

Schlussbericht

Verbundvorhaben „Sphinx“

Hochintegrierter, skalierbarer E-Fahrzeugantrieb auf Basis einer schnell
laufenden elektrischen Maschine

Teilvorhaben

Kühlmittel/Fluide, Wärmespeicherung und –transport

Projektpartner



Autoren: Dipl.-Ing. Steffen Heinke
Dr.-Ing. Wilhelm Tegethoff
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Köhler

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 01MY12001E gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhalt

| | |
|--|----|
| Abbildungsverzeichnis..... | 3 |
| Tabellenverzeichnis..... | 4 |
| 1 Kurze Darstellung..... | 5 |
| 1.1 Aufgabenstellung..... | 5 |
| 1.2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde..... | 6 |
| 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens..... | 6 |
| 1.4 Wissenschaftlicher und technischem Stand..... | 7 |
| 1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen..... | 9 |
| 2 Eingehende Darstellung..... | 11 |
| 2.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen..... | 11 |
| 2.1.1 AP 1000 Randbedingungen..... | 11 |
| 2.1.2 AP 2000 Grundlagen..... | 15 |
| 2.1.3 AP 3000 Mechanik..... | 35 |
| 2.1.4 AP 5000 Prüfstandsversuche..... | 36 |
| 2.1.5 AP 6000 Fahrzeugaufbau..... | 36 |
| 2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises..... | 37 |
| 2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit..... | 37 |
| 2.4 Weiterverwertung..... | 37 |
| 2.5 Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen..... | 38 |
| 2.6 Veröffentlichungen der Ergebnisse..... | 39 |
| Abkürzungsverzeichnis..... | 40 |
| Literaturverzeichnis..... | 41 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1: Balkenplan des Gesamtprojekts mit den Meilensteinen | 7 |
| Abbildung 2: Extremfahrten über verschiedene Bergpässe in unterschiedlichen Klimazonen: Mont Ventoux, Glockner Hochalpenstraße und Towne-Pass..... | 12 |
| Abbildung 3: Mittlere Klimarandbedingungen für E-Fahrzeuge in Ballungszentren für Spanien (mediterran), Süd-China (tropisch) und Süd-USA (kontinental) mit und ohne innerstädtische Überhitzung (UHI). | 14 |
| Abbildung 4: Temperaturprofil über die Inverterschichten für einen Volllastpunkt (Schichtdicken nicht maßstäblich) | 15 |
| Abbildung 5: Schematische Funktionsweise einer Heatpipe (bearbeitet nach [18]): a) Wärmeleitung durch Hülle und Kapillarstruktur, b) Verdampfen des Arbeitsfluids, c) Dampfströmung in Richtung des Kondensators, d) Kondensation in der Kapillarstruktur im Kondensator, e) Rückförderung des Fluides durch Kapillardruck. | 16 |
| Abbildung 6: Generelle Konstruktion der Heatpipes auf den integrierten Leistungshalbleitern: a) flüssigkeitsdurchströmter Kühlkörper, b) Board mit integriertem IGBT, c) thermisch leitfähige Verbindung, d) thermisch leitfähige und elektrisch isolierende Verbindung, e) Heatpipe | 17 |
| Abbildung 7: Temperaturbereiche verschiedener typischer Arbeitsmedien für Heatpipes sowie deren Merit-Zahlen in Abhängigkeit der Temperatur [20]..... | 18 |
| Abbildung 8: Montierte Heatpipes auf den Demonstratoren..... | 19 |
| Abbildung 9: Übersicht der Messergebnisse der thermischen Impedanz der Demonstratoren mit Heatpipes (DUT 3 → flache Aceton-Heatpipe, DUT 13 → runde Wasser-Heatpipes) und Referenzproben ohne Heatpipes (DUT 12, 18, 31)..... | 19 |
| Abbildung 10: Vergleich von Stoffdatenmodellen von Nanofluiden mit Messdaten. | 20 |
| Abbildung 11: Relativer Wärmestrom am Kühlmittelkühler bezogen auf den Referenzfall mit konventionellem Kühlmittel für CuO-Nanofluide mit variierender Partikelkonzentrationen. ... | 21 |
| Abbildung 12: Wärmestromverhältnis von Nanofluid mit variierender Partikelkonzentration und reinem Basisfluid bei identischer hydraulischer Leistungen des Basisfluids..... | 21 |
| Abbildung 13: Änderung der Inverter IGBT-Temperatur bezogen auf den Referenzfall in Abhängigkeit von Chipfläche und Nanopartikelanteil (Al ₂ O ₃). | 22 |
| Abbildung 14: Wärmespeicherarten mit qualitativem Vergleich deren Energiedichte und Entwicklungsstand (eigenen Darstellung nach [21]) | 22 |
| Abbildung 15: Schematischer Vergleich der Temperaturentwicklung über die spezifische Enthalpie eines Materials (rechts) bzw. über die Zeit (links) mit und ohne Phasenwechsel bei konstanter Wärmezufuhr. | 23 |
| Abbildung 16: PCM-Pellets bestehend aus einem Phasenwechselmaterial auf Paraffinbasis eingebettet in eine stabile Polymerstruktur | 24 |
| Abbildung 17: Schematische Darstellung des PCM-Containers mit den Thermoelementen entlang der Durchströmungsrichtung im Inneren | 25 |
| Abbildung 18: Prüfstands Aufbau zur Untersuchung des PCM-Speichers | 25 |
| Abbildung 19: Kühlmitteltemperaturen am Ein- und Austritt des thermischen Speichers beim durchlaufen der Phasenwechseltemperatur..... | 26 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 20: Temperaturdifferenz zwischen Ein- und Austritt des thermischen Speichers aufgetragen über die Eintrittstemperatur..... | 26 |
| Abbildung 21: Verklumptes PCM-Material im Container nach einem Aufheiz- und Abkühlversuch durch den Phasenwechselbereich des Materials..... | 26 |
| Abbildung 22: Implementierte Berechnung der Änderung der spezifischen Enthalpie des PCMs in Abhängigkeit der Temperatur | 27 |
| Abbildung 23: Aufbau des diskretisierten Modells des thermischen Speichers mit PCM..... | 28 |
| Abbildung 24: Integration der Stoffdatenberechnung alternativer Wärmeträger in die TILMedia Stoffdatenbank | 28 |
| Abbildung 25: Schematischer Aufbau der Gesamtfahrzeugsimulation bestehend aus mechanischen, elektrischen und thermischen Modellen sowie Fahrzyklen und Klimarandbedingungen..... | 29 |
| Abbildung 26: Detailansicht des Referenzkühlsystems und AC-Kreislaufs mit thermischem Fahrgastraummodell | 29 |
| Abbildung 27: Kumulierte Energieströme nach dem Durchfahren eines NEFZ bei einer Umgebungstemperatur von 45 °C unter Berücksichtigung der Fahrgastraumklimatisierung. | 30 |
| Abbildung 28: Kühlsystem mit integriertem thermischem Speicher vor der Antriebseinheit .. | 31 |
| Abbildung 29: Vergleich der Inverter- und Kühlmitteltemperatur mit und ohne thermischen Speicher für eine Extremfahrt..... | 31 |
| Abbildung 30: Differenz der Rotortemperatur der E-Maschine sowie der maximalen und mittleren IGBT-Temperatur der Leistungselektronik für den Einsatz eines CuO-Nanofluids mit variierender Partikelkonzentration sowie einer unterstützenden Kühlung der Leistungselektronik mittels Heatpipes zum Referenzfall basierend auf der thermischen Gesamtfahrzeugsimulation im Sphinx Belastungszyklus. | 32 |
| Abbildung 31: Detailausschnitt der Simulationsergebnisse für die zeitliche IGBT-Temperatur der Leistungselektronik für den Referenzfall (blau), den Einsatz eines CuO-Nanofluids mit 5 Vol.-% (rot) sowie der unterstützenden Kühlung der Leistungselektronik mittels Heatpipes (grün) im Sphinx Belastungszyklus..... | 33 |
| Abbildung 32: Temperaturdifferenz der IGBTs mit unterstützender Heatpipe-Kühlung zum Referenzfall (keine Heatpipes) in Abhängigkeit der relativen Chipfläche (\propto Chipanzahl) für den Auslegungsfall (Maximallast)..... | 34 |
| Abbildung 33: Gewählte Kühlmittelführung in der Leistungselektronik und E-Maschine..... | 35 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|---|----|
| Tabelle 1: Festgelegte Parameter für das Simulationsmodell des Gesamtfahrzeugs..... | 11 |
| Tabelle 2: Übersicht über die generellen Merkmale der beiden untersuchten Heatpipes. | 18 |
| Tabelle 3: Ausgewählte Daten des PCM-Materials | 24 |

1 Kurze Darstellung

1.1 Aufgabenstellung

Batterieelektrische Fahrzeuge sind heutzutage noch teurer und bieten eine kleinere Reichweite verglichen mit verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeugen. Eine in einem Gehäuse hochintegrierte Antriebseinheit bestehend aus Getriebe, E-Motor und Leistungselektronik (LE) kann dazu beitragen Kosten, Bauraum und Gewicht einzusparen und sich somit positiv auf die zuvor genannten Nachteile auswirken. Ziel des Forschungsprojekts „Sphinx“ war daher die Entwicklung einer solchen hochintegrierten Antriebseinheit.

Allerdings stellt die Hochintegration auch neue Herausforderungen, unter anderem in Bezug auf das Thermomanagement der Elektronikkomponenten. So können beispielsweise auftretende Wärmeströme zwischen E-Maschine und Leistungselektronik zu unzulässig hohen Temperaturen und damit Schäden in den Leistungshalbleitern führen. Ziel des in diesem Bericht vorgestellten Teilvorhabens „Kühlmittel/Fluide, Wärmespeicherung und -transport“ war es daher mögliche innovative Lösungsansätze zu finden, um das Thermomanagement der Antriebskomponenten, mit dem Fokus auf der Leistungselektronik, zu verbessern.

Die untersuchten Lösungsansätze lassen sich dabei in zwei grundlegende Kategorien einteilen. Ansätze zur Verbesserung der Wärmeübertragung durch Verwendung alternativer Kühlfluide mit verbesserten thermischen Eigenschaften, z.B. Nanofluiden, und der Ausnutzung des Phasenwechsels von Fluiden zur Wärmeübertragung, wie es beispielsweise in sogenannten „Heatpipes“ geschieht. Als zweite Möglichkeit wurde im Rahmen des Projekts die Verbesserung des Thermomanagements durch Zwischenspeicherung von Wärme in Phasenwechselmaterialien (engl.: Phase Change Material, PCM) untersucht. Ziel dabei war es kurzzeitig auftretende Kühllastspitzen abzufangen, um so das Kühlsystem kompakter gestalten zu können. Zur Bewertung wurden im Rahmen des Projekts sowohl experimentelle als auch simulative Untersuchungen durchgeführt. Dabei wurde unter anderem das im Teilprojekt „Thermische Simulation“ bei dem Projektpartner TLK-Thermo GmbH (TLK) erstellte thermische Gesamtfahrzeugmodell eines E-Fahrzeugs um entsprechende Teilmodelle für die untersuchten innovativen Kühlkonzepte erweitert.

Die Arbeitsinhalte des Instituts für Thermodynamik (IfT) im Projekt lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Experimentelle und theoretische Untersuchung von Möglichkeiten zur Verbesserung der Wärmeübertragung.
- Experimentelle und theoretische Untersuchung von Möglichkeiten zur Zwischenspeicherung von Wärme.
- Entwicklung von Teilmodellen für die innovativen Kühlkonzepte und Integration in das von TLK entwickelte thermische Modell eines E-Fahrzeugs.
- Durchführung von simulativen Untersuchungen mithilfe der entwickelten Modelle zur ganzheitlichen Bewertung der innovativen Kühlkonzepte.

1.2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Markteinführung und Verbreitung von Elektrofahrzeugen wird derzeit dadurch gebremst, dass Elektrofahrzeuge im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen deutlich teurer sind und eine geringere Reichweite aufweisen. Größere Stückzahlen, wie sie für Elektrofahrzeuge prognostiziert werden, ermöglichen neue Ansätze, um diese Nachteile zu überwinden. Mit dieser Zielrichtung wird im Forschungsprojekt Sphinx ein hochintegriertes Antriebsmodul für ein Elektrofahrzeug untersucht. Die Integration von Leistungselektronik, E-Maschine und Getriebe in einem Gehäuse vereinfacht oder eliminiert Schnittstellen und erleichtert die ganzheitliche Abstimmung des Antriebssystems, um den spezifischen Anforderungen im Automobilbau gerecht zu werden. Damit entsteht ein Antriebsmodul mit erhöhter Leistungsdichte und reduziertem Material- und Montageaufwand. Somit leistet die Hochintegration des Antriebs ihren Beitrag zur Kostenreduktion.

Ein Antriebssystem nach diesem Ansatz wird im Vorhaben Sphinx als Prototyp aufgebaut und auf einem Prüfstand erprobt. Anschließend wird ein Elektrofahrzeug mit einem derartigen Antriebsmodul ausgestattet und dient als Demonstrator für dieses Konzept. Im Forschungsprojekt Sphinx sind folgende Projektpartner beteiligt: ZF Friedrichshafen AG, Daimler AG, Infineon Technologies AG, TLK-Thermo GmbH und die TU Braunschweig.

Das hier vorgestellte Teilprojekt „Kühlmittel/Fluide, Wärmespeicherung und -transport“ befasst sich mit möglichen innovative Lösungsansätze, um das Thermomanagement der Antriebskomponenten, mit dem Fokus auf der Leistungselektronik, zu verbessern.

Das Projekt wurde im Rahmen des Förderprogramms "ATEM - Antriebstechnologien für die Elektromobilität" durch das BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie) gefördert.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Gesamtprojekt Sphinx gliedert sich in insgesamt 7 Arbeitspakete: Projektmanagement, Randbedingungen, Grundlagen, Mechanik, Elektronik, Prüfstandsversuche und Fahrzeugaufbau. Das IfT ist mit Ausnahme der beiden Arbeitspaketen „Projektmanagement“ und „Elektronik“ an jedem Arbeitspaket (AP) beteiligt und übernimmt darüber hinaus im Arbeitspaket „Grundlagen“ die Leitung. Der gesamte Aufwand beträgt beim IfT 36 Personenmonate.

Ursprünglich wurde das Projekt mit einer Gesamtdauer von 36 Monate geplant, mit dem Projektabschluss zum Ende des Jahres 2015. Im 2. Halbjahr 2013 zeigte sich, dass die Inhalte des Projekts angepasst werden müssen. In der Vorhabensbeschreibung waren zum Zeitpunkt der Antragsstellung aufbauend auf dem damaligen Stand der Technik die Ideen zur Integration formuliert worden. Der Stand der Technik hatte sich zum Zeitpunkt des 2. Halbjahres 2013 derart weiterentwickelt, dass eine bloße Integration von konventionellem Inverter, E-Maschine und Getriebe aus Sicht des Konsortiums nicht mehr geeignet war, ein Alleinstellungsmerkmal darzustellen. Der Sphinx-Ansatz, durch Integration Vorteile und damit Alleinstellungsmerkmale zu erhalten, ließ sich jedoch weiterführen. Dieselben Integrationsprinzipien wurden auch auf den Inverter angewandt, indem die Leistungshalbleiter in den Schaltungsträger integriert wurden (Embedding-Technologie). Mit dieser inhaltlichen Erweiterung wurde eine

in Sphinx Untersuchungen zur Fahrzeugkühlung. Vielversprechende Untersuchungen hierzu wurden am Department of Mechanical Engineering, University of Malaya, Kuala Lumpur, Malaysia durchgeführt [7]. Letztlich sind jedoch auch diese Untersuchungen nicht übertragbar, da sich beispielsweise Leistungsdichte, Wärmeübertragergeometrie und die Fluidströmung (Reynolds-Zahl) deutlich unterscheiden. Dennoch stellen die Veröffentlichungen eine geeignete Grundlage für eigene weiterführende Untersuchungen dar. Darüber hinaus wurden am Institut für Thermodynamik im EU-geförderten Projekt „TIFFE“ (Laufzeit 6/2009 bis 12/2012) bereits einige Untersuchungen mit Nanofluiden in Kälteträgern für die Innenraumklimatisierung eines konventionellen Fahrzeugs durchgeführt. Allerdings unterscheiden sich auch hier die Randbedingungen (Temperaturniveaus, Geometrie, etc.) deutlich, sodass die Ergebnisse nicht direkt übertragbar sind.

Im Bereich der Phasenwechselmaterialien beschäftigt sich die überwiegende Zahl der Veröffentlichungen mit deren Nutzung als Zwischenspeicher für Wärme bzw. „Kälte“ für stationäre Anwendung, wie beispielsweise im Bereich der Gebäudeklimatisierung [8]. Dadurch ist bereits ein breiteres Wissen über diese Art von Materialien bekannt, jedoch unterscheidet sich der geplante Anwendungsbereich im Projekt Sphinx in seinen Anforderungen und Randbedingungen hinsichtlich Leistungsdichte, transientem Verhalten sowie Bauraum- und Gewichtsrestriktionen deutlich von der Anwendung im Gebäudebereich. Ebenfalls im TIFFE Projekt wurde am Institut für Thermodynamik der Einsatz von Phasenwechselmaterialien in Sekundärkreisläufen von Pkw-Klimaanlagen untersucht [9]. Auch hier beschränkten sich die Untersuchungen auf die Innenraumklimatisierung, so dass sich auch hier die Anforderungen an die Phasenwechselmaterialien sowie die Auswirkungen auf das thermische Management deutlich unterscheiden. Die größte Schnittmenge zum Projekt Sphinx besteht bei den Untersuchungen zum Einsatz von PCMs für das Thermomanagement von Batterien für mobile Anwendungen. Dies wurde beispielsweise am Department of Chemical and Environmental Engineering am Illinois Institute of Technology am Beispiel eines Elektroscooters untersucht [10]. Weiterhin existieren Untersuchungen zum passiven Thermomanagement von Elektronikkomponenten durch die Integration von PCM-Materialien in die Wärmesenke, wie sie beispielsweise am Institute of Heat Engineering der Warsaw University of Technology durchgeführt wurden [11]. Die Untersuchungen beschränken sich jedoch auf stationäre Anwendungen, so dass sich auch hier deutliche Unterschiede in Bezug auf die Randbedingungen und Restriktionen ergeben.

Die Ausnutzung des Phasenwechsels zur Optimierung der Kühlung von Elektronikkomponenten ist aus dem Bereich der Computer bereits bekannt [12] und gehören vor allem bei Laptops immer mehr zum Stand der Technik. Wenige Versuche wurden allerdings bisher unternommen diese Technologie für automobiler Anwendungen nutzbar zu machen. Bisherige Unternehmungen versuchten beispielsweise in Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor mittels Heatpipes die Aufheizung des Abgaskatalysators zu beschleunigen [13]. Weiterhin wurde bereits versucht die Temperaturverteilung in kleineren Leistungselektroniken von Mikrohybridfahrzeugen mittels flacher, in die Wärmesenke integrierte Heatpipes zu homogenisieren [14]. Ansätze zu einem Einsatz von Heatpipes zur Kühlung einer hochintegrierten Antriebseinheit sind jedoch nicht bekannt.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass den Antragstellern auch nach aktueller Informationsrecherche (Patent- und Literaturrecherchen) nicht bekannt ist, dass die

spezifischen Vorhaben vom IfT im Projekt Sphinx bereits Gegenstand anderweitiger Forschungen, Entwicklungen, Untersuchungen oder Patente sind. Für die Recherche von Patenten wurde dabei die Datenbank DEPATISnet des Deutschen Patent- und Markenamtes [15] verwendet sowie eine allgemeine Online-Recherche im Internet durchgeführt. Für die Literaturrecherche wurde überwiegend auf das Portale ScienceDirect [16] sowie das Internet im Allgemeinen zurückgegriffen. Entsprechend der Rechercheergebnisse ist nicht zu erwarten, dass Schutzrechte und Schutzrechtsanmeldungen einer späteren Ergebnisverwertung entgegenstehen können.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Forschungsprojekt Sphinx sind folgende Projektpartner beteiligt: ZF Friedrichshafen AG (Konsortialführer), Daimler AG, Infineon Technologies AG, TLK-Thermo GmbH und die TU Braunschweig. Das Institut für Thermodynamik der TU Braunschweig ist wissenschaftlicher Partner im Projekt.

Die Aufgabenverteilung zwischen den verschiedenen Projektpartnern ist dabei wie folgt aufgeteilt:

ZF Friedrichshafen AG

- Organisation des Konsortiums, Projektleitung.
- Auslegung des Antriebssystems auf Basis der Vorgaben (Bauraum, Leistungsanforderungen, Richtlinien) und der zur Verfügung stehenden Basistechnologien.
- Festlegung der Schnittstellen: mechanische Befestigung: Befestigungskonzept für Vorder- und/oder Hinterachse mit mechanischer Entkoppelung (Gummilager, o. ä.); Wellenanschluss: Definition minimale Seitenwellenlänge, maximaler Knickwinkel; Elektrische Anschlüsse, Kühlwasser und Signale: Interner 3-Phasenanschluss E-Maschine, DC-Anschluss Inverter, CAN-Anschlüsse, Sensoranschlüsse.
- Untersuchung von Wechselwirkungen zwischen den Komponenten des Antriebssystems.
- Konzeption, Konstruktion, Fertigung und Bereitstellung der Hardware (Getriebe, Parksperrschloß incl. Aktuatorik, elektrische Maschine, Gehäuse).

Daimler AG

- Zielableitung vom Fahrzeug auf den Antriebstrang.
- Konzeptfindung und Schnittstellenfestlegung.
- Integration und Inbetriebnahme der geprüften integrierten Antriebseinheit in ein Fahrzeug der Daimler AG. (Konnte im Projekt nicht verwirklicht werden.)
- Vermessung des Fahrzeugs auf Prüfständen und im Realbetrieb hinsichtlich u. a. Verbrauch und Akustik/Schwingungen (NVH) direkt durch die Daimler AG. (Konnte im Projekt nicht verwirklicht werden.)

Infineon Technologies AG

- Spezifikation, Modellierung, Auswahl und Bereitstellung von Halbleiterkomponenten und Leistungselektronikmodul.
- Unterstützung der Fertigung von Schaltungsträgern in Embedding-Technologie.
- Mitarbeit u. a. in folgenden den Inverter betreffenden Themen:
 - Definition Spannungsniveau (Untersuchung der Wechselwirkung zw. Spannungsniveau und Bauelemente-Auslegung).
 - Spezifikation und Konstruktion (Auswahl der Inverter und DC/DC Wandler Bauteile, Untersuchung von Wechselwirkungen zwischen den Bauteilen des Inverters (EMV)).
 - Festlegung der Inverter-Bauteile auf Basis von Berechnungen sowie thermischer und elektrischer Simulationen (Leistungsmodule, Gate-Treiber-IC, IGBTs, IGBT-Dioden).
- Lebensdauerbetrachtungen in Abhängigkeit der Temperatur und der Verwendung unterschiedlicher Kühlmedien.
- Klärung des Einbaukonzepts der Elektronik (Gestaltung der Leistungsanschlüsse und Optimierung hinsichtlich Embedding-Technologie).
- Sicherheitskonzept auf Inverter-Ebene (Erfüllen standardisierter Vorschriften, Know-how zu Aspekten beispielsweise HV-Sicherheit und Überwachung Drehmoment).

TLK-Thermo GmbH

- Ermittlung repräsentativer ortsabhängiger Klimarandbedingungen für E-Fahrzeuge (Temperatur, Feuchte, Solarstrahlung) als Randbedingungen für das Kühlmodul.
- Aufbau eines thermischen Simulationsmodells unter Modelica/TIL Suite zur dynamischen von Lastzustand und Umgebungsbedingungen abhängigen Kältebedarfsanalyse (Elektronik-Komponenten und Gesamtfahrzeug-Simulation).
- Simulation der dynamischen Kälte-/Wärme- bzw. Temperaturverteilung.
- Untersuchung von extremen Fahrzuständen bei extremen Fahrzyklen und extremen Temperaturen.
- Untersuchung grundlegender Betriebsstrategien und Regelungsansätze für die Komponentenkühlung.
- Unterstützung bei der Auslegung und Optimierung der Wärmeübertrager.

TU Braunschweig, Institut für Thermodynamik (IfT)

- Ermittlung repräsentativer und extremer Fahrzyklen für E-Fahrzeuge.
- Untersuchung verschiedener Kälte Träger sowie Phasenwechselmedien in Hinblick auf die Einsatzmöglichkeiten im Kälte Trägernetz.
- Untersuchung der Komponentenkühlung am Prüfstand.
- Erweiterung des thermischen Fahrzeugmodells um Teilmodelle für alternative Kälte Träger und Phasenwechselmaterialien.
- Simulative Untersuchung innovativer Kühlkonzepte mithilfe des erweiterten thermischen Fahrzeugmodells.
- Auswertung und Interpretation der Komponentenkühlung im Demonstratorfahrzeug (Konnte im Projekt nicht verwirklicht werden.).

2 Eingehende Darstellung

2.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen

2.1.1 AP 1000 Randbedingungen

AP 1010 Zielfahrzeug

Im Konsortium wurde ein Zielfahrzeug aus dem A/B Segment festgelegt. Die Parametrierung des aufgebauten und für die weiteren Untersuchungen verwendeten Gesamtfahrzeugmodells wurde daher in Anlehnung an einen Smart ED definiert und ist in Tabelle 1 zu finden. Diese Parametrierung dient als Referenz.

Tabelle 1: Festgelegte Parameter für das Simulationsmodell des Gesamtfahrzeugs

| Parameter/Zielgröße | Wert | Einheit |
|----------------------------------|--------------------|----------------|
| Maximalgeschwindigkeit | 125 | km/h |
| maximale Peakleistung | 55 | kW |
| maximale Dauerleistung | 35 | kW |
| maximales Drehmoment | 130 | Nm |
| Fahrzeugleergewicht m_F | 925 kg | kg |
| Zuladung m_{Zu} | 350 kg | kg |
| Stirnfläche A | 2,4 m ² | m ² |
| Luftwiderstandsbeiwert c_W | 0,34 | - |
| Rollwiderstandsbeiwert f_R | 0,011 | - |
| Massenfaktor e | 1,2 | - |
| Getriebe Übersetzung | 16 | - |
| Reifendurchmesser | 0,6 | m |
| Batterietyp Lithium-Ionen | | |
| Batterie Kapazität | 17.6 | kWh |
| Batterienennspannung (93x3.7V) | 344 | V |
| Batteriemasse | 175 | kg |
| Zielgrößen | | |
| Ladezeit 220 V 1-phasig | ≈ 7 | h |
| Ladezeit On-Board 22kW 3-phasig | ≈ 1 | h |
| Reichweite | ≈ 145 | km |
| Verbrauch ohne HVAC | ≈ 15.1 | kWh/100km |
| Beschleunigung 0-100 km/h | ≈ 11.5 | s |

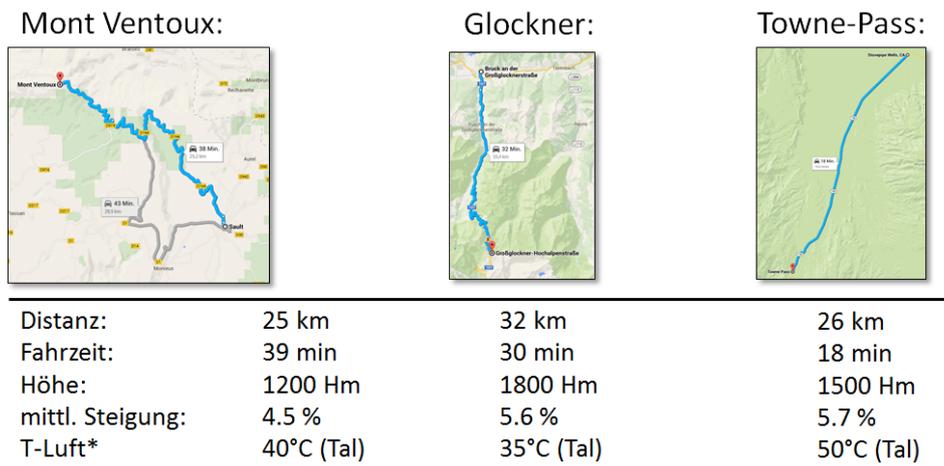
Das Referenzfahrzeug ist mit einem Kühler eines verbrennungsmotorisch angetriebenen Pkw ausgestattet, sodass mit einer Optimierung der Wärmeübertragungsflächen zu rechnen ist.

AP 1050 Schnittstellenanalyse

Im Rahmen der Schnittstellenanalyse wurde festgelegt, dass die E-Maschine, die Leistungselektronik sowie das Getriebe Bestandteile der integrierten Antriebseinheit werden. Die Kühlmittelpumpe, das Batterieladegerät sowie der DC/DC-Wandler für das Niedervoltbordnetz werden zunächst als separate Komponenten ausgeführt. Der DC/DC-Wandler wird kühlmittelseitig parallel zur Antriebseinheit durchströmt. Über ein 3/2-Wegeventil kann anstelle der Antriebseinheit und des DC/DC-Wandlers das Ladegerät im Ladezustand über das Kühlmittel gekühlt werden. Die Verschaltung ist in Abbildung 26 dargestellt.

AP 1070 Fahrprofil

In Absprache mit dem Konsortium wurden gemeinsam mit TLK für die dynamische Untersuchung der Kühlkonzepte Fahrzyklen definiert und für die Verwendung in der Gesamtfahrzeugsimulation aufbereitet. Zum einen wird auf verschiedene Standardzyklen wie WLTP und NEDC zurückgegriffen um Verbrauchs- und Lebensdaueruntersuchungen durchzuführen. Weiterhin werden typische Fahrten in Ballungszentren anhand von Realfahrtdaten abgebildet und ein im Teilprojekt von Daimler definierter „Sphinx-Zyklus“ (modifizierter WLTP) betrachtet. Für die Untersuchung möglicher Extremszenarien werden verschiedene Passfahrten in unterschiedlichen Klimazonen wie die Glockner Hochalpenstraße, Mont Ventoux und Towe-Pass herangezogen (siehe Abbildung 2).



Vorkonditionierung: Initialisierung mit $T_{ini} = T_{Luft}$,
Einschalten Klima- und Kühlkreislauf 10 Minuten vor Fahrtbeginn

*Temperaturprofil: höhenabhängig

Abbildung 2: Extremsfahrten über verschiedene Bergpässe in unterschiedlichen Klimazonen: Mont Ventoux, Glockner Hochalpenstraße und Towe-Pass.

Für die durchgeführten Simulationsrechnungen wird als Initialtemperatur für Luft, Kühlwasser und Komponenten die jeweilige Lufttemperatur im Tal verwendet. Der Klima- und Kühlkreislauf

wird 10 Minuten vor Fahrtbeginn der Testfahrt eingeschaltet um den Innenraum vorzukonditionieren. Anschließend wird die entsprechende Testfahrt über die entsprechende Distanz durchgeführt, wobei die Lufttemperatur basierend auf einer Höhenkorrektur berechnet wird. Die Klimaanlage wird während der gesamten Fahrt vollständig im Umluftbetrieb betrieben.

AP 1075 Klimarandbedingungen

Ziel dieses Arbeitspaketes ist die Generierung örtlich und zeitlich aufgelöster klimatischer Randbedingungen für den Einsatz von E-Fahrzeugen für die durchzuführenden Simulationsrechnungen. Diese Daten sind eng mit den unter AP 1070 ermittelten repräsentativen sowie extremen Fahrzyklen für E-Fahrzeuge verknüpft. Dazu wurden mit TLK zusammen lokale Fahrprofile und Bevölkerungsdichten, örtlich und zeitlich aufgelöste Klimadaten [17] sowie landestypischem Nutzungsverhalten gewichtet miteinander verknüpft und ausgewertet. Ergebnis dieser Untersuchung ist eine Matrix, die beschreibt, zu welchem prozentualen Anteil E-Fahrzeuge in den verschiedenen ausgewählten Ballungszentren bei einer bestimmten Temperatur, Feuchte und Solarstrahlung genutzt werden (siehe Abbildung 3). Um eine örtliche Gewichtung der Klimadaten zu ermöglichen, werden die einzelnen betrachteten Länder in Unterräume aufgeteilt. Weiterhin wird der Einfluss des Stadtklimas durch die Berücksichtigung der innerstädtischen Überhitzung (engl. Urban Heat Island, UHI) berücksichtigt. Dieser Einfluss wird nach Landestyp in Abhängigkeit der Einwohnerdichte und der Uhrzeit berücksichtigt und kann zu einer zusätzlichen Aufheizung von maximal 5 K in der Mittagszeit führen. Die Untersuchung wird exemplarisch für verschiedene Länder in unterschiedlichen Klimaregionen wie Spanien (mediterranes Klima), Süd-USA (Arizona, kontinentales Klima) und Süd-China (Guangdong, tropisches Klima) durchgeführt.

Für das mediterrane Klima (Spanien) liegen 7 % der Fahrtbedingungen bei Temperaturen über 30 °C, während bei kontinentalem Klima (Arizona) 35 % der Fahrten bei über 30 °C und bei tropischem Klima (Guangdong) 8 % bei über 30°C stattfinden. Die höchsten Extremtemperaturen treten in Arizona auf. Dort finden 1 % aller Fahrten bei einer Temperatur zwischen 45 °C und 50 °C statt.

Referenz:

| Spanien | [-20 ... -15 °C] | [-15 ... -10 °C] | [-10 ... -5 °C] | [-5 ... 0 °C] | [0 ... 5 °C] | [5 ... 10 °C] | [10 ... 15 °C] | [15 ... 20 °C] | [20 ... 25 °C] | [25 ... 30 °C] | [30 ... 35 °C] | [35 ... 40 °C] | [40 ... 45 °C] | [45 ... 50 °C] |
|-------------------|---------------------|---------------------|--------------------|----------------------------|-----------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 0 < φ ≤ 20 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.04 | 0.32 | 0.75 | 1.48 | 2.11 | 1.35 | 0.08 | 0.00 | 0.00 |
| 20 < φ ≤ 40 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.24 | 2.21 | 5.52 | 6.59 | 6.77 | 4.11 | 0.74 | 0.04 | 0.00 | 0.00 |
| 40 < φ ≤ 60 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.19 | 2.51 | 7.63 | 9.30 | 8.49 | 4.91 | 0.92 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 60 < φ ≤ 80 | 0.00 | 0.00 | 0.05 | 1.21 | 5.06 | 8.28 | 6.79 | 4.27 | 0.98 | 0.06 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 80 < φ ≤ 100 | 0.00 | 0.00 | 0.06 | 0.74 | 2.16 | 2.35 | 1.24 | 0.41 | 0.04 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| T < -5 °C ≅ 0.1 % | | | | 20 °C < T < 30 °C ≅ 21.4 % | | | | | | T > 30 °C ≅ 2.2 % | | | | |

UHI:

| Spanien UHI 100 | [-20 ... -15 °C] | [-15 ... -10 °C] | [-10 ... -5 °C] | [-5 ... 0 °C] | [0 ... 5 °C] | [5 ... 10 °C] | [10 ... 15 °C] | [15 ... 20 °C] | [20 ... 25 °C] | [25 ... 30 °C] | [30 ... 35 °C] | [35 ... 40 °C] | [40 ... 45 °C] | [45 ... 50 °C] |
|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------|-----------------------------|-----------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 0 < φ ≤ 20 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.12 | 0.83 | 1.46 | 2.90 | 3.58 | 2.16 | 0.04 | 0.00 |
| 20 < φ ≤ 40 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.03 | 0.72 | 4.41 | 6.40 | 6.19 | 4.57 | 1.27 | 0.06 | 0.00 | 0.00 |
| 40 < φ ≤ 60 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.77 | 6.15 | 10.32 | 8.15 | 6.74 | 3.41 | 0.10 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 60 < φ ≤ 80 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.18 | 2.93 | 7.19 | 7.25 | 5.13 | 2.32 | 0.24 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 80 < φ ≤ 100 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.10 | 0.94 | 1.75 | 1.04 | 0.40 | 0.15 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| T < -5 °C ≅ 0.004 % | | | | 20 °C < T < 30 °C ≅ 27.97 % | | | | | | T > 30 °C ≅ 7.2 % | | | | |

Referenz:

| Guangdong Referenz | [-30 ... -25 °C] | [-25 ... -20 °C] | [-20 ... -15 °C] | [-15 ... -10 °C] | [-10 ... -5 °C] | [-5 ... 0 °C] | [0 ... 5 °C] | [5 ... 10 °C] | [10 ... 15 °C] | [15 ... 20 °C] | [20 ... 25 °C] | [25 ... 30 °C] | [30 ... 35 °C] | [35 ... 40 °C] | [40 ... 45 °C] | [45 ... 50 °C] |
|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------------|--------------------|------------------|-----------------|------------------|-------------------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 0 < φ ≤ 20 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.006 | 0.014 | 0.034 | 0.011 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 20 < φ ≤ 40 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.003 | 0.156 | 0.794 | 1.996 | 2.272 | 1.414 | 0.285 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 40 < φ ≤ 60 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.004 | 0.234 | 1.625 | 4.799 | 7.325 | 8.336 | 11.178 | 1.887 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 60 < φ ≤ 80 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.016 | 0.709 | 3.260 | 5.694 | 8.540 | 14.327 | 11.775 | 0.277 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 80 < φ ≤ 100 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.006 | 0.222 | 0.914 | 1.634 | 2.574 | 5.472 | 2.213 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| T < -5 °C ≅ 0 % | | | | 20 °C < T < 30 °C ≅ 57 % | | | | | | T > 30 °C ≅ 2.45 % | | | | | | |

UHI:

| Guangdong UHI 100 | [-30 ... -25 °C] | [-25 ... -20 °C] | [-20 ... -15 °C] | [-15 ... -10 °C] | [-10 ... -5 °C] | [-5 ... 0 °C] | [0 ... 5 °C] | [5 ... 10 °C] | [10 ... 15 °C] | [15 ... 20 °C] | [20 ... 25 °C] | [25 ... 30 °C] | [30 ... 35 °C] | [35 ... 40 °C] | [40 ... 45 °C] | [45 ... 50 °C] |
|-------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------------|--------------------|------------------|-----------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 0 < φ ≤ 20 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.003 | 0.008 | 0.037 | 0.016 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 20 < φ ≤ 40 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.003 | 0.118 | 0.585 | 1.644 | 2.243 | 1.723 | 0.577 | 0.025 | 0.000 | 0.000 |
| 40 < φ ≤ 60 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.004 | 0.171 | 1.225 | 3.860 | 6.595 | 8.233 | 10.551 | 4.613 | 0.135 | 0.000 | 0.000 |
| 60 < φ ≤ 80 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.016 | 0.543 | 2.486 | 5.270 | 7.784 | 12.312 | 13.769 | 2.384 | 0.030 | 0.000 | 0.000 |
| 80 < φ ≤ 100 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.006 | 0.161 | 0.793 | 1.412 | 2.350 | 4.517 | 3.508 | 0.291 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| T < -5 °C ≅ 0.0 % | | | | 20 °C < T < 30 °C ≅ 57 % | | | | | | T > 30 °C ≅ 8.1 % | | | | | | |

Referenz:

| Arizona Referenz | [-30 ... -25 °C] | [-25 ... -20 °C] | [-20 ... -15 °C] | [-15 ... -10 °C] | [-10 ... -5 °C] | [-5 ... 0 °C] | [0 ... 5 °C] | [5 ... 10 °C] | [10 ... 15 °C] | [15 ... 20 °C] | [20 ... 25 °C] | [25 ... 30 °C] | [30 ... 35 °C] | [35 ... 40 °C] | [40 ... 45 °C] | [45 ... 50 °C] |
|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------------|--------------------|------------------|-----------------|------------------|-------------------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 0 < φ ≤ 20 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.026 | 0.301 | 1.574 | 6.600 | 11.080 | 11.534 | 11.311 | 13.196 | 9.885 | 1.470 | 0.000 |
| 20 < φ ≤ 40 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.001 | 0.045 | 0.374 | 1.589 | 4.240 | 5.443 | 4.205 | 2.793 | 2.910 | 2.025 | 0.555 | 0.000 | 0.000 |
| 40 < φ ≤ 60 | 0.000 | 0.000 | 0.001 | 0.029 | 0.172 | 0.514 | 1.015 | 1.287 | 0.885 | 0.758 | 0.380 | 0.519 | 0.096 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 60 < φ ≤ 80 | 0.000 | 0.001 | 0.008 | 0.045 | 0.163 | 0.272 | 0.327 | 0.630 | 0.990 | 0.424 | 0.193 | 0.018 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 80 < φ ≤ 100 | 0.000 | 0.002 | 0.009 | 0.018 | 0.043 | 0.028 | 0.010 | 0.002 | 0.003 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| T < -5 °C ≅ 0.54 % | | | | 20 °C < T < 30 °C ≅ 29.7 % | | | | | | T > 30 °C ≅ 27.2 % | | | | | | |

UHI:

| Arizona UHI 40 | [-30 ... -25 °C] | [-25 ... -20 °C] | [-20 ... -15 °C] | [-15 ... -10 °C] | [-10 ... -5 °C] | [-5 ... 0 °C] | [0 ... 5 °C] | [5 ... 10 °C] | [10 ... 15 °C] | [15 ... 20 °C] | [20 ... 25 °C] | [25 ... 30 °C] | [30 ... 35 °C] | [35 ... 40 °C] | [40 ... 45 °C] | [45 ... 50 °C] |
|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------------|--------------------|------------------|-----------------|------------------|-------------------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 0 < φ ≤ 20 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.026 | 0.301 | 1.277 | 3.692 | 8.367 | 11.203 | 11.718 | 10.901 | 10.789 | 7.650 | 1.053 |
| 20 < φ ≤ 40 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.001 | 0.045 | 0.374 | 1.198 | 2.776 | 4.569 | 4.940 | 3.771 | 2.645 | 2.339 | 1.187 | 0.336 | 0.000 |
| 40 < φ ≤ 60 | 0.000 | 0.000 | 0.001 | 0.029 | 0.172 | 0.488 | 0.719 | 1.006 | 1.163 | 0.767 | 0.601 | 0.435 | 0.246 | 0.029 | 0.000 | 0.000 |
| 60 < φ ≤ 80 | 0.000 | 0.001 | 0.008 | 0.045 | 0.163 | 0.261 | 0.315 | 0.360 | 0.691 | 0.740 | 0.407 | 0.075 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 80 < φ ≤ 100 | 0.000 | 0.002 | 0.009 | 0.018 | 0.043 | 0.028 | 0.010 | 0.002 | 0.003 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| T < -5 °C ≅ 0.53 % | | | | 20 °C < T < 30 °C ≅ 30.8 % | | | | | | T > 30 °C ≅ 35.3 % | | | | | | |

Abbildung 3: Mittlere Klimarandbedingungen für E-Fahrzeuge in Ballungszentren für Spanien (mediterran), Süd-China (tropisch) und Süd-USA (kontinental) mit und ohne innerstädtische Überhitzung (UHI).

2.1.2 AP 2000 Grundlagen

AP 2030 Wärmeübertragung

Abbildung 4 zeigt den Temperaturverlauf über die Inverterschichten, der anhand der Materialeigenschaften für einen Vollastpunkt, unter Vernachlässigung von thermischen Kontaktwiderständen, berechnet wurde (dargestellte Schichtdicken nicht maßstäblich). Anhand der Grafik lassen sich die folgenden wesentlichen Optimierungspotentiale für die Entwärmung des Inverters ausmachen:

1. Verringerung der Wärmeübertragung zwischen Kühlmittel und Kühlplatte.
2. Verwendung eines thermischen Interface-Materials (TIM) mit besserer Wärmeleitfähigkeit.
3. Zusätzliche Abfuhr von Wärme über die Oberseite (nicht vollständig dargestellt).

Die Punkte eins und drei wurden im Rahmen des Projekts untersucht.

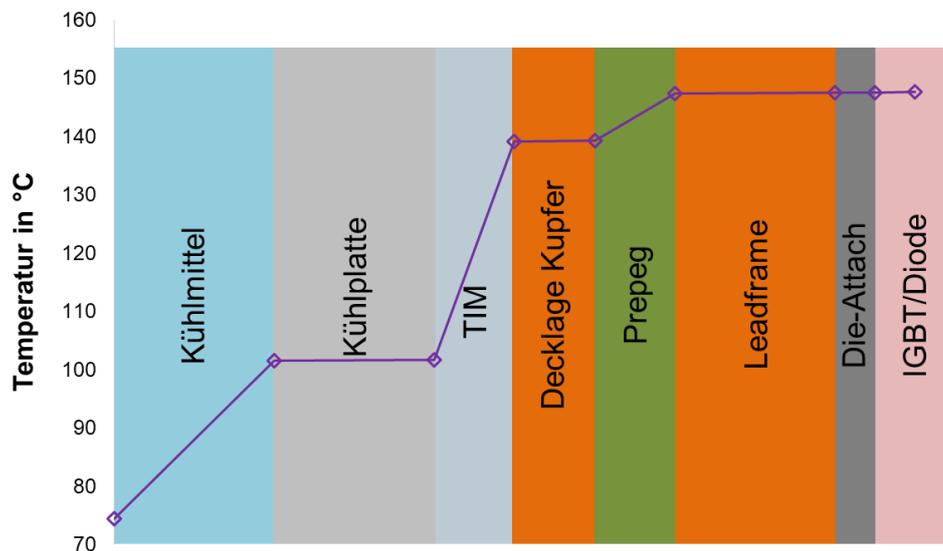


Abbildung 4: Temperaturprofil über die Inverterschichten für einen Vollastpunkt (Schichtdicken nicht maßstäblich)

Ein Punkt stellte die Untersuchung der Komponentenkühlung unter Ausnutzung des Phasenwechsels flüssig-gasförmig dar. Bei der Verdampfung eines Fluids muss diesem eine sehr hohe spezifische Energie, die sogenannte Verdampfungsenthalpie, zugeführt werden. Für die Übertragung eines bestimmten Wärmestroms sind bei Verwendung eines verdampfenden Wärmeübertragungsfluids so deutlich geringere Massenströme notwendig. Darüber hinaus erfolgt der Wärmeübergang bei sehr geringen Temperaturdifferenzen, sodass sich insgesamt deutlich höhere Wärmeübergangskoeffizienten verglichen mit einer erzwungenen Konvektion ohne Phasenwechsel ergeben [18].

Für die Nutzung der Vorteile einer verdampfenden Kühlung im Projekt wurden zunächst im Konsortium die möglichen Umsetzungen dieser Wärmeübertragungsart evaluiert, wobei unter anderem die zu kühlenden Komponenten im E-Fahrzeug auf ihre Kühlanforderung hin analysiert wurden. Dabei hat sich gezeigt, dass eine Kühlung mit Phasenübergang vor allem

für die Leistungselektroniken von Interesse ist, da dort sehr hohe Wärmestromdichten auftreten, deren Abfuhr in der Regel einen der limitierenden Faktoren für den Fahrzeugantrieb darstellt.

Die weitergehenden Untersuchungen konzentrieren sich daher auf die Kühlung der Leistungselektroniken unter Nutzung des Phasenübergangs. Grundsätzlich sind dabei verschiedene Varianten der Kühlung denkbar:

- Verwendung eines Kühlmediums mit Phasenübergang im gesamten Kühlkreislauf (ausgeführt mit einer Pumpe oder einem Verdichter)
- Siedebadkühlung
- Sprühkühlung
- Heatpipes (Wärmerohre)

Heatpipes können sowohl als unterstützendes System zur Kühlung von Leistungselektroniken eingesetzt werden, oder aber auch die komplette Entwärmung übernehmen. Sie sind dabei relativ kompakt und in ihrer maximal übertragbaren Wärmeleistung sehr gut an verschiedene Anforderungen anpassbar. Aus den oben genannten Gründen wurde im Konsortium entschieden den Einsatz von Heatpipes zur Kühlung der Leistungselektroniken im Projekt zu untersuchen. Abbildung 5 zeigt schematisch das Funktionsprinzip einer Heatpipe. Sie besteht aus einer äußeren Hülle (Rohr), die mit einer Kapillarstruktur sowie einem Arbeitsmedium gefüllt ist. Ein Ende der Heatpipe wird an die Wärmequelle, das andere an eine Wärmesenke angebunden. An der Wärmequelle verdampft das Arbeitsmedium und nimmt dabei Wärme auf. Die für die Wärmeübertragung notwendige Temperaturdifferenz ist dabei sehr gering. Der Dampf wird über die adiabate Transportzone zur Wärmesenke transportiert und kondensiert, wobei Wärme abgegeben wird. Das flüssige Arbeitsmedium wird nun über die Kapillaren zurück zum Verdampferraum geführt, wo der Kreislauf erneut beginnt.

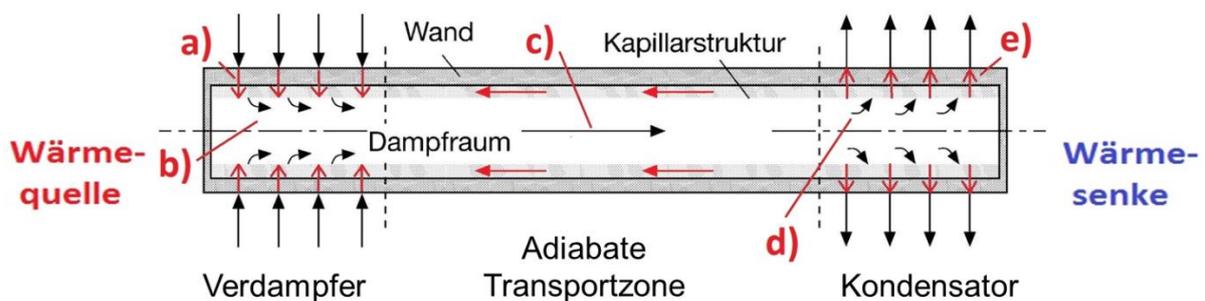


Abbildung 5: Schematische Funktionsweise einer Heatpipe (bearbeitet nach [18]): a) Wärmeleitung durch Hülle und Kapillarstruktur, b) Verdampfen des Arbeitsfluids, c) Dampfströmung in Richtung des Kondensators, d) Kondensation in der Kapillarstruktur im Kondensator, e) Rückförderung des Fluides durch Kapillardruck.

Für den konkreten Anwendungsfall der Kühlung der Leistungselektronik wurden nun zunächst verschiedene auf dem Markt verfügbare Arten von Heatpipes analysiert. Diese unterscheiden sich vor allem hinsichtlich des Arbeitsmediums, der Kapillarstruktur sowie der äußeren Form. Weiterhin wurden mit den Projektpartnern mögliche Einbauvarianten der Heatpipes diskutiert. Als favorisierte Variante im Rahmen des Projekts hat sich die Realisierung einer doppelseitigen Kühlung der eingebetteten IGBTs (Bipolartransistor mit isolierter Gate-

Elektrode, engl.: Insulated-Gate Bipolar Transistor) des Inverters der E-Maschine herausgestellt. Dies ist in Abbildung 6 schematisch am Beispiel der im Verbundprojekt HI-LEVEL [19] unter Mitwirken der Daimler AG sowie der Infineon Technologies AG entwickelten Demonstratoren mit eingebetteten IGBTs dargestellt. Bei dieser Variante wird das Board der Leistungselektronik, das den IGBT beinhaltet, von der Unterseite mittels einer konventionellen Flüssigkeitskühlung gekühlt und zusätzlich von der Oberseite mittels Heatpipes Wärme abgeführt. Die Idee hierbei ist den insgesamt abführbaren Wärmestrom zu erhöhen und so eine Steigerung der realisierbaren Leistungsdichte ohne Überschreitung kritischer Temperaturen zu erreichen sowie das Ansprechverhalten bei stark transienten Lastzyklen zu verbessern. Dadurch könnte für eine gleiche Antriebsleistung eine Reduktion der notwendigen Leistungshalbleiter möglich werden, einhergehend mit einer möglichen Reduktion von Bauraum, Gewicht und Gesamtkosten.

Die Kontaktierung der Heatpipes mit den eingebetteten IGBTs bzw. der Wärmesenke erfolgt dabei über thermisch leitfähige Wachse. Diese Wachse besitzen die Eigenschaft bei einer Temperatur von etwa 60 °C leicht aufzuschmelzen, wobei sie sich ausdehnen, und sorgen dadurch für eine verbesserte Kontaktierung der Oberflächen. Dieser Effekt bleibt auch nach dem Unterschreiten der Phasenwechseltemperatur bestehen. Das Phasenwechselwachs zwischen Board und Heatpipe besitzt zusätzlich noch elektrisch isolierende Eigenschaften. Als Wärmesenke wird zunächst eine gekühlte Oberfläche betrachtet, um die generelle Funktionsfähigkeit der Konstruktion zu untersuchen. Für den letztendlichen Einsatz im Fahrzeug wäre beispielsweise das Gehäuse der E-Maschine mit seiner verhältnismäßig großen thermischen Masse als Wärmesenke denkbar.

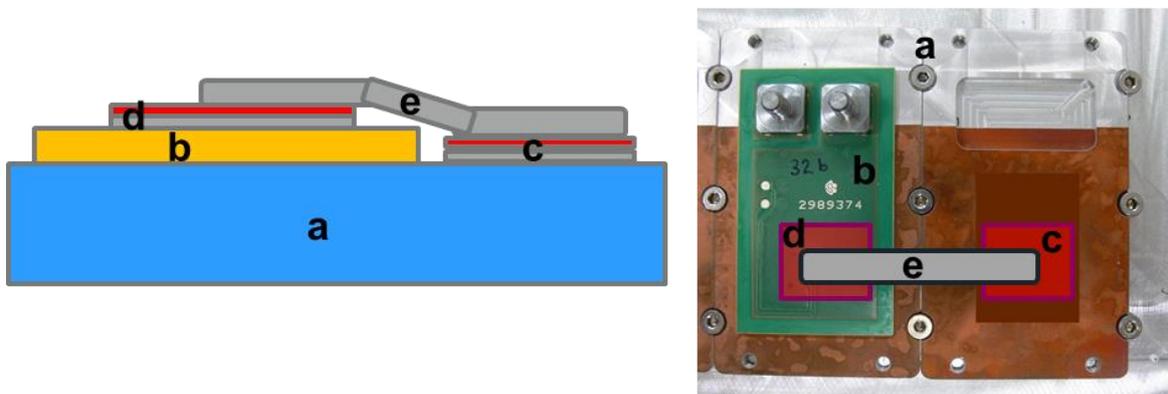


Abbildung 6: Generelle Konstruktion der Heatpipes auf den integrierten Leistungshalbleitern: a) flüssigkeitsdurchströmter Kühlkörper, b) Board mit integriertem IGBT, c) thermisch leitfähige Verbindung, d) thermisch leitfähige und elektrisch isolierende Verbindung, e) Heatpipe

In Abbildung 7 sind die Temperaturbereiche verschiedener typischer Arbeitsfluide für Anwendungen in Heatpipes sowie deren Merit-Zahl in Abhängigkeit der Temperatur, als Maß für die spezifische Arbeitsfähigkeit des Arbeitsmediums, dargestellt. Basierend auf einer geschätzten Arbeitstemperatur für die Anwendung zur doppelseitigen Kühlung des Embedded Boards von ca. 100 °C und anderweitigen Randbedingungen wurden aus den kommerziell verfügbaren Heatpipes zwei verschiedene Typen ausgewählt.

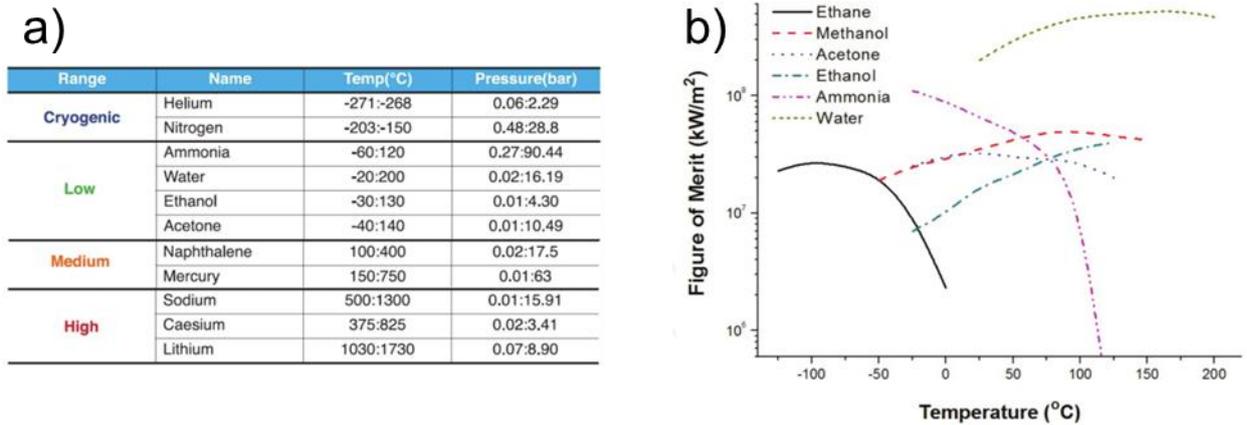


Abbildung 7: Temperaturbereiche verschiedener typischer Arbeitsmedien für Heatpipes sowie deren Merit-Zahlen in Abhängigkeit der Temperatur [20].

Bei den beiden Heatpipes handelt es sich um eine flach ausgeführte Variante, die direkt mit der Wärmequelle und –senke kontaktiert werden kann, sowie eine rund ausgeführte Variante, bei der die Kontaktierung jeweils über einen Wärmediffusor erfolgt. Die generellen Eigenschaften der beiden ausgewählten Heatpipes sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Übersicht über die generellen Merkmale der beiden untersuchten Heatpipes.

| | Heatpipe 1 | Heatpipe 2 |
|---|---|---|
| |  |  |
| Typ | flach | rund |
| Arbeitsmedium | Dimethylketon (Aceton) | Wasser |
| Rohrmaterial | Aluminium | Kupfer, vernickelt |
| Kapillarstruktur | Rillen | Gewebe |
| Abmessungen | Höhe x Breit x Länge 1,6 mm x 30 mm x 100 mm | Durchmesser 3 mm Länge 80 mm |
| Maximaler Wärmestrom pro Stück * | 14,5 W bis 75 W (bei 50 °C) | 18 W |
| Arbeitstemperatur | -40 °C bis 140 °C | 0 °C bis 200 °C |

* Wert ist stark abhängig von der Einbaulage sowie den Betriebsbedingungen

Die Wärmediffusoren der runden Heatpipes wurden aus Kupfer gefertigt um einen geringen thermischen Widerstand sowie eine möglichst homogene Temperaturverteilung zu gewährleisten. Von dem Projektpartner Daimler AG wurden Demonstratoren der Embedded Boards bereitgestellt, auf denen die Heatpipes montiert wurden. Dies ist in Abbildung 8 dargestellt. Der Versuchsaufbau wurde im Auftrag der Daimler AG bei dem Fraunhofer Institute for Integrated Systems and Device Technology (IISB) vermessen. Die Messergebnisse sind in Abbildung 9 dargestellt und zeigen eine Verbesserung der thermischen Impedanz der Demonstratoren für beide Heatpipes (DUT 3 und 13) im Vergleich zu den Referenzproben ohne Heatpipes.

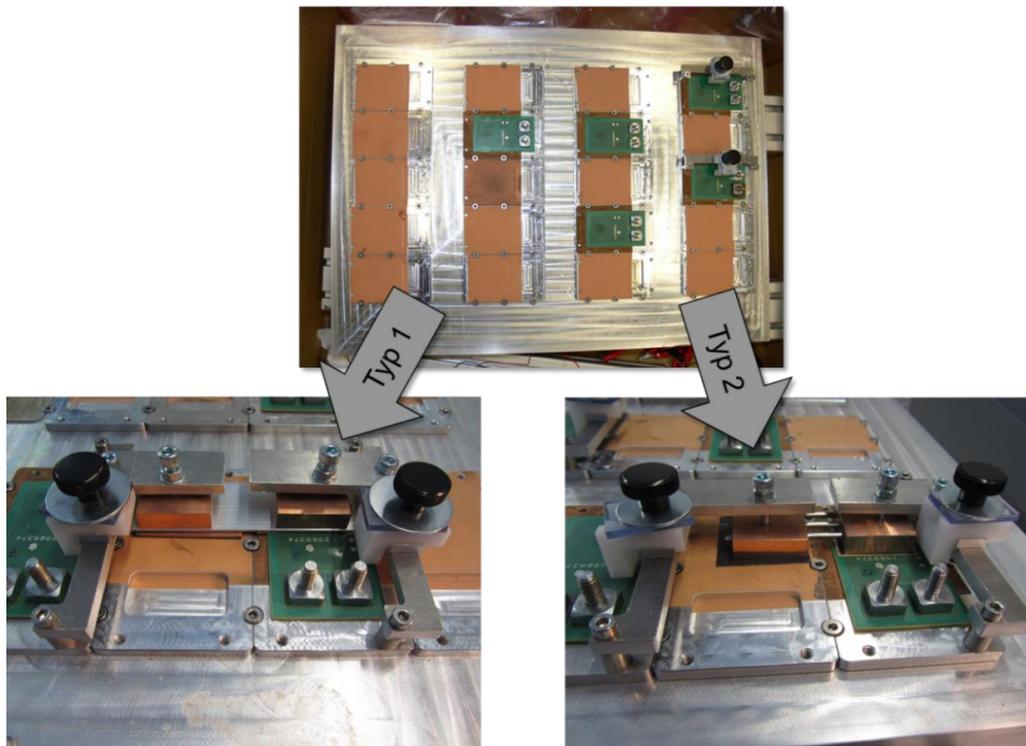


Abbildung 8: Montierte Heatpipes auf den Demonstratoren.

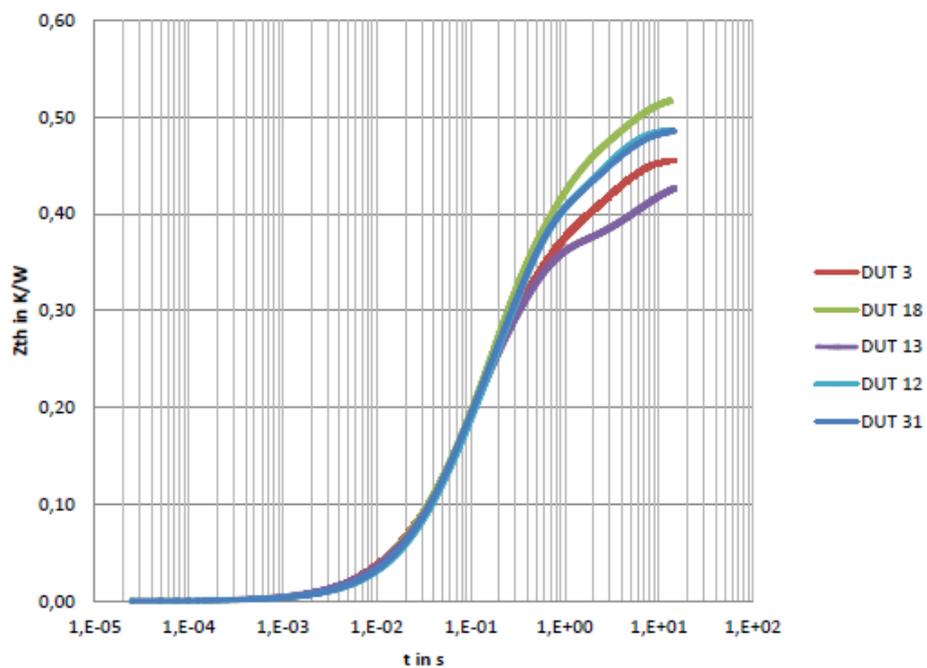


Abbildung 9: Übersicht der Messergebnisse der thermischen Impedanz der Demonstratoren mit Heatpipes (DUT 3 → flache Aceton-Heatpipe, DUT 13 → runde Wasser-Heatpipes) und Referenzproben ohne Heatpipes (DUT 12, 18, 31).

Für die Heatpipe vom Typ 1 (DUT 3) beträgt die Verringerung des thermischen Widerstands 7,6 % und für die Heatpipes vom Typ 2 17 % (DUT 13). In entsprechendem Maße könnte theoretisch die Chipfläche reduziert werden. Demgegenüber stehen jedoch Mehrkosten sowie zusätzlicher Platzbedarf, vor allem in der Höhe. Es ist jedoch anzumerken, dass die

aufgebauten Demonstratoren mit Heatpipes nicht hinsichtlich des Bauraumbedarfs optimiert wurden. Generell sind folgende Optimierungspotentiale für den vorliegenden Anwendungsfall zu nennen:

- Speziell für den Einsatz einer doppelseitigen Chipkühlung konstruierte Heatpipes.
- Verwendung anderer Interfacematerialien zwischen Wärmequelle und Heatpipe sowie Wärmesenke und Heatpipe mit verbesserten thermischen Eigenschaften.
- Reduzierung der Schichtdicke des Leiterplattenmaterials auf der Oberseite des Demonstratoraufbaus zur Verringerung des thermischen Widerstands.
- Einsatz einer anderen Heatpipe-Technologie, beispielsweise sogenannter „Loop-Heatpipes“.

Die unter 1-3 genannten Punkte könnten jeweils nochmals eine deutliche Reduzierung des thermischen Widerstands bewirken. Die unter Punkt 4 genannten Loop-Heatpipes bieten Vorteile für den Fall, dass die Wärmesenke unterhalb der Wärmequelle platziert ist, d.h. die Heatpipe gegen die Schwerkraft arbeiten muss, oder die notwendige Wärmeübertragungstrecke groß ist. Loop-Heatpipes sind zurzeit jedoch noch nicht kommerziell verfügbar, werden aber in verschiedenen Prototypenanwendungen untersucht.

Abbildung 10 zeigt einen Vergleich von angepassten Stoffdatenmodellen mit Messdaten von Nanofluiden für variierende Partikelvolumenkonzentrationen. Mithilfe dieser Daten wurde der Einfluss der alternativen Kühlmedien auf die Komponentenkühlung untersucht.

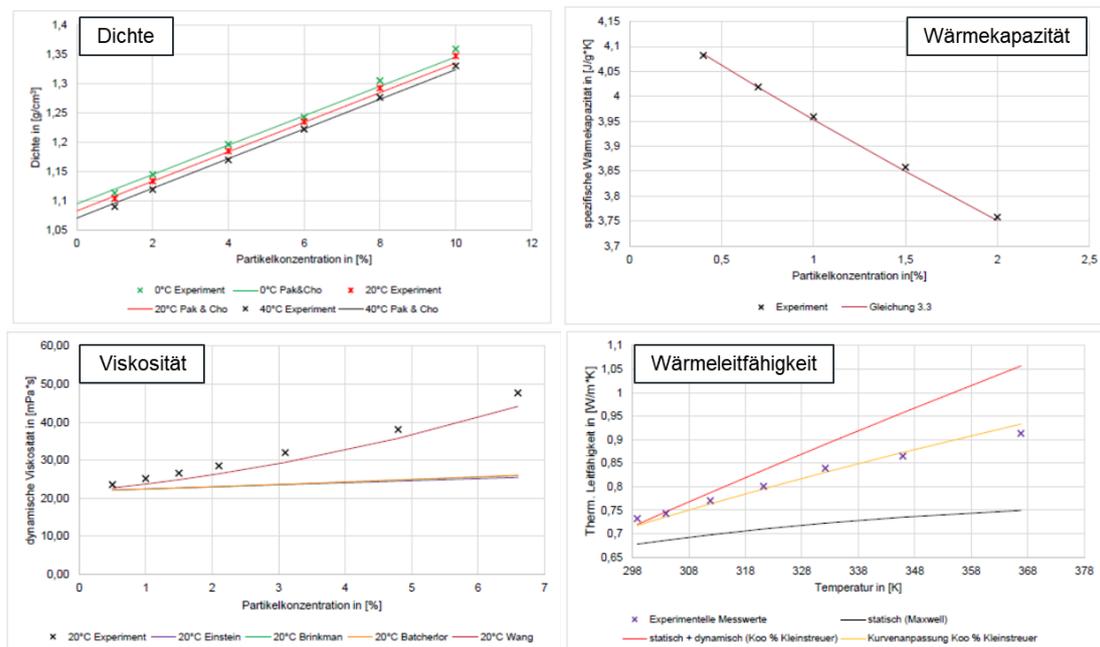


Abbildung 10: Vergleich von Stoffdatenmodellen von Nanofluiden mit Messdaten.

In Abbildung 11 und Abbildung 12 ist der Einfluss des Nanofluids auf den Vorderwagenkühler zu sehen. Dargestellt ist der an die Luft übertragene Wärmestrom bezogen auf den Referenzfall des reinen Basisfluids. In Abbildung 11 gilt dabei für jede Kurve die Randbedingung eines konstanten Kühlmittelvolumenstroms, d.h. mit steigender Partikelkonzentration steigt auch die aufzuwendende hydraulische Leistung der Pumpe. In Abbildung 12 gilt für jede Kurve die Randbedingung der konstanten hydraulischen Leistung,

d.h. mit steigender Partikelkonzentration sinkt der Kühlmittelvolumenstrom. Es wird ersichtlich, dass bei konstantem Kühlmittelvolumenstrom eine deutliche Steigerung der Wärmeübertragung möglich ist, bedingt durch einen steigenden kühlmittelseitigen Wärmeübergangskoeffizienten. Wird jedoch die zur Verfügung stehende Leistung der Pumpe auf den Referenzfall begrenzt, ist die Steigerung der Wärmeabgabe nur in begrenztem Maße möglich und ein Optimum für die Partikelkonzentration wird ersichtlich.

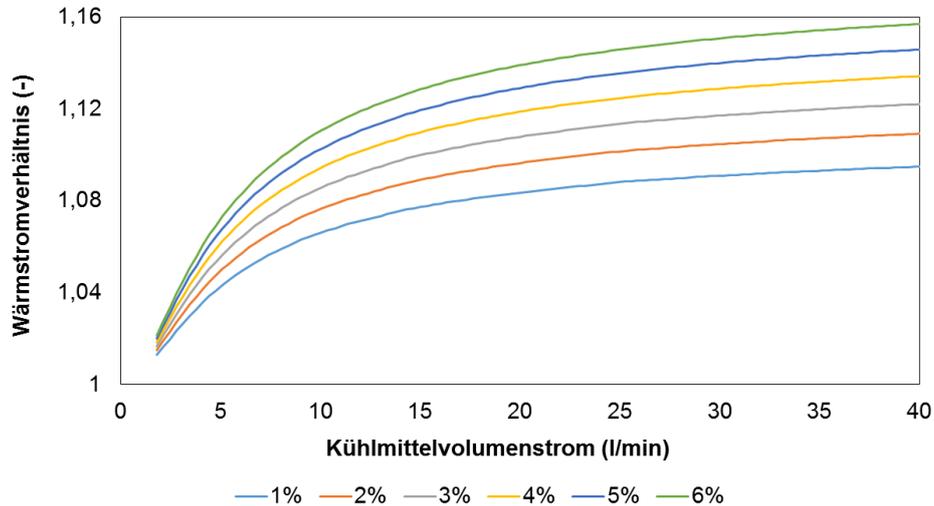


Abbildung 11: Relativer Wärmestrom am Kühlmittelkühler bezogen auf den Referenzfall mit konventionellem Kühlmittel für CuO-Nanofluidе mit variierender Partikelkonzentrationen.

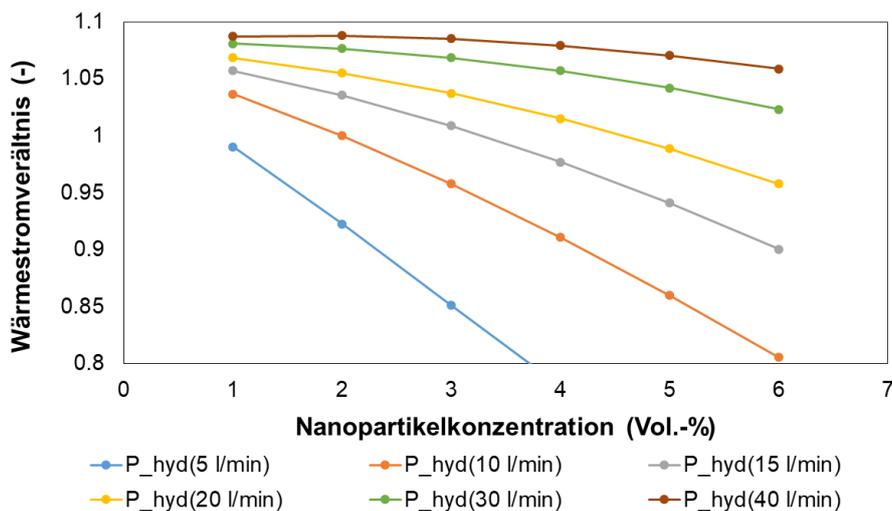


Abbildung 12: Wärmestromverhältnis von Nanofluid mit variierender Partikelkonzentration und reinem Basisfluid bei identischer hydraulischer Leistungen des Basisfluids.

In Abbildung 13 ist die Änderung der IGBT-Temperatur der Leistungselektronik für eine Änderung der Chipfläche und der Nanopartikelvolumenkonzentration gezeigt, unter der Randbedingung einer konstanten hydraulischen Leistung der Pumpe. Referenzfall ist hierbei die Chipfläche des im Projekt ausgelegten Inverters sowie ein Partikelanteil von 0 %, sodass gilt $\Delta T = T(A_{rel}, \phi_{NP}) - T_{Referenz}$. Negative Werte für ΔT führen folglich zu einer Absenkung der IGBT-Temperatur und damit zu einer Verbesserung der Kühlung. Weiterhin eingezeichnet ist die Isolinie für eine Temperaturdifferenz von 0 K, wodurch eine identische Kühlsituation zu

dem Referenzfall gekennzeichnet ist. Das Minimum dieser Isolinie kennzeichnet die maximal mögliche Verringerung der Chipfläche die ohne eine Steigerung der IGBT-Temperatur möglich ist. Das Minimum ist in diesem Beispiel bei einer Verringerung der Chipfläche von 0,4 % und einem Partikelvolumenanteil von 1 % gegeben.

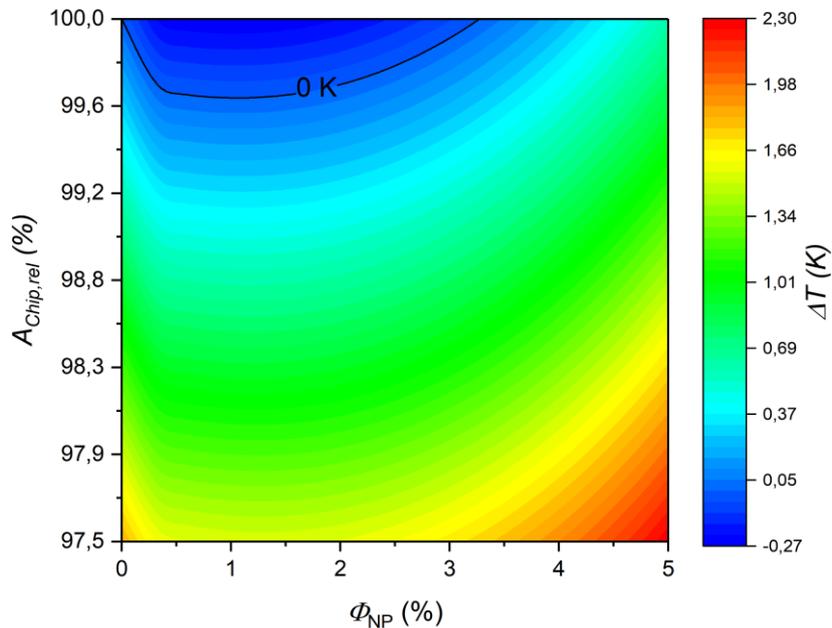


Abbildung 13: Änderung der Inverter IGBT-Temperatur bezogen auf den Referenzfall in Abhängigkeit von Chipfläche und Nanopartikelanteil (Al₂O₃).

AP 2035: Wärmespeicherung

Eine mögliche Alternative, die Komponenten der Antriebseinheit vor unzulässig hohen Temperaturen zu schützen, besteht in der Zwischenspeicherung thermischer Energie in einem geeigneten thermischen Speicher. In Abbildung 14 sind verschiedene Möglichkeiten thermischer Speicher dargestellt, eingeteilt nach ihrem dominierenden physikalischen Wirkprinzip sowie einem qualitativem Vergleich von typischer Energiedichte und Entwicklungsstand.

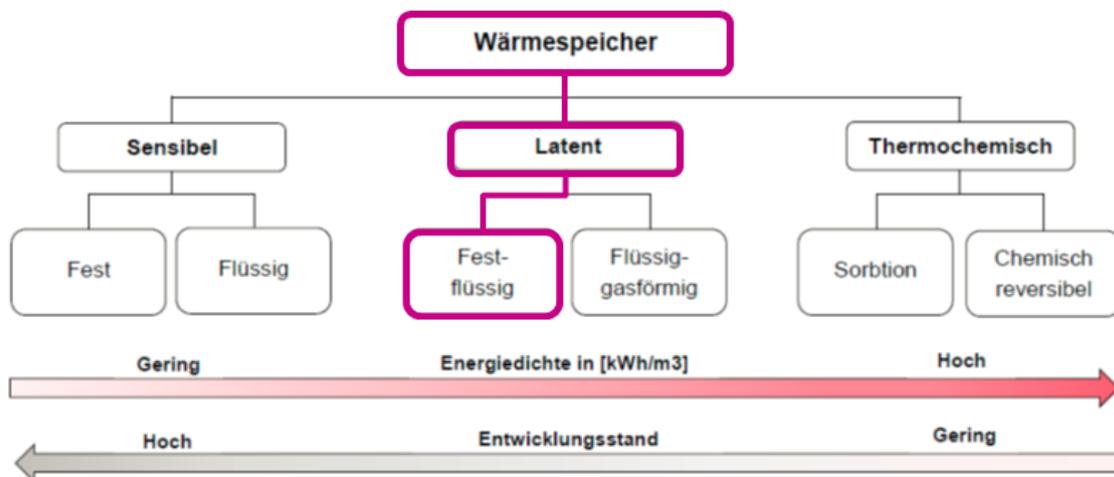


Abbildung 14: Wärmespeicherarten mit qualitativem Vergleich deren Energiedichte und Entwicklungsstand (eigenen Darstellung nach [21]).

Aufgrund des guten Kompromisses zwischen Energiedichte und Entwicklungsstand wurde im Konsortium entschieden sich auf die Untersuchung von Wärmespeichern mit Phasenwechselmaterialien (PCMs) zu konzentrieren. Dieses kann in einem bestimmten Temperaturbereich durch die Veränderung seiner strukturellen Integrität (z.B. aufschmelzen) eine verhältnismäßig große Wärmemenge pro Speichervolumen aufnehmen bzw. abgeben, verglichen mit einem Material ohne Phasenwechsel im betrachteten Temperaturbereich. Zeitlich begrenzte Wärmelastspitzen könnten demnach durch die Aufnahme dieser hohen spezifischen Phasenwechselenthalpie durch das PCM ausgeglichen werden. Dies bedeutet, dass durch die Integration eines thermischen Speichers mit Phasenwechselmaterial in das Kühlsystem unter Umständen eine Verkleinerung der Wärmeübertragungsflächen und weiterer Kühlkomponenten möglich wird. Das Ausmaß der Verkleinerung ist dabei abhängig von der Wärmeaufnahme des PCMs und der zusätzlich in das Kühlsystem eingebrachten Masse des thermischen Speichers. In **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** ist die prinzipielle Idee schematisch anhand eines Vergleichs der Temperaturentwicklung über der zugeführten Wärme, aufgetragen in Form der spezifischen Enthalpie des wärmeaufnehmenden Materials bzw. über die Zeit, dargestellt.

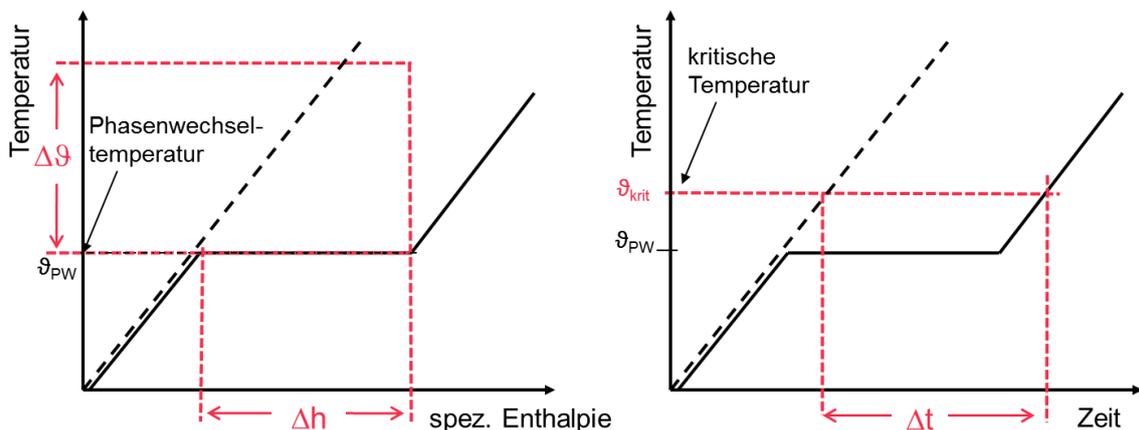


Abbildung 15: Schematischer Vergleich der Temperaturentwicklung über die spezifische Enthalpie eines Materials (rechts) bzw. über die Zeit (links) mit und ohne Phasenwechsel bei konstanter Wärmezufuhr.

Relevante Aspekte für den Einsatz eines Wärmespeichers mit Phasenwechselmaterial zur Pufferung von Lastspitzen im E-Fahrzeug sind vor allem:

- eine geeignete Phasenwechseltemperatur
- eine hohe volumetrische und gravimetrische Energiespeicherdichte
- hohe Zyklenstabilität und reproduzierbare Phasenwechsel
- eine geringe Volumenänderung
- keine Toxizität
- eine hohe stoffliche Kompatibilität mit kontaktierenden Materialien
- eine gute Verfügbarkeit und ein geringer Preis

Anhand dieser Anforderungen wurde ein Phasenwechselmaterial auf Paraffinbasis ausgewählt. Paraffine besitzen eine relativ geringe Wärmeleitfähigkeit, sodass die Wärmeleitung innerhalb des Materials häufig den limitierenden Faktor für die maximale Ein-

und Ausspeicherrate darstellt. Einige Forschergruppen versuchen dies durch hochkomplexe Speichergeometrien zu umgehen, bei denen eine Struktur bestehend aus Stoffen mit einer hohen Wärmeleitfähigkeit, z.B. Metalle, das Phasenwechselmaterial durchziehen. Im Rahmen dieses Projekts wurde jedoch ein alternativer Ansatz verfolgt. Als Speichermaterial werden formstabile PCMs, bestehend aus dem eigentlichen Paraffin und einem Polymer ohne Phasenwechsel als Grundgerüst, untersucht. Dieser Verbundstoff schmilzt beim durchlaufen der Phasenwechseltemperatur nicht vollständig auf, sondern ändert lediglich seine Festigkeit unter Beibehaltung der strukturellen Integrität. Dadurch kann das PCM in Form von Pellets mit einer Größe von einigen Millimetern direkt vom Kühlmittel umströmt werden, wobei eine sehr große Oberfläche für die Wärmeübertragung zur Verfügung steht. Dies soll der Problematik der geringen Wärmeleitfähigkeit, und damit limitierten Ein- und Ausspeicherraten, entgegenwirken. In Abbildung 16 ist das verwendete Phasenwechselmaterial abgebildet und in Tabelle 3 werden Daten des Materials angegeben.



Abbildung 16: PCM-Pellets bestehend aus einem Phasenwechselmaterial auf Paraffinbasis eingebettet in eine stabile Polymerstruktur.

Tabelle 3: Ausgewählte Daten des PCM-Materials

| Eigenschaft | Wert |
|---|---------------------------------------|
| Phasenwechselbereich | 55 – 60 °C |
| Änderung der spezifischen Enthalpie über Phasenwechselbereich | 100 kJ kg ⁻¹ |
| Spezifische Wärmekapazität (außerhalb des Phasenwechselbereichs) | 2 kJ kg ⁻¹ K ⁻¹ |
| Schüttdichte | 0,65 kg l ⁻¹ |
| Max. Arbeitstemperatur | 90 °C |

Ein zylindrischer Container zur Aufnahme des PCM-Materials wurde konstruiert und gefertigt. Dieser Container verfügt über Rückhaltevorrichtungen, um ein Austreten des Materials, und somit mögliche Verstopfungen im restlichen Kühlsystem, zu verhindern. Weiterhin sind Thermoelemente am Ein- und Austritt des Containers sowie an definierten Positionen im Inneren entlang der Durchströmungsrichtung angebracht, wie in Abbildung 17 dargestellt.

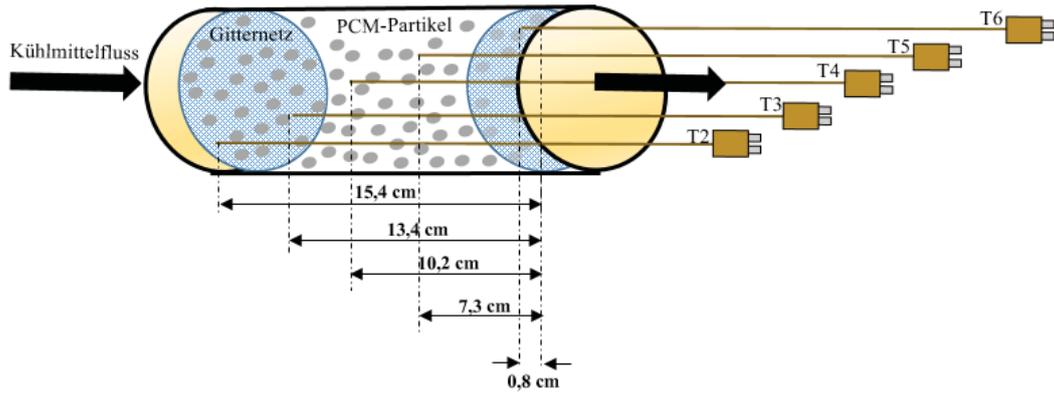


Abbildung 17: Schematische Darstellung des PCM-Containers mit den Thermoelementen entlang der Durchströmungsrichtung im Inneren.

Zur Untersuchung des thermischen Speichers wurde ein Prüfstand aufgebaut, der eine variable Einstellung der Fluidvolumenströme sowie Heiz- und Rückkühlleistung erlaubt, dargestellt in Abbildung 18 mit den wichtigsten Messsensoren.

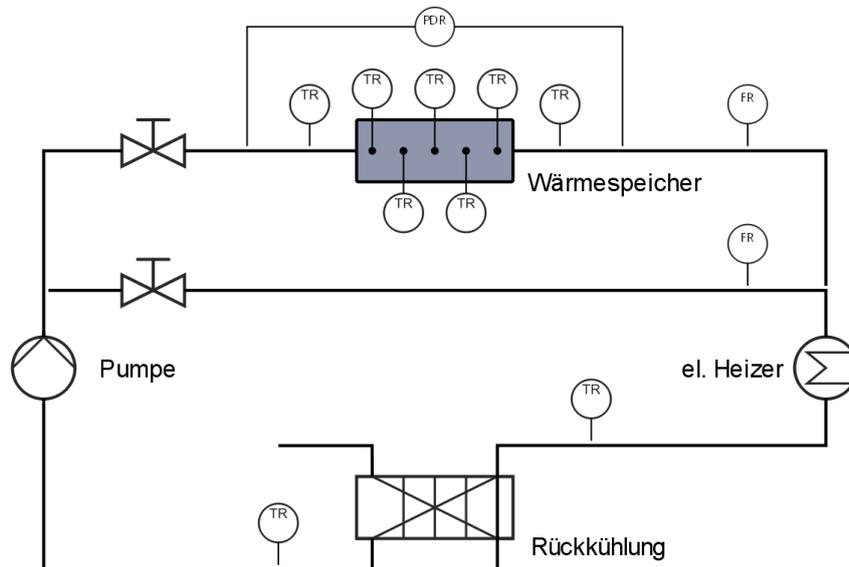


Abbildung 18: Prüfstandsdiagramm zur Untersuchung des PCM-Speichers.

Im Rahmen der Untersuchungen wurde der Speicher mit verschiedenen Kühlmittelvolumenströmen und Heiz- bzw. Rückkühlleistungen beaufschlagt, um das transiente Verhalten charakterisieren zu können. Ein Ergebnis dieser Messungen ist in Abbildung 19 beispielhaft dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Temperaturen am Ein- und Austritt vor Erreichen des Phasenwechsels parallel verlaufen und sich im Bereich des Phasenwechsels leicht aufspreizen. Der Effekt ist allerdings deutlich geringer, als es theoretisch zu erwarten wäre. Dies zeigt auch das Diagramm in Abbildung 20, in der die Temperaturdifferenz zwischen Ein- und Austritt des thermischen Speichers über dessen Eintrittstemperatur aufgetragen ist. Hier ist ein geringer Anstieg im Bereich des Phasenwechsels des PCM-Materials zu erkennen, was auf eine leicht erhöhte Einspeicherung thermischer Energie zurückzuführen ist.

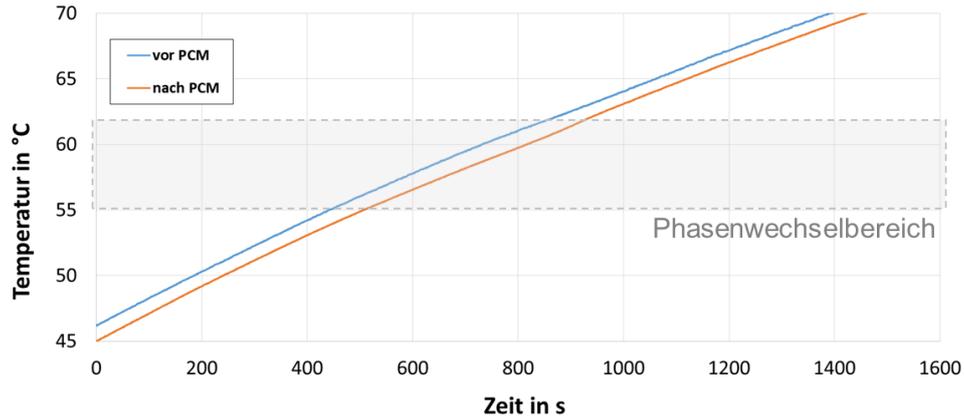


Abbildung 19: Kühlmitteltemperaturen am Ein- und Austritt des thermischen Speichers beim durchlaufen der Phasenwechseltemperatur.

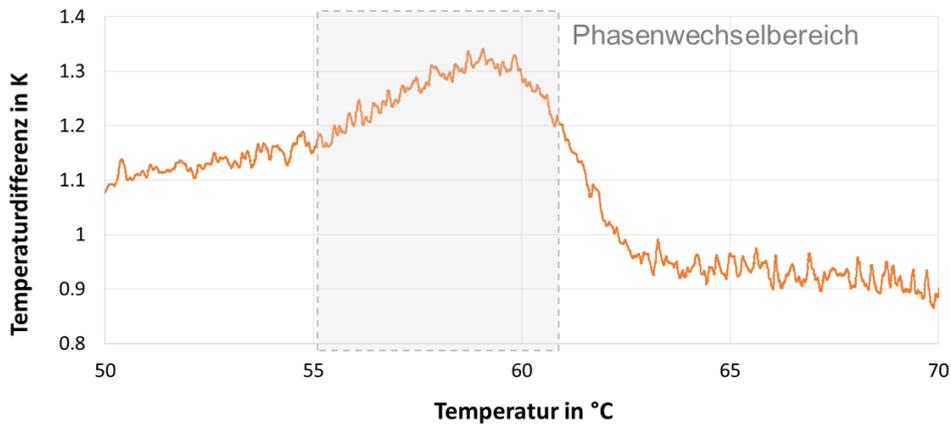


Abbildung 20: Temperaturdifferenz zwischen Ein- und Austritt des thermischen Speichers aufgetragen über die Eintrittstemperatur.

Es zeigte sich, dass das PCM-Material zu Verklumpung neigte wodurch vermutlich die Durchströmung des Materials behindert wurde, sodass die Ein- und Ausspeicherung thermischer Energie in das Material nur in sehr begrenztem Maße stattfinden konnte. In Abbildung 21 ist das verklumpte PCM-Material zu sehen.



Abbildung 21: Verklumptes PCM-Material im Container nach einem Aufheiz- und Abkühlversuch durch den Phasenwechselbereich des Materials.

AP 2040 Simulationsmodell

Ziel dieses Arbeitspaketes war die Erstellung von Teilmodellen für Phasenwechselmaterialien und Kälteträger in der von TLK und dem IfT gemeinsam in Modelica entwickelten „TIL-Suite“.

Für die physikalisch basierte Modellierung der Phasenwechselmaterialien wurde zunächst ein Modell einer thermischen Kapazität unter Berücksichtigung der im Phasenwechselbereich auftretenden Phasenwechselenthalpie erstellt. Die spezifische Enthalpie des Phasenwechsels wird dabei als normalverteilt um eine nominelle Schmelztemperatur angenommen und auf die spezifische Wärmekapazität ohne Phasenwechsel aufgeschlagen, wie in Abbildung 22 dargestellt. Die entspricht näherungsweise dem realen Verhalten der im Projekt untersuchten Art von Phasenwechselmaterial, da bei diesen der Phasenwechsel nicht bei einer einzigen konstanten Temperatur vollzogen wird, sondern ebenfalls in einem kleinen Temperaturintervall.

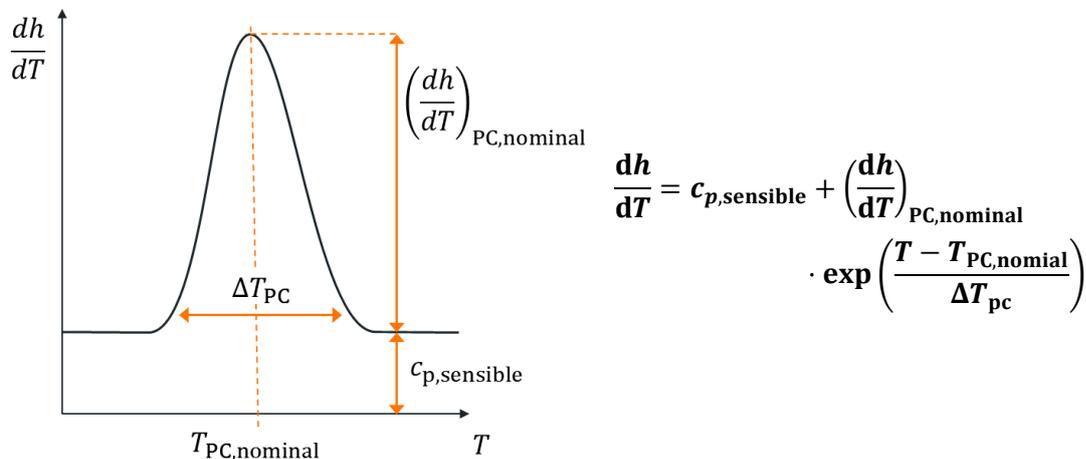


Abbildung 22: Implementierte Berechnung der Änderung der spezifischen Enthalpie des PCMs in Abhängigkeit der Temperatur.

Mithilfe dieses Modells zur Beschreibung der thermischen Kapazität eines Phasenwechselmaterials in Abhängigkeit seiner spezifischen Wärmekapazität außerhalb des Phasenwechselbereichs, seiner spezifischen Phasenwechselenthalpie sowie Temperatur und Masse wurde ein Modell des in AP 2035 untersuchten thermischen Speichers erstellt, wie es schematisch in Abbildung 23 dargestellt ist. Das Modell bildet den PCM-Container ab, der in Strömungsrichtung eindimensional flexibel diskretisierbar ist. Jedes Diskretisierungsvolumen wird als ideal durchmischt angenommen. Stellvertretend wird der Wärmestrom zwischen einem einzelnen PCM-Pellet und dem umgebenden Kühlfluid berechnet und auf die Gesamtheit des PCM-Materials im Diskretisierungsvolumen hochskaliert. Der ausgetauschte Wärmestrom berechnet sich dabei in Abhängigkeit der Kühlmittel- und PCM-Temperatur sowie dem thermischen Widerstand für den Wärmeübergang sowie die Wärmeleitung innerhalb des PCM-Pellets. Für den Wärmeübergangskoeffizienten wurden Beziehungen aus der Literatur entnommen [22].

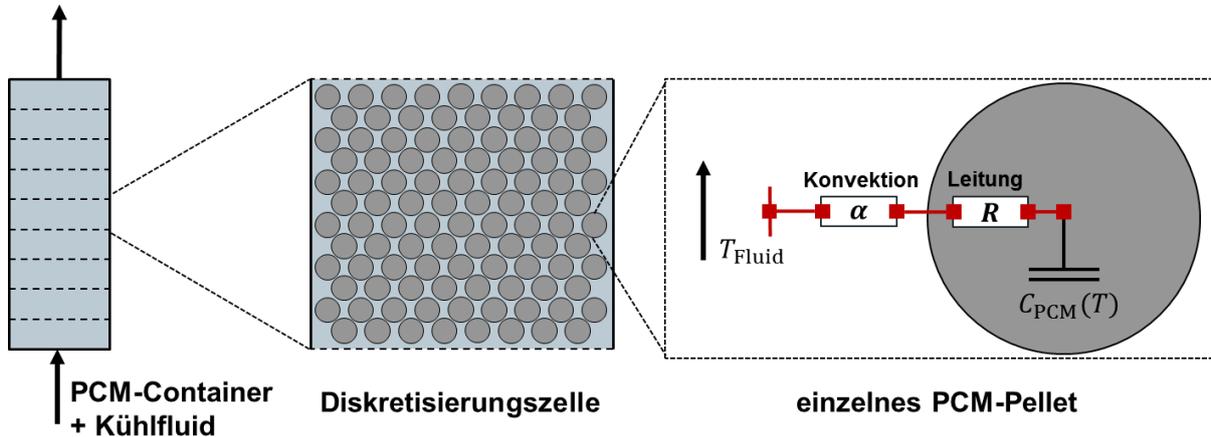
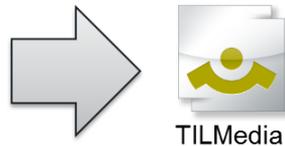


Abbildung 23: Aufbau des diskretisierten Modells des thermischen Speichers mit PCM.

Für die theoretische Untersuchung der alternativen Wärmeübertragungsfluide ist deren Stoffdatenberechnung ein entscheidender Punkt. Die gemeinsam von TLK und IfT entwickelte Stoffdatenbank TILMedia wurde daher im Rahmen des Arbeitspakets um eine Schnittstelle sowie Modelle für die Berechnung thermophysikalischer Stoffdaten alternativer Kühlfluide erweitert. Die Modelle erlauben dabei eine flexible Kombination von Basisfluiden und ggf. zugesetzten Nanopartikel unter Vorgabe deren thermophysikalischer Eigenschaften (siehe Abbildung 24). Innerhalb von TILMedia sind wiederum verschiedene Berechnungsvorschriften für diese Fluidklassen hinterlegt, die im Rahmen des Projekts an Messdaten aus der Literatur angepasst wurden.

- Basisfluid
- Partikeleigenschaften
- Mischungsverhältnis



| z.B. Nanofluide vs. Basisfluid |
|--------------------------------|
| Dichte ↑ |
| Wärmekapazität ↓ |
| Wärmeleitfähigkeit ↑ |
| Viskosität ↑ |

Abbildung 24: Integration der Stoffdatenberechnung alternativer Wärmeträger in die TILMedia Stoffdatenbank.

Für die Heatpipes wurden vereinfachte Modelle auf Basis von thermischen Widerständen, die aus den Messungen aus AP 2030 abgeleitet wurden, erstellt.

AP 2020 Thermomanagement und AP 2045 Thermische Simulation

Mit dem um die Teilmodelle für Phasenwechselmaterialien sowie alternativen Kälte-träger und Heatpipes erweitertem thermischem Fahrzeugmodell wurden Gesamtfahrzeugsimulationen zur Untersuchung der alternativen Kühlkonzepte durchgeführt. Der schematische Aufbau des Gesamtmodells ist in Abbildung 25 dargestellt. Abbildung 26 zeigt den Aufbau des Referenzkühlsystems sowie des AC-Kreislaufs mit thermischem Fahrgastraummodell.

Zunächst wurde gemeinsam mit TLK auf Basis des aufgebauten Gesamtfahrzeugmodells eine energetische und thermische Analyse, vor allem für den Grenzbetrieb unter Heißlandbedingungen, mithilfe einer Energiestromdarstellung durchgeführt. Beispielhaft ist ein

Ergebnis für das Durchfahren eines NEFZ bei 45 °C Umgebungstemperatur unter Berücksichtigung der Innenraumklimatisierung in Abbildung 27 dargestellt.

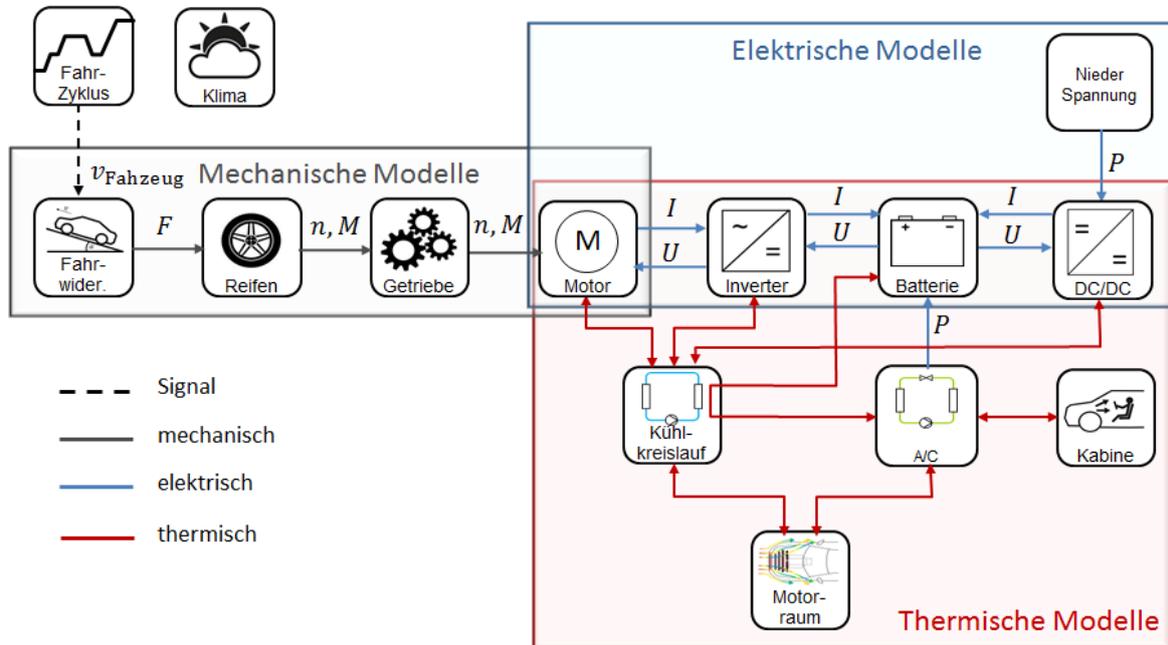


Abbildung 25: Schematischer Aufbau der Gesamtfahrzeugsimulation bestehend aus mechanischen, elektrischen und thermischen Modellen sowie Fahrzyklen und Klimarandbedingungen.

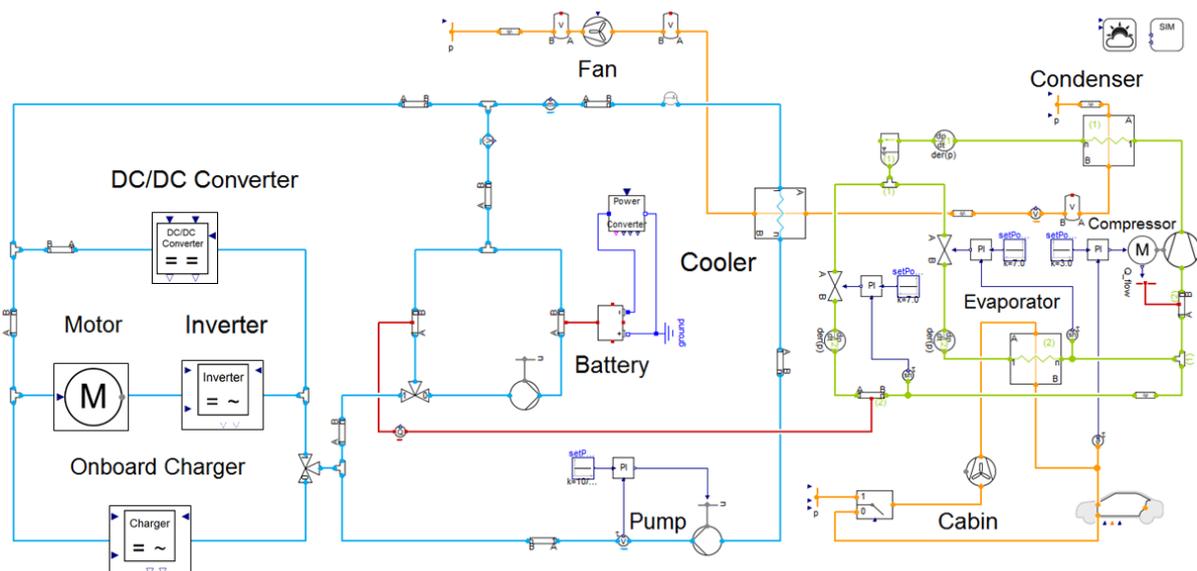


Abbildung 26: Detailansicht des Referenzkühlsystems und AC-Kreislaufs mit thermischem Fahrgastraummodell

Die Analysen zeigen unter anderem, dass der Energiebedarf zum Vortrieb des Fahrzeugs und der Klimatisierung des Innenraums in der gleichen Größenordnung liegen. Weiterhin lässt sich sehr gut erkennen, dass für diese extremen Randbedingungen der Klimakondensator einen

sehr großen Wärmestrom in den Kühlluftpfad einträgt und so die in den Elektronik Kühler eintretende Kühlluft stark vorerwärmt. Dadurch kann unter Umständen sogar das Kühlmittel des Kühlkreislafs, zumindest zeitweise, durch die Kühlluft erwärmt werden (siehe Nettowärmemenge von der Umgebung in Richtung des Kühlmediums in Abbildung 27). Dies zeigt, dass eine ganzheitliche Betrachtung der thermischen Vorgänge im Fahrzeug zur optimalen Kühlauslegung zwingend erforderlich ist.

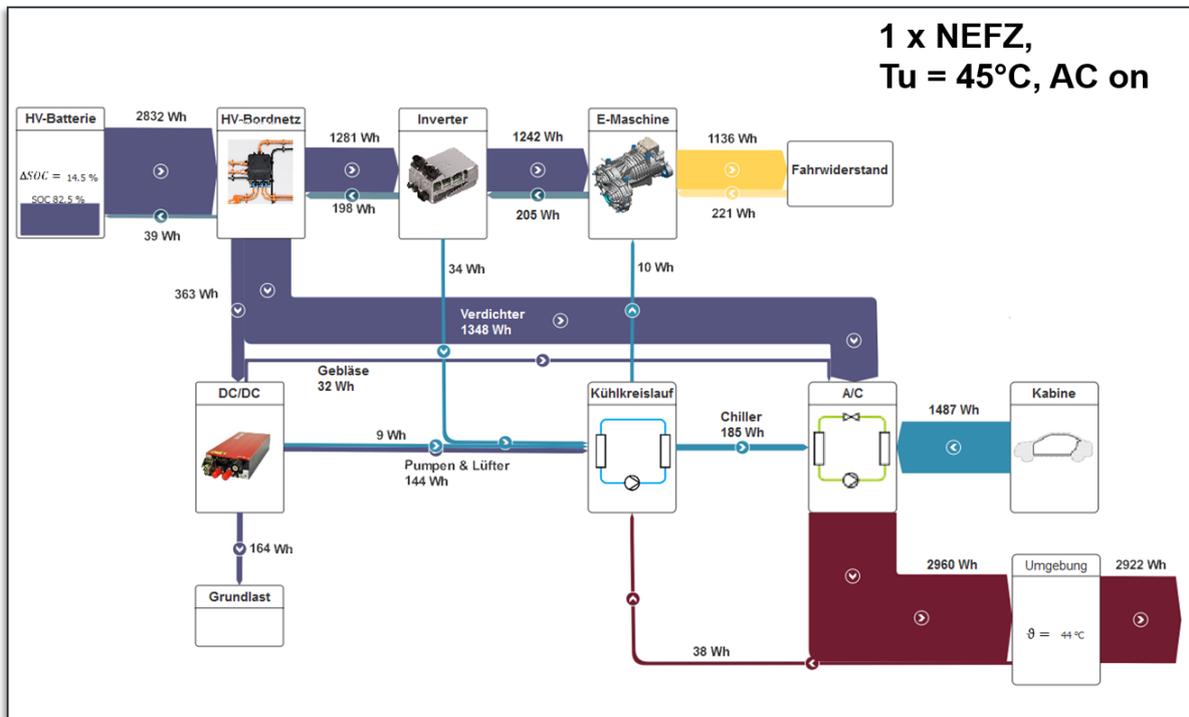


Abbildung 27: Kumulierte Energieströme nach dem Durchfahren eines NEFZ bei einer Umgebungstemperatur von 45 °C unter Berücksichtigung der Fahrgastraumklimatisierung

Im Anschluss wurde der Einfluss der unterschiedlichen alternativen Kühlkonzepte auf der Thermomanagement des Fahrzeugs untersucht. Dazu wurde zunächst das Modell des thermischen Speichers in das Kühlsystem vor der Antriebseinheit integriert und verschiedene Extremfahrtszenarien, sowohl in Bezug auf den Fahrzyklus als auch die Umgebungsbedingungen, durchgeführt. In Abbildung 29 ist ein Vergleich der simulierten Inverter- und Kühlmitteltemperatur mit und ohne thermischen Speicher im Kühlsystem dargestellt. Es ist zu erkennen, dass durch die Erhöhung der thermischen Masse des Kühlsystems dieses langsamer aufheizt, wodurch sich auch niedrigere Invertertemperaturen ergeben. Es ist jedoch auch zu erkennen, dass die Phasenwechseltemperatur des Speichers nur einmalig durchfahren wird, d.h. ein „Entladen“ des Speichers findet während der restlichen Fahrt nicht erneut statt. Generell lässt sich sagen, dass der Nutzen des thermischen Speichers aufgrund der relativ großen Trägheit des Kühlsystems selber, als auch der großen Trägheit des thermischen Speichers in Bezug auf das „Beladen“ und „Entladen“, begrenzt ist.

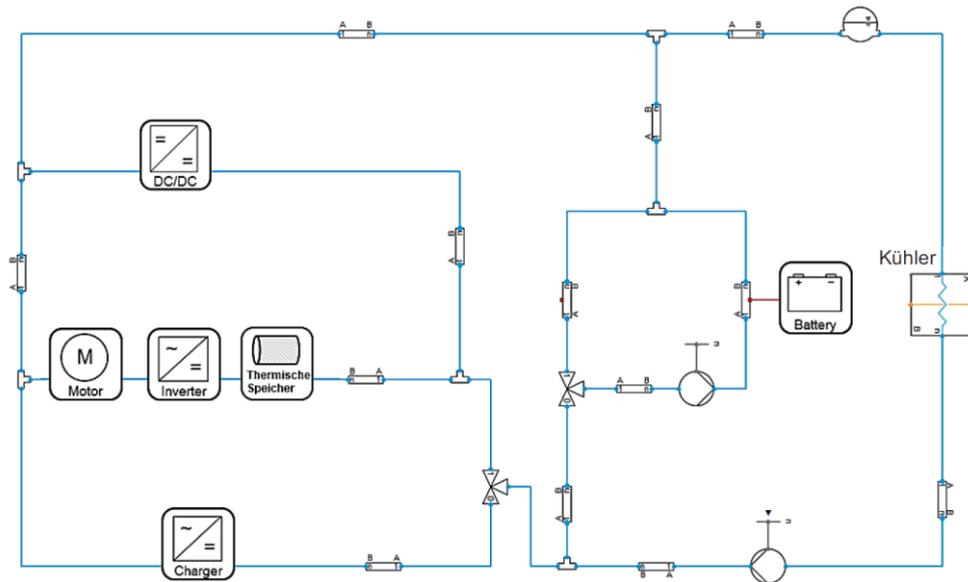


Abbildung 28: Kühlsystem mit integriertem thermischem Speicher vor der Antriebseinheit

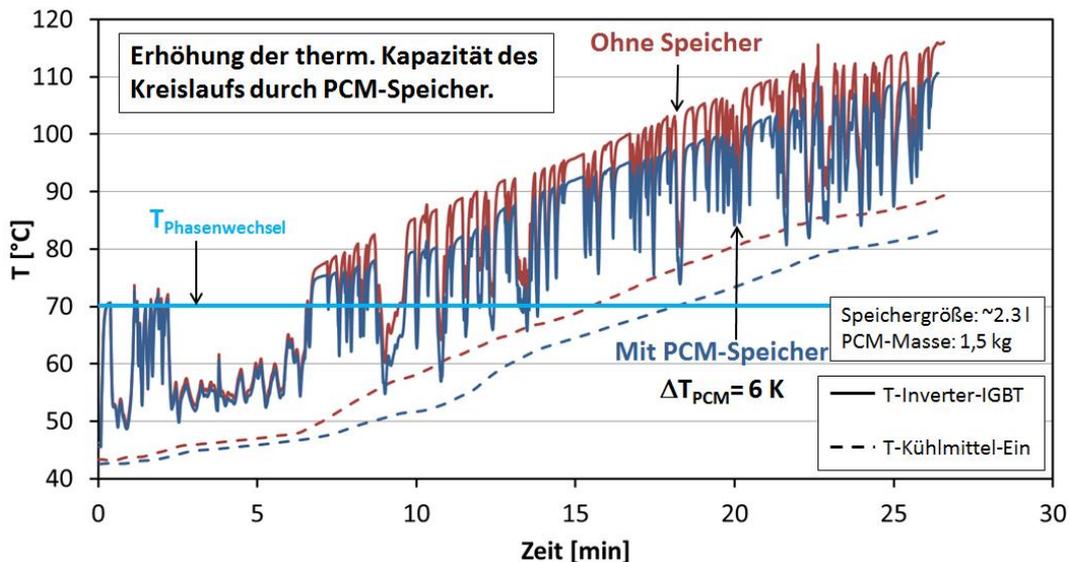


Abbildung 29: Vergleich der Inverter- und Kühlmitteltemperatur mit und ohne thermischen Speicher für eine Extremfahrt

Für die alternativen Kühlmedien sowie der unterstützenden Kühlung der Leistungselektronik mittels Heatpipes wurde in Bezug auf die Einzelkomponente Leistungselektronik bereits gezeigt, dass prinzipiell die Entwärmung positiv beeinflusst werden kann. Abbildung 30 zeigt Ergebnisse der thermischen Gesamtfahrzeugsimulation für den „Sphinx Überlandzyklus“. Dargestellt sind ausgewählte Relativtemperaturen der E-Maschine und Leistungselektronik für verschiedene beispielhafte alternative Kühlmethode. Die Relativtemperatur ist dabei definiert als Temperatur mit alternativer Kühlmethode minus der Temperatur im Referenzfall ($\Delta T = T_{\text{Maßnahme}} - T_{\text{Referenz}}$). Randbedingung für den simulativen Vergleich war hierbei ein konstanter Leistungsaufwand für die Kühlung entsprechend dem Referenzfall.

