [a], P. Vetter [a], F. Nees [a] and F. Kargl [b]

Thermal Contact Resistance: Implications for Thermal Energy Storage Systems

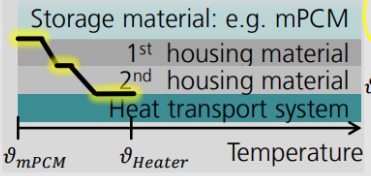
Motivation:

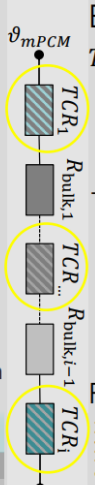
System's thermal resistance
=
∑ Contact Resistances TCR
+
∑ Bulk Resistances R_{bulk}

Limits (dis)charge rate for

1. **storage material** with low thermal resistance
2. **heat transport system** with high heat transfer

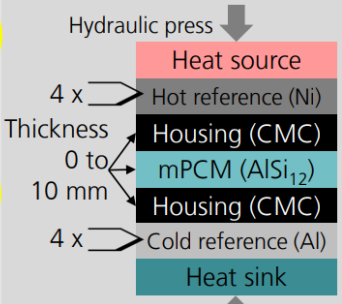
Stationary temperature gradient with i = 3 interfaces for charging process:



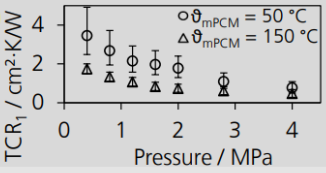


Experimental setup:

$TCR(\vartheta, p)$ for solid setups



Result:



Conclusion:

TCR reduction by…

- increasing p due to larger effective contact area
- increasing ϑ due to easier elastic/plastic deformation

Outlook:

- $TCR(\vartheta)$ for liquid mPCM via LFA
- Investigate more factors:
  - Surface roughness
  - Cycling
  - System design
  - …

Deutsches Zentrum
DLR für Luft- und Raumfahrt

*Corresponding Author
E-Mail: veronika.stahl@dlr.de

German Aerospace Center
[a] Institute of Vehicle Concepts
[b] Institute of Materials Physics in Space

Poster 3

Simulative designing of a Thermal High Performance Storage (THS) for electric bus heating

Werner Kraft[a]*, Veronika Stahl[a], Peter Vetter[a], Frank Nees[a]

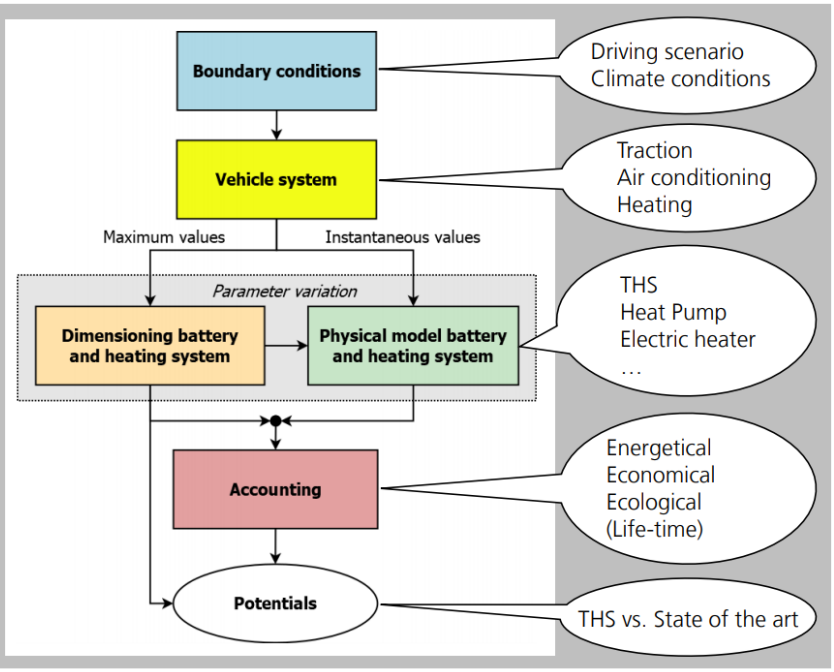
Main Goals

- Finding ideal dimensions of a THS
- Quantification of the technology's potentials compared to other heating systems

Platform / Tool

DYMOLA [1]

Modelica [2]



References
[1]: https://www.ebm.at/dymola/
[2]: https://www.3ds.com/de/produkte-und-services/catia/produkte/dymola/

*Corresponding author
Werner.Kraft@dlr.de

[a] German Aerospace Center
Institute of Vehicle Concepts

This work was funded by: