



Abschlussbericht 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.
Dipl.-Ing. Frank Nees
Henrik Grübbel M.Sc.

Datum: 31.01.2021

Inhalt

1	Einleitung.....	1
2	Aktueller Projektstand.....	1
2.1	Projektplan.....	1
2.2	Seit dem letzten Zwischenbericht durchgeführten Arbeiten.....	1
2.2.1	AP2 – Auslegungsmethodik und Auslegungswerkzeuge	1
2.2.2	AP5 – Funktionsmusterbau und Laboruntersuchung	1
2.2.3	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 und Veröffentlichungen.....	2
3.2	AP 2 – Auslegungsmethodik und Auslegungswerkzeuge	2
3.2.1	Vollständig aufgebaute Teilmodelle.....	4
3.2.2	Teilweise aufgebaute Teilmodelle.....	10
3.3	AP 5 – Funktionsmusterbau und Laboruntersuchung	18
3.3.1	Experimentelle Untersuchung des Funktionsmusters ohne Wärmeaustragssystem	18
3.3.2	Ausblick: Aufbau und experimentelle Untersuchung des Funktionsmusters mit Wärmeaustragssystem.....	23
3.4	AP 6 – Potentiale und Bewertung.....	24
3.4.1	Technologische Kenngrößen des Speichersystems	25
3.4.2	Kostenschätzung.....	26
4	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen zum Gesamtprojekt	30
5	Ausblick	32

1 Einleitung

Der vorliegende Abschlussbericht zeigt die final seit dem letzten Zwischenbericht durchgeführten Arbeiten im Projekt „THS-Bus“. Neben den Ergebnissen werden auch die Arbeitsschritte beleuchtet, die zur Erreichung der jeweiligen Ergebnisse durchgeführt wurden. Weiterhin gibt der Abschlussbericht eine Zusammenfassung der Ergebnisse der jeweiligen Arbeitspakete. Abschließend werden ein Fazit und ein Ausblick in Bezug auf das gesamte Projekt gegeben.

2 Aktueller Projektstand

2.1 Projektplan

Der Projektplan zum Projekt „THS-Bus“ ist in Abbildung 1 dargestellt. Gemäß des Projektplans sollte das Projekt eigentlich bereits zum 30.06.2021 abgeschlossen sein. Aufgrund von Verzögerungen im Projekt wurde jedoch eine kostenneutrale Verlängerung bis 31.12.2021 beantragt und auch gewährt. Weiterhin konnten aufgrund des deutlich höheren Arbeitsaufwandes im Arbeitspaket 1 die Arbeitspakete 2 und 6 lediglich in etwas reduzierter Form bearbeitet werden.

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

Abbildung 1: Projektplan zum Projekt „THS-Bus“

2.2 Seit dem letzten Zwischenbericht durchgeführten Arbeiten

2.2.1 AP2 – Auslegungsmethodik und Auslegungswerkzeuge

Im Rahmen des AP2 wurde eine komplexe Auslegungsmethodik erarbeitet. Die zur Anwendung der Auslegungsmethodik benötigten Werkzeuge sind unterdessen soweit aufgebaut, dass ein erstes Verknüpfen selbiger und erste gesamtsystemische Auslegungsberechnungen möglich wären, ohne jedoch die Auslegungsmethodik bereits vollständig abdecken zu können. Hierfür steht noch die Erstellung einiger Teilmodelle aus sowie eine Validierung der erstellten Modelle. Die Durchführung einer gesamtsystemischen Auslegung, Ergänzung der noch fehlenden Modelle sowie die Validierung sind nicht mehr Teil dieses Projektes.

2.2.2 AP5 – Funktionsmusterbau und Laboruntersuchung

Innerhalb der letzten Monate wurde das aufgebaute Funktionsmuster in den Prüfstand integriert sowie verschiedenste experimentelle Untersuchungen durchgeführt. So konnten die grundsätzliche Eignung der Einhausung aus Graphit nachgewiesen sowie die relevanten thermischen Kontaktwiderstände, welche als essentiell für die Leistungsfähigkeit des Speichersystems angesehen werden, bestimmt werden. Die Integration eines Wärmeaustragssystems zur Entladung des

Speichersystems kann erst im Februar durchgeführt werden. Ergebnisse hierzu liegen demnach noch nicht vor.

2.2.3 AP6 – Bewertung und Ausblick

Die Bewertung des Speichersystems erfolgte auf weniger komplexe Art und Weise als ursprünglich geplant. So wurde das Auslegungswerkzeug verwendet, um beispielhafte Speichersysteme zu dimensionieren und deren relevanten technologischen Kenngrößen zu bestimmen. Eine weiterführende Ermittlung von Potentialen in Bezug zum Betrieb des Speichers konnte aufgrund der nicht vollständig erstellten Auslegungswerkzeuge nicht durchgeführt werden.

3 Darstellung der Arbeitsinhalte

3.1 AP 0 – Projektmanagement und Reporting

3.1.1 Austausch mit assoziierten Projektpartnern und Veröffentlichungen

Der Austausch mit den assoziierten Projektpartner hat im letzten halben Jahr nach Bedarf stattgefunden. So gab es einige Telefonkonferenzen mit der Konvekta AG. Ein größerer Austausch im Rahmen des assoziierten Konsortiums war nicht notwendig.

Im letzten halben Jahr des Projektes gab es keine Veröffentlichungen mehr. Es ist jedoch geplant, die Ergebnisse der experimentellen Untersuchung in künftigen Veröffentlichungen darzustellen.

3.2 AP 2 – Auslegungsmethodik und Auslegungswerkzeuge

Im Rahmen des vergangenen Abschlussberichtes wurden der aktuelle Stand bei der Entwicklung der Auslegungswerkzeuge dargestellt. Diese Art der Darstellung wird im vorliegenden Bericht fortgeführt. Nachfolgende Abbildung 2 gibt eine Übersicht über die bereits aufgebauten, teilweise aufgebauten und nicht mehr im Rahmen des Projektes aufzubauenen Teilmodelle des Simulationstools.

Im Vergleich zum vorherigen Bericht sind nun die Modelle „Traktion“, „Physikalische Eigenschaften Batteriesystem“, „Beladung und Entladung Batteriesystem“ vollständig aufgebaut. Bereits teilweise aufgebaut sind nun die Modelle „Dimensionierung Heizsystem“, „Physikalische Eigenschaften Heizsystem“ sowie „Beladung und Bereitstellung Heizleistung / Entladung“.

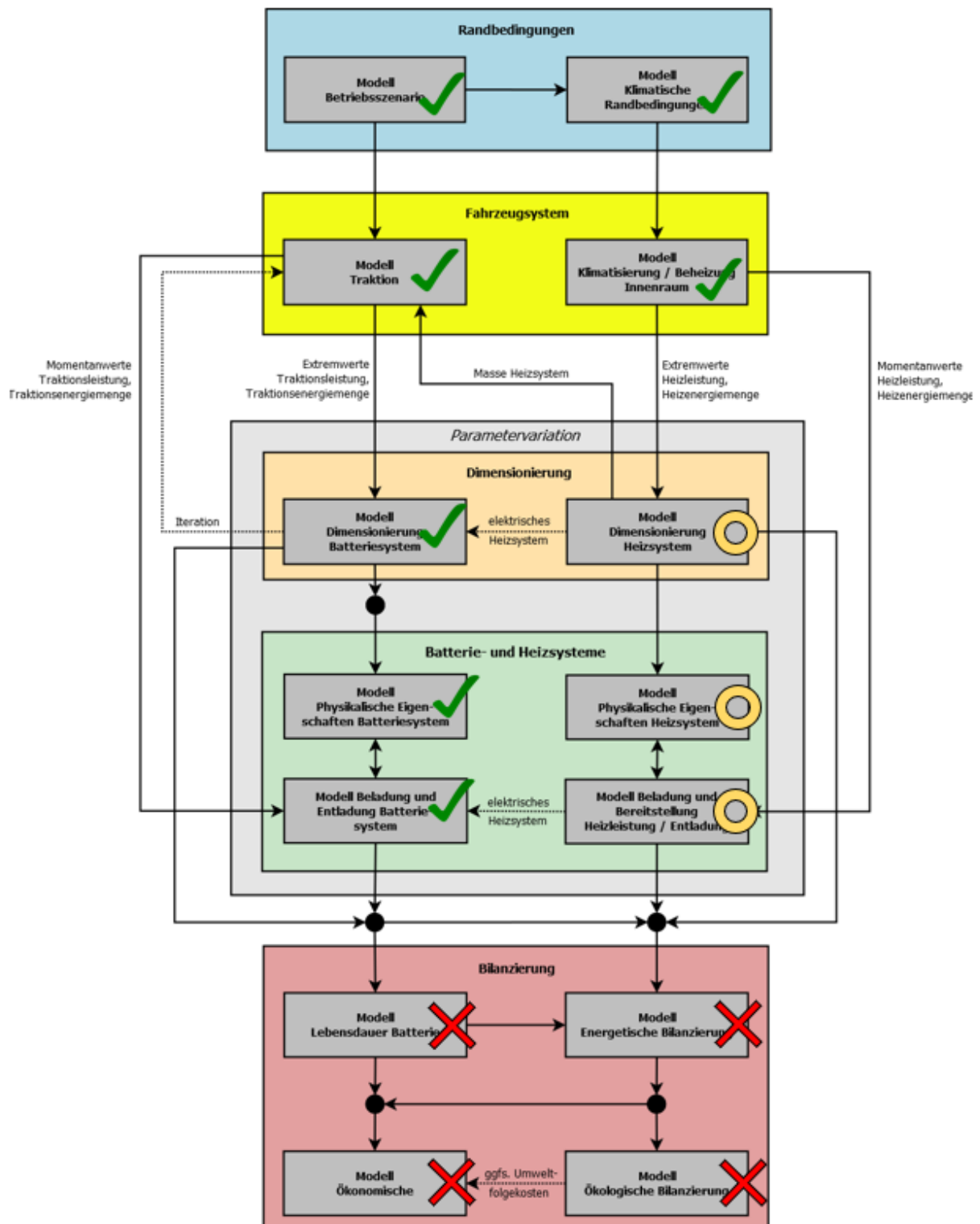


Abbildung 2: Übersicht über die bereits aufgebauten, sich im Aufbau befindlichen, noch nicht aufgebauten und nicht mehr aufzubauenen Teilmodelle

3.2.1 Vollständig aufgebaute Teilmodelle

3.2.1.1 Modell Traktion

Das Modell Traktion berechnet die Leistung bzw. Energie, welche für den Antrieb des Fahrzeugs notwendig ist. Dazu können folgende Parameter eingegeben werden:

Einstellbare Parameter	Typ	Beschreibung
e_Traktion_Sonstige	LinearEnergyTransfer [J/m]	Traktionsenergiebedarf/Strecke
v_avg	Velocity (SI)	Durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit
t_Fahrdauer_max	Time (SI)	Fahrdauer (Verlinkung Betriebsszenario)

Anhand dieser Parameter wird die Fahrtstrecke und die dafür benötigte Traktionsenergie berechnet:

$$s_{max} = v_{avg} t_{Fahrdauer_{max}}$$

Formel 1 Fahrstrecke

$$E_{Traktion_{sonstige}} = e_{Traktion_{sonstige}} s_{max}$$

Formel 2 Traktionsenergie

Berechnete Parameter	Typ	Beschreibung
s_max	Distance (SI)	Maximale Fahrtstrecke
E_Traktion_Sonstige	Energy (SI)	Benötigte Traktionsenergie für eine Fahrperiode

Zur Ausgabe der aktuellen Traktionsleistung verfügt das Modell weiterhin über einen Input und einen Output:

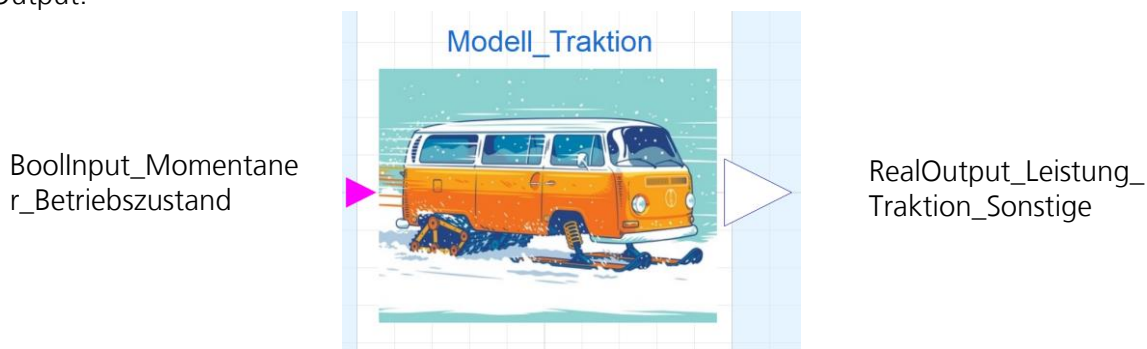


Abbildung 3 Icon Modell_Traktion

Der Input wird mit dem Modell Randbedingungen verbunden und gibt den Betriebszustand des Fahrzeugs an. Der Output gibt anschließend die momentane Traktionsleistung aus. Wenn das Fahrzeug aktuell im Fahrbetrieb ist, wird die Traktionsleistung wie folgt berechnet:

$$Leistung_{Traktion} = E_{Traktion_{sonstige}} / t_{Fahrdauer_{max}}$$

Sofern sich das Fahrzeug im Betriebszustand „Laden“ befindet, wird die Traktionsleistung gleich Null gesetzt.

3.2.1.2 Modell Dimensionierung Batteriesystem

Durch das Modell Dimensionierung_Batteriesystem werden Masse, Energiekapazität sowie weitere Parameter des Batteriesystems berechnet. Dazu können verschiedene Parameter des Batteriesystems eingestellt bzw. mit anderen Modellen verknüpft werden.

Einstellbare Parameter	Typ	Beschreibung
E_Traktion_max	Energy (SI)	Maximaler Traktionsenergiebedarf (Verlinkung mit Modell Traktion)
Q_max	Energy (SI)	Maximaler Heizenergiebedarf (Verlinkung mit Modell Klimatisierung)
E_Sonstige	Energy (SI)	Sonstiger elektrischer Energieverbrauch
Heizsystem	String	Art des Heizsystems (aktuell nicht genutzt)
COP_Heizsystem	Real	COP des Heizsystems
SOC_max	Percent	Maximaler SOC der Batterie
SOC_min	Percent	Minimaler SOC der Batterie
L_Batterie_nom	Time	Nominelle Lebensdauer der Batterie (nicht genutzt)
SOH_min	Percent	Minimal erlaubter State of Health der Batterie
e_grav_Bat	SpecificEnergy (SI)	Gravimetrische Energiedichte
e_vol_Bat	EnergyDensity (SI)	Volumetrische Energiedichte
k_Bat	Integer [€/kWh]	Spezifische Kosten des Batteriesystems

Zur Bestimmung der notwendigen Batteriekapazität wird zunächst der maximale elektrische Energieverbrauch berechnet. Dieser setzt sich aus dem Energiebedarf für die Traktion, einer möglichen elektrischen Heizeinrichtung sowie sonstigen elektrischen Energieverbrauchern zusammen:

$$E_{\text{Verbrauch}_{\text{max}}} = E_{\text{Traktion}_{\text{max}}} + \frac{Q_{\text{max}}}{COP_{\text{Heizsystem}}} + E_{\text{Sonstige}}$$

Formel 3 Maximaler elektrischer Energiebedarf

Mithilfe bestimmter Grenzwerte zur nutzbaren Batteriekapazität und maximalen Degradation kann damit die notwendige Batteriekapazität bestimmt werden:

$$C_{\text{Bat}} = \frac{E_{\text{Verbrauch}_{\text{max}}}}{\frac{SOC_{\text{max}} - SOC_{\text{min}}}{100} * \frac{SOH_{\text{min}}}{100}}$$

Formel 4 Benötigte Batteriekapazität

Mit diesen Parametern werden anschließend weitere Batterieparameter berechnet. Diese sind im Folgenden aufgeführt, ohne diese jedoch näher zu beschreiben.

Berechnete Parameter	Typ	Beschreibung
E_Verbrauch_max	Energy (SI)	Maximaler elektrischer Energiebedarf
C_Bat	Energy (SI)	Batteriekapazität
f_Bat	Real	Verhältnis installierte/nutzbare Batteriekapazität
K_Bat	Real [€]	Batteriekosten
m_Bat	Mass (SI)	Batteriemasse
V_Bat	Volume (SI)	Batterievolumen

3.2.1.3 Modell Physikalische Eigenschaften Batteriesystem

Das Modell Physikalische Eigenschaften Batteriesystem berechnet den aktuellen Ladezustand (SOC) der Batterie und zählt die Entladezyklen. Zusätzlich wird die Anzahl der Entladezyklen mit verschiedenen Entladetiefen (DoD) in 5%-Schritten gezählt. Dies bedeutet, dass die Anzahl der Entladezyklen, mit einer Entladetiefe von 1% bis 5%, 6% bis 10%, 11% bis 15% usw. gezählt werden. Weiterhin wird ein durchschnittlicher Ladezustand der Batterie berechnet. Die Analyse der Entladetiefen und Ladezustände dient als Grundlage für eine spätere Lebensdauerbetrachtung der Batterie. Zur Berechnung werden folgende Parameter vorgegeben:

Vorgegebene Parameter	Typ	Beschreibung
C_Bat_max	Energy (SI)	Gesamte Batteriekapazität (Verknüpfung mit Dimensionierung Batterie)
C_Bat_Nenn	Energy (SI)	Nutzbare Batteriekapazität (Verknüpfung mit Dimensionierung Batterie)
SOC_max	PC	Obere Grenze der tatsächlich nutzbaren Batteriekapazität (Verknüpfung mit Dimensionierung Batterie)
SOC_min	PC	Untere Grenze der tatsächlich nutzbaren Batteriekapazität (Verknüpfung mit Dimensionierung Batterie)
SOC_Initialisierung	PC	Ladezustand bei Initialisierung

Zur Berechnung und Ausgabe des aktuellen Ladezustands nutzt das Modell insgesamt 3 Konnektoren:

Konnektor	Typ	Einheit
BooleInput_Momentaner_Betriebszustand	Boolean	
ReallInput_P_el_Bat	Real	[W]
RealOutput_SOC_Nenn	Real	[PC]

Ist der Wert des momentanen Betriebszustands „wahr“, fährt das Fahrzeug, ein „falscher“ Wert bedeutet, dass das Fahrzeug lädt. Der Ladezustand wird anschließend anhand der Inputs und der vorgegebenen Parameter über Modellica-Standard-Modelle berechnet. Der Aufbau der Modelle ist in Abbildung 4 dargestellt.

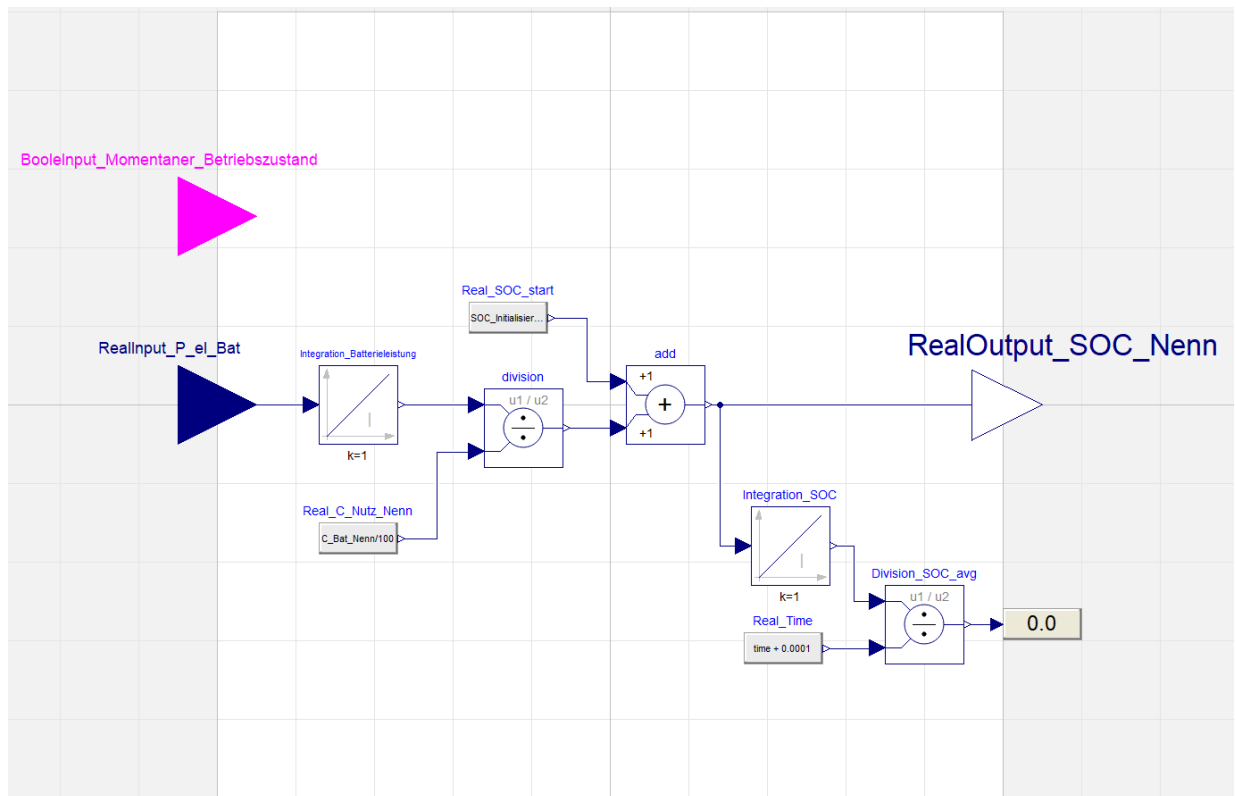


Abbildung 4 Diagramm Physikalische Eigenschaften Batterie

Der SOC wird dabei wie folgt berechnet:

$$SOC_{Nenn} = \int_0^t P_{elbat} + SOC_{start}$$

Formel 5 Berechnung SOC

Der durchschnittliche SOC wird weiterhin über folgenden Zusammenhang berechnet:

$$SOC_{avg} = \frac{\int_0^t SOC_{Nenn}}{t}$$

Formel 6 Berechnung durchschnittlicher SOC

Die Anzahl der Entladezyklen wird über „when“-Bedingungen im Modelica-Code berechnet. Dazu werden folgende Variablen genutzt:

Variablen	Typ	Beschreibung
SOC_Start	Real	SOC zu Beginn eines Entladevorgangs
SOC_Ende	Real	SOC bei Ende eines Entladevorgangs
DOD	Real	Entladetiefe eines Entladevorgangs
n_Zyklen	Integer	Anzahl der Entladezyklen
n_DOD_(x)_(x+5)	Integer	Anzahl der Entladezyklen im DOD-Bereich von (x)% bis (x+5)%

Der Algorithmus dazu ist in Abbildung 5 dargestellt:

```

algorithm
  when der(RealOutput_SOC_Nenn) < 0 then
    if BooleInput_Momentaner_Betriebszustand == true then
      SOC_Start :=RealOutput_SOC_Nenn;
    else
      SOC_Start :=SOC_Start;
    end if;
  end when;

  when der(RealOutput_SOC_Nenn) > 0 then
    if BooleInput_Momentaner_Betriebszustand == false then
      SOC_End     :=RealOutput_SOC_Nenn;
      DOD        :=SOC_Start - SOC_End;
      n_Zyklen   :=n_Zyklen + 1;

      if DOD >= 1 and DOD < 5 then
        n_DOD_1_5 :=n_DOD_1_5 + 1;
      end if;

      if DOD >= 5 and DOD < 10 then
        n_DOD_5_10 :=n_DOD_5_10 + 1;
      end if;
    end if;
  end when;

```

Abbildung 5 Algorithmus zur Berechnung der Anzahl der Entladezyklen

3.2.1.4 Modell Beladung und Entladung Batteriesystem

Dieses Modell steuert die Be- und Entladung der Batterie. Dazu greift es auf drei vorgegebene Parameter zu:

Vorgegebene Parameter	Typ	Beschreibung
C_Bat_Nenn	Energy (SI)	Nutzbare Batteriekapazität (Verknüpfung mit Dimensionierung Batterie)
eta_Laden	Efficiency (SI)	Ladewirkungsgrad; Summe aller Wirkungsgrade ab Ladesäule bis Batterie, d.h. eta_Kabel * eta_Ladeelektronik (z.B. Umrichter, etc.) * eta_Batterie; exkl. Wirkungsgrad der Ladesäule selbst
eta_Entladen	Efficiency (SI)	Entladewirkungsgrad; Summe aller Wirkungsgrade ab Batterie bis elektrische Verbraucher, d.h. eta_Batterie * eta_Kabel * eta_Elektronik (z.B. Umrichter, etc.); exkl. Wirkungsgrad der Verbraucher selbst

Zur Steuerung der Beladung sowie zur Berechnung und Ausgabe der benötigten Lade- und Entladeleistung werden insgesamt 10 Konnektoren genutzt:

Konnektor	Typ	Einheit
BooleInput_Momentaner_Betriebszustand	Boolean	
ReallInput_P_Traktion_Sonstige	Real	[W]
ReallInput_P_Heiz_Klimatisierung	Real	[W]
ReallInput_E_Traktion_Sonstige_next	Real	[J]
ReallInput_E_Heiz_Klimatisierung_next	Real	[J]
ReallInput_SOC_Bat_Nenn	Real	[PC]
ReallInput_t_Lade_next	Real	[s]
RealOutput_P_Bat_eff	Real	[W]
RealOutput_P_Ladeinfrastruktur	Real	[W]

RealOutput_P_Verbraucher	Real	[W]
--------------------------	------	-----

Der boolesche Input gibt wieder an, ob das Fahrzeug fährt oder lädt, ist der Wert „wahr“, befindet sich das Fahrzeug in Fahrt. Die Konnektoren sind, wie in Abbildung 6 dargestellt, positioniert. Die Werte werden ausschließlich im Modelica-Code berechnet. Eine Berechnung über Modelica-Standard Library Modelle findet nicht statt.

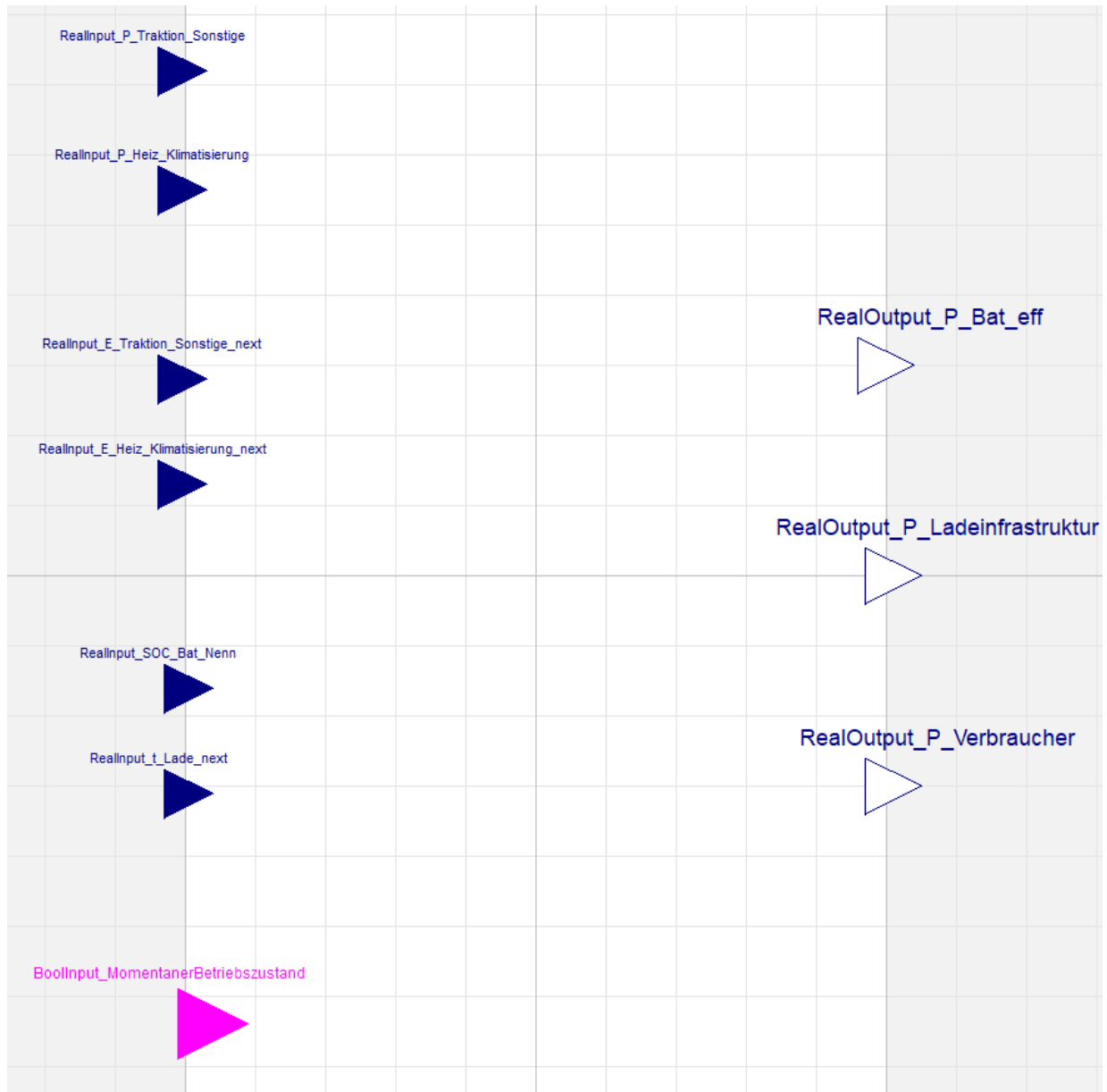


Abbildung 6 Konnektoren Be_Entladung_Batterie

Die Berechnung der Leistung erfolgt nun wie im Programmcode wie in Code 1 zu sehen:

```

equation
/*Bestimmung der Leistung aus der Ladesäule*/
if BoolInput_MomentanerBetriebszustand == true then
  RealOutput_P_Ladeinfrastruktur = 0;
else
  RealOutput_P_Ladeinfrastruktur = (((RealInput_E_Traction_Sonstige_next +
  RealInput_E_Heiz_Klimatisierung_next)/RealInput_t_Lade_next) + (
  RealInput_P_Heiz_Klimatisierung + RealInput_P_Traction_Sonstige))/
  eta_Entladen/eta_Laden;
  /*RealOutput_P_Ladeinfrastruktur = RealOutput_P_Verbraucher / eta_Entladen;*/
end if;

/*Berechnung der momentan insgesamt durch die Verbraucher benötigten elektrischen Leistung*/
if RealInput_SOC_Bat_Nenn > 0 then /*Prüfung, ob die Batterie noch geladen ist*/
  RealOutput_P_Verbraucher = RealInput_P_Traction_Sonstige + RealInput_P_Heiz_Klimatisierung;
/*Falls ja, wird die Leistung der Verbraucher berechnet entsprechend der benötigten Leistungen*/
else
  RealOutput_P_Verbraucher = 0;
/*Falls die Batterie bereits entladen ist, wird die Leistung der Verbraucher zu Null gesetzt um zu verhindern,
dass weitere Leistung entnommen wird*/
end if;

/*Berechnung der in der Batterie umgesetzten elektrischen Leistung*/
RealOutput_P_Bat_eff = -1*RealOutput_P_Verbraucher/eta_Entladen + RealOutput_P_Ladeinfrastruktur * eta_Laden
"Berechnung der in der Batterie tatsächlich umgesetzten Leistung unter Berücksichtigung der Wirkungsgrade";

```

Code 1 Berechnung der Leistungen *Be_Entladung_Batterie*

3.2.2 Teilweise aufgebaute Teilmodelle

3.2.2.1 Modell Dimensionierung Heizsystem

Thermischer Hochleistungsspeicher

Das Modell Dimensionierung_Thermischer_Speicher besteht aus mehreren Modellen, welche die Dimensionierung der einzelnen Speicherkomponenten durchführen. In Abbildung 7 sind die verwendeten Modelle zu sehen.

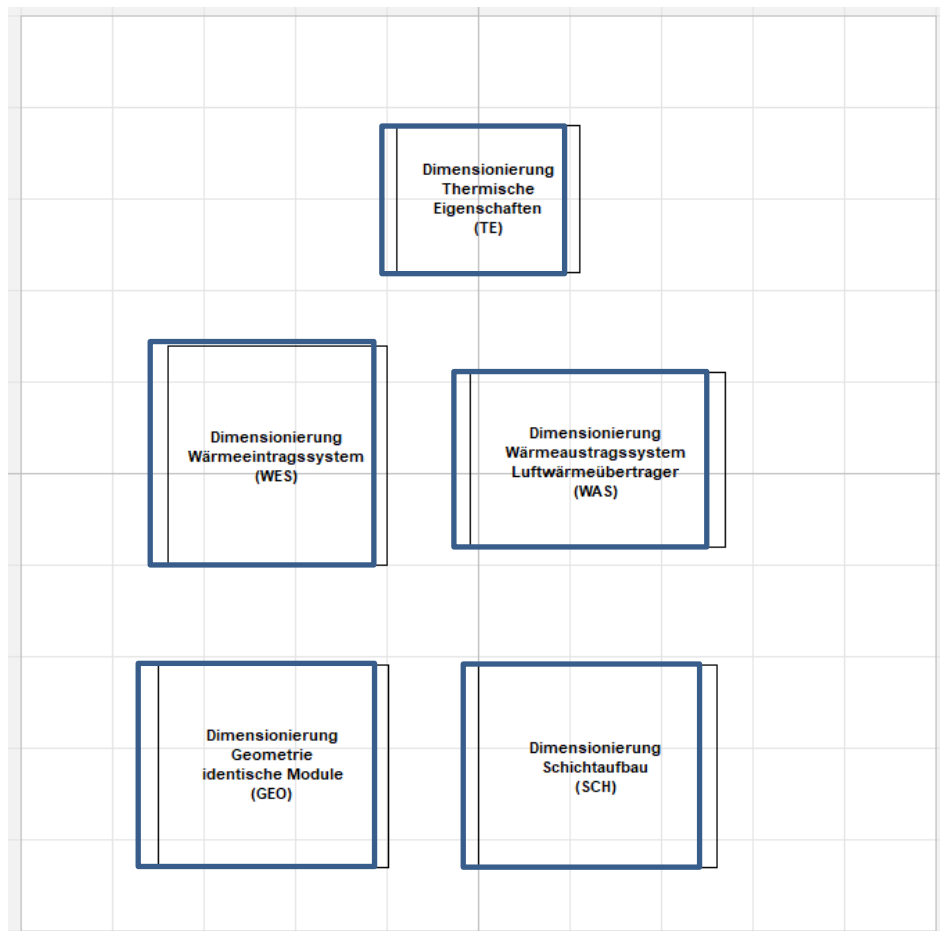


Abbildung 7 Modelle zur Dimensionierung des thermischen Speichers

Die Parameter zur Dimensionierung des Speichers werden dabei jedoch in das übergeordnete Modell Dimensionierung_Thermischer_Speicher propagiert. Dieses greift ebenfalls auf die berechneten Parameter der anderen Modelle zu. Zur schnellen Verwendung von „Standardkomponenten“ wie bspw. elektrischer Heizer werden die Parameter der Modelle in „replacable records“ gespeichert. Diese können einfach ausgetauscht werden, und somit schnell verschiedene Komponenten eingesetzt werden. Im nachfolgenden werden die einzelnen Teilmodelle zur Dimensionierung des Thermischen Speichers näher beschrieben.

Dimensionierung Thermische Eigenschaften

Im Modell Dimensionierung thermische Eigenschaften werden die grundlegenden thermischen Eigenschaften, insbesondere die Wärmekapazität des Speichers, berechnet. Dazu werden die Parameter **Q_Max**, **Reserve_Q**, **T_max** sowie **T_min** genutzt. Weiterhin wird auf Parameter aus den verschiedenen anderen Modellen zugegriffen, um die Wärmekapazität der anderen Teilmodelle zu bestimmen. Aufgrund der „simplen“ Berechnung wird auf diese nicht im Detail eingegangen. Die „Referenzwärme“, welche im Speicher enthalten sein soll, berechnet sich folgendermaßen:

$$Q_{THS_{ref}} = Q_{max} + Q_{max} * Reserve_Q$$

Formel 7 Referenzwärme THS

Die Wärmeenergie im mPCM wird anschließend bestimmt:

$$Q_{mPCM_{ref}} = Q_{THS_{ref}} - Q_{WES_{ref}} - Q_{WAS_{ref}} - Q_{Einhausung1_{ref}} - Q_{Einhausung2_{ref}}$$

Formel 8 Wärmeenergie mPCM

Anschließend wird die Masse des mPCM aus den vorgegebenen Maximal- und Minimaltemperaturen, sowie der Wärmekapazität und Schmelzenthalpie berechnet. Diese sind im bereits vorgestellten Record Speichermaterial hinterlegt.

Dimensionierung Wärmeeintragsystem

Im Modell „Dimensionierung Wärmeeintragsystem“ werden die Anzahl und Dimensionen an elektrischen Heizelementen sowie die Heizplatte, in die die Heizelemente im Speicher eingebettet werden, dimensioniert. Zunächst wird hierfür die minimale benötigte Heizleistung pro Modul berechnet:

$$P_{el_{min}Modul} = Q_{max_{20degC}} / (t_{Lade_{min}} * n_{Module})$$

Formel 9 Minimal benötigte Heizleistung pro Modul

Weiterhin werden die Daten aus dem bereits vorgestellten records Elektrischer_Widerstandsheizler und Material_Heizplatte genutzt. Hier sind die Leistungs- und Materialdaten der verwendeten Heizler und die Materialdaten der Heizplatte hinterlegt.

Somit kann die benötigte Fläche der Heizplatte berechnet werden:

$$A_{WES_{Modul}} = \frac{P_{el_{min}Modul}}{Daten_{Elektrischer_Widerstandsheizler.p_area}}$$

Formel 10 Benötigte Fläche der Heizplatte

Anschließend wird überprüft, ob die Fläche des Wärmeaustrags- oder Wärmeeintragsystems größer ist. Anhand der größeren Fläche und des vorgegebenen Seitenverhältnisses wird die Länge und Breite der Heizplatte berechnet.

Somit kann die Anzahl benötigten Heizler berechnet werden:

$$n_{Heizer_{Modul}} = \text{ceil} \left(\frac{P_{el_{min}modul}}{Daten_{ElektrischerWiderstandsheizler.plength_{Heizelement}} * B_{Heizplatte_{Modul}}} \right)$$

Formel 11 Anzahl der Heizler

Somit kann auch die tatsächlich installierte Heizleistung berechnet werden:

$$P_{el_{inst}Modul} = n_{Heizer_{Modul}} * B_{Heizplatte_{Modul}} * Daten_{ElektrischerWiderstandsheizler.plength_{Heizelement}}$$

Formel 12 Heizleistung pro Modul

Anschließend werden die Masse der Heizler und Heizplatte berechnet sowie die Wärmekapazität, dies wird jedoch nicht näher erläutert.

Die effektive Wärmeleitfähigkeit wird folgendermaßen berechnet:

$$\lambda_{WES_{eff}} = Daten_{Material_{Heizplatte}} \lambda_{Heizplatte} * \left(1 - \left(n_{Heizer_{Modul}} * \frac{Daten_{ElektrischerWiderstandsheizler.d_{Heizelement}}}{L_{Heizplatte_{Modul}}} \right) \right)$$

Formel 13 Effektive Wärmeleitfähigkeit WES

Dimensionierung Wärmeaustragssystem

Dieses Modell ist für die Dimensionierung des Wärmeaustragssystems zuständig. Neben den bereits genannten Parametern Q_dot_max und T_min_mPCM werden weiterhin die im Modell WES vorgestellten Parameter ratio_L_B und n_Module genutzt. Zusätzlich wird auf die Daten im record Material_Luftwaermeuebertrager zugegriffen. Dieser enthält die Materialbezeichnung, die

Wärmekapazität $cp_{Material}$ und spezifische Leistungsfähigkeit q_A (W/m^2) des Luftwärmeübertragers. Die spezifische Leistungsfähigkeit wird hierbei für eine gegebene Wandtemperatur des WAS angegeben. Bei einem Nickel-Wärmetauscher beträgt diese $150^\circ C$, bei einem Edelstahlwärmetauscher $230^\circ C$. Die Wandtemperatur ist hierbei die Temperatur der Wärmetauscherfläche zum Fluid (Verlinkung zu $mPCM_{min}$ Temperatur sinnvoll). Mit diesen Daten wird nun zunächst die benötigte Leistung pro Modul berechnet:

$$\dot{Q}_{modul} = \frac{\dot{Q}_{max}}{n_{module}}$$

Formel 14 Wärmeaustragsleistung Modul

Anhand der gegebenen Leistungsdichte wird die Fläche, sowie Länge und Breite des THS berechnet:

$$A_{WAS_{modul}} = \frac{\dot{Q}_{modul}}{q_A}$$

Formel 15 Wärmeaustragsfläche Modul

$$L_{WAS_{modul}} = \sqrt{A_{WAS_{modul}} * ratio_{L,B}}$$

Formel 16 Länge WAS Modul

$$B_{WAS_{modul}} = \frac{A_{WAS_{modul}}}{L_{WAS_{modul}}}$$

Formel 17 Breite WAS Modul

Die Durchströmung des THS-Moduls erfolgt hierbei wie in Abbildung 8 gezeigt:

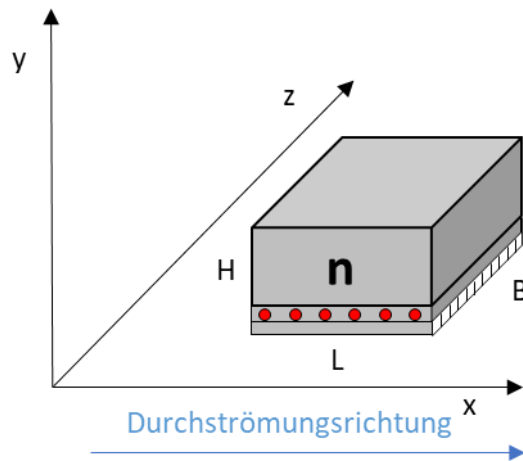


Abbildung 8 Deklaration der Bezeichnungen

Nun werden die restlichen Parameter durch Interpolation in Tabellen bestimmt. Dazu wird das ModelonTable3D-Modell genutzt. Dieses interpoliert in einer „dreidimensionalen“ Tabelle anhand von drei Eingangsgrößen wie in Abbildung 9 zu sehen:

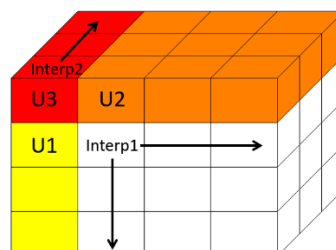


Abbildung 9 Funktionsweise ModelonTable3D

Wie in Abbildung 10 zu sehen, werden vier Werte aus vier 3D-Tabellen anhand von drei Eingangsgrößen interpoliert. Die erste Eingangsgröße U1 ist die Leistung pro Modul $Q_{\dot{modul}}$, die zweite Eingangsgröße U2 ist das Seitenverhältnis $ratio_{L_B}$, die dritte Eingangsgröße ist die Minimaltemperatur des mPCM T_{min_mPCM} .

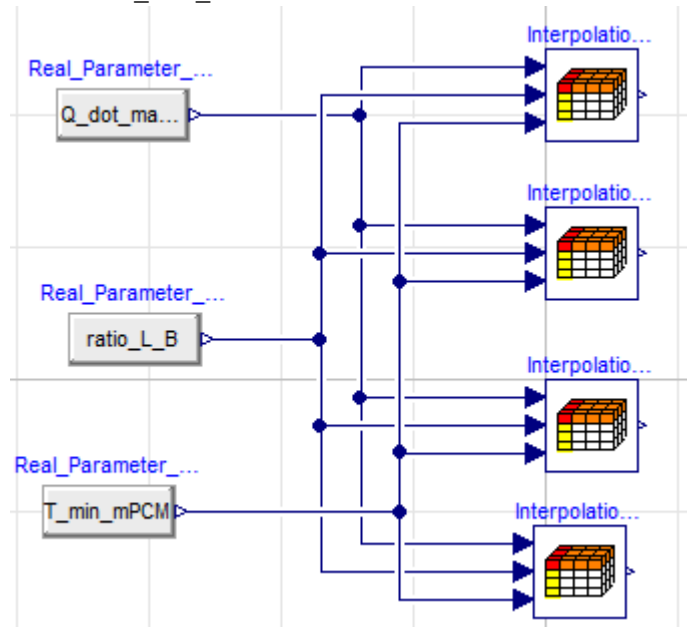


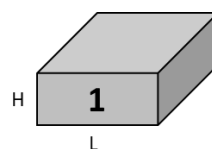
Abbildung 10 Diagramm Dimensionierung_WAS_Luftwaermeuebertrager

Interpoliert werden damit die effektive Wärmeleitfähigkeit des WAS λ_{WAS_eff} , die Höhe des WAS eines Moduls H_{Modul} , die Masse des WAS eines Moduls m_{WAS_Modul} sowie das Volumen des WAS eines Moduls V_{Modul} .

