

## Abschlussbericht zum BMWi-Verbundprojekt **Sphinx:**

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

Teilvorhaben TLK-Thermo GmbH Braunschweig

Projektpartner



Autoren: Dr.-Ing. Sven Försterling  
Dr.-Ing. Nicholas Lemke

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 01MY12001D gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

### Kontakt.

TLK-Thermo GmbH, Hans-Sommer-Straße 5, 38106 Braunschweig, Germany  
Telefon. +49/531/390 76-0 Fax. +49/531/390 76-29 / info@tlk-thermo.com / <http://www.tlk-thermo.de>

## Inhaltsverzeichnis

<b>1. Kurze Darstellung .....</b>	<b>3</b>
<b>1.1. Aufgabenstellung.....</b>	<b>3</b>
<b>1.2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.....</b>	<b>3</b>
<b>1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens .....</b>	<b>5</b>
<b>1.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand .....</b>	<b>8</b>
<b>1.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....</b>	<b>9</b>
<b>2. Eingehende Darstellung (TLK-Thermo).....</b>	<b>11</b>
<b>2.1. Verwendung der Zuwendung und der erzielten Ergebnisse im Einzelnen .....</b>	<b>11</b>
<b>2.1.1. AP 1000 Randbedingungen.....</b>	<b>11</b>
<b>2.1.2. AP 2000 Grundlagen.....</b>	<b>18</b>
<b>2.1.3. Weitere Arbeitspakete .....</b>	<b>33</b>
<b>2.2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....</b>	<b>35</b>
<b>2.3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....</b>	<b>35</b>
<b>2.4. Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse nach Verwertungsplan.....</b>	<b>36</b>
<b>2.5. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....</b>	<b>36</b>
<b>2.6. Veröffentlichungen der Ergebnisse .....</b>	<b>37</b>
<b>3. Literaturverzeichnis.....</b>	<b>38</b>

# 1. Kurze Darstellung

## 1.1. Aufgabenstellung

Im Rahmen des Forschungsprojektes „Sphinx“ wird ein hochintegriertes Antriebsmodul für Elektrofahrzeuge entwickelt. Zur simulativen Untersuchung von innovativen Kühlkonzepten wird in diesem Beitrag ein thermisches Simulationsmodell zur dynamischen Wärmestromanalyse zwischen den hochintegrierten Komponenten Inverter, E-Maschine und Getriebe, sowie den externen Wärmequellen und -senken Kühlkreislauf, Klimakreislauf und Batterie vorgestellt. Das thermische Modell ist in eine Gesamtfahrzeugsimulation eingebettet, um typische Randbedingungen für E-Fahrzeuge abbilden zu können. Hiermit können auch alternative Kühlkonzepte wie z.B. mit thermischem Speicher und alternativen Kühlflüssigkeiten wie z.B. Nanofluiden untersucht werden.

Ziel der Untersuchung ist die Auslegung und Bewertung von Kühlkonzepten für Leistungselektroniken unter Verwendung unterschiedlicher Last- und Klimarandbedingungen. Hierfür werden auch alternative Kühlkonzepte unter Verwendung von thermischen Speichern basierend auf Phasenwechselmaterialien und alternativen Kühlflüssigkeiten wie z.B. Nanofluiden betrachtet.

Folgende Ergebnisse konnten im Rahmen dieses Vorhabens erzielt werden:

- Erstellung von thermischen Simulationsmodellen für Leistungselektroniken unter Modelica/Dymola.
- Aufbau eines Thermisches Gesamtfahrzeugmodells.
- Werkzeugkette zur thermischen Auslegung von E-Fahrzeugen.
- Ermittlung gewichteter extremer Klimarandbedingungen + extreme Fahrzyklen.
- Entwicklung von Modellen für innovative Kühlsysteme: PCM, Heatpipes, Nanofluide.
- Kühlsystem ist für Extrembedingungen ausreichend ausgelegt (konventioneller Kühler).
- Optimierung des Kühlsystems, u.a. deutliche Reduktion der Kühlerfläche möglich.
- Bewertung im Energieflussdiagramm: Ermittlung von Verlusten, Verbrauch und Reichweite.

## 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.

Im Rahmen des vorliegenden Berichtes wird ein thermisches Simulationsmodell zur dynamischen Analyse der zwischen den hochintegrierten Komponenten Inverter, E-Maschine und Getriebe, sowie den externen Wärmequellen und -senken Kühlkreislauf, Klimakreislauf und Batterie ausgetauschten Wärmeströmen vorgestellt. Das thermische Modell ist in eine Gesamtfahrzeugsimulation eingebettet, um typische elektrofahrzeugspezifische Randbedingungen abbilden zu können. Für die Nachbildung des typischen Betriebs eines E-Fahrzeugs werden spezifische Klimadaten und Fahrszenarien verwendet.

Für die Erstellung des Simulationsmodells wird die Simulationsbibliothek „TIL Suite“ der TLK-Thermo GmbH (im Folgenden kurz TLK) unter der Programmiersprache Modelica/Dymola verwendet.

Ziel der Untersuchung ist die Auslegung und Bewertung von Kühlkonzepten für Leistungselektroniken unter Verwendung unterschiedlicher Last- und Klimarandbedingungen. Hierfür werden auch alternative Kühlkonzepte unter Verwendung von thermischen Speichern basierend auf Phasenwechselmaterialien und alternativen Kühlflüssigkeiten wie z.B. Nanofluiden betrachtet.

### 1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt ist in acht Haupt-Arbeitspakete unterteilt. In Tabelle 1 sind die Arbeitspakete unter Mitarbeit von TLK mit PM sowie die Leiter der einzelnen Arbeitspakete gemäß Projektskizze aufgelistet.

Nr.	Arbeitspaket / Arbeitsschritt	Leitung	Mitarbeit PM TLK
<b>1000</b>	<b>Randbedingungen</b>	ZF	
1010	Zielfahrzeug	DAI	0.5
1050	Schnittstellen-analyse	ZF	0.5
1070	Fahrprofil	DAI	0.5
1075	Klima-Randbedingungen	TLK	3
<b>2000</b>	<b>Grundlagen</b>	TLK	
2020	Thermomanagement	DAI	2
2030	Wärmeübertragung	TU BS	1
2035	Wärmespeicherung	TU BS	1
2040	Simulationsmodell	TLK	5
2045	Thermische Simulation	TLK	3
2050	Lebensdauer LE	ZF	0.5
2090	Kühlkonzept	ZF	1
<b>3000</b>	<b>Mechanik</b>	ZF	
3010	Integrationskonzept	ZF	1.5
3080	Bewertung der Konstruktion	ZF	1
<b>4000</b>	<b>Elektronik</b>	IFX	
<b>5000</b>	<b>Prüfstandsversuche</b>	ZF	
5010	Definition Prüfumfang	ZF	0.5
5020	Prüfung Inverter	ZF	0.5
<b>6000</b>	<b>Fahrzeugaufbau</b>	DAI	
6070	Vermessung Fahrzeug	DAI	1
<b>8000</b>	<b>Projektmanagement</b>	ZF	

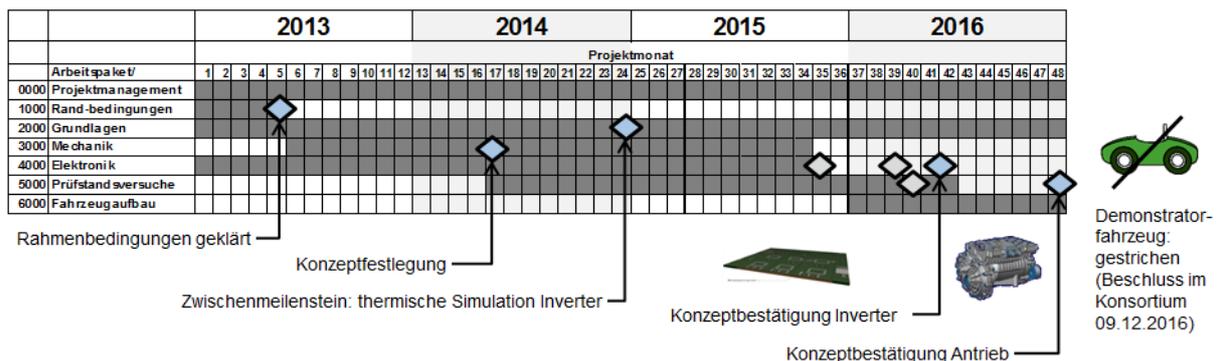
**Tabelle 1: Arbeitspakete des Projekts Sphinx unter Mitarbeit von TLK (Projektskizze).**

Bild 1 zeigt den ursprünglichen Zeit- und Arbeitsplan mit Arbeitspaketen unter Mitarbeit von TLK gemäß der eingereichten Projektskizze.

Bild 2 und 3 und zeigen den tatsächlichen Zeit- und Arbeitsplan. Allen Projektpartnern wurde eine aufwandsneutrale Verlängerung von 1 Jahr gewährt um Verzögerungen im Projektablauf aufzufangen.

Arbeitspaket/ Arbeitsschritt	Leiter	Start	Ende	Projektmonat																																			
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
<b>1000 Rand-bedingungen</b>	ZF	1	5	[Bar chart showing task duration]																																			
1010 Zielfahrzeug	DAI	1	1	[Bar chart showing task duration]																																			
1050 Schnittstellen-analyse	ZF	3	5	[Bar chart showing task duration]																																			
1070 Fahrprofil	DAI	3	5	[Bar chart showing task duration]																																			
1075 Klima-Randbedingungen	TLK	2	5	[Bar chart showing task duration]																																			
1099 MS Rahmenbedingungen geklärt	ZF	5		[Bar chart showing task duration]																																			
<b>2000 Grundlagen</b>	TLK	1	33	[Bar chart showing task duration]																																			
2020 Thermomanagement	DAI	6	16	[Bar chart showing task duration]																																			
2030 Wärmeübertragung	TU BS	1	30	[Bar chart showing task duration]																																			
2035 Wärmespeicherung	TU BS	6	30	[Bar chart showing task duration]																																			
2040 Simulationsmodell	TLK	1	24	[Bar chart showing task duration]																																			
2045 Thermische Simulation	TLK	9	33	[Bar chart showing task duration]																																			
2050 Lebensdauer LE	ZF	1	16	[Bar chart showing task duration]																																			
2090 Kühlkonzept	ZF	9	16	[Bar chart showing task duration]																																			
<b>3000 Mechanik</b>	ZF	6	25	[Bar chart showing task duration]																																			
3010 Integrationskonzept	ZF	6	16	[Bar chart showing task duration]																																			
3080 Bewertung der Konstruktion	ZF	17	22	[Bar chart showing task duration]																																			
3090 Aufbau Prototyp / Antrieb	ZF	17	25	[Bar chart showing task duration]																																			
<b>4000 Elektronik</b>	IFX	1	25	[Bar chart showing task duration]																																			
<b>5000 Prüfstandsversuche</b>	ZF	17	28	[Bar chart showing task duration]																																			
5010 Definition Prüfumfang	ZF	17	19	[Bar chart showing task duration]																																			
5020 Prüfung Inverter	ZF	26	28	[Bar chart showing task duration]																																			
5099 MS Konzeptbestätigung	ZF	28		[Bar chart showing task duration]																																			
<b>6000 Fahrzeugaufbau</b>	DAI	26	36	[Bar chart showing task duration]																																			
6070 Vermessung Fahrzeug	DAI	29	36	[Bar chart showing task duration]																																			
<b>8000 Projektmanagement</b>	ZF	1	36	[Bar chart showing task duration]																																			
8050 Projektmanagement	ZF	1	36	[Bar chart showing task duration]																																			

**Bild 1: Ursprünglicher Zeit- und Arbeitsplan – Arbeitspakete unter Mitarbeit von TLK. Planung nach Projektskizze.**



**Bild 2: Realer Zeit- und Arbeitsplan. Angepasster Projektverlauf mit Projektverlängerung.**



#### 1.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand

Modelica ist derzeit eine bevorzugt verwendete Sprache bei der Modellierung thermischer Systeme [1]-[3]. Während für die wesentlichen Komponenten eines Kühlsystems (Rohre, Pumpen, Wärmeübertrager, etc.) zumindest Grundkomponenten prototypisch in den verschiedenen Bibliotheken verfügbar sind, besteht die eigentliche Herausforderung bei der Simulation im Aufbau einer ergänzenden Bibliothek, welche die konkreten noch zu entwickelnden Komponenten des im Projekt untersuchten hochintegrierten Systems abbilden. Diese entsprechenden Modelle sind Prinzip bedingt noch in keiner Bibliothek vorhanden und sollen im Rahmen des Projektes entwickelt werden. Soweit dem Antragsteller bekannt ist, werden in anderen Förderprojekten aus dem Bereich der Elektromobilität (z.B. Projekt „e performance“ [10]) gerade nicht die speziellen Fragestellungen eines hochintegrierten Antriebsmoduls untersucht, sodass auch die dort entwickelten Simulationsmodelle nicht übertragbar sind.

Verschiedene Softwareprodukte werden hauptsächlich zur stationären Berechnung von Kühlkreisläufen eingesetzt (Kuli, Flowmaster, GT-Cool). Die im Projekt vorgesehene Bibliothek TIL Suite unter Modelica ist darüber hinaus auch hervorragend dazu geeignet, Fragestellungen des transient betriebenen Kreislaufs zu untersuchen [4][5].

Die Ermittlung repräsentativer ortsabhängiger Umgebungsbedingungen (Temperatur, Feuchte, Solarstrahlung, ...) wurde in der Vergangenheit bereits für konventionelle Pkw durchgeführt [30]. Diese Daten beziehen sich allerdings nicht auf E-Fahrzeuge. Durch die zu erwartende anders strukturierte örtliche und zeitliche Nutzung können die bekannten Daten nicht verwendet werden. Speziell für E-Fahrzeuge ermittelte Umgebungsbedingungen sind dem Antragsteller aus der Literatur nicht bekannt.

Dem Antragsteller ist auch nach aktueller Informationsrecherche (Literatur- und Patentrecherchen) nicht bekannt, dass die spezifischen Vorhaben von TLK im Projekt Sphinx bereits Gegenstand anderweitiger Forschungen, Entwicklungen, Untersuchungen oder Patente sind. Dementsprechend ist auch 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, Parksperrschalter 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, 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.
- Auswertung von Fahrzeugmessdaten des Demonstrator-Fahrzeugs und Validierung der Modelle (Konnte im Projekt nicht durchgeführt werden).

### **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-träger-Netz.
- 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 (TLK-Thermo)

### 2.1. Verwendung der Zuwendung und der erzielten Ergebnisse im Einzelnen

Die **zentralen** Arbeitspakete der TLK waren nach Tabelle 1 in den Haupt-AP 1000 Randbedingungen und 2000 Grundlagen enthalten:

- AP 1010 Zielfahrzeug
- AP 1050 Schnittstellenanalyse
- AP 1070 Fahrprofil
- **AP 1075 Klima-Randbedingungen**
- **AP 2020 Thermomanagement**
- AP 2030 Wärmeübertragung
- AP 2035 Wärmespeicherung
- **AP 2040 Simulationsmodell**
- **AP 2045 Thermische Simulation**
- AP 2050 Lebensdauer LE
- AP 2090 Kühlkonzept

Weitere Mitarbeit ergab sich in den Haupt-AP 3000 Mechanik und Prüfstandsversuche 5000 und Vermessung Fahrzeug 6000

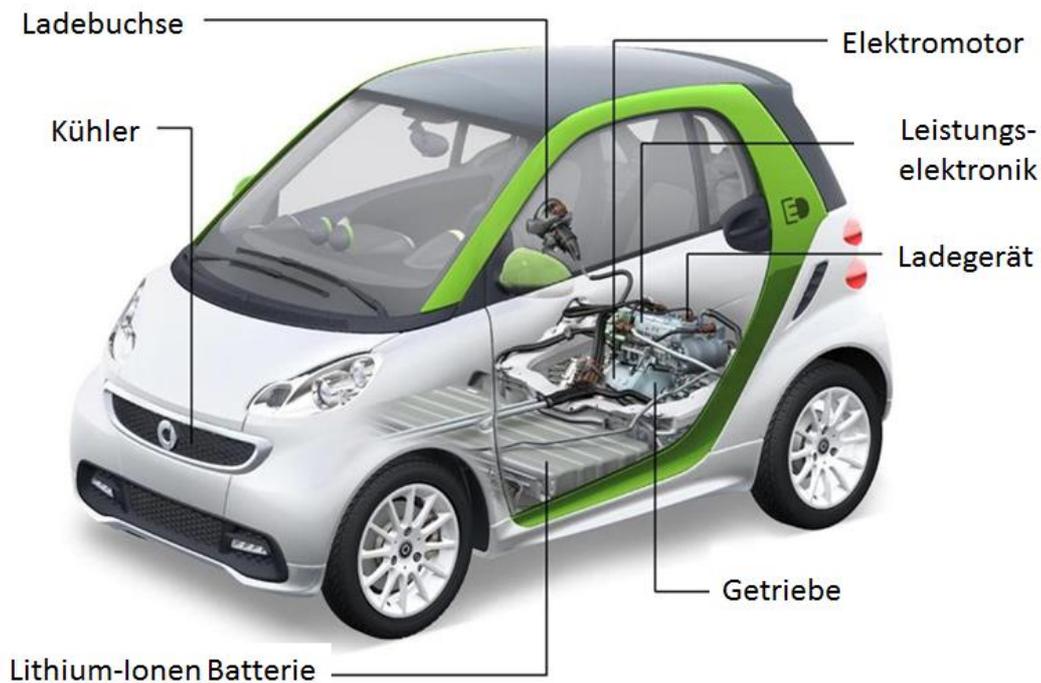
- AP 3010 Integrationskonzept
- AP 3080 Bewertung der Konstruktion
- AP 5010 Definition Prüfumfang
- AP 5020 Prüfung Inverter
- AP 6070 Vermessung Fahrzeug

#### 2.1.1. AP 1000 Randbedingungen

In den folgenden Abschnitten werden zum einen das Zielfahrzeug (AP 1010) sowie die Randbedingungen für die simulativ untersuchten Fahrscenarien des Elektrofahrzeuges festgelegt. Hierfür werden zum einen statistisch gewichtete Klimarandbedingungen für Ballungszentren in unterschiedlichen Heißlandgebieten unterschiedlichen Klimas ermittelt (AP 1070) sowie entsprechende Fahrzyklen für Standard- als auch Extremfahrten vorgestellt (AP1075).

### AP 1010 Zielfahrzeug

Bild 4 zeigt die wesentlichen Elektronik- und Kühlkreislaufkomponenten, wie sie z.B. im Smart Fortwo Electric Drive verbaut sind. Die Parametrierung des Fahrzeugmodells erfolgt dabei für einen typischen Kleinwagen, wie in Tabelle 2 dargestellt (siehe [11]):



**Bild 4: Elektrokomponenten im Elektrofahrzeug am Beispiel des Smart Fortwo Electric Drive [6].**

### Mechanisches Fahrzeugmodell

Für die Gesamtfahrzeugsimulation wurde für die Abbildung des mechanischen Fahrverhaltens ein Längsdynamikmodell erstellt und mit typischen Parametern nach Tabelle 2 parametrisiert, die ein Fahrzeug der Kleinst- bis Kleinwagenklasse beschreiben.

Ein mechanisches Fahrzeugmodell wurde in der Programmiersprache Modelica unter Verwendung des Simulators Dymola erstellt, dessen wesentliche Komponente ein Längsdynamikmodell darstellt. In diesem Modell wird die, für einen vorgegebenen Fahrzyklus mit der Fahrzeuggeschwindigkeit  $v_F$ , notwendige Antriebsleistung am Rad  $P_{\text{Rad}}$  in Abhängigkeit des momentanen Fahrzustandes bestimmt [7]. Berücksichtigt wird dabei der Rollwiderstand  $F_R$ , der Luftwiderstand  $F_L$ , der Steigungswiderstand  $F_{\text{St}}$  sowie der Beschleunigungswiderstand  $F_B$ .

$$P_{\text{Rad}} = (F_R + F_L + F_{\text{St}} + F_B) \cdot v_F$$

Für den Beschleunigungswiderstand wird dabei sowohl der translatorische als auch der rotatorische Anteil berücksichtigt.

$$F_B = (e \cdot m_F + m_{Zu}) \cdot \frac{dv_F}{dt}$$

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 <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>
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
Batteriespannung (93x3.7V)	344	V
Batteriemasse	175	kg
<b>Zielgrößen</b>		
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

**Tabelle 2: Im Rahmen dieser Untersuchung gewählte Fahrzeugparameter bzw. Zielgrößen für die Abbildung eines typischen Kleinst- / Kleinwagens [11].**

### AP 1050 Schnittstellenanalyse

Nach Diskussion verschiedener Konzeptvarianten mit unterschiedlichen Verschaltungen des Kühlkreislaufs wird eine nach den Kriterien, Effizienz, Hochintegration und Kosten ausgewählte Anlagenverschaltung mit entsprechenden Schnittstellen zwischen den einzelnen Komponenten wie sie in Bild 13 dargestellt ist festgelegt. Die im Flussbild hinter dem Frontendkühler eingebaute Kühlwasserpumpe pumpt die Kühlflüssigkeit durch den Kreislauf. Optional kann mit einem 3-Wege-Ventil Kühlmittel durch den On-Board Charger geleitet werden, der parallel zum Motor und Inverter und parallel zum DC/DC Konverter verbaut ist. Inverter und Motor sind in dieser Reihenfolge kühlmittelseitig seriell verbaut, da der Inverter das thermisch sensibelste Bauteil darstellt. Eine zusätzliche Kühlmittelpumpe ist im Kühlkreislauf für die Batterie verbaut, der über ein 3-Wege-Ventil mit dem Haupt-Kühlkreislauf verbunden ist. Hiermit kann der Batteriekreislauf über einen Chiller der Klimaanlage bei hohen Umgebungstemperaturen und Lastfällen gezielt gekühlt oder vorkonditioniert werden.

### AP 1070 Fahrprofil

Für die dynamische Untersuchung der Kühlkonzepte werden unterschiedliche Fahrzyklen verwendet. 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. Für die Untersuchung möglicher Extremszenarien werden verschiedene Passfahrten in unterschiedlichen Klimazonen wie die Glockner Hochalpenstraße, Mont Ventoux und Towne-Pass herangezogen (siehe Bild 5).

	Mont Ventoux:	Glockner:	Towne-Pass:
Distanz:	25 km	32 km	26 km
Fahrzeit:	39 min	30 min	18 min
Höhe:	1200 Hm	1800 Hm	1500 Hm
mittl. Steigung:	4.5 %	5.6 %	5.7 %
T-Luft*	40°C (Tal)	35°C (Tal)	50°C (Tal)

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

\*Temperaturprofil: höhenabhängig

**Bild 5: Extrempassfahrten über verschiedene Bergpässe in unterschiedlichen Klimazonen: Mont Ventoux, Glockner Hochalpenstraße und Towne-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 vorkonditionieren. 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.

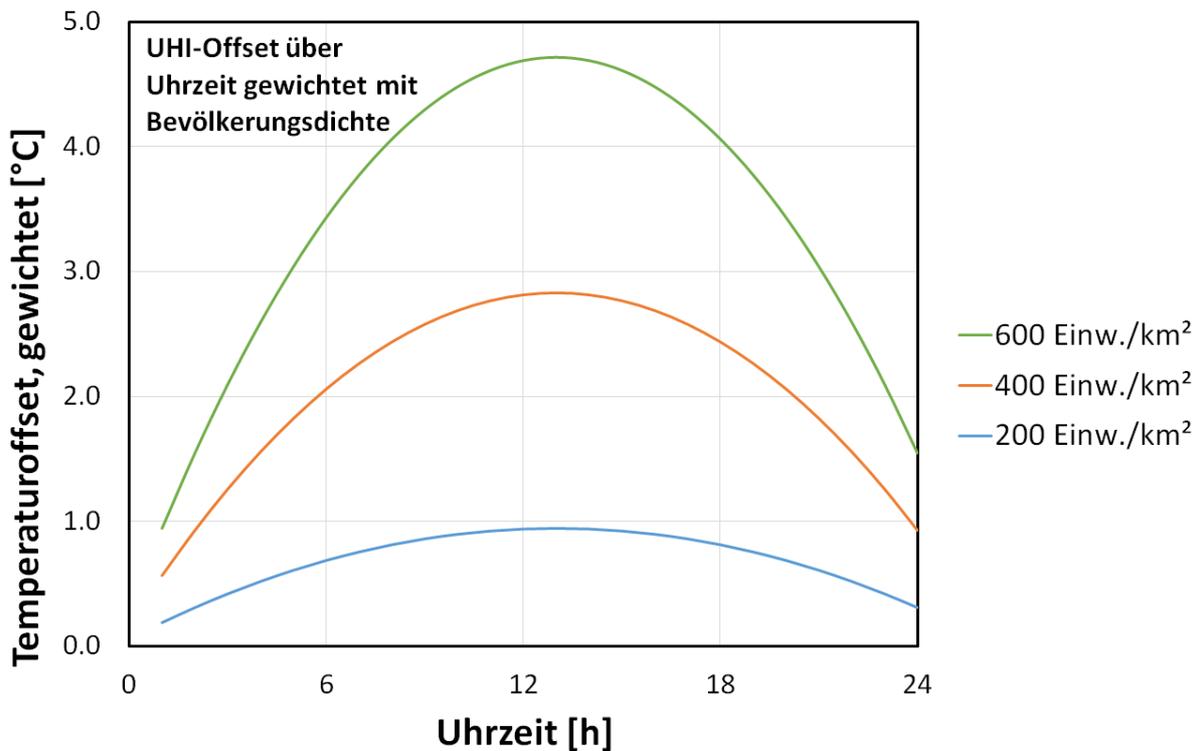
### **AP 1075 Klima-Randbedingungen**

Für die simulative Untersuchung werden gemittelte Klimarandbedingungen für Elektrofahrzeuge in Ballungszentren verwendet. Dazu werden basierend auf mittleren Klimadaten aus Wetterstationen örtlich und zeitlich hochaufgelöste Klimadaten für E-Fahrzeuge weltweit in verschiedenen Ländern herangezogen. Diese Daten werden mit Hilfe der Software Meteonorm (siehe [32]) mit dem tageszeitlichen statistischen landestypischen Nutzungsverhalten von Autofahrern und der Bevölkerungsdichte der entsprechenden Region gewichtet (siehe [31]). Für die Auswertung der verschiedenen Daten (zeitlich und örtlich aufgelöste Klimadaten, Bevölkerungsdichte, tageszeitliches Fahrverhalten und weitere Zusatzinformationen wie innerstädtische Überhitzung UHI) wird die von TLK entwickelte C++ basierte Software Weather Client verwendet.

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. 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 UHI (Urban Heat Island) berücksichtigt. Dazu wird ein UHI-Temperaturoffset zu den Temperaturen aus den mittleren Klimadaten addiert, der zum einen von der Uhrzeit und zum anderen von der Bevölkerungsdichte abhängt und erst ab einer Bevölkerungsdichte ab 100 Einwohner pro km<sup>2</sup> berücksichtigt wird (siehe Bild 7).

Dieser Einfluss wird nach Landestyp in Abhängigkeit der Einwohnerdichte und der Uhrzeit berücksichtigt und kann zu einer zusätzlichen Aufheizung von maximal 5K in der Mittagszeit führen.



**Bild 6: UHI-Offset ab Einwohnerdichte von 100 Einwohner/km<sup>2</sup> in Abhängigkeit der Einwohnerdichte und Uhrzeit.**

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 (siehe Bild 7).

Für mediterranes Klima (Spanien) liegen 7% der Fahrtbedingungen bei Temperaturen über 30°C, während bei kontinentalem Klima (Arizona) 35% der Fahrten bei über 30°C, bei tropischem Klima (Guangdong) 8% 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 %						

**Bild 7: Mittlere Klimarandbedingungen für E-Fahrzeuge in Ballungszentren für Spanien (mediterrän), Süd-China (tropisch) und Süd-USA (kontinental) mit und ohne UHI.**

## 2.1.2. AP 2000 Grundlagen

### AP 2020 Thermomanagement

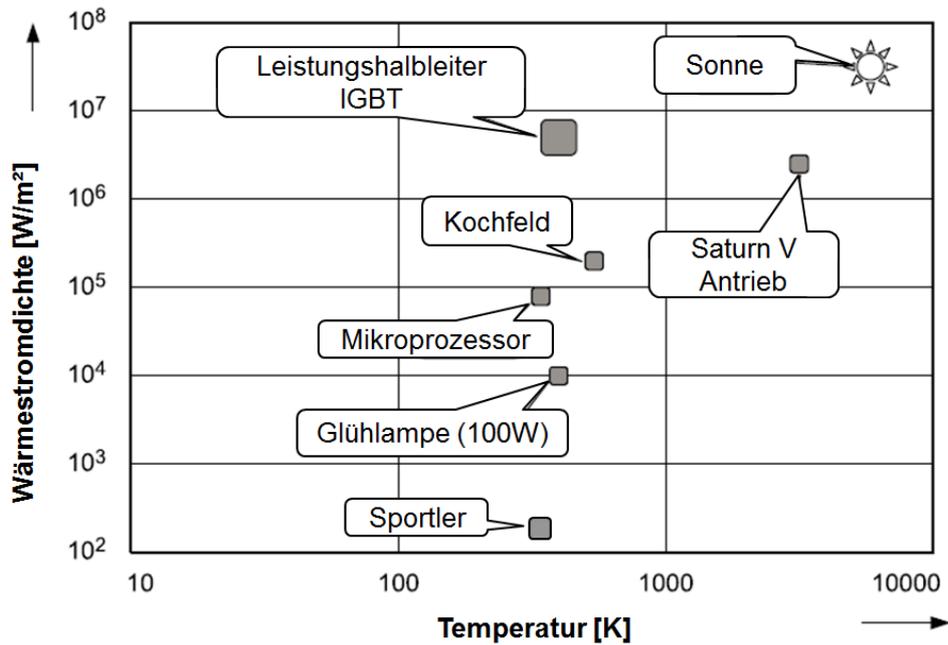
Für die simulative Untersuchung werden dynamisch thermische Modelle der Leistungselektroniken von Inverter, DC/DC-Wandler und OnBoard Charger erstellt. Weiterhin wird ein dynamisch thermisches Modell der Motor/Generatoreinheit erstellt. Die Modellierung der Verlustleistungen der Motor/Generatoreinheit, des DC/DC-Wandlers und des OnBoard-Chargers erfolgt über eine verlustbasierte physikalische Beschreibung, die unter anderem von Spannung, Drehzahl, und Moment abhängen. Die Modellierung des Inverters erfolgt kennfeldbasiert. Das transiente thermische Verhalten wird über ein Netzwerk aus thermischen Widerständen und Kapazitäten abgebildet, wobei die einzelnen Verlustleistungen des physikalischen Modells über thermische Quellen bzw. Senken mit dem Netzwerk verknüpft sind. Analog wird die 1-dimensionale Wärmeübertragung durch die Platine der nach der Embedded Technologie aufgebauten Leistungselektroniken modelliert [37]. Die Kühlkanäle der Leistungselektroniken werden mit Rohrleitungsmodellen unter Verwendung detaillierter Druck- und Wärmeübergangsbeziehungen abgebildet (siehe AP 2030). Besonderes Augenmerk wurde auf das Thermomanagement des Kühlkreislaufes gelegt, der simulativ für extreme Last- und Klimarandbedingungen hinsichtlich Verschaltung und Auslegung der Kühlflächen in den zu kühlenden Komponenten sowie im Kühler untersucht wurde (siehe AP 2040 und 2045).