Es wird ersichtlich, dass bei Verwendung des Nanofluids die mittlere und maximale Temperatur der IGBTs leicht abgesenkt werden kann. Die Temperaturabsenkung steigt dabei mit steigender Nanopartikelkonzentration etwa linear an. Demgegenüber steht jedoch eine mit

steigender Nanopartikelkonzentration steigende Rotortemperatur der E-Maschine. Der Betrag der Steigerung der Rotortemperatur ist dabei größer als der Betrag der Absenkung der IGBT-Temperatur. Der Grund für den gegensätzlichen Einfluss des Nanofluids auf die Temperaturen in beiden Komponenten liegt in den unterschiedlichen Strömungsarten begründet. In dem Kühlmantel der E-Maschine liegt zunächst turbulente Strömung vor, im Kühlkörper der Leistungselektronik laminare Strömung. Im turbulenten Fall hat die Zugabe von Nanopartikeln nur eine deutlich geringere Steigerung des Wärmeübergangskoeffizienten zur Folge, verglichen mit dem laminaren Fall. Gleichzeitig steigen mit steigender Partikelkonzentration die Druckverluste im System. Dementsprechend sinkt der geförderte Kühlmittelvolumenstrom, aufgrund des als konstant definierten Leistungsaufwand für die Kühlung. Nur bei laminarer Strömung im Kühlkörper der Leistungselektronik kann der sinkende Kühlmittelvolumenstrom durch den gesteigerten Wärmeübergangskoeffizienten überkompensiert werden, nicht jedoch im Falle der turbulenten Strömung in der E-Maschine. Der starke Anstieg der Rotortemperatur bei einer Steigerung der Partikelkonzentration von 5 % auf 6 % wird durch einen Wechsel von turbulenter zu laminarer Strömung im Kühlmantel der E-Maschine, aufgrund veränderter Fluideigenschaften, hervorgerufen. Damit einher geht eine starke Verringerung des Wärmeübergangskoeffizienten.

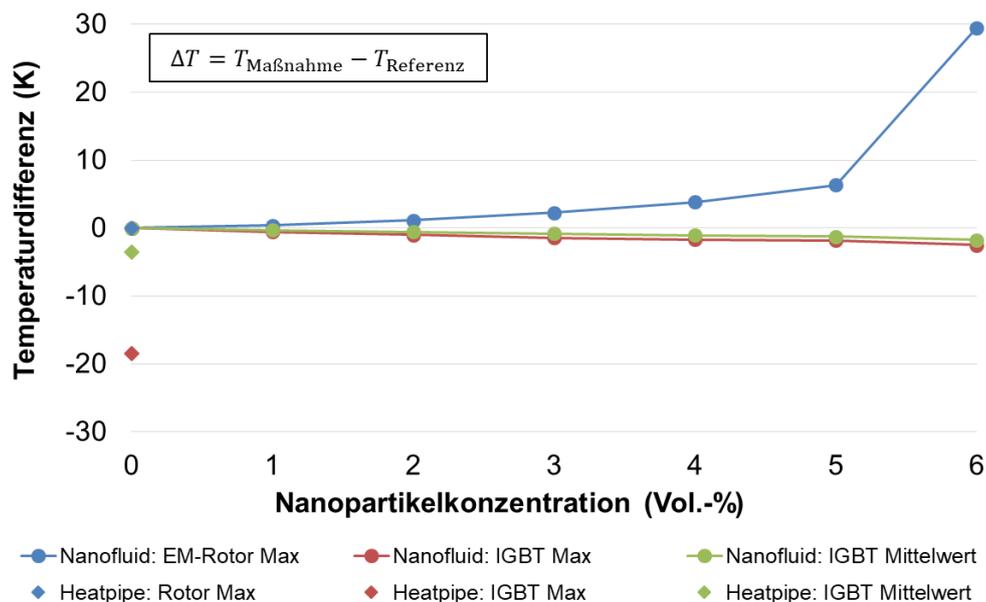


Abbildung 30: Differenz der Rotortemperatur der E-Maschine sowie der maximalen und mittleren IGBT-Temperatur der Leistungselektronik für den Einsatz eines CuO-Nanofluids mit variierender Partikelkonzentration sowie einer unterstützenden Kühlung der Leistungselektronik mittels Heatpipes zum Referenzfall basierend auf der thermischen Gesamtfahrzeugsimulation im Sphinx Belastungszyklus.

Ebenfalls in Abbildung 30 ist das Ergebnis bei Anwendung einer unterstützenden Kühlung der Leistungselektronik mittels Heatpipes dargestellt (bei Verwendung des Referenzkühlmittels ± 0 % Nanopartikelkonzentration). Die Modelle der Heatpipes wurden so kalibriert, dass eine Verminderung des thermischen Widerstands für die Wärmeableitung aus den IGBTs von 17 % vorliegt (siehe AP 2030). Die Wärmesenke der Heatpipes ist dabei mit dem Gehäuse der Leistungselektronik verbunden. Für den untersuchten Fall kann durch diese Maßnahme die durchschnittliche Temperatur der IGBTs um etwa 3,5 K abgesenkt werden, was etwa dem

dreifachen Wert der Temperaturabsenkung bei Verwendung des Nanofluids mit einem Partikelvolumenanteil von 5 % entspricht. Die Maximaltemperatur kann um ca. 18 K abgesenkt werden. Für die Temperatur des Rotors der E-Maschine ergeben sich keine nennenswerten Unterschiede. Abbildung 31 zeigt zusätzlich einen Vergleich der transienten IGBT-Temperaturen für einen Ausschnitt des Fahrzyklus für den Referenzfall, den Einsatz eines CuO-Nanofluids mit 5 Vol.-% sowie einer unterstützenden Kühlung mittels Heatpipes. Auch hier werden nochmals die deutliche geringeren Maximaltemperaturen im Falle des Einsatzes von Heatpipes sichtbar. Außerdem sind für diesen Fall leicht höhere IGBT-Temperaturen im Vergleich zum Referenzfall in den Abkühlphasen zu erkennen. In den Hochlastphasen wird das Gehäuse durch die Wärmeabfuhr von den IGBTs über die Heatpipes aufgeheizt. In darauffolgenden Niedriglastphasen sinkt die Temperatur in den IGBTs deutlich schneller als die Temperatur im Gehäuse, aufgrund der deutlich geringeren thermischen Trägheit. Fällt die IGBT-Temperatur unterhalb der Gehäusetemperatur kommt es zu einem „Rückstrom“ von Wärme aus dem Gehäuse über die Heatpipes hin zu den IGBTs. Dieses Verhalten ist jedoch als nicht kritisch einzustufen.

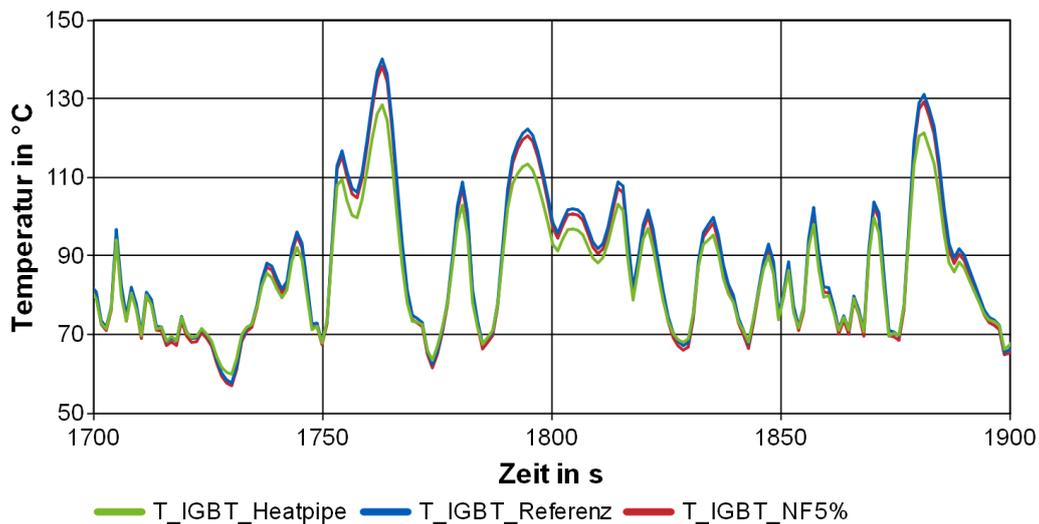


Abbildung 31: Detailausschnitt der Simulationsergebnisse für die zeitliche IGBT-Temperatur der Leistungselektronik für den Referenzfall (blau), den Einsatz eines CuO-Nanofluids mit 5 Vol.-% (rot) sowie der unterstützten Kühlung der Leistungselektronik mittels Heatpipes (grün) im Sphinx Belastungszyklus.

Das größte Potential zur Verbesserung des Wärmehaushalts der Leistungselektronik im Gesamtsystem bietet folglich der Einsatz von Heatpipes. Für die zuvor beschriebene Antriebseinheit mit unterstützender Heatpipekühlung wurde anhand eines Maximallastfalls, bei dem die IGBT-Temperaturen im Referenzfall das zulässige Maximum erreichen, untersucht, in welchem Maße die Chipfläche bzw. die Chipanzahl reduziert werden kann. Das Ergebnis ist in Abbildung 32 dargestellt. Es zeigt sich, dass eine Reduktion der Chipfläche um ca. 13 % möglich ist. Einschränkend ist hierzu zu sagen, dass der Einsatz von Heatpipes einen zusätzlichen Material und Kostenaufwand darstellt, der mit den zuvor genannten Einsparungen verrechnet werden muss. Da die angenommene Reduktion des thermischen Widerstands von 17 % bei Einsatz der Heatpipes jedoch eine konservative Schätzung darstellt und weiteres Optimierungspotential bietet, ist von einer positiven auszugehen.

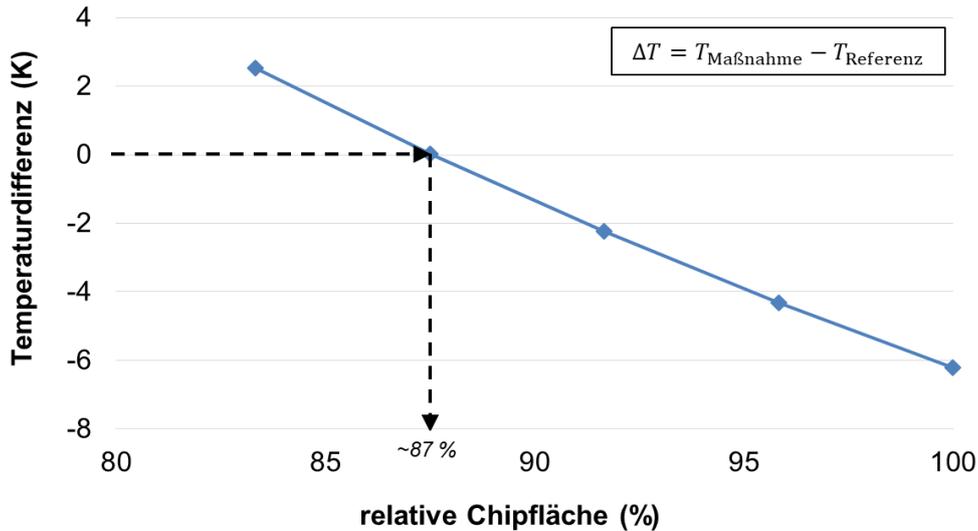


Abbildung 32: Temperaturdifferenz der IGBTs mit unterstützender Heatpipe-Kühlung zum Referenzfall (keine Heatpipes) in Abhängigkeit der relativen Chipfläche (\propto Chipanzahl) für den Auslegungsfall (Maximallast).

AP 2050 Lebensdauer LE

Für die Lebensdauerabschätzung des Phasenwechsellmaterials wurden zunächst die thermischen Randbedingungen abgeleitet. Dazu wurde der im Projekt erstellte Belastungszyklus für verschiedene Umgebungstemperaturen durchfahren und die jeweilige Anzahl an theoretischen Phasenwechseln eines thermischen Speichers mit einer Phasenwechseltemperatur von 65 °C ermittelt. Anschließend wurde die Anzahl an Phasenwechseln für jede Umgebungstemperatur mit deren Auftretenswahrscheinlichkeit, entsprechend den in AP 1075 ermittelten Klimarandbedingungen für Arizona unter Berücksichtigung der UHIs, gewichtet. Die Klimarandbedingungen von Arizona wurden gewählt, da hier die höchsten Temperaturen vorliegen und das Kühlsystem somit am stärksten belastet wird. Für eine Auslegung des Fahrzeugs auf 300.000 km Laufleistung ergab sich damit eine relative Zyklanzahl von 17 % bezogen auf die vom Hersteller angegebene mindestens erreichbare Zyklanzahl. Es ist folglich noch eine ausreichende Lebensdauerreserve für eine weitere Optimierung des Kühlsystems, beispielsweise durch Verkleinerung des Kühlers und damit potentiell einhergehende Erhöhung der Zyklanzahl des thermischen Speichers, gegeben.

AP 2090 Kühlkonzepte

Für das Kühlkonzept der Antriebseinheit wurde eine serielle Verschaltung von Leistungselektronik und E-Maschine gewählt, wie sie in Abbildung 33 dargestellt ist. Die bei ZF durchgeführten Simulationen zur Entwärmung mit dem gewählten Konzept haben gezeigt, dass der Wärmeeintrag der E-Maschine in die LE gering ist (ca. 10 % der Verlustleistung der LE), sodass der Einfluss auf den maximal zulässigen Inverterstrom vernachlässigbar ist. Konventionelle Kühltechniken reichen demnach für den im Rahmen des Projektes Sphinx realisierten Demonstratorantrieb aus. Die Verschaltung des gesamten Kühlsystems entspricht

dem System aus Abbildung 26. Diese Verschaltung dient auch als Referenz für die Untersuchungen zu den Potentialen der alternativen Kühlkonzepte in AP 2020 und AP 2045.

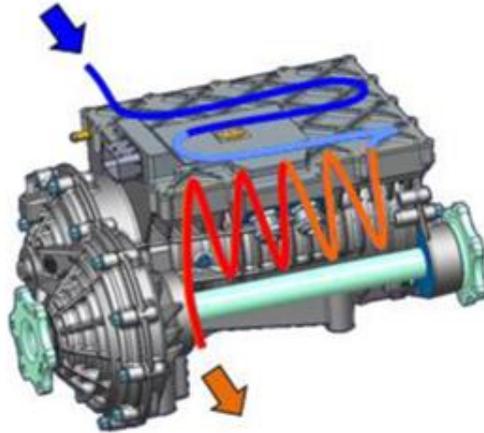


Abbildung 33: Gewählte Kühlmittelführung in der Leistungselektronik und E-Maschine

2.1.3 AP 3000 Mechanik

AP 3010 Integrationskonzept und AP 3080 Bewertung der Konstruktion

Wie in AP 2090 gezeigt, erfüllt die derzeitige Ausführung der Kühlung der hochintegrierten Antriebseinheit die definierten Anforderungen. Dies stellt ein wesentliches Ergebnis des Projektes dar.

Weiteres Potential zur Optimierung bietet vor allem der Einsatz von Heatpipes zur Kühlungsunterstützung des Inverters der E-Maschine. Der thermische Widerstand konnte um 17 % gesenkt werden, wodurch, wie gezeigt, der maximale Inverterstrom gesteigert bzw. die Anzahl an Halbleitern reduziert werden kann. In der im Projekt aufgebauten Antriebseinheit wird der Platz auf der Oberseite der Embedded Boards jedoch teilweise von anderen Komponenten blockiert, sodass ein Neudesign unter Berücksichtigung der Heatpipes notwendig wäre.

Durch den Einsatz der alternativen Kühlfluide kann ebenfalls eine gewisse Steigerung der Kühlleistung erzielt werden, jedoch fiel diese in den Untersuchungen geringer aus als durch den Einsatz von Heatpipes. Weiterhin ist zu beachten, dass es, in Abhängigkeit der konkreten Strömungssituation, lokal auch zu einem negativen Einfluss kommen kann.

Durch den Einsatz von Phasenwechselmaterialien im Kühlsystem können in einem gewissen Rahmen Lastspitzen abgefangen und so Zeitweise die Temperaturen im Kühlsystem gesenkt werden. Unter Anbetracht der experimentellen Ergebnisse mit dem ausgewählten PCM, dem Aufwand in Bezug auf Bauraum und Gewicht ist ein effektiver Mehrwert, bei ausschließlicher Betrachtung der Komponentenkühlung, jedoch fraglich.

Kurzfristig bietet die Optimierung der Kühlergeometrie bzw. der Kühlermoduls das größte Potential, wie in den Untersuchungen von TLK gezeigt wurde.

2.1.4 AP 5000 Prüfstandsversuche

AP 5010 Definition Prüfumfang

Basierend auf den definierten Randbedingungen und den Erkenntnissen aus AP 1000 Randbedingungen und AP 2000 Grundlagen wurden Lastpunkte zur Bewertung der verbesserten Wärmeübertragungstechniken und der Wärmespeicherung definiert. Von Interesse sind hierbei vor allem stationäre Vollastpunkte, aber auch instationäre Lastwechsel, beispielsweise Wechsel zwischen maximaler Dauerleistung und Peakleistung des Antriebs.

AP 5020 Prüfung Inverter

Die Inbetriebnahme der Antriebseinheit bei ZF wurde nur in einem sehr eingeschränkten Betriebsbereich ohne detaillierte thermische Vermessung durchgeführt, so dass die durch das IfT definierten Messpunkte nicht angefahren werden konnte. Daher standen keine thermischen Messdaten zur Auswertung, wie ursprünglich geplant, zur Verfügung.

2.1.5 AP 6000 Fahrzeugaufbau

AP 6070 Vermessung Fahrzeug

Da der ursprünglich geplante Fahrzeugaufbau, aufgrund der genannten Einschränkungen in Bezug auf den Betrieb der Antriebseinheit, nach Beschluss im Konsortium gestrichen wurde, standen dem IfT keine Messdaten zur Auswertung und zum Modellabgleich zur Verfügung.

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Kosten für das Teilprojekt des IfT sind überwiegend Personalkosten sowie Kosten für die Prüfstandsuntersuchungen. Im Schnitt wurde die Stelle eines wissenschaftlichen Mitarbeiters drei Jahre finanziert. Hinzu kommen Reiskosten für die Projektbesprechungen sowie Tagungsbesuche. Die Gesamtkosten fielen etwas geringer aus, als die Beantragen Zuwendungen. Dies ist auf eine Reduzierte Anzahl an Dienstreisen zu den Projektpartnern, aufgrund wöchentlich stattfindender Telefonkonferenz, sowie Synergieeffekten bei den Prüfstandsuntersuchungen (z.B. Untersuchung der Heatpipes gemeinsam mit Projektpartner Daimler) zurückzuführen.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Der Schwerpunkt der Arbeiten des IfT im Projekt Sphinx lag auf dem AP 2000 Grundlagen, das sich mit dem Wärmemanagement der Antriebseinheit beschäftigte. Die geleisteten Arbeiten waren notwendig, da bei der im Projekt aufgebauten hochintegrierten Antriebseinheit zunächst Unsicherheiten existierten, wie sich das Integrationskonzept auf den Wärmehaushalt der einzelnen Komponenten auswirkt. Es war daher sinnvoll möglichst frühzeitig Maßnahmen zu untersuchen, um einer potentiellen Limitierung der Integrationstiefe durch den Wärmehaushalt entgegensteuern zu können. Die wurde mit den Untersuchungen zur Verbesserung des Wärmeübergangs sowie zur Zwischenspeicherung von Wärme in Phasenwechselmaterialien sowohl experimentell als auch theoretisch getan.