Dimensionierung Geometrie

Im Modell Dimensionierung Geometrie wird die Anzahl und Form der Module des thermischen Speichers festgelegt. Nachfolgende Abbildungen geben eine Übersicht über die einstellbaren Modulanordnungen. Insgesamt kann aktuell ein Speichersystem in bis zu sechs verschiedene Module aufgeteilt werden.

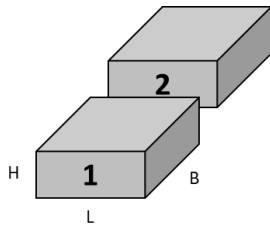
Modulanzahl 1



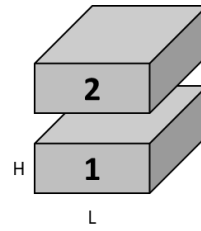
Durchströmungsrichtung →

Abbildung 11: Modulanordnung 1x1x1

Modulanzahl 2

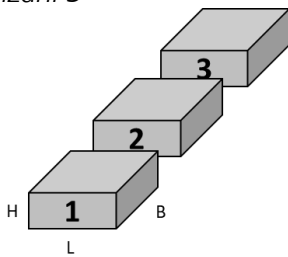


Durchströmungsrichtung →
Abbildung 12: Modulanordnung 1x1x2

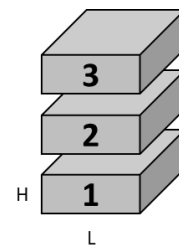


Durchströmungsrichtung →
Abbildung 13: 1x2x1

Modulanzahl 3

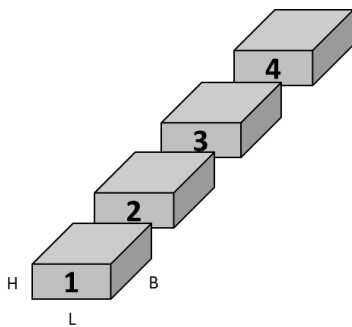


Durchströmungsrichtung →
Abbildung 14: Modulanordnung 1x1x3

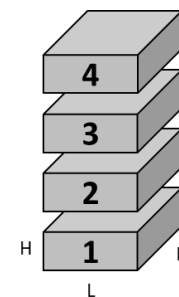


Durchströmungsrichtung →
Abbildung 15: Modulanordnung 1x3x1

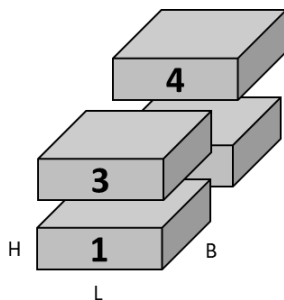
Modulanzahl 4



Durchströmungsrichtung →
Abbildung 16: Modulanordnung 1x1x4



Durchströmungsrichtung →
Abbildung 17: Modulanordnung 1x4x1



Durchströmungsrichtung →
Abbildung 18: Modulanordnung 1x2x2

Modulanzahl 5

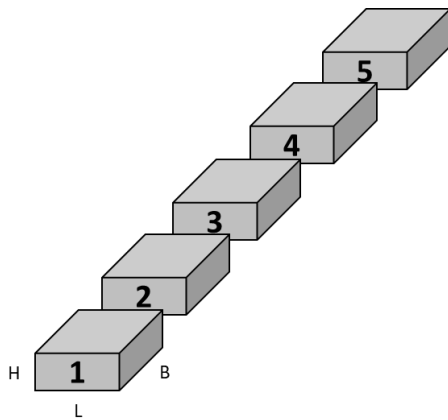


Abbildung 19: Modulanzordnung 1x1x5

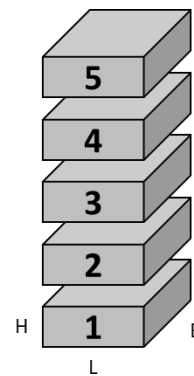


Abbildung 20: Modulanzordnung 1x5x1

Modulanzahl 6

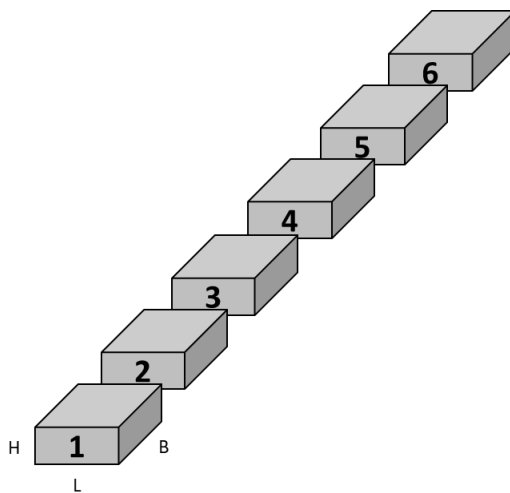


Abbildung 21: Modulanzordnung 1x1x6

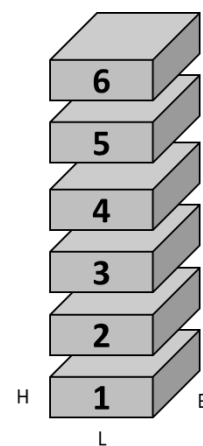


Abbildung 22: Modulanzordnung 1x6x1

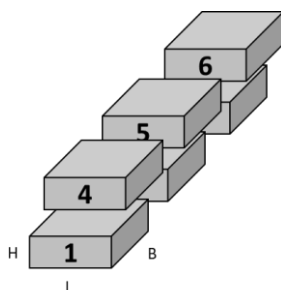


Abbildung 23: Modulanzordnung 1x2x3

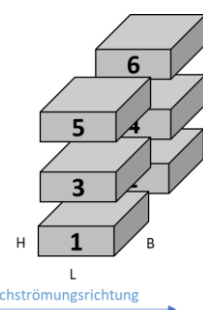


Abbildung 24: Modulanzordnung 1x3x2

Auf Basis der Modulanzordnung erfolgt die Berechnung der Volumina der einzelnen Komponenten. Dies erfolgt auf Basis der in nachfolgender Abbildung dargestellten Hüllkörper.

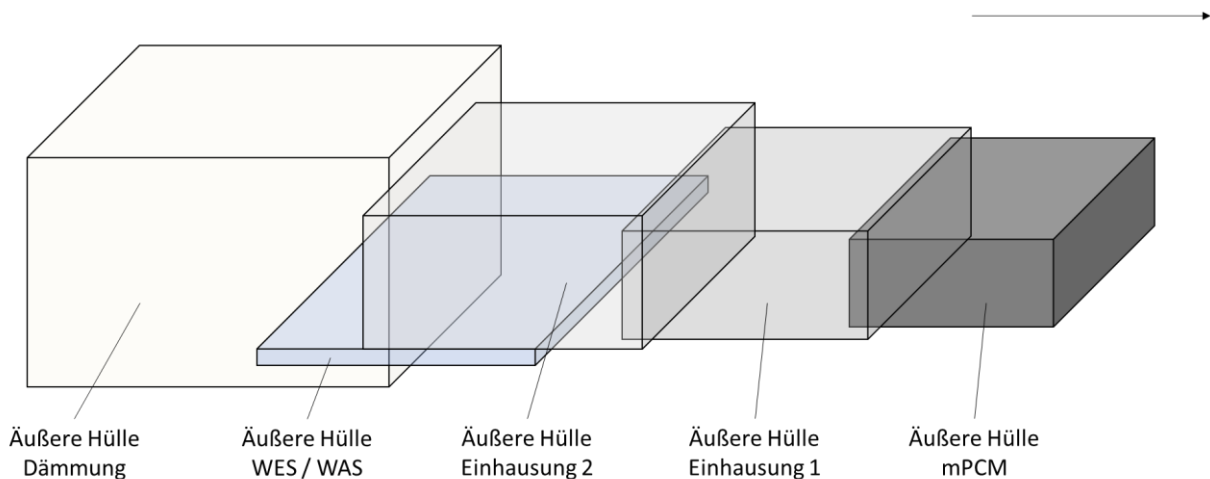


Abbildung 25: Hüllkörper – Modell des THS zur Bestimmung der Volumina der einzelnen Komponenten

Ausgangspunkt ist die Bestimmung des Volumens des mPCMs. Mittels der im Schichtaufbau angegebenen Wandstärken werden anschließend die Außenabmessungen der als nächstes folgenden Komponenten / Schicht berechnet. Mittels Subtraktion der Hüllkörper voneinander können die Volumina der einzelnen Komponenten berechnet werden.

Schichtaufbau

Im Modell Dimensionierung Schichtaufbau werden Parameter zur Dimensionierung und Charakterisierung der Schichten hinterlegt, welche anschließend von den anderen Modellen genutzt werden. Dazu werden vier replacable records genutzt, diese decken Haube und Boden des THS-Moduls für die Fälle „Kontakt zu weiterem Modul“ (_Mod) und „Kontakt zur Umgebung ab“ (_Umg). Die hinterlegten Parameter sind für die beiden Kontaktfälle (bisher) identisch, lediglich die Dicke der Dämmung ist unterschiedlich.

Zur besseren Übersichtlichkeit ist in Abbildung 26 eine Schnittansicht eines Moduls hinterlegt.

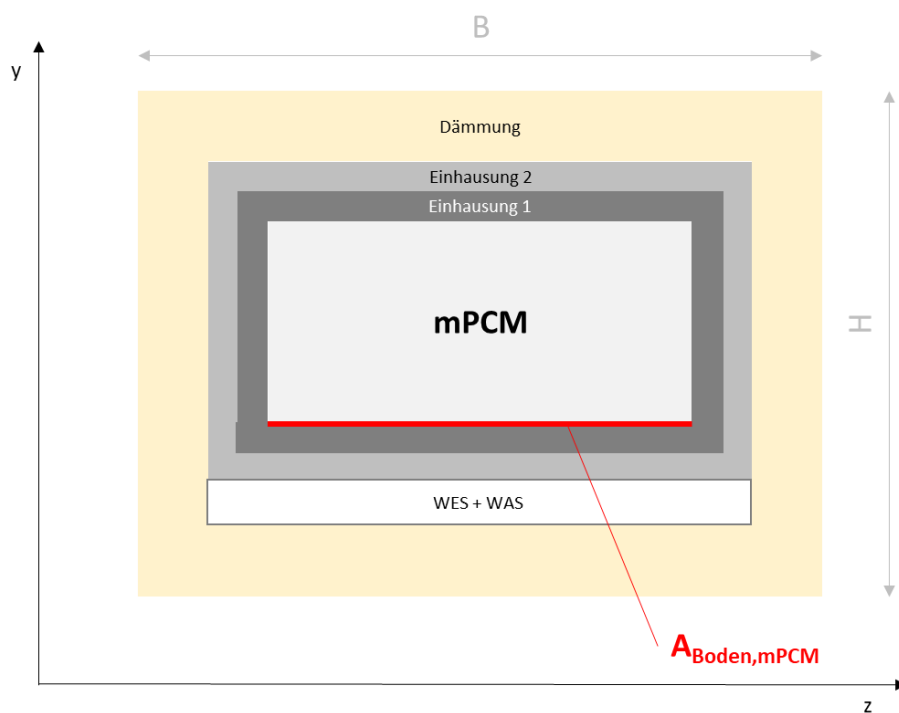


Abbildung 26 Schnittansicht y-z Modul

Mittels records sind die Schichtaufbauten je nach Art der Einhausung hinterlegt. Auf diese Art und Weise können durch einfaches Abrufen der Parameter unterschiedlichste Arten an Speichersystemen betrachtet werden.

3.3 AP 5 – Funktionsmusterbau und Laboruntersuchung

3.3.1 Experimentelle Untersuchung des Funktionsmusters ohne Wärmeaustragssystem

Die nachfolgenden Unterkapitel zeigen Darstellungen und Ergebnisse der experimentellen Untersuchung des Funktionsmusters. In den Kapiteln 3.3.1.1 und 3.3.1.2 wird kurz auf Beobachtungen bei der Erstinbetriebnahme und bei erneutem Wiederaufschmelzen eingegangen. In Kapitel 3.3.1.3 wird die Bestimmung des Thermischen Kontaktwiderstandes dargestellt und diskutiert.

3.3.1.1 Erstinbetriebnahme

Abbildung 27 zeigt die Draufsicht auf die Graphithaube und die Bodenfläche des Speichermaterials nach Erstinbetriebnahme. Deutlich zu erkennen ist ein Riss in der Graphithaube. Weiterhin sind auf der Bodenfläche des Speichermaterials Konturen des ursprünglich als einzelne Blöcke eingelegten Speichermaterials zu erkennen. Der Riss ist darauf zurückzuführen, dass das als einzelne Teile eingelegte Speichermaterial bereits im kalten Zustand Kontakt zur Graphithaube hatte. Aufgrund des höheren thermischen Ausdehnungskoeffizienten des Speichermaterials im Vergleich zur Graphithaube resultierte eine Verspannung, die ein Brechen der Graphithaube zur Folge hatte. Die im Speichermaterial deutlich zu sehenden Konturen der einzelnen Blöcke sind auf eine stabile Oxidhaut an der Oberfläche des Speichermaterials zurückzuführen, die auch über den Aufschmelzprozess hinweg bestehen bleibt.



Abbildung 27: Draufsicht auf die defekte Graphithaube nach Erstinbetriebnahme und auf die Unterseite des Speichermaterials.

Für eine erneute Inbetriebnahme wurde die Graphithaube durch eine Ersatzkomponente ersetzt. Das nun zu einem Block erstarrte Speichermaterial wurde von der defekten Graphithaube in die intakte Graphithaube umgesetzt. Abbildung 28 zeigt den in den Prüfstand integrierten Speicher. Von außen ist hierbei lediglich die Dämmung sowie der Anschluss entsprechender Messsensorik zu erkennen.

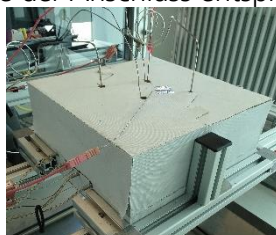


Abbildung 28: Außenansicht des in den Prüfstand eingebauten Speichersystems.