### AP 2030 Wärmeübertragung

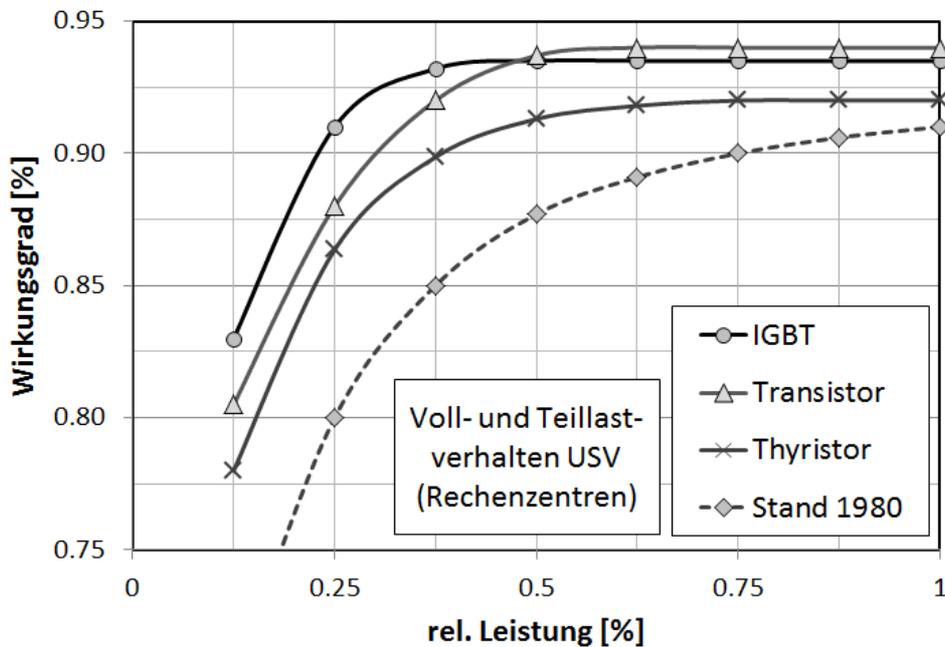
Aufgrund der angestrebten Hochintegration der Antriebskomponenten ergeben sich immer höhere Anforderungen an die Leistungsdichte der Halbleiterelektroniken (siehe Bild 8) und damit an die Kühlungsarchitektur [13].

In Hinblick auf die hohen Spannungen und Ströme im Elektrofahrzeug werden hier IGBTs eingesetzt, für die sich insbesondere für hohe Spannungen und Ströme in diesem Anwendungsbereich geringe Ansteuerströme ergeben und auch für den Teillastbereich (siehe Bild 8) hohe Wirkungsgrade erzielen lassen [19].

Für die Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten des Wasser/Glykol Gemischs (Massenanteil 50/50) wurden die Wärmeübergangskorrelationen von Gnielinski und Dittus Boelter verwendet (siehe [33] [34] [35]). Der Druckabfall wurde für rauhe Rohrleitungen mit Hilfe der Gleichung von Swamee-Jain ermittelt (siehe [35] [36]). Alternative Kälte-träger wie z.B. Nanofluide und weitere Konzepte wie z.B. Wärmeübertragung mit Phasenwechsel in Heatpipes wurden in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner IfT untersucht.



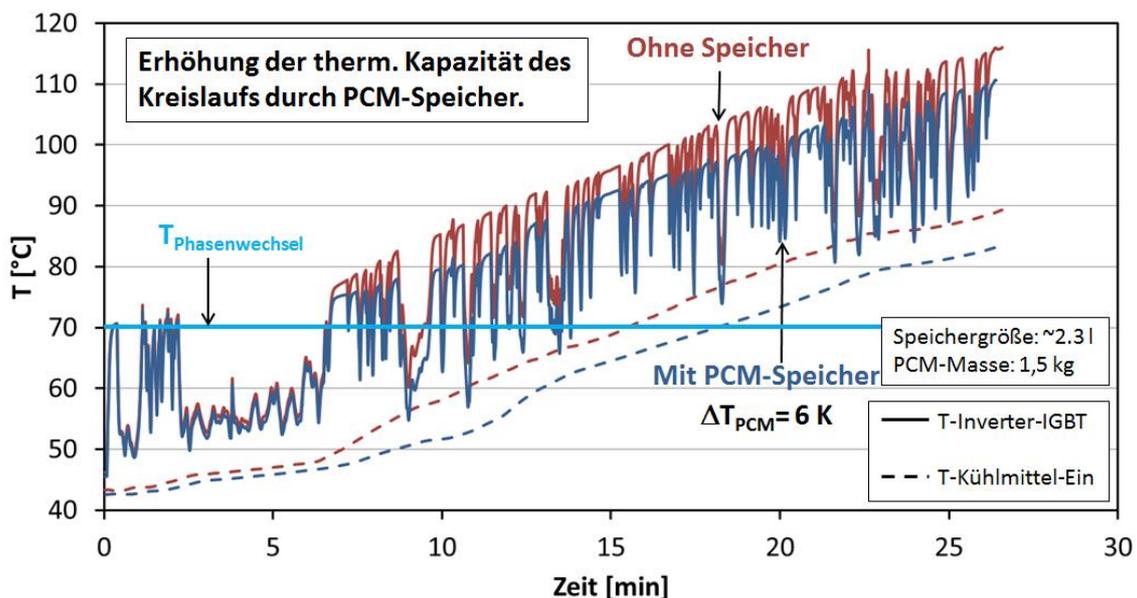
**Bild 8:** Typische Wärmestromdichten und Temperaturen für unterschiedliche Wärmequellen [13].



**Bild 9:** Wirkungsgrad für Voll- und Teillast einer unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV) bei unterschiedlichen Bauelementen [15].

### AP 2035 Wärmespeicherung

Im Rahmen des Projektes werden alternative Kühlkonzepte unter Verwendung von thermischen Speichern basierend auf Phasenwechselmaterialien und alternativen Kühlflüssigkeiten wie z.B. Nanofluiden betrachtet. Für die simulative Untersuchung von PCM-Materialien wird ein Modell für einen PCM-Speicher erstellt und in den Kühlkreislauf des thermischen Gesamtfahrzeugmodells eingebunden, um eine Potentialabschätzung durchführen zu können. Hierbei wurde eng mit dem Projektpartner IfT zusammen gearbeitet. Es zeigt sich hierbei, dass durch den Einbau eines PCM-Speichers die Kühlmitteltemperatur temporär geringfügig reduziert werden kann, wobei hierfür weniger der Speichereinfluss des PCM-Materials selber sondern in erster Linie die Vergrößerung der thermischen Masse des Kühlwassers maßgeblich ist (siehe Bild 10).



**Bild 10: Simulierte Kühlmitteltemperatur im Inverter-IGBT und Motor mit und ohne PCM-Speicher (angeordnet zwischen Kühlmittelpumpe und Inverter).**

### AP 2040 Simulationsmodell

Im Bereich der Modellerstellung wird eine detaillierte und physikalisch motivierte Modellbibliothek zur Beschreibung der hochintegrierten Antriebskomponenten entwickelt. Näheres ist bereits unter AP 2020 beschrieben worden.

Mittels dieser Modelle können im Rahmen der thermischen Gesamtfahrzeugsimulation sowohl die Temperaturen in den Kühlkanälen als auch in den Halbleitern simulativ für verschiedene Fahrzeugkonfigurationen und Fahrzustände dynamisch abgeschätzt werden. Für die thermische Modellierung der Leistungselektroniken im thermischen Gesamtfahrzeugmodell wird das Kühlkreislaufmodell mit dem Batteriekühlkreislauf und dem Klimaanlagekreislauf, einem thermischen Modell für die Fahrzeugkabine und einem mechanischen Modell für

das Fahrzeug verknüpft. Das mechanische Modell berechnet anhand von Fahrscenarien die entsprechenden Größen wie Drehzahl, Drehmoment und Fahrleistung.

Das für die Untersuchung herangezogene E-Fahrzeugmodell ist mit den Fahrzeugdaten eines typischen Kleinwagens parametrisiert. Als Randbedingungen werden neben dem NEFZ und einem kombinierten typischen Stadt- und Überlandfahrzyklus (BS-WOB-Zyklus) auch extreme Fahrscenarien herangezogen: verschiedene Passfahrten über den Towne-Pass in Kalifornien, den Mont Ventoux in Südfrankreich und die Glockner Hochalpenstraße in Österreich (siehe AP 1070). Als Klimarandbedingungen werden zunächst gemittelte Klimarandbedingungen für E-Fahrzeuge in Ballungszentren unter Berücksichtigung des Einflusses von innerstädtischen Wärmeinseln für mediterranes Klima in Spanien, kontinentales Klima in Süd-USA (Arizona) und tropisches Klima in Süd-China (Guangdong) ermittelt (siehe AP 1075). Ausgehend von diesen mittleren Randbedingungen werden im nächsten Schritt typische Extremwerte für die entsprechenden Passfahrten ermittelt. Weiterhin wird die Temperatur- und Dichteverteilung entsprechend höhenabhängig berechnet.

Das thermische Gesamtfahrzeugmodell ermöglicht eine dynamische Simulation des gesamten Fahrzeugsystems und eine dynamische Berechnung des transienten Temperaturverlaufs in den Leistungselektroniken und allen weiteren Kühlkreislaufkomponenten, in der Batterie sowie der Kabine.

Durch die Verknüpfung der unterschiedlichen Simulationsmodelle wird dadurch ein leistungsfähiges Werkzeug zur Auslegung und Optimierung von Fahrzeug-Klimatisierungs- und Kühlkonzepten zur Verfügung gestellt.

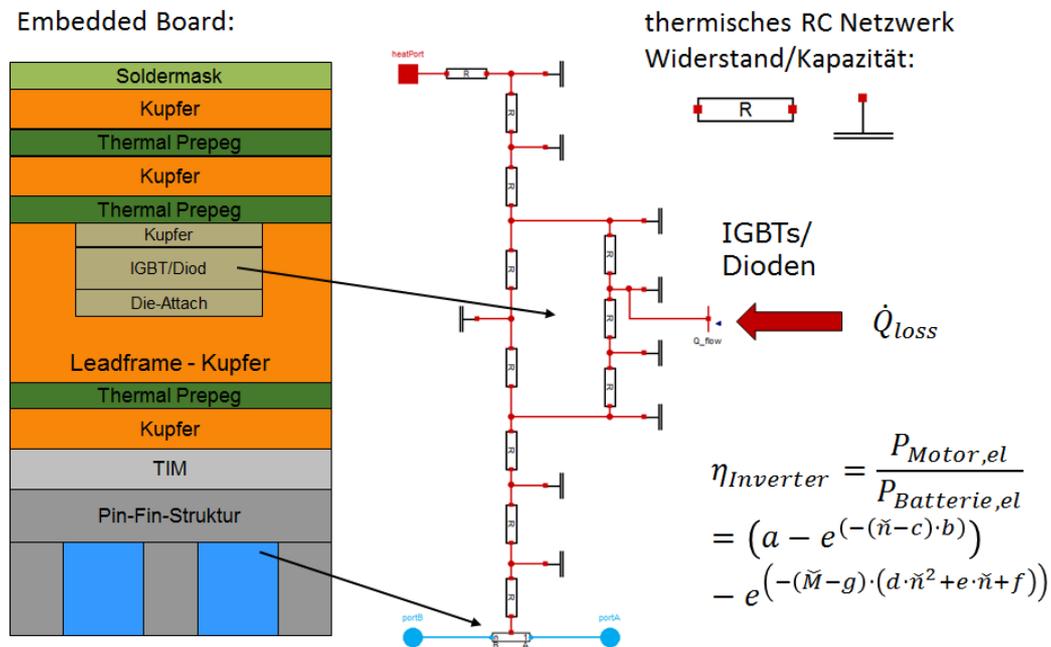
Hiermit wird es möglich, verschiedene Anlagen- und Geometrieparameter wie beispielsweise die Kühlergröße und die Verschaltung des Kühlkreislaufs so zu optimieren, dass z.B. die Übertragungsfläche des Kühlers minimiert werden kann, während die Halbleitertemperaturen für extreme Fahrzustände unterhalb der einzuhaltenden kritischen Temperatur bleiben [24]-[27].

Die Simulationsmodelle für die untersuchten Elektronik-Komponenten werden basierend auf der TIL-Suite erstellt. Hiermit werden Modelle für die Leistungselektroniken wie den Inverter, den DC/DC-Wandler, das Bordladegerät sowie den Elektromotor implementiert (siehe [29]). Für die thermische Modellierung des Inverters wird nach Bild 11 das verwendete Embedded Board als eindimensionales RC-Netzwerk abgebildet. Der Wärmeübergang in der Pin-Fin-Struktur wird näherungsweise über eine durchströmte Rohrgeometrie mit typischen Wärmeübergangskoeffizienten modelliert. Die Verlustwärme der IGBTs berechnet sich anhand eines Kennfeldes für den Inverter Wirkungsgrad als Funktion der Drehzahl und des Drehmomentes.