Durch die Kühlkonzeptuntersuchungen konnte im Projekt gezeigt werden, dass der Einfluss der Hochintegration auf die Leistungslimitierung gering ist, sodass zunächst keine zusätzlichen Maßnahmen zur verbesserten Entwärmung notwendig waren. Dennoch bieten die untersuchten Ansätze, vor allem die Wärmeübertragung unter Ausnutzung des Phasenwechsels (Heatpipes), ein hohes Potential die Entwärmung der Leistungselektroniken zu verbessern und so das Gesamtsystem zu optimieren.

2.4 Weiterverwertung

Im Projekt Sphinx wurden wesentliche Erkenntnisse im Bereich der innovativen Techniken für das Thermomanagement von E-Fahrzeuge gewonnen. Insbesondere ist hier das Potential der Wärmeübertragung mittels Heatpipes für Bauteile mit hoher Wärmestromdichte zu nennen. Eine wirtschaftliche Verwertung der Ergebnisse im Sinne einer Gewinnerwirtschaftung erfolgt am IfT nicht. Dennoch fließen diese in weitere Forschungsprojekte sowie die Lehre ein und erweitern so die wissenschaftliche Basis und steigert die Attraktivität als Forschungspartner für weiterführende Projekte mit Partnern des öffentlichen Raums und der gewerblichen Wirtschaft.

So wurden die entwickelten Gesamtfahrzeugmodelle sowie Teilmodelle für die Wärmespeicherung und Wärmeübertragung bereits in verschiedene studentische Arbeiten und Forschungsprojekten angewendet und teilweise weiterentwickelt. Die gemeinsam vom IfT und TLK entwickelte Stoffdatenbank TILMedia wurde um eine nachhaltige Schnittstelle zur

Berechnung und Bereitstellung thermophysikalischer Stoffdaten von Suspensionen, beispielsweise Nanofluiden, erweitert sowie verschiedene empirische Berechnungsmodelle implementiert. Für entsprechende Folgeprojekt besteht dadurch direkt die Möglichkeit diese Stoffdaten in verschiedene Simulation- und Berechnungsumgebungen einzubinden.

Am IfT sind darüber hinaus weiterführende Forschungsvorhaben im Bereich der Heatpipekühlung für Elektrofahrzeuge geplant, die auf den Ergebnissen von Sphinx aufbauen. Hierdurch werden weitere Dissertationen initiiert.

2.5 Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während des Projektverlaufs arbeiteten verschiedene Firmen an der Entwicklung hochintegrierter Antriebseinheiten, so z.B. Siemens [23]. Auf diese Entwicklung hat das Konsortium in Abstimmung mit dem Projektträger durch die weiterführende Hochintegration mithilfe der Embedded-Technologie reagiert.

Im Rahmen des Förderprojektes „Visio.M“ [24] wurde das Thermomanagement im Elektrofahrzeug ganzheitlich untersucht. Dabei wurde auch die unterstützende Kühlung der Leistungselektronik im Sommer durch Reserven der Klimaanlage vorgeschlagen.

Verschiedene Untersuchungen zu dem Einsatz von Nanofluiden zur Kühlung von Elektronikkomponenten wurden im Projektzeitraum durchgeführt. Ein Beispiele ist der Einsatz als Kühlmedium im Brennstoffzellenfahrzeug [25]. Hierbei kam die Forschergruppe zu dem Ergebnis, dass durch den Einsatz von Nanofluiden die Kühlung der Brennstoffzelle verbessert werden kann, bei gleichzeitiger Verkleinerung des Kühlsystems. Eine andere Forschergruppe untersuchte Nanofluide im Zusammenhang mit Mikrochannel Wärmesenken für Leistungselektroniken [26]. Hier wurde festgestellt, dass der Verringerung des thermischen Widerstand der Wärmesenke nur durch eine Erhöhung der notwendigen Pumpenleistung erzielt werden kann. Dies ist ein ähnliches Ergebnis wie in der vorliegenden Untersuchung. Generell lässt sich sagen, dass die Ergebnisse in der Literatur zum Einsatz von Nanofluiden als Kühlmedium nach wie vor sehr unterschiedlich ausfallen und höchst umstritten bleiben.

Der Einsatz von Phasenwechselmaterialien wurde hauptsächlich im Zusammenhang mit dem Thermomanagement von Batterien betrachtet. Als Beispiel ist hier der Einsatz eines thermischen Speichers im Batteriekühlkreislauf eines Hybridfahrzeugs als Ergänzung zur aktiven Kühlung über die Klimaanlage zu nennen [27]. Die Autoren kamen zu dem Schluss, dass durch eine ganzheitliche Optimierung des Systems sowohl das Thermomanagement des Batteriesystems verbessert konnte, als auch die Systemkosten reduziert werden konnten. Jedoch weist das Batteriesystem eine sehr große thermische Trägheit auf, was im starken Gegensatz zu dem hier untersuchten Einsatz zu Kühlung der Antriebseinheit steht.

Verschiedene Untersuchungen zum Einsatz von Heatpipes im Fahrzeug wurden im Projektzeitraum durchgeführt. So konnte beispielsweise das Thermomanagement eines luftgekühlten Lithium-Ionen-Batteriesystems eines Hybridfahrzeugs durch Integration von Heatpipes deutlich verbessert werden [28]. Für stationäre Anwendungen wurde unter anderem eine Wärmesenke mit integrierten Heatpipes zur Mikrochipkühlung entwickelt, wodurch sowohl die Chiptemperatur als auch der Energiebedarf des Kühlsystems gesenkt werden

konnten [29]. Ähnliche Konzepte sind auch für Leistungselektroniken in Elektrofahrzeugen denkbar.

2.6 Veröffentlichungen der Ergebnisse

Folgende Veröffentlichungen auf Fachtagungen wurden im Rahmen des Projektes publiziert:

- Fachvortrag mit TLK auf der VDI-Tagung „Thermomanagement für elektromotorisch angetriebene Pkw“ am 25.-25. November 2015 in Stuttgart mit dem Titel: „Kühlkonzepte für Leistungselektroniken im E-Fahrzeug – eine simulative Studie“. [30]
- Publikation mit Fachvortrag zusammen mit TLK auf dem 13. Braunschweiger Symposium: Hybrid- und Elektrofahrzeuge am 23.-24. Februar 2016 in Braunschweig. Titel: „Cooling Concepts for Power Electronics in Electric Vehicles – a Simulative Investigation“. [31]
- Publikation mit Fachvortrag mit TLK auf der Haus der Technik Fachtagung „Wärme- management des Kraftfahrzeuges X“ am 9.-10. Juni 2016 in Potsdam. Titel: „Innovative Kühlkonzepte für Leistungselektroniken im E-Fahrzeug mit hochintegriertem Antriebsmodul – eine simulative Studie“. [32]

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|-------|--|
| AP | Arbeitspaket |
| BMWi | Bundesministerium für Wirtschaft und Energie |
| IfT | Institut für Thermodynamik, TU Braunschweig |
| IGBT | Bipolartransistor mit isolierter Gate-Elektrode (engl.: Insulated-Gate Bipolar Transistor) |
| LE | Leistungselektronik |
| NEDC | Neuer Europäischer Fahrzyklus (engl.: New European Driving Cycle) |
| PCM | Phasenwechselmaterial (engl. Phase Change Material) |
| TIFFE | Thermal Systems Integration For Fuel Economy |
| TIL | TLK-IfT-Library |
| TIM | Thermisches Interface-Material |
| TLK | TLK-Thermo GmbH |
| UHI | Innerstädtische Überhitzung (engl.: Urban Heat Island) |
| WLTP | Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure |
| ZF | ZF Friedrichshafen AG |

Literaturverzeichnis

- [1] M. Nold, W. Schön, et al., Thermal characterization of a liquid cooled 25 kW inverter, in: PCIM Eur. Conf., Nürnberg, 2011.
- [2] J.L.B. Lemke, Energetische Bewertung von Pkw-Klimaanlagensystemen mit Sekundärkreisläufen, Technische Universität Braunschweig, 2014.
- [3] J. Townsend, R.J. Christianson, Nanofluid Properties and Their Effects on Convective Heat Transfer in an Electronics Cooling Application, *J. Therm. Sci. Eng. Appl.* 1 (2009) 31006. doi:10.1115/1.4001123.
- [4] M. Nikolaus, S. Feja, et al., Nanofluide – Besser als Wasser ?, *Kälte Luft Klimatechnik.* (2011) 30–33.
- [5] J. Buongiorno, D.C. Venerus, et al., A benchmark study on the thermal conductivity of nanofluids, *J. Appl. Phys.* 106 (2009) 94312. doi:10.1063/1.3245330.
- [6] S.M.S. Murshed, K.C. Leong, et al., Thermophysical and electrokinetic properties of nanofluids - A critical review, *Appl. Therm. Eng.* 28 (2008) 2109–2125. doi:10.1016/j.applthermaleng.2008.01.005.
- [7] K.Y. Leong, R. Saidur, et al., Performance investigation of an automotive car radiator operated with nanofluid-based coolants (nanofluid as a coolant in a radiator), *Appl. Therm. Eng.* 30 (2010) 2685–2692. doi:10.1016/j.applthermaleng.2010.07.019.
- [8] R. Baetens, B.P. Jelle, et al., Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review, *Energy Build.* 42 (2010) 1361–1368. doi:10.1016/j.enbuild.2010.03.026.
- [9] N. Lemke, J. Lemke, et al., Secondary Loop System with PCM under Different Climatic Conditions Institut für Thermodynamik, (2011) 1–2.
- [10] S.A. Khateeb, S. Amiruddin, et al., Thermal management of Li-ion battery with phase change material for electric scooters: Experimental validation, *J. Power Sources.* 142 (2005) 345–353. doi:10.1016/j.jpowsour.2004.09.033.
- [11] M. Jaworski, Thermal performance of heat spreader for electronics cooling with incorporated phase change material, *Appl. Therm. Eng.* 35 (2012) 212–219. doi:10.1016/j.applthermaleng.2011.10.036.
- [12] K.-S. Kim, M.-H. Won, et al., Heat pipe cooling technology for desktop PC CPU, *Appl. Therm. Eng.* 23 (2003) 1137–1144. doi:10.1016/S1359-4311(03)00044-9.
- [13] A.E. El-sharkawy, Potential Automotive Applications of Heat Pipes, *SAE Tech. Pap. Ser.* (1998).
- [14] S. Harmand, R. Sonan, et al., Transient cooling of electronic components by flat heat pipes, *Appl. Therm. Eng.* 31 (2011) 1877–1885. doi:10.1016/j.applthermaleng.2011.02.034.
- [15] DEPATISnet, (n.d.). <https://www.dpma.de/patent/index.html>.
- [16] ScienceDirect, (n.d.). <http://www.sciencedirect.com>.
- [17] J. Remund, S. Kunz, et al., Software METEONORM: Handbook Version 7.0, (n.d.). http://www.meteororm.com/images/uploads/downloads/mn71_software.pdf. (accessed September 6, 2016).
- [18] VDI, VDI-Wärmeatlas, 11th ed., 2013. doi:10.1007/978-3-642-19981-3.
- [19] Hi-Level: Teilabschlussbericht der Daimler AG - Ansteuerung für E-Motor. Förderkennzeichen 16N11654. Projektträger, 2015. doi:10.2314/GBV:856394645.
- [20] C. Byon, Heat Pipe and Phase Change Heat Transfer Technologies for Electronics

- Cooling, in: *Electron. Cool.*, InTech, 2016. doi:10.5772/62328.
- [21] M. Sterner, S. Ingo, *Energie Speicher*, 2013. doi:10.1017/CBO9781107415324.004.
- [22] N. Wakao, S. Kaguei, et al., Effect of fluid dispersion coefficients on particle-to-fluid heat transfer coefficients in packed beds, *Chem. Eng. Sci.* 34 (1979) 325–336. doi:10.1016/0009-2509(79)85064-2.
- [23] Siemens Antriebseinheit Sivetec MSA 3300, (n.d.). <https://www.elektrotechnik.vogel.de/neuer-antrieb-vereint-motor-und-inverter-fuer-das-elektroauto-a-463750/> (accessed May 25, 2017).
- [24] Visio.M: BMBF Verbundprojekt, (n.d.). <http://www.verbundprojekt-visiom.tum.de/home/> (accessed May 25, 2017).
- [25] M.R. Islam, B. Shabani, et al., The potential of using nanofluids in PEM fuel cell cooling systems: A review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 48 (2015) 523–539. doi:10.1016/j.rser.2015.04.018.
- [26] J. Wu, J. Zhao, et al., Effectiveness of nanofluid on improving the performance of microchannel heat sink, *Appl. Therm. Eng.* 101 (2016) 402–412. doi:10.1016/j.applthermaleng.2016.01.114.
- [27] N. Javani, I. Dincer, et al., Exergy analysis and optimization of a thermal management system with phase change material for hybrid electric vehicles, *Appl. Therm. Eng.* 64 (2014) 471–482. doi:10.1016/j.applthermaleng.2013.11.053.
- [28] T.-H. Tran, S. Harmand, et al., Experimental investigation on heat pipe cooling for Hybrid Electric Vehicle and Electric Vehicle lithium-ion battery, *J. Power Sources.* 265 (2014) 262–272. doi:10.1016/j.jpowsour.2014.04.130.
- [29] K. Zhu, M. Zheng, et al., Experimental Study of Energy Saving Performances in Chip Cooling by using Heat Sink with Embedded Heat Pipe, *Energy Procedia.* 105 (2017) 5160–5165. doi:10.1016/j.egypro.2017.03.1046.
- [30] S. Försterling, S. Heinke, et al., Kühlkonzepte für Leistungselektroniken im E-Fahrzeug – eine simulative Studie, in: *VDI-Fachkonferenz Thermomanagement Für Elektromot. Angetriebene PKW*, Stuttgart, 2015.
- [31] S. Heinke, S. Försterling, et al., Cooling Concepts for Power Electronics in Electric Vehicles – a Simulative Investigation, in: *Hybrid Electr. Veh. 13th Symp.*, ITS Automotive Nord e.V, Braunschweig, 2016.
- [32] S. Försterling, S. Heinke, et al., Innovative Kühlkonzepte für Leistungselektroniken im E-Fahrzeug mit hochintegriertem Antriebsmodul - eine simulative Studie, in: P. Steinberger (Ed.), *Wärmemanagement Des Kraftfahrzeugs X*, expert Verlag, Essen, 2016: pp. 143–162.

Berichtsblatt

| | |
|--|---|
| 1. ISBN oder ISSN geplant | 2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht |
| 3. Titel Sphinx - Hochintegrierter, skalierbarer E-Fahrzeugantrieb auf Basis einer schnell laufenden Maschine Teilvorhaben: Kühlmittel/Fluide, Wärmespeicherung und -transport | |
| 4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Heinke, Steffen Tegethoff, Wilhelm Köhler, Jürgen | 5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2016 |
| | 6. Veröffentlichungsdatum geplant |
| | 7. Form der Publikation Abschlussbericht |
| 8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Technische Universität Braunschweig Institut für Thermodynamik Hans-Sommer-Straße 5 38106 Braunschweig | 9. Ber. Nr. Durchführende Institution |
| | 10. Förderkennzeichen 01MY12001E |
| | 11. Seitenzahl 42 |
| 12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 53107 Bonn | 13. Literaturangaben 32 |
| | 14. Tabellen 3 |
| | 15. Abbildungen 33 |
| 16. Zusätzliche Angaben | |
| 17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) | |
| 18. Kurzfassung Ziel des Forschungsprojekts „Sphinx“ war die Entwicklung einer hochintegrierten Antriebseinheit bestehende aus Getriebe, E-Motor und einer Leistungselektronik mit in den Schaltungsträgern integrierten Leistungshalbleitern (Embedding-Technologie). Im Rahmen dieses Teilprojekts wurde das Thermomanagement der Antriebseinheit mit dem Fokus auf der Leistungselektronik untersucht. Dazu wurden innovative Kühlkonzepte basierend auf alternativen Wärmeübertragungsmedien, unter anderen unter Ausnutzung des Phasenwechsels, sowie thermischen Speichern betrachtet. Ausgewählte Konzepte wurden experimentell untersucht und entsprechende Teilmodelle für die Verwendung in einem thermischen Gesamtfahrzeug erstellt. Im Rahmen von simulativen Untersuchungen mit dem erweiterten Gesamtfahrzeugmodell unter extremen Klima- und Fahrscenarien konnte gezeigt werden, dass der Einsatz von Heatpipes zur Unterstützung der Entwärmung der Leistungshalbleiter das größte Potential zur weiteren Steigerung der Leistungsdichte der Antriebseinheit aufweist, gefolgt von dem Einsatz alternativer Kühlmedien. Ein in den Kühlkreislauf integrierter thermischer Speicher zeigte keinen signifikanten Nutzen in Bezug auf die Entwärmung der Antriebseinheit, aufgrund der großen thermischen Trägheiten. | |
| 19. Schlagwörter Alternative Kälteträger, Wärmespeicherung, Phasenwechselmaterial, Thermische Simulation, Elektrofahrzeug, Kühlkreislauf, Fahrzeugelektronik, Gesamtfahrzeugsimulation | |
| 20. Verlag Technische Informationsbibliothek (TIB), Hannover | 21. Preis - |

Document Control Sheet

| | |
|--|--|
| 1. ISBN or ISSN -none- | 2. type of document (e.g. report, publication) Final report |
| 3. title Sphinx - Hochintegrierter, skalierbarer E-Fahrzeugantrieb auf Basis einer schnell laufenden Maschine Teilvorhaben: Kühlmittel/Fluide, Wärmespeicherung und –transport | |
| 4. author(s) (family name, first name(s)) Heinke, Steffen Tegethoff, Wilhelm Köhler, Jürgen | 5. end of project 31.12.2016 |
| | 6. publication date |
| | 7. form of publication Final report |
| 8. performing organization(s) (name, address) Technische Universität Braunschweig Institut für Thermodynamik Hans-Sommer-Straße 5 38106 Braunschweig | 9. originator's report no. |
| | 10. reference no. 01MY12001E |
| | 11. no. of pages 42 |
| 12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 53107 Bonn | 13. no. of references 32 |
| | 14. no. of tables 3 |
| | 15. no. of figures 33 |
| 16. supplementary notes | |
| 17. presented at (title, place, date) | |
| 18. abstract The aim of the research project "Sphinx" was the development and analysis of a highly integrated driving unit for an electric vehicle consisting of a gear, an electric machine and an inverter. In the scope of this work the thermal management of the electric driving unit was investigated. Special attention was paid to the power semiconductors embedded into the printed circuit board. Innovative cooling solutions, such as alternative heat transfer fluids and phase change materials, were examined. Selected concepts were investigated experimentally and modeled theoretically for the usage in a thermal vehicle model. Using this extend vehicle model the novel cooling concepts were evaluated under challenging climate and driving conditions. It was found that the usage of heat pipes for an additional cooling of the power semiconductors offers the highest potential for a further increase of power density, followed by the application of novel heat transfer fluids. An integration of a thermal storage unit into the cooling circuit based on a phase change material showed no significant benefit due to the slow thermal response compared to the power electronics. | |
| 19. keywords alternative cooling fluids, heat storage, phase change material, thermal simulation, electric vehicle, cooling cycle, vehicle electronics, entire vehicle simulation | |
| 20. publisher Technische Informationsbibliothek (TIB), Hannover | 21. price - |