3.3.1.2 Erneutes Aufschmelzen mit Ersatzhaube

Abbildung 29 zeigt die Außenansicht der Graphithaube sowie die Unterseite des Speichermaterials nach erneutem Aufschmelzen. Die Graphithaube blieb nun unversehrt, was für die im vorherigen Kapitel beschriebene Theorie zur Entstehung des Defekts spricht. An der Unterseite des Speichermaterials sind eine Einfallstelle sowie dunkle Verfärbungen zu erkennen. Die Einfallstelle resultiert aus der Volumenverringerung beim Phasenübergang von flüssig nach fest. Der Speicher kühlt gleichmäßig über alle Oberflächen ab, sodass das im Zentrum befindliche Speichermaterial zuletzt erstarrt. Aufgrund des Ausbleibens einer Nachspeisung mit flüssigem Material entsteht der Lunker bzw. die Einfallstelle. Die dunkle Verfärbung des Speichermaterials ist vermutlich auf ein Abfärben der Graphit-Komponenten zurückzuführen.

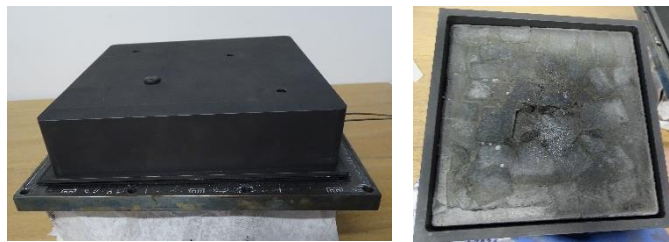


Abbildung 29: Außenansicht der Graphithaube sowie Ansicht des Speichermaterials von unten nach erneutem Aufschmelzen.

3.3.1.3 Bestimmung der Thermischen Kontaktwiderstände

Die Bestimmung der Thermischen Kontaktwiderstände zwischen den einzelnen Schichten des Bodenaufbaus ist von zentraler Bedeutung für die Auslegung und die Leistungsfähigkeit eines Thermischen Hochleistungsspeichers. Durch die Anordnung von Wärmeein- und austrag an der Bodenfläche werden diese maßgeblich hierdurch begrenzt. Eine Limitierung von maximal zu- und abführbarem Wärmestrom sowie der Entladetiefe sind die Folge. Um möglichst genaue Kenntnisse über entsprechende Kontaktwiderstände zu erlangen, wird der Fokus der experimentellen Untersuchung daher auf die Bestimmung selbiger gelegt.

3.3.1.3.1 Vorgehensweise zur Bestimmung der Thermischen Kontaktwiderstände

Zur Bestimmung des Wärmewiderstandes R_{th} von der Heizplatte bis zum Speichermaterial wird die Gleichung zur stationären Berechnung dessen in Abhängigkeit des zugeführten Wärmestromes und der sich einstellenden Temperaturdifferenz angewandt. Die Gleichung lautet wie folgt:

$$R_{th} = \frac{A \cdot \Delta T}{\dot{Q}} = \frac{\Delta T}{\dot{q}} \quad (1)$$

Die Fläche A entspricht dabei der gesamten Bodenfläche. Die Temperaturdifferenz ΔT wird aus einer Messstelle in der Heizplatte und der Messstelle in der Graphithülse, d.h. im Speichermaterial gebildet. Der Wärmestrom \dot{Q} entspricht der mittels der elektrischen Heizer eingetragenen Wärmeleistung. Aufgrund der guten Wärmedämmung des Speichers wird angenommen, dass sämtliche eingebrachte Wärme auch in das Speichermaterial übergeht. Käme es zu signifikanten Wärmeverlusten z.B. über die Bodenplatte, so müsste der Wärmeverluststrom in der Berechnung des Wärmekontaktwiderstandes berücksichtigt werden.

Aufgrund der beiden genannten Messstellen in der Bodenplatte und in der Graphithülse kann messtechnisch lediglich der gesamte Wärmewiderstand zwischen beiden Temperatursensoren entsprechend Gleichung (1) bestimmt werden. Die Bestimmung des Kontaktwiderstandes erfolgt deshalb auf theoretische Art und Weise. Hierzu werden die Wärmeleitwiderstände der einzelnen

Schichten auf Basis von Literaturwerten der Stoffeigenschaften rechnerisch bestimmt und anschließend vom experimentell ermittelten Gesamtwiderstand abgezogen. Hierdurch erhält man die Summe der innerhalb der Messstrecke vorherrschenden Kontaktwiderstände. Eine Zuordnung des gesamten Kontaktwiderstandes auf die einzelnen Kontaktwiderstände kann durch eine weitere Betrachtung der Oberflächenrauigkeiten und Materialpaarungen erfolgen, ist jedoch nicht mehr Bestandteil dieses Berichts.

Zum besseren Verständnis der beschriebenen Vorgehensweise sind in Abbildung 30 und Abbildung 31 die theoretische Anordnung des Schichtaufbaus samt qualitativem Temperaturverlauf sowie ein Ersatzschaltbild dargestellt. Wichtig zu erwähnen ist, dass der Weg durch das mPCM hindurch bis hin zum Temperatursensor in den Darstellungen nicht mit abgebildet ist, jedoch bei den Betrachtungen berücksichtigt wurde.

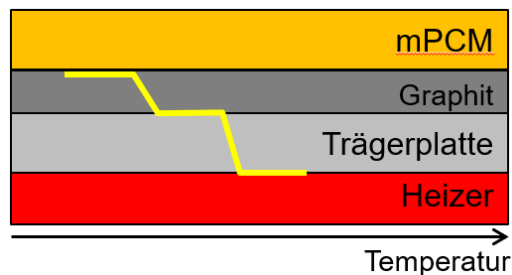


Abbildung 30: Qualitative Darstellung des erwarteten Temperaturverlaufes von der Heizplatte bis zum Speichermaterial.

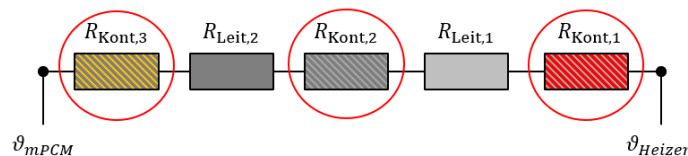


Abbildung 31: Thermisches Ersatzschaltbild des Schichtaufbaus von Heizer bis mPCM.

3.3.1.3.2 Ergebnisse für einen Stellgrad von 40 % bzw. ca. 960 W

Nachfolgend werden die Ergebnisse für die Untersuchungen mit einem Leistungseintrag von ca. 960 W (entspricht konstantem Stellgrad von etwa 40 % des Heizleistungsreglers) dargestellt. Analog wurden weitere Messungen mit Stellgraden von 20 % und 30 % durchgeführt. Durch Vergleich der Messwerte für verschiedene Leistungen kann die Unsicherheit bei der Bestimmung der Kontaktwiderstände reduziert werden. Um den Umfang des Berichts jedoch überschaubar zu halten, wird auf die Darstellung weiterer Ergebnisse verzichtet.

Abbildung 32 zeigt den Temperaturverlauf an den beiden Messstellen in Abhängigkeit der Uhrzeit. Die Temperatur im Speichermaterial steigt von annähernd Raumtemperatur leicht konvex bis in etwa auf eine Temperatur um 575 °C. Dort schließt sich ein annähernd horizontaler Verlauf an, ehe dieser in einen linear steigenden Verlauf übergeht. Die Temperatur in der Heizplatte (blaue Kurve) steigt ausgehend von annähernd Raumtemperatur zunächst sehr stark an und geht dann ebenfalls in einen leicht konvexen Verlauf über bis zu ihrer maximalen Temperatur von ca. 640 °C. Die Temperatur sinkt hier in einem konkaven Verlauf, ehe sich ein leichter, annähernd linearer Anstieg anschließt.

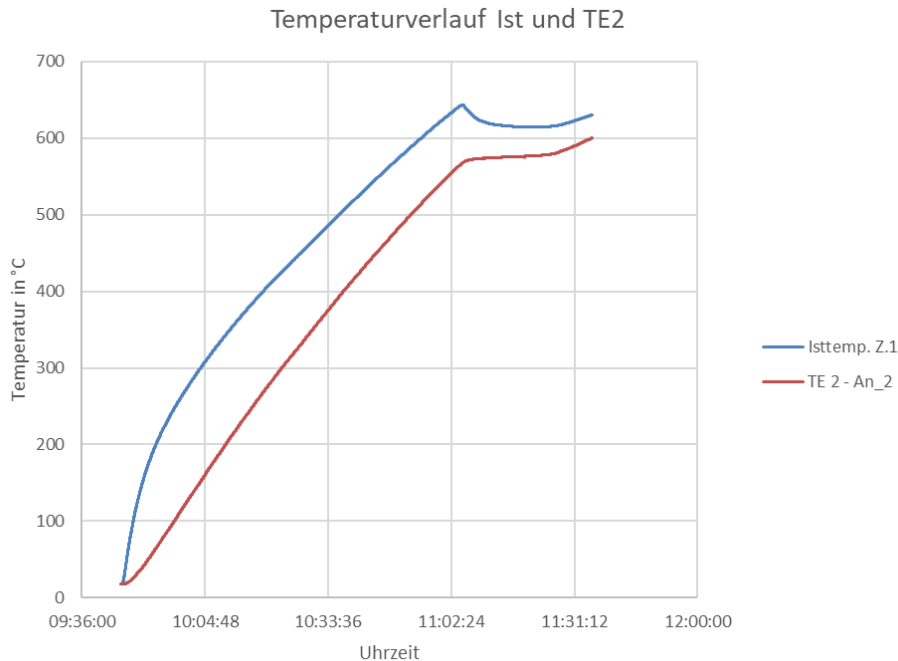


Abbildung 32: Verlauf der Temperaturen an den beiden Messtellen in Abhängigkeit der Uhrzeit; in Rot die Temperatur des Speichermaterials gemessen in der Graphithülse, in Blau die Temperatur des Heizsystems gemessen in der Bodenplatte.

Abbildung 33 zeigt die Temperaturdifferenz zwischen der Messtelle in der Bodenplatte und der Graphithülse in Abhängigkeit der Temperatur im Speichermaterial. Ausgehend von einer Temperaturdifferenz von 0 K steigt diese zunächst sehr stark an. Bis hin zum Maximum von ca. 135 K bei einer Speichertemperatur von etwa 120 °C flacht sich der Kurvenverlauf ab und geht nach dem Maximum in einen annähernd linear verlaufenden Abfall über. Bei einer Speichertemperatur von ca. 575 °C fällt die Temperaturdifferenz sehr stark, annähernd linear. Nach einem kurzen weniger steilen annähernd linearem Abfall bildet sich schließlich ein quasi horizontaler Verlauf bei einer Speichertemperatur von ca. 610 bis 660 °C aus.

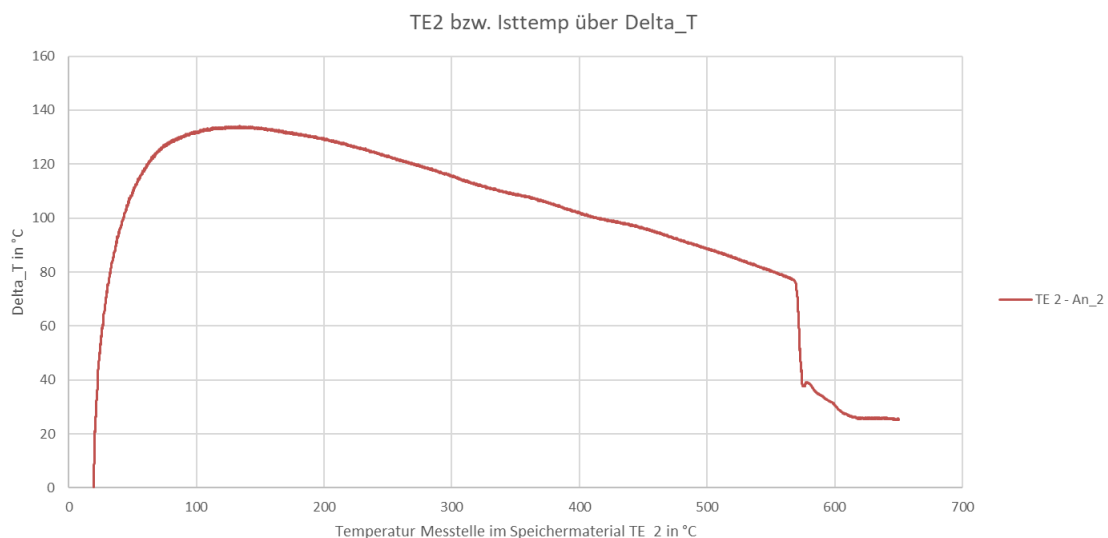


Abbildung 33: Temperaturdifferenz zwischen den beiden Messstellen in Abhängigkeit der Temperatur des Speichermaterials

Zu Beginn des Aufheizprozesses bildet sich zunächst die maximale Temperaturdifferenz zwischen Heizplatte und Speichermaterial aus. Ab dem Maximum stellt sich die Temperaturdifferenz in

Abhängigkeit des eingetragenen Wärmestromes sowie des Wärmewiderstands zwischen Heizplatte und Speichermaterial ein. Der Abfall der Temperaturdifferenz bis hin zum Schmelzpunkt bei ca. 575 °C ist bedingt durch den sich verringern den Wärmewiderstand. Sowohl thermische Kontaktwiderstände als auch Wärmeleitwiderstände sinken mit zunehmender Temperatur. Dies wird durch nachfolgende Abbildung 34 verdeutlicht. Der annähernd vertikale Abfall der Temperaturdifferenz im Schmelzpunkt bei ca. 575 °C ist durch die deutliche Abnahme des Thermischen Kontaktwiderstandes zwischen Speichermaterial und Graphitplatte zu erklären. Dieser sinkt mit flüssig werden des Speichermaterials deutlich ab.

Abbildung 34 zeigt den Verlauf des thermischen Gesamtwiderstandes, Kontaktwiderstandes und Leitwiderstandes in Abhängigkeit der Speichertemperatur. Gesamtwiderstand und Kontaktwiderstand verlaufen im Temperaturintervall von ca. 100 °C bis ca. 550 °C annähernd parallel. Der Widerstand sinkt dabei von einem maximalen Gesamtwiderstand von ca. 0,15 K/W bis hin zu ca. 0,08 K/W. Der Kontaktwiderstand fällt von etwa 0,14 K/W auf ca. 0,072 K/W. Ab ca. 550 °C sinken sowohl der Gesamtwiderstand als auch der Leitwiderstand stärker bis zu einer Temperatur von ca. 580 °C. Der Gesamtwiderstand beträgt dort etwa 0,039 K/W, der Kontaktwiderstand ca. 0,022 K/W. Beide sinken weiter bis zu ihrem Minimum bei 600 °C auf ca. 0,032 K/W bzw. 0,019 K/W. Der Leitwiderstand beträgt bei 100 °C ca. 0,01 K/W und fällt leicht auf ca. 0,08 K/W bei etwa 575 °C. Dort steigt der Leitwiderstand stark auf seinen maximalen Wert von ungefähr 0,013 K/W an.