Das thermische Verhalten des Elektromotors wird nach Bild 12 über ein RC-Netzwerk abgebildet, das die thermischen Widerstände und Kapazitäten innerhalb des Motors berücksichtigt. Die Berechnung der Verlustwärme des Motors erfolgt über ein physikalisches Modell, das die wesentlichen Verluste wie die Kupferverluste, die Eisenverluste, die mechanischen

Verluste sowie die Zusatzverluste erfasst (siehe [16], [17], [18]). Aufgrund der hochintegrierten Bauweise, in der Motor und Getriebe in einer Komponente kombiniert sind, werden die Getriebeverluste nicht durch ein getrenntes Modell berücksichtigt sondern durch den mechanischen Verlustanteil im Motormodell.

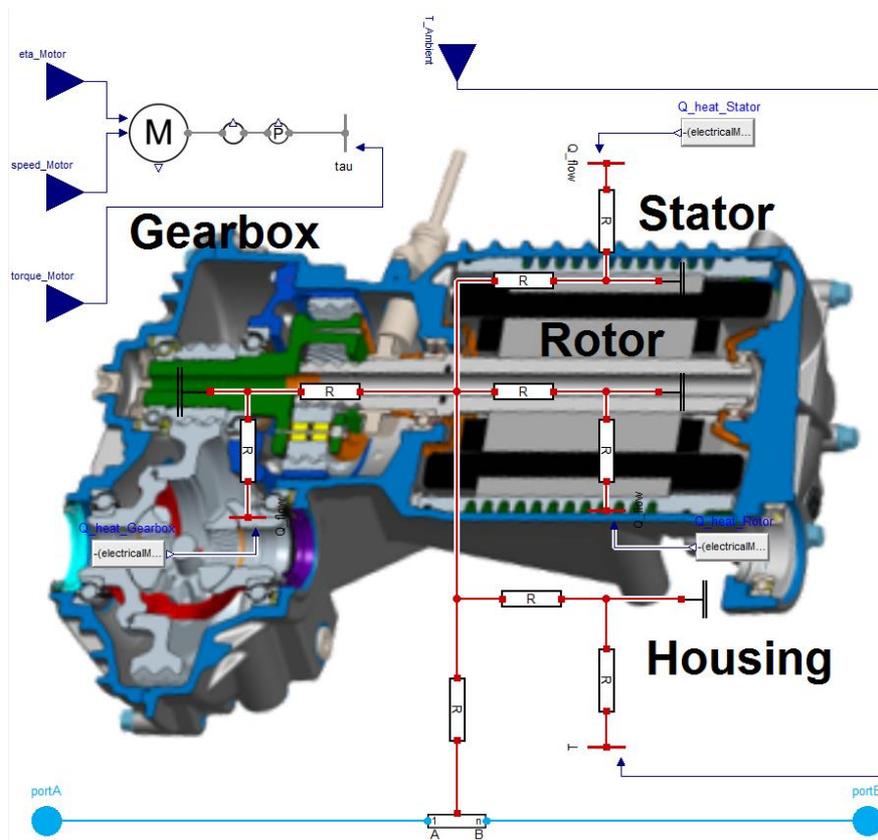
Das thermische Batterieverhalten wird über einen Modellierungsansatz beschrieben, der die thermischen Verluste in den einzelnen Batteriezellen in Abhängigkeit von Ladezustand, Spannung und Temperatur berechnet. Für das transiente thermische Verhalten werden die Wärmeleitwiderstände und die Kapazitäten der verwendeten Materialien berücksichtigt (siehe [22]). Das Batteriemodul wird über einen eigenen Kühlkreislauf gekühlt, der mit dem Gesamtkühlkreislauf des Fahrzeugs sowie mit einem Chiller der Klimaanlage verbunden ist.



**Bild 11: Thermische Modellierung des Embedded Boards als RC-Widerstandsnetzwerk.**

Das thermische Verhalten der Fahrzeugkabine wird über ein eindimensionales Kabinenmodell mit einem Luft-Innenraumvolumen abgebildet. Neben den Insassen werden die thermischen Eigenschaften der Sitze, Wände und Verscheidungen sowie der Strahlungsaustausch mit der Umgebung als auch der Einfluss der Fahrgeschwindigkeit betrachtet (siehe [20], [21]).

Weiterhin wird der R-134a Kältekreislauf mit drehzahlgeregelten E-Verdichter, Kondensator, Sammler, Expansionsventil und jeweils einem Verdampfer für die Innenraumluft sowie einem weiteren parallelgeschalteten Verdampfer (Chiller) für die Batteriekühlung unter der TIL-Suite abgebildet.

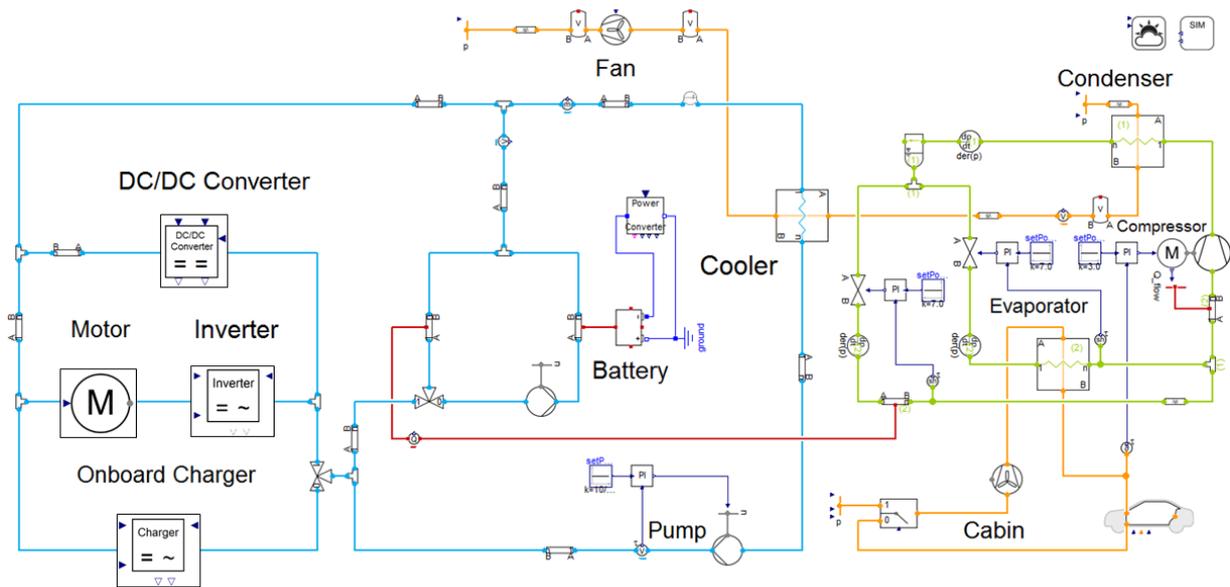


**Bild 12: Thermische Modellierung des Elektromotors mit Getriebe als RC-Widerstandsnetzwerk.**

### Gesamtfahrzeugsimulation

Bild 13 zeigt die Verschaltung des gesamten Kühl- und Kältekreislaufs zusammen mit den Luftpfaden für die Kühler- und Kondensatoranordnung sowie den Verdampfer-Kreislauf mit Frischluftzufuhr und Kabinenmodell. Der Kühlkreislauf gibt die von den Antriebskomponenten erzeugte Wärme über den Kühler an die Umgebungsluft ab. Die verschiedenen Elektronikkomponenten wie Inverter, DC/DC-Konverter, Bordladegerät, Motor sowie die Batterie werden mittels Kühlwasser gekühlt.

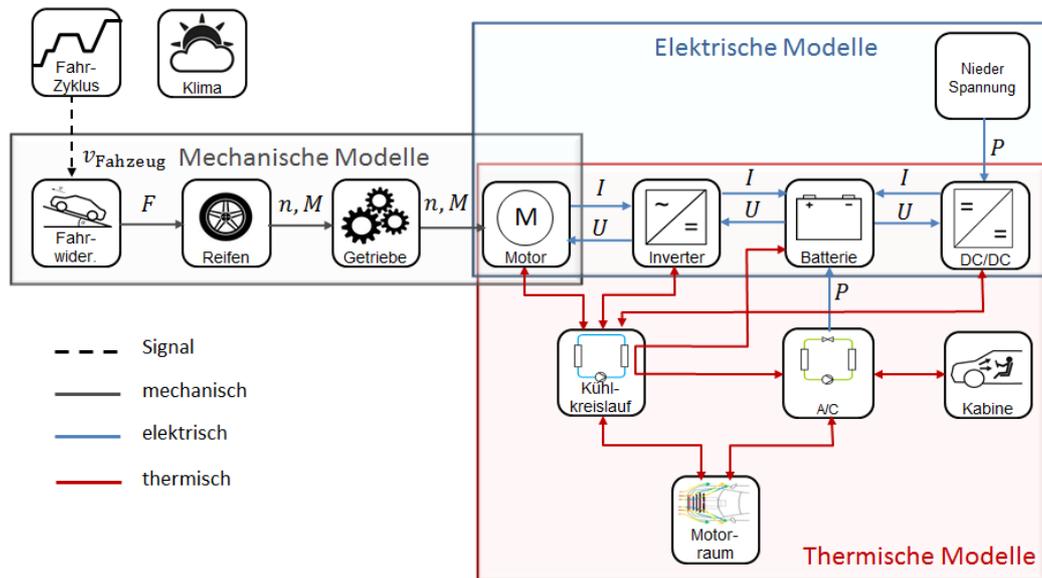
Für die Durchführung der Gesamtfahrzeugsimulation (siehe z.B. [25], [26], [27]) wird die Modellkette um das auf Seite 12 beschriebene mechanische Fahrzeugmodell erweitert, um die verschiedenen Fahrzustände abbilden zu können. Die Fahrzustände werden je nach Fahrscenario über verschiedene Fahrzyklen von außen vorgegeben. Das Verhalten des Fahrers wird über einen Regler abgebildet, der die Leistung regelt und über die jeweilige vom Kurvenradius abhängige Maximalgeschwindigkeit limitiert wird.



**Bild 13: Modell für Kühl- und AC-Kreislauf mit Fahrzeugkabine.**

Die Auslegung des Kühlsystems hinsichtlich der Kühlergröße und der Klimaanlage orientiert sich hierbei an einem entsprechenden konventionellen Fahrzeug mit Verbrennungsmotor. Aufgrund des deutlich niedrigeren Motorwirkungsgrades beim konventionellen Verbrennungsmotor gegenüber dem rein elektromotorischen Fahrzeug ergibt sich ein deutlich reduzierter Kühlwärmestrom. Allerdings wird im E-Fahrzeug eine niedrigere Kühlwassertemperatur im Vergleich zum konventionellen Verbrennerfahrzeug angestrebt, so dass sich eine niedrigere Temperaturdifferenz zur Umgebungsluft ergibt. Trotzdem ist mit einem deutlichen Optimierungspotenzial für den Kühler zu rechnen. Der Kühler ist zunächst wie im konventionellen Fahrzeug im Luftpfad seriell hinter dem Kondensator angeordnet (siehe Bild 13).

Bild 14 zeigt schematisch die Verknüpfung der verschiedenen Einzelmodelle zur Gesamtfahrzeugsimulation. Die Gesamtfahrzeugsimulation ermöglicht die detaillierte Betrachtung hochtransienter Fahrzustände und deren Auswirkungen auf die Chiptemperaturen der verwendeten Halbleiterbauelemente sowie der Motorkomponenten. Mit Hilfe dieser Werkzeugkette können Aussagen zur Auslegung des Kühlkreislaufes bis hin zur Lebensdauererwartung getroffen werden.



**Bild 14: Schematischer Aufbau der Gesamtfahrzeugsimulation bestehend aus mechanischen, elektrischen und thermischen Modellen sowie Fahrzyklen und Klimarandbedingungen.**

### AP 2045 Thermische Simulation

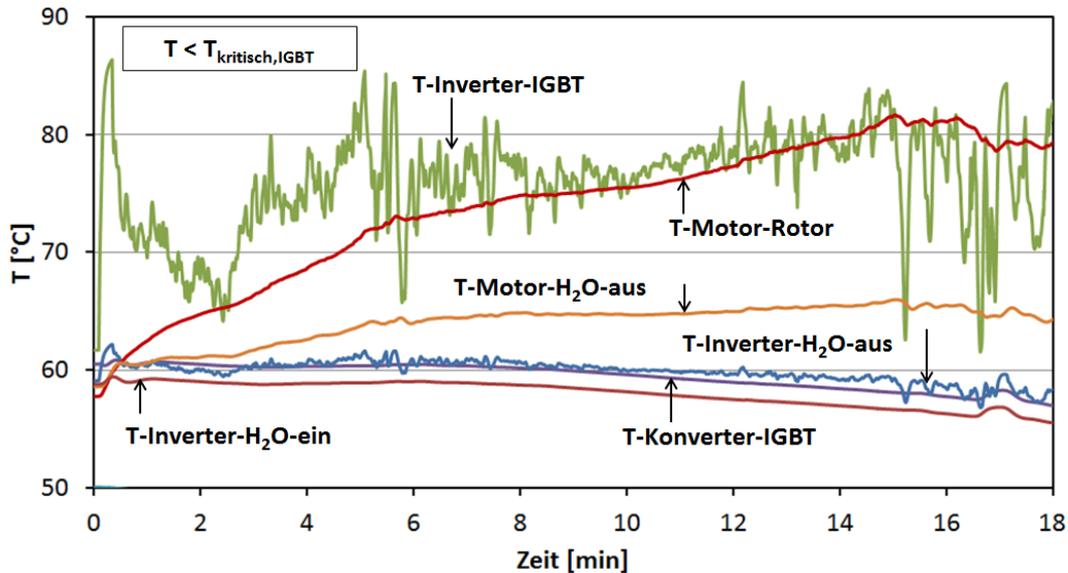
Bild 15 zeigt die Simulationsergebnisse einer Passfahrt über den Towne Pass für extreme Klimarandbedingungen mit einer Umgebungstemperatur von 50°C Taltemperatur. Die größten Temperaturgradienten und Maximaltemperaturen treten aufgrund der hohen transienten Lastwechsel im Inverter für die IGBTs im Embedded Board auf. Aufgrund der gleichmäßigen Leistungsabnahme im DC/DC Konverter ergeben sich hier im Gegensatz nahezu konstante Temperaturverläufe für die Halbleiter. Ein weiteres Augenmerk ist auf die Rotortemperatur des Elektromotors zu richten, da diese ähnliche Temperaturwerte wie die IGBTs im Inverter erreichen.

Die Halbleitertemperaturen bewegen sich während der gesamten Fahrt deutlich unterhalb der kritischen Temperatur von 150°C. Da sich die Auslegung des Kühlsystems hinsichtlich der Kühlergröße an einem konventionellen Fahrzeug mit Verbrennungsmotor orientiert, besteht hier ein Optimierungspotential. Allerdings wurde für die Simulation der im Rahmen des Projekts entwickelte Inverter abgebildet, der für eine etwa doppelt so große Peakleistung ausgelegt ist, wodurch die im Folgenden erzielten Ergebnisse etwas relativiert werden.

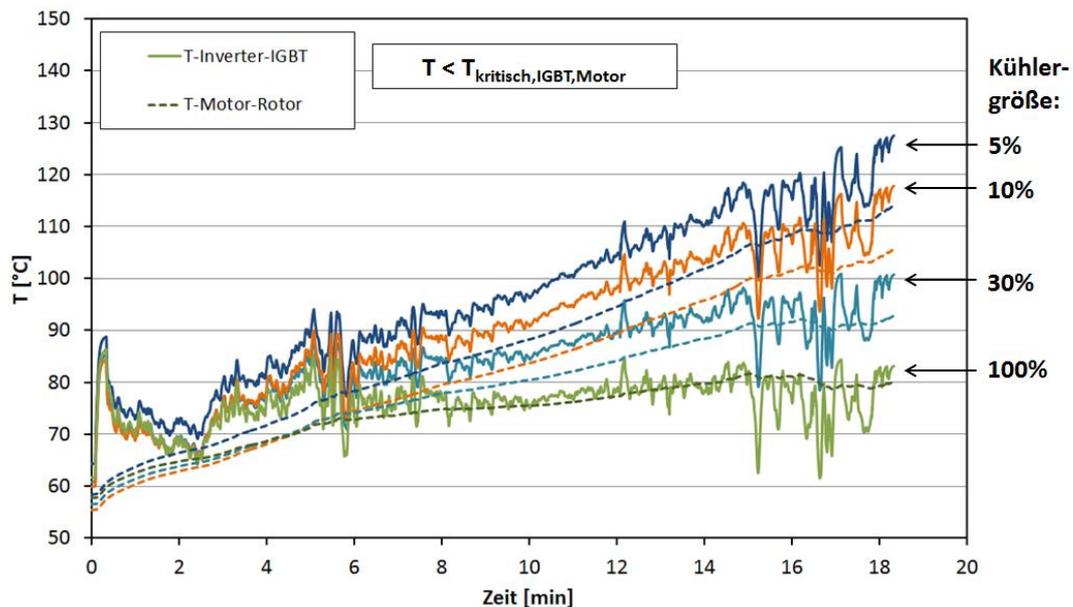
Bild 16 zeigt die Ergebnisse einer Simulationsrechnung mit sukzessiver Reduktion der Kühlerfläche. Die Variationsrechnung zeigt, dass selbst bei einer reduzierten Kühlerfläche die IGBT-Temperatur weiterhin im unkritischen Bereich bleibt.

Vergleichsrechnungen mit weiteren Passfahrten über die Glockner-Hochalpenstraße und den Mont Ventoux für eine auf 10% reduzierte Kühlerfläche bestätigen die optimierte Auslegung. Demnach kann die Kühler-Übertragungsfläche im Elektrofahrzeug aufgrund des höheren Wirkungsgrades und trotz der erzielten geringeren Kühlwassertemperatur deutlich klei-

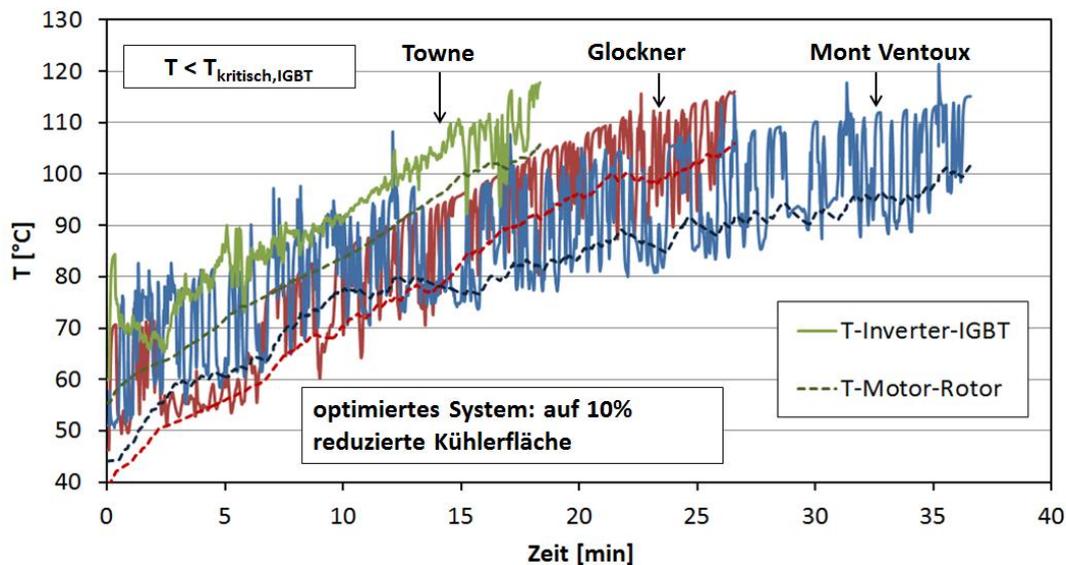
ner ausgeführt werden als im verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeug. Damit besteht die Möglichkeit, eine parallele Verschaltungsvariante von Kühler und Kondensator im Luftpfad zu wählen und die Kühlwassertemperatur um 5K gegenüber der seriellen Verschaltung zu reduzieren.



**Bild 15: Simulationsergebnisse für eine Passfahrt über den Towner Pass mit konventionellem Referenzkühlsystem.**



**Bild 16: Simulationsergebnisse für eine Passfahrt über den Towner Pass für ein optimiertes Kühlsystem mit reduzierter Kühlerfläche.**



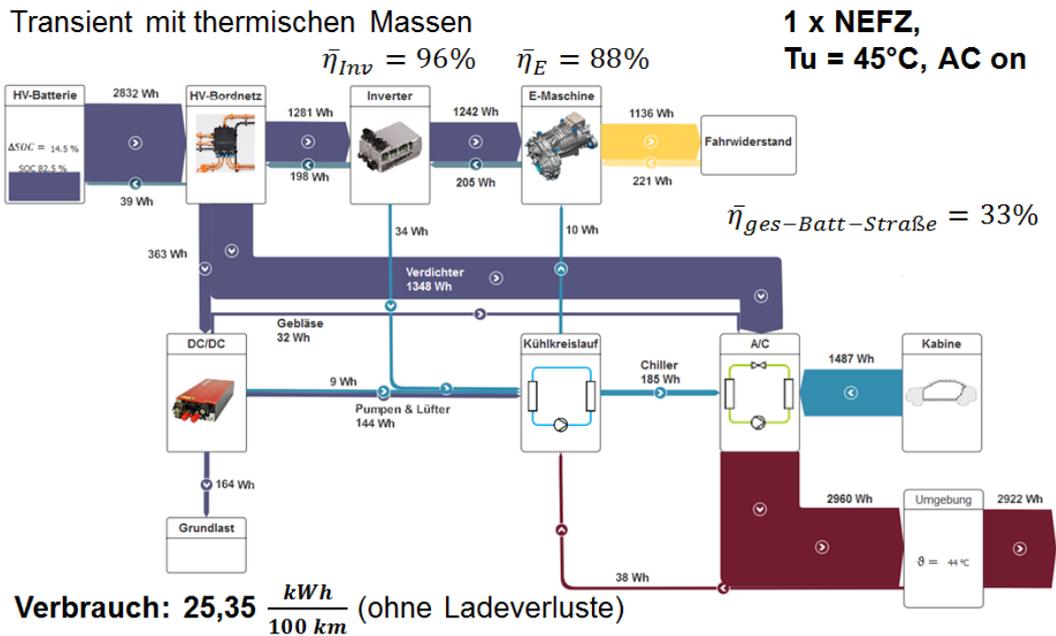
**Bild 17: Simulationsergebnisse für verschiedene Passfahrten über den Towne Pass, die Glockner-Hochalpenstraße und den Mont Ventoux mit optimiertem Kühlsystem.**

### Gesamtfahrzeugsimulation – Ergebnisse im Energiefluss-Diagramm

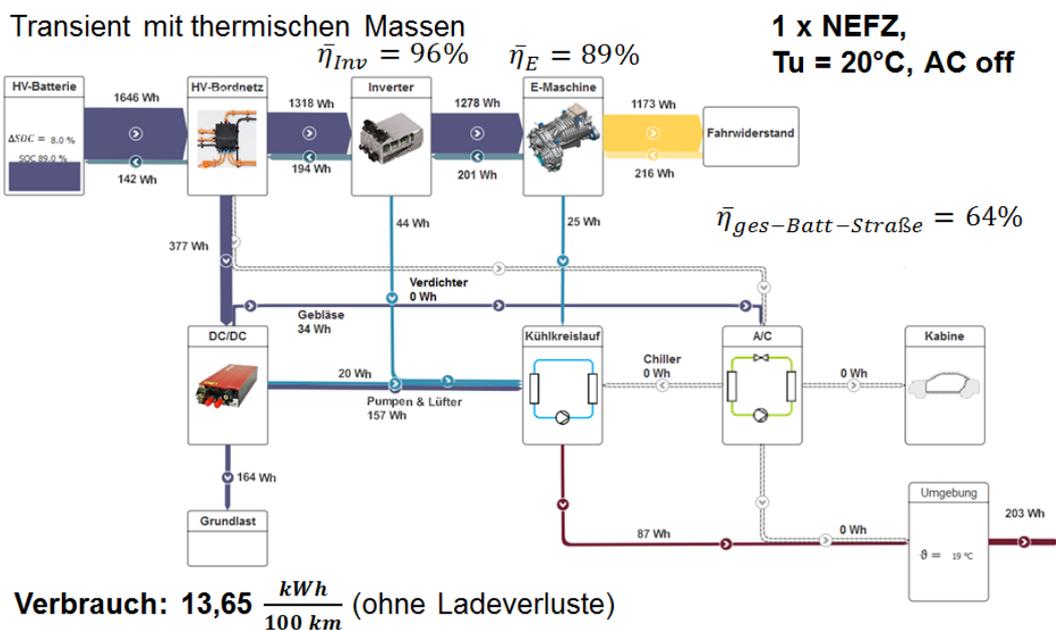
Bild 18 zeigt die Simulationsergebnisse der Gesamtfahrzeugsimulation aufbereitet in einem Energieflussdiagramm, das mit Hilfe der Software EnergyViewer der TLK-Thermo GmbH erstellt wurde. Dargestellt sind die Energieflüsse nach Durchfahrt eines NEFZ für eine Umgebungs- und Initialtemperatur von  $45^{\circ}\text{C}$  mit Klimaanlagebetrieb.

Der elektrische Energiefluss im Antriebsstrang für den Traktionsbetrieb ist violett und der Energiefluss im Rekuperationsbetrieb grau gekennzeichnet. Die Abwärme ins Kühlsystem und die Kabinenabwärme ist blau und die an die Umgebung abgegebene Wärme rot dargestellt. Es ist erkennbar, dass die vom Verdichter aufgenommene elektrische Energie ähnlich groß ist wie die vom Motor aufgenommene Energie. Für den Inverter kann der mittlere Wirkungsgrad mit 96% und für die E-Maschine im Motorbetrieb mit 88% aus dem Diagramm bestimmt werden. Es ergibt sich ein Verbrauchswert von  $25 \text{ kWh}/100 \text{ km}$  ohne Berücksichtigung der Ladeverluste.

Bild 19 zeigt die entsprechenden Simulationsergebnisse bei  $20^{\circ}\text{C}$  Umgebungs- und Initialtemperatur ohne Betrieb der Klimaanlage. Der Verbrauch ohne Ladeverluste liegt hier bei  $13,7 \text{ kWh}/100\text{km}$ .



**Bild 18:** Darstellung der Ergebnisse der Gesamtfahrzeugsimulation im Energieflussdiagramm nach Durchfahrt eines NEFZ bei einer Umgebungs- und Initialtemperatur von 45°C mit Klimaanlagebetrieb.



**Bild 19:** Darstellung der Ergebnisse der Gesamtfahrzeugsimulation im Energiefluss-diagramm. Nach Durchfahrt eines NEFZ bei einer Umgebungs- und Initialtemperatur von 20°C ohne Klimaanlagebetrieb.

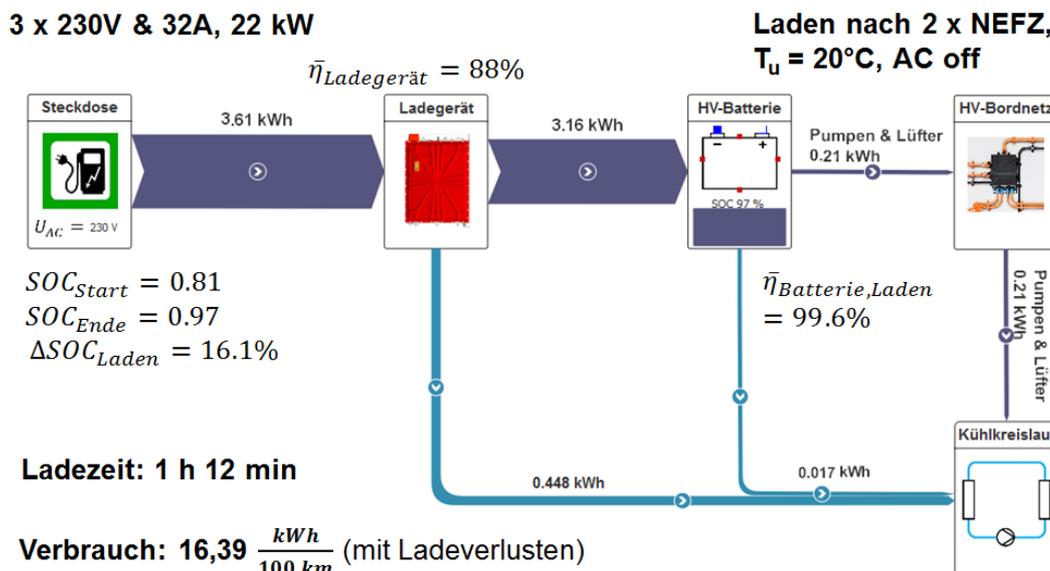
### Ladevorgang – Ergebnisse im Energiefluss-Diagramm – Verbrauchsermittlung

Bild 20 und Bild 21 zeigen simulierte Ergebnisse des Ladevorgangs im Energiefluss-Diagramm beim Schnellladen mit 22 kW (Bild 20) und beim Laden mit 1,8 kW (Bild 21). Der Ladevorgang wurde in Anlehnung an die EU-Norm L/138 (siehe [49]) folgendermaßen bei einer Umgebungstemperatur von 20°C abgebildet:

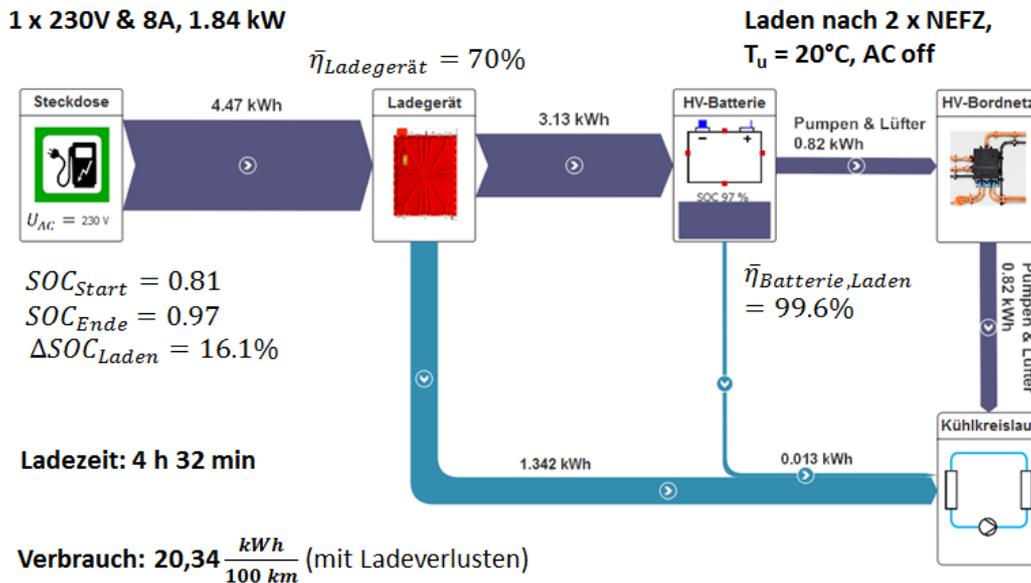
- Erstauffladung der Batterie
- Zweimaliges Durchfahren des NEFZ
- Laden der Batterie
- Berechnung des Stromverbrauchs

Für das Schnellladen mit 22 kW ergibt sich eine Ladezeit von 1 h 12 min, der Verbrauch mit Ladeverlusten beträgt 16,4 kWh/100km bei einem mittleren Wirkungsgrad des Ladegeräts von 88%. Beim Laden mit 8 A bzw. 1,8 kW dauert der Ladevorgang bereits 4 h 32 min, der Verbrauch mit Ladeverlusten erreicht 20,3 kWh/100km mit einem mittleren Wirkungsgrad des Ladegeräts von 70%.