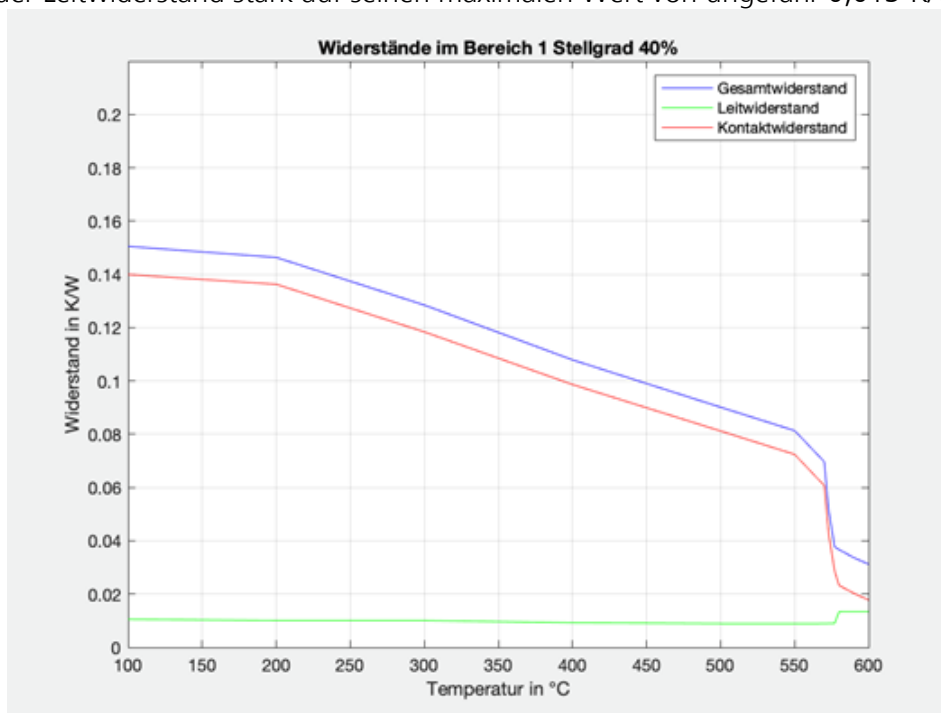


Abbildung 34: Auf Basis der Messungen bestimmter gesamter Wärmewiderstand (blau), berechneter Wärmeleitwiderstand (grün) und gesamter Wärmekontakt-widerstand (rot).

Anhand der Ergebnisse lässt sich erkennen, dass der Kontaktwiderstand im festen Zustand des Speichermaterials den dominierenden Anteil bildet. So liegt der Anteil des Kontaktwiderstandes in der Größenordnung von größer gleich 90 % am Gesamtwiderstand. Im flüssigen Zustand hingegen sinkt der Anteil des Kontaktwiderstandes am Gesamtwiderstand auf ca. 60 % ab, bleibt aber weiterhin der dominierende Anteil. Einer der Hauptursachen für den hohen Thermischen Kontaktwiderstand im festen Zustand ist der vermutlich eher schlechte Kontakt zwischen Speichermaterial und Graphitplatte. Beim Auseinanderbau des Speichers hat sich gezeigt, dass das Speichermaterial an der Bodenfläche eine Wölbung nach innen ausbildet. Aufgrund des Fehlens eines gerichteten Wärmeaustrags erstarrt das Speichermaterial gleichmäßig an allen Oberflächen von außen nach innen. Der Bereich in der Mitte erstarrt zuletzt und bildet damit Fehlstellen und Wölbungen aus. Hierfür spricht auch der starke Abfall des Wärmewiderstandes beim Phasenübergang von fest nach flüssig. Im Hinblick auf den Betrieb mit einem gerichteten Wärmeaustrag an der

Bodenfläche (vgl. Kapitel 3.3.2) wird davon ausgegangen, dass sich der Kontakt an dieser Stelle verbessert.

3.3.2 Ausblick: Aufbau und experimentelle Untersuchung des Funktionsmusters mit Wärmeaustragssystem

Das in den vorherigen Kapiteln beschriebene Funktionsmuster umfasst bisher keine Möglichkeit, den Speicher aktiv thermisch zu entladen. Um dies zu ändern wurde ein Wärmeaustragssystem (WAS) zur Integration in den bestehenden Aufbau entwickelt.

Anders als das in einem früheren Zwischenbericht vorgestellte Verdampfungskonzept beruht das hier vorgestellte WAS-Konzept auf einer direkten Entladung an Luft. Dabei wird Umgebungsluft über einen Lüfter angesaugt und durch Wärmeübertragungskanäle unterhalb der Heiz-/Bodenplatte geblasen und wiederum an die Umgebung abgeführt. Ziele der geplanten Experimente sind u.a. die Untersuchung der Wärmeaustragsleistung, der Fluid- und Bauteiltemperaturen, Druckverluste sowie dem Einfluss von Kontaktwiderständen. Zudem soll erstmalig der Wärmeaustrag an einem realen Funktionsmuster des thermischen Speichers erprobt werden.

Zur Realisierung des WAS sind zahlreiche Anpassungen am bestehenden Prüfstand notwendig. Diese beinhalten neue Komponenten, wie u.a. dem WAS-Luftwärmeübertrager, einem Eintrittsdiffusor, einem Lüfter sowie einer Anpassung der bestehenden Heizplatte und Isolierung. Zudem ist eine Erweiterung der Messtechnik vorgesehen. Abbildung 35 gibt eine Übersicht über die WAS-Versuchsstrecke.

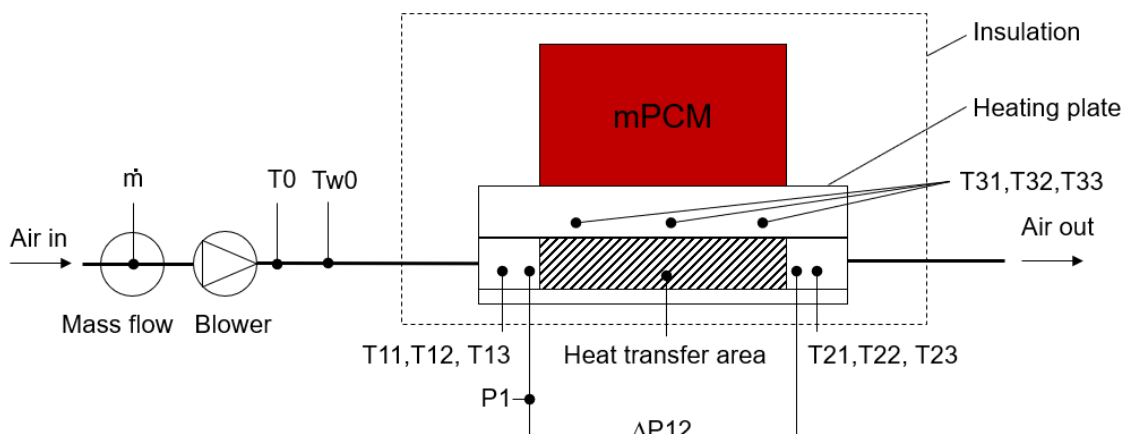


Abbildung 35: Übersicht über die WAS-Versuchsstrecke mit Messstellen.

Die Messtechnik der WAS-Versuchsstrecke umfasst:

- Massenstrommessung am Eintritt
- Fluid- und Wandtemperatur Einströmung (T_0 und T_{w0})
- Temperaturen der Strömung vor und nach dem WAS (T_1 und T_2 , insgesamt 6x Messstellen)
- Differenz- und Absolutdruck vor und nach dem Wärmeübertrager (P_1 und dP)
- Wandtemperaturen Heizplatte (T_3 , insgesamt 6x Messstellen)
- Leistungsmessung Lüfter

Das WAS wird flächig unterhalb des Wärmeintragssystems (WES) angebracht, um so eine möglichst große Fläche für die Wärmeübertragung bereitzustellen. Die Geometrie der WAS-Struktur ist in Abbildung 36 dargestellt. Diese besteht aus parallelen Kühlkanälen, die in diesem Prototyp aus einem Materialblock herausgefräst werden. Aus dem gleichen Materialblock wird auch die WES-Platte

gefertigt, sodass sich für die WAS-WES-Bodenplatte ein integriertes Bauteil ergibt. Zum Schließen der Kanäle an der Unterseite wird in einem weiteren Fertigungsschritt eine Deckplatte angelötet/verschweißt.

Das WAS-System wurde thermo-hydraulisch so ausgelegt, dass eine Nennleistung von 1,3 kW (thermische Austragsleistung) bei einer Wandtemperatur von 200 °C (Oberseite WAS-Struktur) mit dem ausgewählten Lüfter erreicht werden kann.

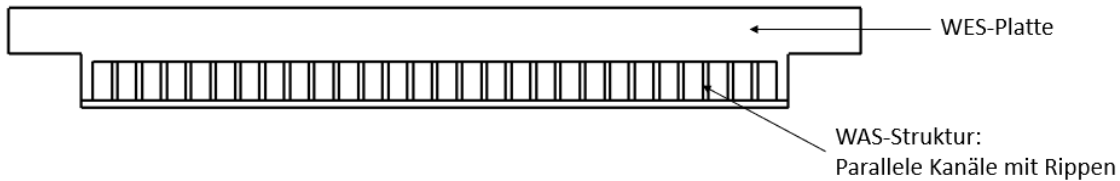


Abbildung 36: Querschnitt durch die WAS-WES-Bodenplatte mit WAS-Struktur

Abbildung 37 zeigt das integrierte WAS-WES-System mit Verbindungsflansch am Eintritt, Ein- und Austrittskanal sowie Klemmverschraubungen auf der Unterseite. Diese werden per Laserschweißverfahren gasdicht angeschweißt. Nicht dargestellt sind der Eintrittsdiffusor sowie die Luftzuführung mit Lüfter und Leitungen. Aus Übersichtlichkeitsgründen wurde die Isolierung ebenfalls nicht dargestellt.

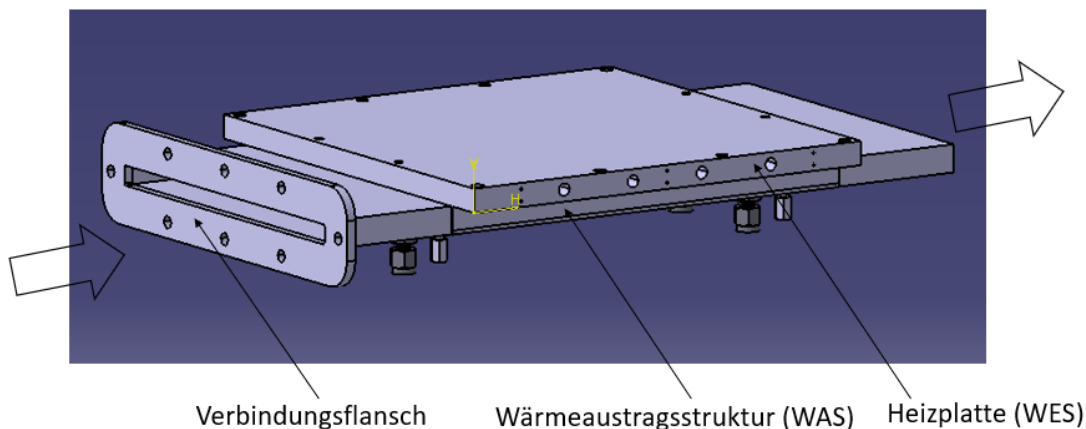


Abbildung 37: Integriertes WAS-WES-System mit Verbindungsflansch

Die experimentelle Untersuchung des Systems ist für das erste Quartal 2022 geplant. Zum Zeitpunkt dieses Berichts wird das System am Prüfstand aufgebaut und noch ausstehende Komponenten der Versuchsstrecke befinden sich im Bestell- und Fertigungsprozess.

3.4 AP 6 – Potentiale und Bewertung

Zur Darstellung der Potentiale und Bewertung der Technologie Thermische Hochleistungsspeicher werden abschließend Betrachtungen zu technologischen Kenngrößen und möglichen Kosten für ein derartiges System durchgeführt. Hierfür werden neben dem für die Anwendung am Flughafen grobausgelegten Speichersystem (Speichersystem 2) zwei weitere Speichersysteme betrachtet, die an die Anwendung im ÖPNV angelehnt sind. Grund hierfür ist die deutlich höhere Stückzahl an Bussen, die im ÖPNV für den Personentransport eingesetzt werden im Vergleich zur Anwendung am Flughafen. Hierdurch ist ein potentiell deutlich größerer Markt gegeben.

Die an den ÖPNV angelehnten Speichersysteme unterscheiden sich dabei im Wesentlichen durch die Speicherkapazität und die installierte elektrische Beladeleistung. Speichersystem 3 entspricht dabei eher einem Speicher, wie er für ein Szenario „Nachtlader“ eingesetzt werden könnte, Speichersystem 1 einem Speicher, wie er für ein Szenario „Gelegenheitsladen“ zum Einsatz kommen könnte.

Hierdurch wird eine gewisse Bandbreite an möglichen Szenarien abgedeckt. Nachfolgende Tabelle gibt eine Übersicht über die wesentlichen Kenngrößen der drei betrachteten Speichersysteme.

Tabelle 1: Wesentliche Kenngrößen der drei betrachteten Speichersysteme

Eigenschaft	Speichersystem 1 (Gelgenheitsladen ÖPNV)	Speichersystem 2 (Grobauslegung Flughafen)	Speichersystem 3 (Nachtladen ÖPNV)
Speicherkapazität [kWh]	50	162	300
Installierte Ladeleistung [kW]	150	40	100
Installierte Entladeleistung (Luft- WÜ) [kW]	25	18	25
Modulanzahl	4	4	4

Die Speicherkapazität des für das Gelegenheitsladeszenario angedachte Speichersystem 1 beträgt 50 kWh. Unter Annahme einer maximal erforderlichen Heizleistung von 25 kW könnte ein Bus hiermit zwei Stunden lang beheizt werden. Durch die installierte Ladeleistung von 150 kW wäre ein vollständiges nachladen innerhalb von ca. 20 Minuten möglich. Die Speicherkapazität von Speichersystem 2 beträgt gemäß der früher im Projekt bereits durchgeführten Auslegung 162 kWh. Die installierte elektrische Ladeleistung beträgt 40 kW, die maximale Entladeleistung 18 kW. Das Speichersystem wäre damit für ein Übernachtszenario am Flughafen geeignet. Speichersystem 3 besitzt eine Speicherkapazität von 300 kWh. Bei einer angenommenen maximalen mittleren Heizleistung von 20 kW könnte ein Bus hiermit 15 h lang beheizt werden. Mit Hilfe der installierten Ladeleistung von 100 kW wäre ein Nachladen über Nacht innerhalb von 3 h möglich.

3.4.1 Technologische Kenngrößen des Speichersystems

Die Ermittlung der im Weiteren dargestellten Kenngrößen erfolgte unter Zuhilfenahme des im Rahmen dieses Projektes mit aufgebauten Simulationstools. Hierfür wurde das Teilmodell „Dimensionierung Thermischer Hochleistungsspeicher“ entsprechend der dargestellten Kenngrößen parameterisiert. Die relevanten technologischen Kenngrößen der einzelnen Speichersysteme (exklusive der bereits in Tabelle 1 dargestellten Größen) sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Relevante technologische Kenngrößen der betrachteten Speichersysteme

Eigenschaft	Speichersystem 1 (Gelgenheitsladen ÖPNV)	Speichersystem 2 (Grobauslegung Flughafen)	Speichersystem 3 (Nachtladen ÖPNV)
Masse Speichersystem [kg]	241	634	1155
Volumen Speichersystem [l]	164	386	671
Grav. Energiedichte (150 °C – 600 °C) [Wh/kg]	207	255	260
Vol. Energiedichte (150 °C – 600 °C) [Wh/l]	305	420	447
Abmessungen Speichersystem LxBxH [mm]	472x1782x195	412x1542x608	472x1782x799

Die Masse von Speichersystem 1 beträgt 241 kg, das Volumen 164 l. Hiermit ergeben sich Energiedichten von 207 Wh/kg bzw. 305 Wh/l bezüglich eines nutzbaren Temperaturintervalls von ca. 150 °C bis 600 °C. Speichersystem 2 hat eine Masse von 634 kg und ein Volumen von 386 l. Die Energiedichten ergeben sich hiermit zu 255 Wh/kg bzw. 420 Wh/l. Bei Speichersystem 3 beträgt die Masse 1155 kg und das Volumen 671 l. Die Speicherdichten liegen damit bei 260 Wh/kg bzw. 447 Wh/l. Hinsichtlich der Anordnung der Speichermodule wurde für alle drei Speichersysteme eine nebeneinanderliegende Anordnung gewählt. Hiermit ergibt sich eine Ausdehnung in Richtung der Breite, wie anhand der in der Tabelle angegebenen Werte ersichtlich wird.

3.4.2 Kostenschätzung

Das vorliegende Kapitel gibt eine Abschätzung möglicher Herstellungskosten eines Thermischen Hochleistungsspeichers. Zur Abschätzung der Kosten der einzelnen Komponenten werden die aus der Dimensionierung bekannten Massen mit Materialpreisen und Herstellungsfaktoren multipliziert. An dieser Stelle wird darauf hingewiesen, dass sowohl Materialpreise als auch Herstellungspreise lediglich teilweise durch Literaturquellen abgesichert sind. Insbesondere bei den Herstellungsfaktoren werden Werte verwendet, die durch Rücksprache mit Kollegen sowie einem Austausch der Fa. Konvekta definiert wurden. Die Größenordnungen sollten damit in etwa einem realen Wert entsprechen. Tabelle 3 gibt eine Übersicht über die abgeschätzten Kosten.

Tabelle 3: Kostenübersicht zu den drei abgeschätzten Speichersystemen

Komponente	Speichersystem 1	Speichersystem 2	Speichersystem 3
Speichermaterial [€]	417	1640	3127
Einhausung [€]	176	344	535
Dämmung [€]	292	479	715
Heizeinrichtung [€]	7100	2313	4766
Wärmeaustragssystem [€]	129	84	129
Sonstiges [€]	100	1000	1000
Summe [€]	9114	5860	10271
Spezifische Kosten [€/kWh]	182	35	34
Substitution [€]	2500	1000	2500
Summe mit Subs. [€]	6614	4860	7771
Spez. Kosten mit Subs. [€/kWh]	132	29	26

Die Gesamtkosten zur Herstellung belaufen sich für Speichersystem 1 auf ca. 9114 €, für Speichersystem 2 auf 5860 € und für Speichersystem 3 auf 10271 €. Die spezifischen Kosten bezüglich der Speicherkapazität bestimmen sich damit ca. 182 €/kWh für Speichersystem 1, 35 €/kWh für Speichersystem 2 und 34 €/kWh für Speichersystem 3.

Zusätzlich zu den reinen Herstellungskosten werden außerdem Werte angegeben die berücksichtigen, dass bisher notwendige Fahrzeugkomponenten durch den Thermischen Hochleistungsspeicher substituiert werden können. Für Speichersystem 1 und 3 sind dies 2500 €, für Speichersystem 2 1000 €. Bei Speichersystem 1 und 3 wird angenommen, dass auf einen elektrischen Bremswiderstand, wie im EvoBus eCitaro verwendet (ca. 100 kW elektrische Leistung), verzichtet werden kann, Dessen Funktion soll perspektivisch durch den Thermischen Hochleistungsspeicher übernommen werden. Bei Speichersystem 2 wird davon ausgegangen, dass die bisher zur Beheizung des Fahrzeugs verwendete elektrische Widerstandsheizung nicht mehr notwendig ist. Hierdurch ergeben sich Gesamtkosten von 6614 € für Speichersystem 1, 4860 € für Speichersystem 2 und 7771 € für Speichersystem 3, was spezifischen Kosten von 132 €/kWh, 29 €/kWh bzw. 26 €/kWh entspricht.

Zusätzlich zu den gezeigten absoluten Kosten geben die nachfolgenden drei Abbildungen eine Übersicht über den Anteil der Gesamtkosten an den relativen Kosten. Hierbei ist auffällig, dass stets die elektrische Heizeinrichtung mit 81 % bei Speichersystem 1, 43 % bei Speichersystem 2 und 50 % bei Speichersystem 3 den größten Anteil an den Gesamtkosten ausmacht. Das Speichermaterial hat mit 5 % bei Speichersystem 1 einen relativ überschaubaren Anteil an den Gesamtkosten. Bei Speichersystem 2 und 3 ist dieses mit 30 % bzw. 33 % hingegen die zweit teuerste Komponente. Insbesondere die Preissteigerungen innerhalb des letzten Jahres bedingt durch die Folgen der Corona-Krise haben einen deutlichen Anstieg der Rohstoffpreise von Metallen bewirkt, die sich auch hier auswirken. Sonstige Kosten (nicht näher spezifiziert; pauschaler Puffer für bislang noch nicht bekannte Kosten sowie die Systemintegration in das Fahrzeug) haben einen Anteil von 11 % bei Speichersystem 1 sowie 19 % bzw. 10 % bei Speichersystem 2 und 3. Zuletzt liegt der Anteil der Kosten von Einhausung und Wärmeaustragssystem für alle Speichersysteme im niedrigen einstelligen Bereich.

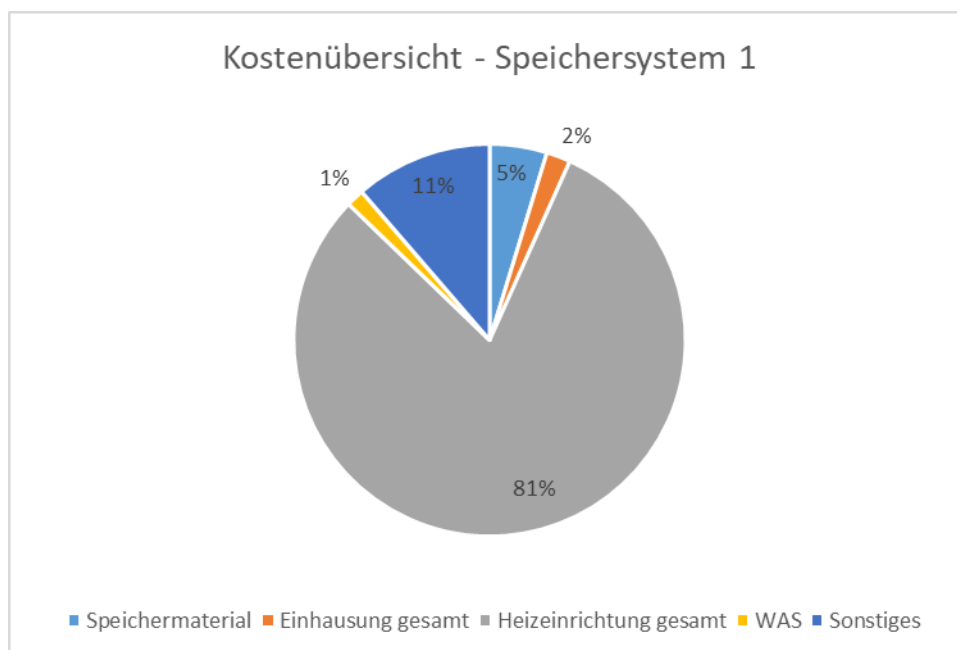


Abbildung 38: Relativer Anteil an den Gesamtkosten der einzelnen Komponenten für Speichersystem 1

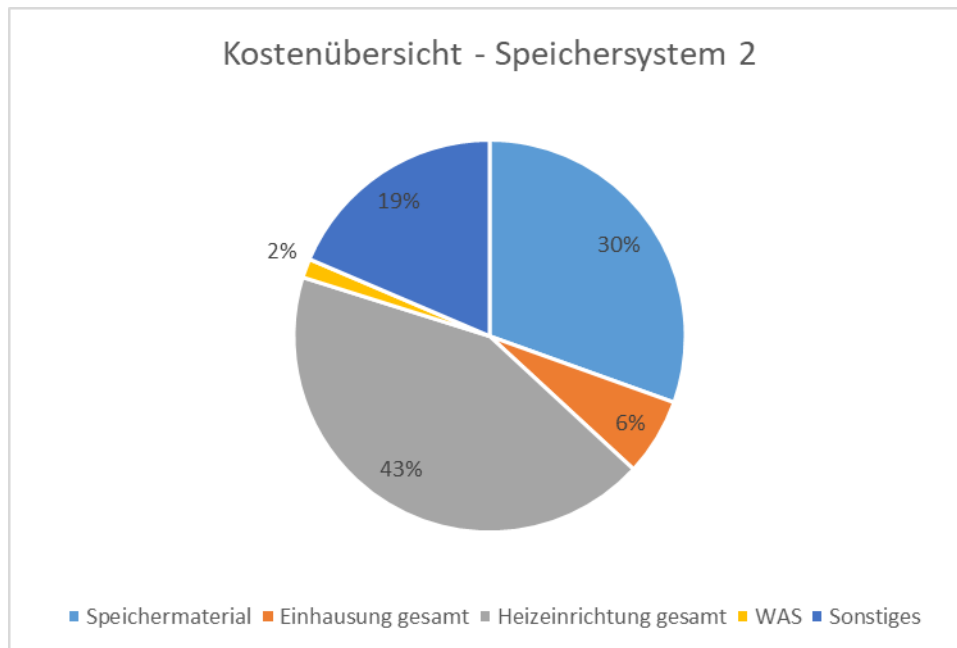


Abbildung 39: Relativer Anteil an den Gesamtkosten der einzelnen Komponenten für Speichersystem 2

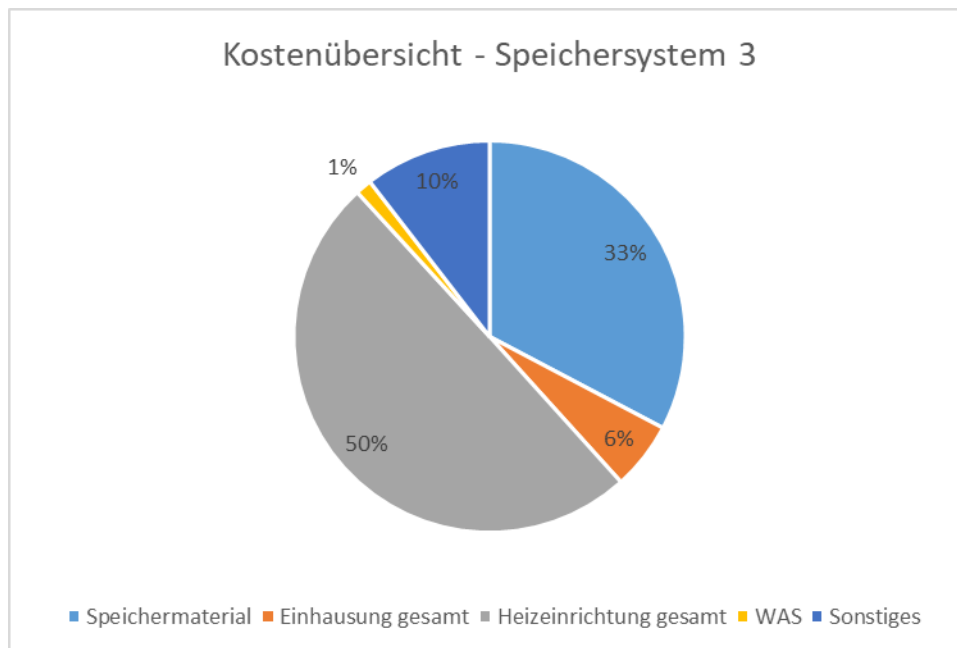


Abbildung 40: Relativer Anteil an den Gesamtkosten der einzelnen Komponenten für Speichersystem 3

Zusammenfassend lässt sich über die Kostenabschätzung sagen, dass eine große Spreizung im Hinblick auf die spezifischen Kosten des Speichersystems erwartet wird. Im Wesentlichen sind hierbei die Speichergröße und die installierte elektrische Heizleistung die maßgeblichen Einflussgrößen. Entsprechend große Speicher mit moderater Heizleistung erreichen mit spezifischen Herstellungskosten von 35 €/kWh oder weniger Werte, die deutlich unter denen von Batteriesystemen liegen (> 100 €/kWh). Im Gegenzug können für kleinere Speichersysteme, die schnell beladen werden können mit Kosten bis ca. 182 €/kWh spezifisch gesehen knapp das fünffache kosten. Als Hauptkostentreiber hat sich hierbei die installierte elektrische Heizleistung herausgestellt. Für einen Vergleich zu Batteriesystemen müssen hier genau Zahlen für die für eine Schnellladung

geeigneten Batteriesysteme herangezogen werden. Grundsätzlich gibt es auch dort deutliche Unterschiede bei den Kosten in Abhängigkeit der Schnellladefähigkeit.

Als weitere Besonderheit wird in einer ergänzten Kostenschätzung die Substitution bestehender Komponenten berücksichtigt. Hierdurch können die effektiven Herstellungskosten des Speichersystems im Vergleich zu den reinen Herstellungskosten nochmals deutlich nach unten abweichen. Die Betrachtung zeigt, dass die Herstellungskosten eines THS-Heizsystems im Vergleich zu elektrisch basierten Heizsystemen deutlich niedriger liegen können, jedoch eine starke Abhängigkeit vom Einsatzszenario vorliegt. Das ökonomische Potential gegenüber auf batteriebasierten Heizsystemen lässt sich daher nicht pauschal quantifizieren. Für einen fundierten Vergleich sollte zudem die jeweilige Systemlebensdauer berücksichtigt werden. Da zum jetzigen Zeitpunkt weder Erkenntnisse über die Langzeitstabilität eines THS noch langjährige Erfahrungen zu batteriebasierten Heizsystemen vorliegen, besteht diesbezüglich weiterer Forschungsbedarf. Auch müssen weitere Kostenfaktoren wie Energiekosten mitberücksichtigt werden. Ein weiterer, jedoch schwer zu prognostizierender Faktor, ist der Werterhalt des metallischen Phasenwechselmaterials, welcher sich positiv auf die Wirtschaftlichkeit auswirken kann. Dem gegenüber ist v.a. die Nutzung von Batterien nach ihrem Einsatz im Fahrzeug z.B. als stationäre Energiespeicher in Diskussion.