Laut Literatur wird für den Smart ein Flottenverbrauch zwischen 15,1 km/100km und 19,2 kWh/100km angegeben (siehe [11] [12]).



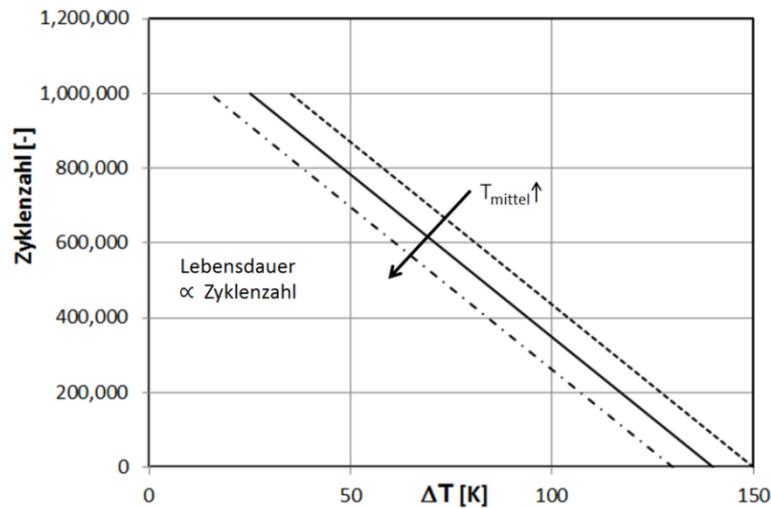
**Bild 20: Darstellung der Ergebnisse des Ladevorgangs mit 22 kW elektrischer Leistung im Energiefluss-Diagramm. Randbedingungen: Laden nach 2xNEFZ bei einer Umgebungs- und Initialtemperatur von 20°C ohne Klimaanlagebetrieb (siehe [49]).**



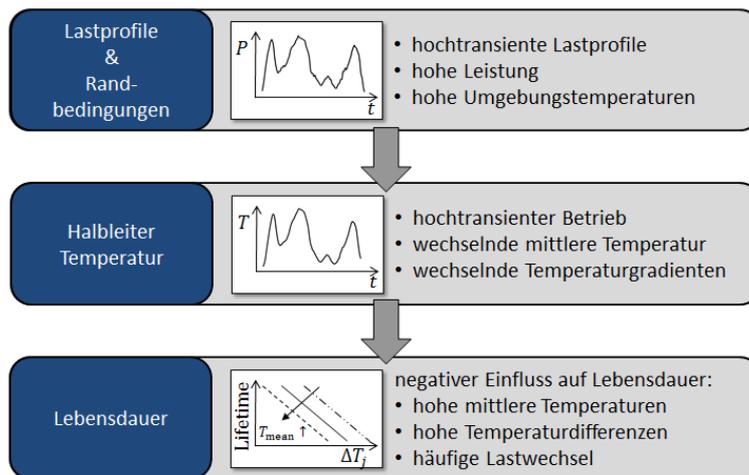
**Bild 21:** Darstellung der Ergebnisse des Ladevorgangs mit 1.84 kW elektrischer Leistung im Energiefluss-Diagramm. Randbedingungen: Laden nach 2xNEFZ bei einer Umgebungs- und Initialtemperatur von 20°C ohne Klimaanlagebetrieb.

### AP 2050 Lebensdauer Leistungselektronik

Aufgrund der stark transienten Betriebsweise von Elektrofahrzeugen ist für die Erzielung hoher Lebensdauern nach Bild 22 und Bild 23 eine ausreichende Lastwechselfestigkeit erforderlich [14]. Neben der Optimierung des Wirkungsgrades und der effizienten Kühlung ist daher die Steigerung der Lastwechselfestigkeit und damit der Lebensdauer auch ein wichtiges Ziel aktueller Entwicklungstätigkeiten. Unter Zugrundelegung der im Rahmen des Projekts herangezogenen Extremlastzyklen für ausgewählte Passfahrten (AP 1070) wurden mittels der Gesamtfahrzeugsimulation jeweils die transienten Temperaturwechsel im IGBT des Inverters abgeschätzt und den Projektpartnern zur Verfügung gestellt (siehe Bild 15 bis Bild 17).



**Bild 22: Lebensdauerzyklus eines IGBT-Moduls für einen typischen Lastwechsel, der durch den Betrieb des Fahrzeugs bei einem definierten Fahrzyklus entsteht [14].**



**Bild 23: Zusammenhang zwischen Lastprofilen, Randbedingungen, Halbleitertemperatur und Lebensdauer.**

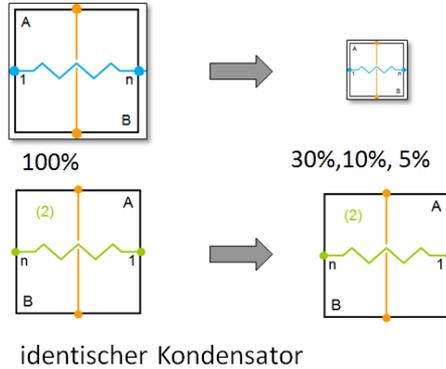
### AP 2090 Kühlkonzept

Im Rahmen des Projektes wurden verschiedene Kühlkonzepte diskutiert und unter extremen Randbedingungen untersucht (siehe AP 1050, AP 2040, AP 2045, AP 3010). Als die am besten geeignete Basisverschaltung des Kühlsystems wurde das Kühlkonzept nach Bild 13 ausgewählt. Für die Bewertung wurden verschiedene luftseitige Verschaltungen sowie Kühlergrößen simulativ untersucht, siehe Bild 24. Die Ergebnisse sind in Bild 17 dargestellt.

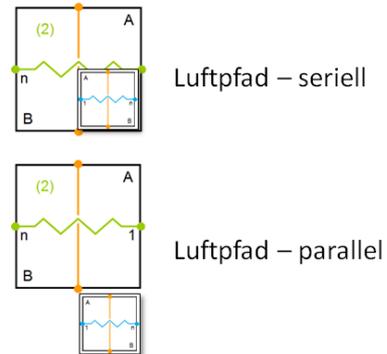
Referenz-Kühler: konventionelles Fahrzeug VKM

⇒ Fläche zu groß für E-Fahrzeug (Verlustwärme nur 10%)

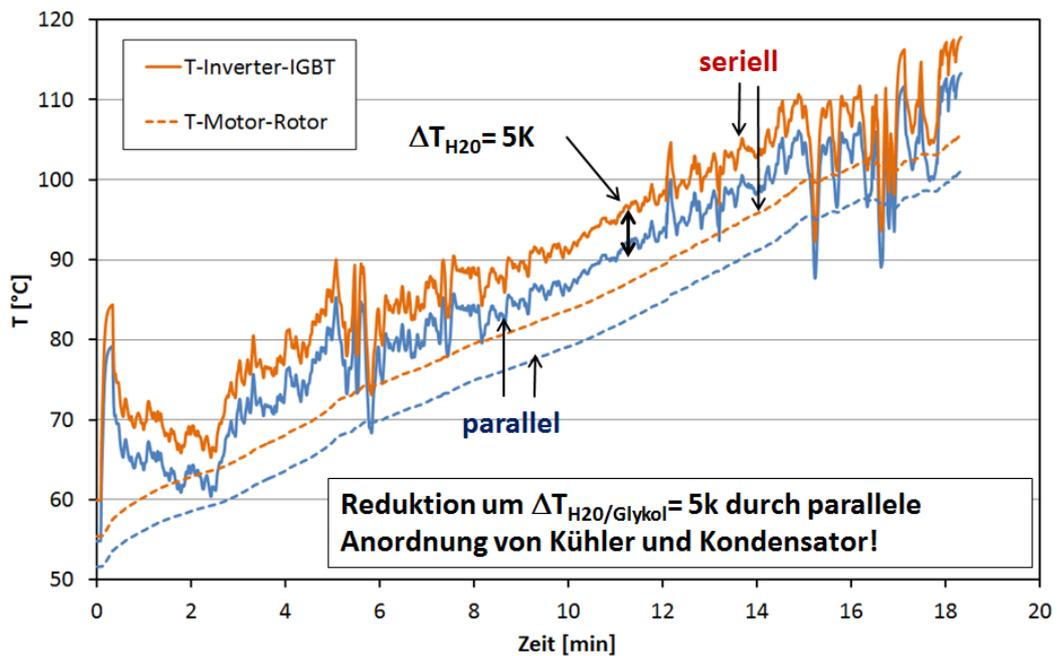
a) Verkleinerung Kühlerfläche:



b) Verschaltung luftseitig:



**Bild 24: Untersuchung verschiedener Kühlergrößen bei identischem Klima-Kondensator und verschiedenen luftseitigen Verschaltungen (seriell und parallel).**

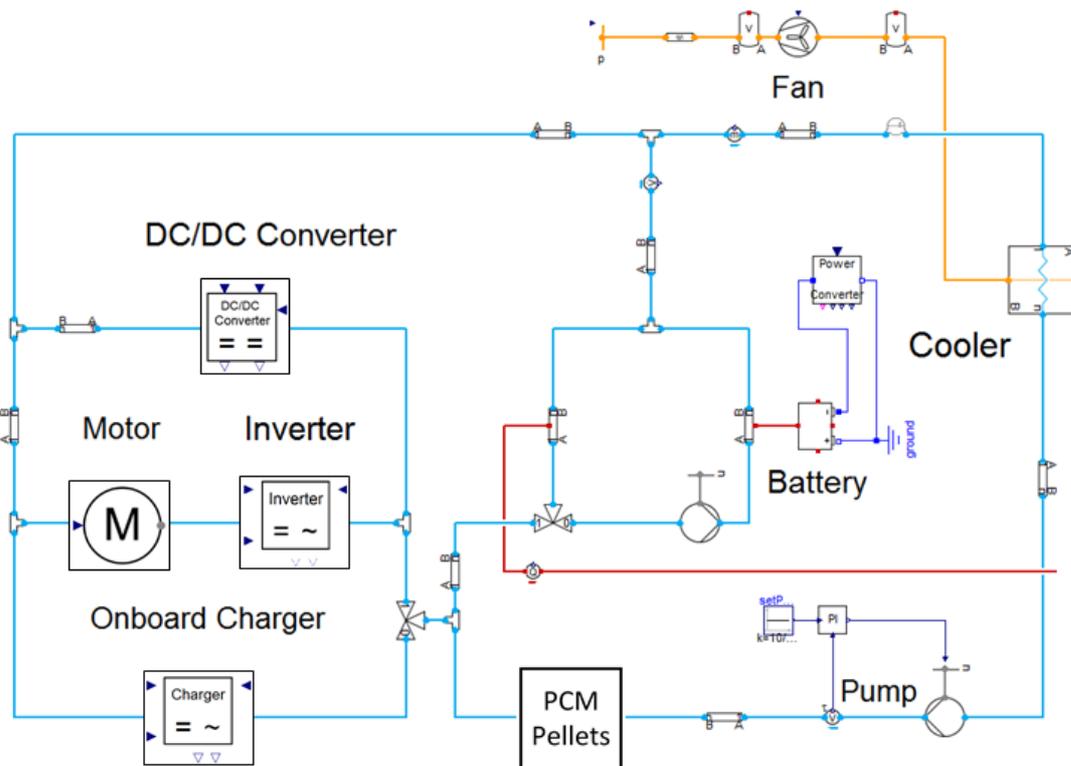


**Bild 25: Simulationsergebnisse für eine Passfahrt über den Towne Pass für ein optimiertes Kühlsystem mit reduzierter Kühlerfläche und luftseitig seriell bzw. parallel angeordnete Kombination aus Kondensator und Kühler.**

### 2.1.3. Weitere Arbeitspakete

#### AP 3010 Integrationskonzept

Durch den Einbau eines seriell in den Kühlkreislauf integrierten Wärmespeichers kann die Kühlmitteltemperatur bei extremen Randbedingungen kurzzeitig leicht gesenkt werden (siehe Bild 10 und Bild 26). Hierdurch kann das Gesamtkühlsystem etwas kleiner dimensioniert werden. Durch den Wärmespeicher wird etwas mehr Bauraum benötigt, wobei allerdings durch die höhere Effizienz bei extremen Lastbedingungen die übrigen Komponenten insbesondere der Kühler geringfügig kleiner dimensioniert werden kann. Siehe AP 2090, AP 2040, AP 2045.



**Bild 26: Kühlkreislauf mit seriell angeordnetem PCM Speicher.**

#### AP 3080 Bewertung der Konstruktion

Es zeigt sich, dass eine deutliche Reduktion der Kühlerfläche möglich ist. Optional ist statt der seriellen Anordnung von Klimakondensator und Kühler eine parallele Anordnung des Kühlers am Frontend des Fahrzeugs möglich (siehe AP 2045 und AP 2090). Hierdurch ergibt sich ein alternatives effizientes kostenreduziertes thermisches Konzept für die Dimensionierung und Anordnung der Frontend-Wärmeübertrager unter Minimierung des Bauraums.

**AP 5010 Definition Prüfumfang**

Basierend auf den in AP 1075 und AP 1075 ermittelten Fahrprofilen und Klimarandbedingungen wurden mit Hilfe des in AP 2040 entwickelten Gesamtfahrzeugmodells und der in AP 2045 durchgeführten Thermischen Simulation umfassende Fahrscenarien für die mögliche Vermessung am Prüfstand simulativ ermittelt. Die ermittelten Rand- und Extrembedingungen beschreiben sowohl das stationäre als auch das transiente Betriebsverhalten des Antriebsmoduls.