4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen zum Gesamtprojekt

Allgemein lässt sich festhalten, dass mit Hilfe der Arbeiten im Projekt THS-Bus ein essentieller Beitrag zur Steigerung des Technologiereifegrades und zum Systemverständnis der Technologie „Thermische Hochleistungsspeicher“ geleistet werden konnte. Weiterhin konnten die Betriebsabläufe des Busverkehrs am Stuttgarter Flughafen im Hinblick auf deren Beheizung aufgearbeitet sowie essentielle Messungen zur Erfassung des Heizleistungsbedarfs durchgeführt werden. Da diese Ergebnisse auch dem Flughafen Stuttgart zur Verfügung stehen, besteht hier das Potential einer Optimierung im Betriebsablauf sowie bei der Beheizung der Busse. Nachfolgend wird für jedes der sechs durchgeführten Arbeitspakete eine kurze Zusammenfassung gegeben.

Arbeitspaket 1

Im Rahmen von Arbeitspaket 1 wurden die für den Thermischen Hochleistungsspeicher relevanten Anforderungen und Randbedingungen ermittelt. Hierfür wurden das Betriebsszenario am Flughafen analysiert, die Bauraumsituation und Einbindungsmöglichkeiten im Flughafenbus betrachtet sowie eine Messung des Heizleistungsbedarfes an einem Flughafenbus durchgeführt. Die Analyse des Betriebsszenarios hatte zum Ergebnis, dass grundsätzlich über Nacht ein längerer Zeitraum zur Beladung genutzt werden kann sowie auch während des Betriebsablaufs ca. 3 bis 4 Möglichkeiten zur Zwischenladung bestehen. Eine Integration eines Thermischen Hochleistungsspeichers könnte an der Position an der sich bisher die beiden elektrischen Heizgeräte befinden, daher zwischen Fahrgastraum und Fahrerkabine, erfolgen. Eine thermische Anbindung an das Fahrzeug könnte mittels des bestehenden Heizkreislaufes erfolgen. Der Thermische Hochleistungsspeicher könnte die bestehenden Heizsysteme damit ohne größeren Anpassungsaufwand direkt ersetzen.

Arbeitspaket 2

Im Arbeitspaket 2 wurde eine Auslegungsmethodik sowie die zugehörigen Auslegungswerkzeuge zur Dimensionierung und Bewertung des Thermischen Hochleistungsspeichers entwickelt. Die definierte Auslegungsmethodik lässt eine flexible Auslegung des Speichers für beliebige Anwendungsszenarien zu. Hierdurch könnte grundsätzlich jeder Bus und jedes Betriebsszenario (ÖPNV, Flughafen, Reisebus, etc.) betrachtet werden. Als relevante Ergebnisse sollen mit Hilfe der Auslegungsmethodik Informationen zu technologisch relevanten Kenngrößen des Thermischen Hochleistungsspeichers (z.B. Energiedichten, Abmessungen, etc.), Energieverbräuchen, Kosten, Ökobilanzen, technologische Kenngrößen anderer Heizsysteme, etc. bestimmt werden können. Der Aufbau sämtlicher Auslegungswerkzeuge konnte aufgrund des enormen Umfangs und der hohen Komplexität nicht vollständig im Projekt umgesetzt werden. Bis zum Abschluss liegen ca. zwei Drittel bis drei Viertel aller Auslegungswerkzeuge vor. Auch eine Validierung auf Basis der experimentellen Untersuchungen konnte nicht mehr durchgeführt werden.

Arbeitspaket 3

Im Arbeitspaket 3 erfolgte die technologische Weiterentwicklung der Teilkomponenten des Speichersystems. Dies betrifft Speichermaterial und Einhausung, das Wärmeeintragssystem sowie das Wärmeaustragssystem. Hinsichtlich Speichermaterial und Einhausung ist die genaue Kenntniss über das Reaktions- bzw. Degradationsverhalten über der Zeit notwendig. Dies ermöglicht eine Vorhersage der Degradation bzw. Langzeitstabilität des Speichersystems in Abhängigkeit des Betriebsverhaltens. Grundvoraussetzung hierfür ist die exakte Bestimmung thermophysikalischer Kenngrößen wie spezifischer Wärmekapazität und Schmelzenthalpie. Hierfür wurden im Rahmen des Projektes Charakterisierungsmethoden definiert, theoretisch analysiert und experimentell validiert. Zur Validierung wurde eine bekannte Referenzprobe mit einer Speichermasse von mehreren Kilogramm in einen Prüfstand integriert. Die Validierung ergab Abweichungen im einstelligen Prozent-Bereich, was als gering und damit positiv zu werten ist. Hinsichtlich des Wärmeeintragssystems wurden zunächst Recherchen zu industriell verfügbaren, elektrischen Widerstandsheizelementen durchgeführt. Hieraus ergab sich eine Auswahl an zylindrischen Hochleistungsheizpatronen, geteilten zylindrischen Hochleistungsheizpatronen sowie keramischen Flachheizern. Die maximale

Leistungsfähigkeit selbiger wurde versucht im Rahmen einer experimentellen Untersuchung zu ermitteln. Anhand der Ergebnisse konnte jedoch nicht auf die maximale Leistungsfähigkeit geschlossen werden, da die Prüfstandsinfrastruktur einen limitierenden Faktor darstellte. Grundsätzlich konnten jedoch wichtige Informationen zur Betriebsweise generiert werden. So kann in Abhängigkeit des Ladezustandes eine Begrenzung der maximalen Leistungsfähigkeit zur Vermeidung einer Überhitzung der Heizelemente erforderlich sein. Zum Wärmeaustag wurde ein System konzeptioniert, dimensioniert und experimentell untersucht, welches auf Basis der Verdampfung von Wasser die Wärme aus dem Speicher entnimmt. Grundsätzlich lässt sich durch die Verdampfung ein sehr hoher Wärmeübergangskoeffizient erreichen, welcher eine kompakte Bauweise des Systems ermöglicht. Durch Kondensation des verdampften Wassers in einem Plattenkondensator lässt sich die Wärme aus dem Speichersystem ohne direkte hydraulische Kopplung in den Heizkreislauf des Fahrzeugs eintragen. Anhand der experimentellen Untersuchungen hat sich gezeigt, dass hin zu höheren Speichertemperaturen die maximal erreichbare Wärmeaustagsleistung sinkt. Ursächlich hierfür sind Effekte, die ein „Austrocknen“ der wärmeübertragenden Oberflächen zur Folge haben und damit den Wärmeübergang limitieren. Hier gilt es in der Zukunft diese Effekte zu reduzieren, das System um weitere Wärmeübertragungsmechanismen bei hohen Temperaturen zu ergänzen oder aber gasbasierte Systeme zu untersuchen.

Arbeitspaket 4

Im Arbeitspaket 4 wurde das bisherige Speicherkonzept eines Thermischen Hochleistungsspeichers adaptiert bzw. Konzepte neu definiert. Grundlage für die Adaption bilden Überlegungen und experimentelle Untersuchungen zu Erstarrungseffekten bei der Abkühlung des Speichersystems. Von zentraler Bedeutung ist dabei ein guter thermischer Kontakt zwischen Speichermaterial und den Systemen zum Wärmeein- und austrag. Insgesamt wurden acht verschiedene Versuchsspeicher mit unterschiedlicher Anordnung von Wärmeein- und austragssystem aufgebaut. Kerninhalt der experimentellen Untersuchung ist die Betrachtung des Erstarrungsbildes mittels einer CT-Analyse. Aus den Kenntnissen selbiger wurden insgesamt vier verschiedene Speicherkonzepte abgeleitet, die entsprechende gute Kontaktierungen zwischen Speichermaterial und den Systemen zum Wärmeein- und austrag ermöglichen. Für alle weiteren Betrachtungen im Rahmen des Projektes wurde dabei ein Konzept ausgewählt, bei welchem sowohl der Wärmeein- als auch austrag an der Bodenfläche des Speichersystems erfolgt.

Arbeitspaket 5

Im Arbeitspaket 5 wurde ein Funktionsmuster eines Thermischen Hochleistungsspeichers aufgebaut und experimentell untersucht. Das Speichersystem wurde dabei im skalierten, sehr kleinen Maßstab aufgebaut. Als funktionelle Einhausung kommt Graphit als Werkstoff zum Einsatz. Diese ist von einer weiteren Einhausung aus Edelstahl umgeben. Die Graphit-Einhausung bildet die zum Speichermaterial kompatible Schicht, sodass es zu keiner Reaktion zwischen dem Speichermaterial und weiteren Komponenten kommt. Da bei Temperaturen oberhalb von 500 °C Sauerstoff jedoch potentiell mit Graphit zu CO₂ reagiert und sich die Einhausung damit auflösen würde, ist das Anlegen einer Schutzgasatmosphäre erforderlich. Diese wird zwischen gasdichter Edelstahlhülle und Graphit-Einhausung angelegt. Zur Beheizung des Speichersystems kommt eine Edelstahlplatte zum Einsatz die mit Bohrungen versehen ist. Die Bohrungen werden mit Heizpatronen bestückt. Insgesamt kommen vier Heizpatronen mit einer Leistung von je 600 W zum Einsatz. Zur Entladung wird ein Luftwärmeübertrager eingesetzt. Umgeben ist das Speichersystem von einer Wärmedämmung aus mikroporösem Dämmmaterial.

Experimentelle Untersuchungen wurden zunächst ohne Wärmeaustragssystem durchgeführt. Eine Integration des Wärmeaustragssystems war zum Zeitpunkt des Abschlussberichtes noch im Gange – Untersuchungen hierzu sind demnach nicht mehr Bestandteil des Berichts. Im Rahmen der Untersuchungen hat sich gezeigt, dass die Graphit-Einhausung gegenüber der Metallschmelze stabil ist. Es konnten keinerlei Reaktionserscheinungen beobachtet werden. Weiterhin wurde durch Messungen der Temperaturen in Heizplatte und Speichermaterial sowie der elektrisch eingetragenen

Wärmeleistung eine angenäherte Bestimmung des Thermischen Kontaktwiderstandes zwischen den einzelnen Komponenten durchgeführt.

Arbeitspaket 6

Im Arbeitspaket 6 wurde eine Bewertung der Technologie Thermische Hochleistungsspeicher durchgeführt. Die Bewertung erfolgte unter Zuhilfenahme des aufgebauten Auslegungswerkzeugs. Bewertet wurde das Speichersystem anhand technologischer Kenngrößen wie Energiedichte sowie hinsichtlich der Herstellungskosten. Ein Vergleich wurde gegenüber Batteriesystemen gezogen. Bewertet wurde für drei verschiedene Speichersysteme, die sich v.a. hinsichtlich ihrer Speicherkapazität und maximal möglichen Beladerate unterscheiden. Speichersystem 1 hat dabei die Auslegung für ein Gelegenheitsladezenario im ÖPNV zu Grunde ($Q = 50 \text{ kWh}$, $P_{el} = 150 \text{ kW}$), Speichersystem 2 die Auslegung für den Stuttgarter Flughafen ($Q = 162 \text{ kWh}$, $P_{el} = 40 \text{ kW}$) und Speichersystem eine Auslegung für eine Nachtladeszenario im ÖPNV ($Q = 300 \text{ kWh}$, $P_{el} = 100 \text{ kW}$). Anhand der technologischen Kenngrößen zeigen sich Skalierungseffekte hin zu höheren Energiedichten mit Zunahme der Speicherkapazität. Aus Kostensicht wurde v.a. die installierte elektrische Aufheizleistung als Kostentreiber identifiziert. Insgesamt kann von deutlich höheren Energiedichten (bis $> 250 \text{ Wh/kg}$, $> 400 \text{ Wh/l}$) und geringeren Herstellungskosten (minimal $< 30 \text{ €/kWh}$) eines Thermischen Hochleistungsspeichers im Vergleich zu Batteriesystemen ausgegangen werden. V.a. hinsichtlich der Herstellungskosten besteht jedoch eine massive Abhängigkeit vom Einsatzszenario, sodass hier Aussagen im Hinblick auf die jeweiligen Szenarien getroffen werden müssen. Für eine gesamtheitliche Abschätzung sind außerdem weitere Kosten, wie z.B. Energiekosten, Restwert nach Nutzungsdauer, etc. mit einzubeziehen.

5 Ausblick

Im Rahmen der weiteren Entwicklung Thermischer Hochleistungsspeicher erfolgt zunächst der Abschluss der Untersuchung des aktuell aufgebauten Funktionsmusters mit integriertem Wärmeaustragssystem. Die im Projekt erlangten Erkenntnisse können für die Untersuchung eines in einem anderen Projekt aufzubauenden Funktionsmusters genutzt werden. Erste Untersuchungen sind hier im Sommer 2022 geplant. Der dort aufgebaute Speicher entspricht erstmalig einem Speichermodul in realer Baugröße mit einer Speicherkapazität von ca. 17 kWh.

Aus technologischer Sicht ist v.a. eine Weiterentwicklung im Bereich des Wärmeaustragssystems erforderlich. Hier wird weiterhin ein System benötigt, welches die Wärme über den vollständigen Temperaturbereich von ca. 150 °C bis 600 °C kontrolliert vom Speicher in einen Kühlmittelkreislauf übertragen kann. Aufgrund der Kostenintensität des Wärmeeintragssystems besteht insbesondere bei Varianten mit erhöhter Beladeleistung Optimierungsbedarf. Hinsichtlich der Einhausung gilt es weitere Lösungen im Anwendungsmaßstab zu untersuchen. Allen voran ist eine Einhausungslösung auf Basis von Al_2O_3 als funktionalem Werkstoff von Interesse. Für die Auslegung wird der Aufbau der Simulationswerkzeuge weiter vorangetrieben. Nach Abschluss des Aufbaus der Werkzeuge ist weiterhin eine Validierung anhand experimenteller Daten aus eigenen Messungen oder aus Literaturquellen erforderlich.

Aus Projektsicht ist die Akquirierung von Anschlussprojekten erforderlich, die eine weitere Verbesserung des Speichersystems sowie die Integration in ein reales Fahrzeug zum Ziel haben. Hier finden aktuell Gespräche mit möglichen Industriepartnern statt. Weiterhin ist die Betrachtung der Technologie auch für andere Anwendungsfelder von Interesse. Hier ist v.a. die Anwendung in batterieelektrischen Zügen ebenfalls zur Innenraumbeheizung zu nennen. Auch der Einsatz im Energiesektor als Pufferspeicher für erneuerbare Energien kann von Interesse sein. Insbesondere die Bereitstellung von Hochtemperatur-Prozesswärme könnte sich als interessantes Anwendungsfeld erweisen.