**AP 5020 Prüfung Inverter**

Die Inbetriebnahme des Inverters bei ZF wurde nur in einem sehr eingeschränkten Betriebsbereich ohne detaillierte thermische Vermessung durchgeführt, so dass der von TLK vorgeschlagene Prüfumfang nicht wie geplant durchgeführt werden konnte. Daher standen keine thermischen Messdaten zur Auswertung wie ursprünglich geplant zur Verfügung.

**AP 6070 Vermessung Fahrzeug**

Aufgrund des veränderten Zeitplans konnte die Vermessung nicht verwirklicht werden.

## 2.2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Im Verbundvorhaben Sphinx setzen sich beim Teilvorhaben der TLK-Thermo GmbH die Positionen des zahlenmäßigen Nachweises aus Personalkosten und Reisekosten zusammen. Im Schnitt wurde eine Stelle eines Projektingenieurs über 3 Jahre finanziert, wobei der Eigenanteil bei 50% der Gesamtkosten lag.

## 2.3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Bei der TLK-Thermo lagen die Schwerpunkte der Projektarbeit auf den AP 1000 Randbedingungen (Fahrprofil und Klima-Randbedingungen) und AP 2000 Grundlagen (Thermomanagement, Wärmeübertragung und Speicherung, Simulationsmodell, Thermische Simulation). Für die Bearbeitung der Arbeitspakete war im Schnitt über die 3 Jahre Projektlaufzeit ein Projektingenieur beschäftigt. Der geplante Kostenrahmen konnte eingehalten werden und alle Projektziele wurden erreicht.

Aufgrund der zahlreichen Projekttreffen beim Konsortialführer in Friedrichshafen und bei den weiteren Projektpartnern in Sindelfingen und München sowie aufgrund mehrerer Besuche auf Fachtagungen in Stuttgart, Potsdam und Braunschweig wurden entsprechende Reisemittel benötigt.

Aufgrund des positiven Projektverlaufs und der sehr guten intensiven Zusammenarbeit mit den Projektpartnern konnten nachhaltige Simulationswerkzeuge, -techniken und Regelstrategien für die thermische Simulation von Fahrzeugen mit hochintegrierten skalierbaren E-Fahrzeugantrieben auf Basis einer schnellaufenden Maschine erstellt und getestet werden. Weiterhin wurden entsprechende Fahrzyklen und Klimarandbedingungen im Rahmen einer simulativen Gesamtfahrzeuguntersuchung entwickelt.

Die im Rahmen des Projektes Sphinx geleisteten Arbeiten waren aus Sicht von TLK-Thermo notwendig und angemessen für die effiziente Erreichung der angestrebten Projektziele. Die daraus entstandenen Ausgaben waren daher das Resultat sowohl einer erfolgreichen Bearbeitung der Projekt-Aufgaben unter einer wirtschaftlichen und effizienten Verwendung der zur Verfügung gestellten Mittel. Aufgrund von verschiedenen Anschlussprojekten hat sich die Anzahl der Mitarbeiter von TLK-Thermo seit Projektende um mindestens 2-3 langfristige Stellen im Bereich der Softwareentwicklung und E-Fahrzeugsimulation erhöht. Insgesamt hat sich die Anzahl der festen Mitarbeiter von TLK-Thermo seit Antragsstellung von 25 auf inzwischen 38 vergrößert. Diese Entwicklung zeigt, dass der nachhaltige wirtschaftliche Nutzen, der aus aktuellen und zukünftigen Nachfolge-Projekten erwirtschaftet werden kann langfristig den eingesetzten Projektaufwand übertreffen wird. Damit ergibt sich langfristig eine deutlich positive Bilanz bei der Durchführung einer Kosten-Nutzen-Analyse.

## 2.4. Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse nach Verwertungsplan

Im Projekt Sphinx wurden große Fortschritte bei der Entwicklung neuer Simulationstechniken und -modelle erzielt im Bereich Kühlkreisläufe und der Kühlung von Elektronikkomponenten. Insbesondere wurden dynamisch thermische Modelle der Leistungselektroniken von Inverter, DC/DC-Wandler und OnBoard Charger sowie ein dynamisch thermisches Modell der Motor/Generatoreinheit erstellt und in eine Gesamtfahrzeugsimulation eingebunden. Weiterhin wurden Regelstrategien für das Laden und den Betrieb von Elektrofahrzeugen entwickelt sowie klimatische Randbedingungen und Fahrprofile erarbeitet, die im Rahmen der Gesamtfahrzeugsimulation angewendet und evaluiert werden konnten. Aufgrund des gewonnen Erkenntnisgewinns sowie neuer Komponentenmodelle, Regelkonzepte und Randbedingungen können zahlreiche zukünftige Kundenprojekte in unterschiedlichen Anwendungsbereichen bearbeitet werden (z.B. E- und Hybrid-Fahrzeuge wie Pkw, Busse und Lkw, stationäre Klima- und Kälteanlagen in Gebäuden wie Supermarkt, Fabrikhallen, Büro- und Wohnhäusern, ...).

Bezüglich der Anschlussfähigkeit des Sphinx-Projekts sind bei TLK folgende Maßnahmen geplant bzw. schon in der Durchführung (siehe auch Verwertungsplan im Antrag):

- Durchführung neuer Kundenprojekte unter Anwendung der neu gewonnenen Erkenntnisse auf dem Gebiet der Regelungskonzepte (Thermomanagement im E-Fahrzeug, Elektrobus).
- Vermarktung der klimatischen Randbedingungen und Ermittlung weiterer Klimadaten im Kundenauftrag für weitere Regionen (Anschlussprojekte sind schon in der Bearbeitung).
- Verbesserte Simulationsmodelle, -techniken und Simulationsansätze für weitere thermische Modelle aus anderen Bereichen (Klimaverdichter, Batterie, Kühlkreislauf).
- Transfer auf andere Anwendungsgebiete: Anwendung der Konzepte des hochintegrierten Systems auf andere Bereiche, z.B. in der mobilen Klimatechnik (elektrische Verdichter mit integriertem Inverter für Pkw & Busse) und stationären Kühlung von Schaltschränken & Leistungselektronik.
- Erfolgte Publikation auf Fachtagungen (VDI Thermomanagement in Stuttgart, Symposium Hybrid and Electric Vehicles in Braunschweig, HdT Wärmemanagement in Potsdam).

## 2.5. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Im Förderprojekt „e-performance“ (siehe [10],[46]) wurde an einem energieeffizienten Thermomanagement auf Gesamtfahrzeugebene geforscht. Für die durchgeführten Simulationsrechnungen des Gesamtfahrzeugs wurden verschiedene Softwareprogramme verwendet und mit TISC gekoppelt. Es wurden verschiedene Kühlkreistopologien hinsichtlich möglicher Funktionen und daraus resultierender Einsparpotentiale vergleichend

analysiert. Es stellte sich heraus, dass aufgrund unterschiedlicher Temperaturanforderungen zwei separate Kühlkreise, zum einen für die Traktionsbatterien, zum anderen für die übrigen Antriebstrangkomponenten, zielführend sind. Zudem zeigte sich, dass elektrisch regelbare Wasserpumpen und Proportionalventile durch eine bedarfsgerechte Volumenstromregelung des Kühlmediums den Energiebedarf zur Temperierung der Komponenten senken können.

Im Förderprojekt „Visio.M“ [47] wird höchste Effizienz durch ein sog. „Ganzheitliches Thermomanagement“ verfolgt. Hierbei werden nicht nur Heizung und Kühlung der Insassen sondern auch die Temperierung der Leistungselektronik in einem ganzheitlichen Thermomanagement-System integriert werden. Im Winter kann so die Abwärme des Elektromotors und der Leistungselektronik auch zur Heizung des Innenraums heran gezogen werden, und im Sommer kann Reservekapazität der Klimaanlage helfen, die Leistungselektronik zu kühlen.

Im Förderprojekt „Fleets-Go-Green“ [48] wurde unter anderem ein modulares Simulationsmodell für die Gesamtfahrzeugsimulation aufgebaut. Die Einzelkomponenten wie E-Maschine, Getriebe, Fahrer und Fahrerumgebung wurden zum Teil mit FEM-Software erstellt. Das Modell für den Heiz- und Klimakreislauf und die Fahrerkabine wurde unter Modelica/Dymola mittels der TIL-Bibliothek erstellt, wobei hier das Augenmerk auf der Heizung und Kühlung des Fahrzeuginnenraums gelegt wurde.

## 2.6. Veröffentlichungen der Ergebnisse

Folgende Veröffentlichungen auf Fachtagungen wurden im Rahmen des Projektes bereits publiziert:

- *Fachvortrag mit IFT 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“.* [50]
- *Publikation mit Fachvortrag zusammen mit IFT auf dem 13. Braunschweiger Symposium: Hybrid- und Elektrofahrzeuge am 23.-24. Februar 2016 in Braunschweig. Titel: „Innovative Kühlkonzepte für Leistungselektroniken im E-Fahrzeug – eine simulative Studie“.* [51]
- *Publikation mit Fachvortrag mit IFT auf der Haus der Technik Fachtagung „Wärme-management des Kraftfahrzeuges X“ am 9.-10. Juni 2016 in Braunschweig. Titel: „Innovative Kühlkonzepte für Leistungselektroniken im E-Fahrzeug mit hochintegriertem Antriebsmodul – eine simulative Studie“.* [52]

### 3. Literaturverzeichnis

#### Simulation Modelica/TIL

- [1] **Schulze, C.:** A Contribution to Numerically Efficient Modelling of Thermodynamic Systems. Ph. D. thesis, Technische Universität Braunschweig, Germany, 2013.
- [2] **Tegethoff, W., Schulze, C. W., Gräber, M., Huhn, M., Stulgies, N., Kaiser, C., Loeffler M.:** TEMO - Thermische Echtzeitfähige Modelle. Abschlussbericht zu einem vom BMBF geförderten Verbundvorhaben mit den Förderkennzeichen 01IS08013A, 01IS08013B und 01IS08013C, Braunschweig 2011.
- [3] **Richter, C.:** Proposal of New Object-Oriented Equation-Based Model Libraries for Thermodynamic Systems. Ph. D. thesis, Technische Universität Braunschweig, Germany, 2008.
- [4] **Lemke, N.; Lemke, J.; Köhler, J.:** Secondary Loop System with PCM under different climatic Conditions, 4th European Workshop on Mobile Air Conditioning, Vehicle Thermal Systems and Auxiliaries; Torino, Italien, Dezember 2011.
- [5] **Schulze et al:** Bewertung eines optimierten Kühlmittelkreislaufkonzepts in einer thermischen Gesamtfahrzeugumgebung hinsichtlich des Primärenergieverbrauchs, 8. Tagung „Wärme-management des Kraftfahrzeugs (incl. Energiemanagement)“, Berlin (2012).

#### Fahrzeuge & Elektromobilität

- [6] **Guy Weemaes:** GoingElectric Elektroauto Homepage: URL 10. März, 2016. [http://www.goingelectric.de/wp-content/uploads/11C929\\_01-e1339433507529.jpg](http://www.goingelectric.de/wp-content/uploads/11C929_01-e1339433507529.jpg).
- [7] **Heißing, B., Ersoy, M. & Gies, S. (Hrsg.):** Fahrwerkhandbuch, Auflage 3, Vieweg+Teubner ISBN 978-3-8348-0821-9, 2011
- [8] **Karle, Anton:** *Elektromobilität, Grundlagen und Praxis*, Carl Hanser Verlag München ISBN 978-3-446-44339-6, 2015.
- [9] **Schoblick, Robert:** *Antriebe von Elektroautos in der Praxis, Motoren, Batterietechnik, Leistungstechnik*, Franzis Verlag GmbH München ISBN 978-3-645-65166-0, 2013.
- [10] **Allmann, Christian et al.:** Forschungsprojekt e performance – Modularer Systembaukasten für elektrifizierte Fahrzeug. Cuvillier Verlag Göttingen ISBN 978-3-954-04526-6, 2014.
- [11] **Umweltbroschüre smart fortwo electric drive:** Herausgeber: Daimler AG, Mercedes-Benz Cars ,Stuttgart, URL 30. Januar, 2017. <https://www.smart.com>.
- [12] **ADAC-Test Smart electric drive:** ADAC Autotes, URL 30. Januar, 2017. [https://www.adac.de/\\_ext/itr/tests/Autotest/AT5037\\_smart\\_fortwo\\_coup\\_electric\\_drive/smart\\_fortwo\\_coup\\_electric\\_drive.pdf](https://www.adac.de/_ext/itr/tests/Autotest/AT5037_smart_fortwo_coup_electric_drive/smart_fortwo_coup_electric_drive.pdf).

#### Leistungselektronik & elektrische Komponenten

- [13] **Lutz, J.:** Halbleiter- Leistungsbaulemente, Auflage 2, Springer ISBN 978-3-642-29795-3, 2012.

- [14] **Specovius, J.:** Grundkurs Leistungselektronik, Auflage 6, Springer ISBN 978-3-8348-2447-9, 2013.
- [15] **Hintermann, R.; Pfahl, S.:** Energieeffizienz im Rechenzentrum – Ein Leitfaden zur Planung, zur Modernisierung und zum Betrieb von Rechenzentren. Band 2, BITKOM, BMUB, 2008.
- [16] **Fischer, R.:** Elektrische Maschinen, Auflage 16, Hanser ISBN 978-3-446-43813-2, 2013.
- [17] **Schoblick, R.:** Antriebe von Elektroautos in der Praxis, Auflage 16, Franzis ISBN 978-3-645-65166-0, 2013.
- [18] **Hofmann, W.:** Elektrische Maschinen. PEARSON ISBN 978-3-86894-009-1, 2013.
- [19] **Wintrich, A. et. al.:** Application Manual Power Semiconductors - SEMICRON. 2. Edition ISBN 978-3-938843-83-3, 2015.

#### Kabinenmodell und Klimatisierung

- [20] **Kaiser, C.; Försterling, S.; Strupp, C.; Lemke, N.; Sonnekalb, M.; Köhler, J.:** Simulation zur verbrauchsorientierten Bewertung von Omnibus-Klimatisierungskonzepten. In: Steinberg, P. (Hrsg.) ; Haus der Technik (Veranst.): Wärmemanagement des Kraftfahrzeuges VIII. Berlin : Expert Verlag, Juni 2012.
- [21] **Jugert, R.; Fischer, H.:** Fahrgastraumkonditionierung von Elektrofahrzeugen in Winterlastfällen. In: 3. VDI-Fachkonferenz Thermomanagement für elektromotorisch angetriebene PKW, Manching bei Ingolstadt, 5.-6. November 2014.

#### Batterie

- [22] **Varchmin, A.; Gräber, M.; Köhler, J.:** Modeling and Validation of a Multiple Evaporator Refrigeration Cycle for Electric Vehicles, 11th International Modelica Conference, Versailles, Frankreich, September 2015.
- [23] **Retzbach, Ludwig:** Akkus und Ladetechniken, Franzis Verlag GmbH Poing ISBN 978-3-7723-4170-0, 2008

#### Gesamtfahrzeugsimulation

- [24] **Kaiser, Christian:** Untersuchungen zur Effizienzsteigerung von Omnibusklimaanlagen, Ph. D. thesis to be published in 2017, Technische Universität Braunschweig, Germany.
- [25] **Kaiser, C.; Försterling, S.; Tegethoff, W.; Köhler, J.:** Untersuchungen von Regelstrategien für die Omnibusklimatisierung mit Hilfe einer Gesamtfahrzeugsimulation. In: Liu-Henke, X.; Buchta, R.; Quantmeyer, F. (Hrsg.): ASIM-Konferenz STS/GMMS, Februar 2012, ISBN 978-3-901608-39-1.
- [26] **Kossel, R.; Loeffler, M.; Bodmann, M.; Tegethoff, W.:** Verteilte Simulation von Energiesystemen im Fahrzeug. In: Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau 2010, VDI-Verlag, November 2010.
- [27] **Mennenga, M.; Egede, P.; Bodmann, M.; Mummel, J.; Sander, M.; Herrmann, C.; Kurrat, M. und Küçükay, F.:** Cyber-Physischer Ansatz zur Planung von Elektroflotten. In: 7. Wissenschaftsforum Mobilität vom 18. Juni 2015, Duisburg, 2015.

## Laden

- [28] **Roesky, O.; Bodmann, M.; Mummel, J.; Kurrat, M.; Köhler, J.:** Impact of Losses on the Charging Strategy of Electric Vehicles. In: Intelligente Transport- und Verkehrssysteme und –dienste Niedersachsen e.V. (Ed.). 12th Symposium Hybrid and Electric Vehicles, Braunschweig, Februar 2015, ISBN 978-3-937655-35-2.
- [29] **Mustafa, R.; Küçükay, F.; Boseniuk, F.; Ponick, B.; Tang, T.; Köhler, J.; Ulrich, B.; Mertens, A.:** Innovative electric vehicle modelling for energy management applications. In: Int. J. Vehicle Design, Vol. 68, No. 4, 2015.

## Klimadaten

- [30] **Strupp, N. C.; Lemke, N.; Köhler, J.; Böttcher, C.:** Klimatische Daten und PKW-Nutzung (Klimadaten und Nutzungsverhalten zu Auslegung, Versuch und Simulation an Kraftfahrzeug-Kälte-/Heizanlagen in Europa und den USA), DKV-Tagung, Berlin, November 2009, Ergebnisse: China, Europa, Indien, USA.
- [31] **Strupp, N. C.; Lemke:** Klimadaten und Pkw-Nutzung, Nutzungsverhalten zu Auslegung, Versuch und Simulation an Kraftfahrzeug-Kälte-/Heizanlagen in Europa, USA, China u. Indien, FAT-Schriftenreihe 224, September 2009.
- [32] **Remund, J., Kunz, S., Schilter, C.:** Software METEONORM: Handbook Version 7.0. URL 9. März, 2016.  
[http://www.meteonorm.com/images/uploads/downloads/mn71\\_software.pdf](http://www.meteonorm.com/images/uploads/downloads/mn71_software.pdf).

## Wärmeübertragung

- [33] **Baehr, H. D., Stephan K.:** Wärme- und Stoffübertragung. 2. Auflage, Springer-Verlag, ISBN 3-540-60374-3, S. 366, 1996.
- [34] **VDI Wärmetlas-Gnielinski:** G1 Durchströmte Rohre. 11. Auflage, VDI Verlag GmbH, ISBN 978-3-642-19980-6, 2013.
- [35] **Genić, Srbislav et al.:** A Review of Explicit Approximations of Colebrook's Equation. FME Transactions, VOL. 39, No 2, 68-71 (2011).
- [36] **Swamee, D.K., Jain, A.K.:** Explicit equations for pipe flow problems. J. Hydraul. Div. Am. Soc. Civ. Eng. **102**, 657–664 (1976).
- [37] **Randoll, R., Wondrak, W., Schletz, A.:** Dielectric strength and thermal performance of PCB-embedded power electronics, Microelectron. Reliab. **54** (2014) 1872–1876.
- [38] **Suganthi, K. S., Leela Vinodhan, V., Rajan, K. S.:** Heat transfer performance and transport properties of ZnO-ethylene glycol and ZnO-ethylene glycol-water nanofluid coolants. Appl. Energy **135**, 548–559 (2014).
- [39] **Jaworski, M.:** Thermal performance of heat spreader for electronics cooling with incorporated phase change material. Appl. Therm. Eng. **35**, 212–219 (2012).
- [40] **Das, S. K., Choi, S. U. S., Yu, W., Pradeep, T.:** Nanofluids. John Wiley & Sons, Inc. ISBN 9780470074732, 2007

- [41] **Mustafa et al:** Improved Energy Management Using Engine Compartment Isolation and Grille Shutter Control, SAE-Paper 2012-01-1203 (2012).

#### PCM Speicher

- [42] **Mayinger, F.:** Heat and cold storage with PCM. Springer Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-540-68556-2
- [43] **Mehling, H.; Cabeza, L., 2008:** Heat and cold storage with PCM. An up to date introduction into basics and applications. Springer Verlag, ISBN: 978-3-540-68556-2, Heidelberg, Germany
- [44] **Walter, C. et al., 2012:** Speicherverdampfer für Fahrzeuge mit Start-Stopp Funktion. PKW-Klimatisierung VII, Hrsg. Mager, Robert Expert Verlag ISBN: 978-3-8169-3113-3, Essen, Germany
- [45] **Bockholt, M., 2009:** Dynamische Optimierung von mobilen CO<sub>2</sub>-Klimaanlagen mit innovativen Komponenten, Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 2009

#### Forschungsprojekte e-Mobilität

- [46] **e performance:** Teilabschlussbericht der RWTH Aachen, Verbundprojekt: „e performance“ – Entwicklung und Aufbau eines batterieelektrischen Fahrzeugs. Förderkennzeichen 16N10656. Projektträger VDI/VDE Innovationen + Technik GmbH, Berlin, Aachen 2013.
- [47] **Visio.M:** BMBF Verbundprojekt.  
URL 30. Januar, 2017: <http://www.verbundprojekt-visiom.tum.de/home/>
- [48] **Fleets Go Green:** Ganzheitliche Analyse und Bewertung der Umwelteffizienz von Elektro- und Plug-In-Hybrid-Fahrzeugen in der Alltagsnutzung am Beispiel des Flottenbetriebs. Projektträger BMUB, Berlin, Braunschweig 2017.

#### Normen

- [49] **EU-Norm L 138/41 Anhang 7:** Regelung Nr. 101 der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UN/ECE) — Verfahren zur Messung des Stromverbrauchs von Fahrzeugen, die nur mit Elektroantrieb betrieben werden. 2012.

#### Publikationen im Rahmen des Projektes

- [50] **Försterling, S.; Heinke, S.; Lemke, N.:** Innovative Kühlkonzepte für Leistungselektroniken im E-Fahrzeug mit hochintegriertem Antriebsmodul - eine simulative Studie. In: Haus der Technik Fachbuch Band 143, Wärmemanagement des Kraftfahrzeugs X, Expert Verlag, 2016, ISBN 978-3-8169-3347-2.
- [51] **Heinke, S.; Försterling, S.; Lemke, N.:** Köhler, J.: Cooling Concepts for Power Electronics in Electric Vehicles – a Simulative Investigation. Hybrid and Electric Vehicles 13th Symposium, IST automotive nord, Braunschweig, 23.-24. Februar 2016, Tagungsband ISBN 978-3-937655-38-3
- [52] **Försterling, S.; Heinke, S.; Lemke, N.:** Kühlkonzepte für Leistungselektroniken im E-Fahrzeug - eine simulative Studie. 4. VDI-Fachkonferenz Thermomanagement für elektromotorisch angetriebene PKW, Stuttgart, 24.-25. November 2015.

## 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	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Försterling, Sven Lemke, Nicholas	5. Abschlussdatum des Vorhabens Dezember 2016
	6. Veröffentlichungsdatum August 2017
	7. Form der Publikation Abschlussbericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)  TLK-Thermo GmbH Hans-Sommer-Straße 5 38106 Braunschweig	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 01MY12001D
	11. Seitenzahl 41
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 53107 Bonn	13. Literaturangaben 52
	14. Tabellen 2
	15. Abbildungen 26
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	

## 18. Kurzfassung

Die Markteinführung und Verbreitung von Elektrofahrzeugen wird derzeit dadurch gebremst, dass Elektrofahrzeuge im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen deutlich teurer sind und eine geringere Reichweite haben. 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.

Im Rahmen des vorliegenden Beitrags wird ein thermisches Simulationsmodell zur dynamischen Wärmestromanalyse zwischen den hochintegrierten Komponenten Inverter, E-Maschine und Getriebe, sowie den externen Wärmequellen und -senken Kühlkreislauf, Klimakreislauf und Batterie vorgestellt. Das thermische Modell ist in eine Gesamtfahrzeugsimulation eingebettet um typische elektrofahrzeugspezifische Randbedingungen abbilden zu können. Für die Nachbildung des typischen Betriebs eines E-Fahrzeugs werden spezifische Klimadaten und Fahrscenarien verwendet. Für die Erstellung des Simulationsmodells wird die Simulationsbibliothek „TIL Suite“ unter der Programmiersprache Modelica/Dymola verwendet.

Ziel der Untersuchung ist die Auslegung und Bewertung von Kühlkonzepten für Leistungselektroniken unter Verwendung unterschiedliche Last- und Klimarandbedingungen. Hierfür werden auch alternative Kühlkonzepte unter Verwendung von thermischen Speichern basierend auf Phasenwechselmaterialien und alternativen Kühlflüssigkeiten wie z.B. Nanofluiden betrachtet.

Folgende Ergebnisse konnten im Rahmen dieses Vorhabens erzielt werden:

- Erstellung von thermischen Simulationsmodellen für Leistungselektroniken unter Modelica/Dymola.
- Aufbau eines thermischen Gesamtfahrzeugmodells.
- Werkzeugkette zur thermischen Auslegung von E-Fahrzeugen.
- Ermittlung gewichteter und extremer Klimarandbedingungen + extreme Fahrzyklen.
- Entwicklung von Modellen für innovative Kühlsysteme: PCM, Heatpipes, Nanofluide.
- Analyse von Temperaturverteilung in Leistungselektronik, Motor, Batterie, Kühlkreislauf, Luftpfad, Klimaanlage und Innenraum.
- Kühlsystem ist für Extrembedingungen ausreichend ausgelegt (konventioneller Kühler).
- Optimierung des Kühlsystems, u.a. deutliche Reduktion der Kühlerfläche möglich.
- Bewertung im Energieflussdiagramm: Ermittlung und Bewertung von Verlusten, Verbrauch und Reichweite.

Mit Hilfe der im Rahmen dieses Vorhabens durchgeführten Maßnahmen und entwickelten Simulationswerkzeugen können bestehende sowie zukünftig entwickelte Elektrofahrzeuge thermisch ausgelegt, optimiert und bewertet werden.

## 19. Schlagwörter

Thermische Simulation, Elektrofahrzeug, Klimarandbedingungen, Fahrzyklen, Extremfahrten, Kühlkreislauf, Fahrzeugelektronik, Gesamtfahrzeugsimulation

## 20. Verlag

## 21. Preis

## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN geplant	2. type of document (e.g. report, publication) Final report
3. title  Sphinx - Hochintegrierter, skalierbarer E-Fahrzeugantrieb auf Basis einer schnell laufenden Maschine	
4. author(s) (family name, first name(s)) Försterling, Sven Lemke, Nicholas	5. end of project December 2016
	6. publication date August 2017
	7. form of publication Final report
8. performing organization(s) (name, address)  TLK-Thermo GmbH Hans-Sommer-Straße 5 38106 Braunschweig	9. originator's report no.
	10. reference no. 01MY12001D
	11. no. of pages 41
12. sponsoring agency (name, address)  Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 53107 Bonn	13. no. of references 52
	14. no. of tables 2
	15. no. of figures 26
16. supplementary notes  Final report	
17. presented at (title, place, date)	

18. abstract

Currently market penetration of electric vehicles is slowed down due to their significantly higher prices and reduced cruising range compared to vehicles with internal combustion engines. However, for the future a growth in production and sales quantity is predicted allowing the use of new approaches to overcome the aforementioned challenges. With the research project "Sphinx" we want to contribute to this process by development and investigation of a highly integrated electric driving unit consisting of an electric machine, power electronics and a transmission. By means of integration of this components in one housing interfaces can reduced or even eliminated and the different components optimally matched. This results in an electronic driving unit with increased power density and at the same time decreased material and installation effort. Therefore high integration of the driving unit contributes to cost and weight reduction of electric vehicles.

An electric driving unit based on the principle of high-integration is developed, set up as a prototype and investigated as part of the project "Sphinx". Finally, an electric vehicle will be equipped with the developed driving unit to serve as a demonstrator. The following partners participate in this research project: ZF Friedrichshafen AG, Daimler AG, Infineon Technologies AG, TLK-Thermo GmbH and the TU Braunschweig.

In the scope of this work a thermal model for transient simulation and analysis of heat sources inside the components power electronics, electric machine and transmission as well as heat exchange between these components and the external heat sources and sinks cooling circuit, refrigeration cycle and high-voltage battery is presented. Combining this thermal model with a mechanical vehicle model enables to obtain the necessary driving performance and therefore the load at the different components under varying drive cycles. For the ambient conditions, climatic conditions in different regions around the world were evaluated with a focus on typical driving scenarios for electric vehicles. The thermal vehicle model is based on the model library "TIL Suite" using the modeling language Modelica.

The objective of this work is the design and evaluation of cooling concepts for power electronics in electric vehicles for different load and climatic conditions. This includes the investigation of alternative cooling concepts for example the use of thermal storage units based on phase change materials or novel heat transfer fluids such as Nanofluids.

Following results were achieved in the scope of this work:

- Implementation of thermal models for power electronics using Modelica/Dymola.
- Development of thermal entire vehicle simulation model.
- Development of tool chain for thermal design of electric vehicles.
- Weighted average and extreme climate conditions and drive cycles.
- Development of models for innovative cooling systems: pcm, heatpipes, nanofluids
- Investigation of temperature distribution in power electronics, motor, battery, cooling cycle, air pathway, A/C-system and cabin.
- Cooling system is adequate designd for extrem conditions (cooler size for conventional vehicle).
- Optimization potential i.a. significant reduction of cooling area possible.
- Assessment in Energy flow chart: calculation and representation of losses, energy consumption and range.

The measures implemented and simulation tools developed in the scope of this work can be used for consisting and prospective developed electric cars in order to design optimize and evaluate vehicles thermally.

19. keywords

thermal simulation, electric vehicle, climatic conditions, drive cycle, extreme driving conditions, cooling cycle, vehicle electronics, entire vehicle simulation

20. publisher

21. price