



Thomas Weustenfeld

---

# Heiz- und Kühlkonzept für ein batterieelektrisches Fahrzeug basierend auf Sekundärkreisläufen



Audi-Dissertationsreihe, Band 122





# Heiz- und Kühlkonzept für ein batterieelektrisches Fahrzeug basierend auf Sekundärkreisläufen

Von der Fakultät für Maschinenbau  
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde  
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte  
DISSERTATION

von: Thomas A. Weustenfeld  
aus: Herdecke

eingereicht am: 10. September 2016  
mündliche Prüfung am: 21. Juni 2017

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Köhler  
Prof. Dr. rer. nat. Ludwig Brabetz

2017



## **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2017  
Zugl.: (TU) Braunschweig, Univ., Diss., 2017

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2017  
Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen  
Telefon: 0551-54724-0  
Telefax: 0551-54724-21  
[www.cuvillier.de](http://www.cuvillier.de)

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.  
1. Auflage, 2017

Gedruckt auf umweltfreundlichem, säurefreiem Papier aus nachhaltiger Forstwirtschaft.

ISBN 978-3-7369-9627-4  
eISBN 978-3-7369-8627-5



# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als Doktorand bei der AUDI AG unter wissenschaftlicher Betreuung des Instituts für Thermodynamik der Technischen Universität Braunschweig zwischen 2012 und 2016. Über die vier Jahre der Entstehung dieser Arbeit haben mich viele Menschen begleitet, denen ich zu tiefem Dank verpflichtet bin.

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Köhler von der Technischen Universität Braunschweig danke ich für die inhaltliche Betreuung der Arbeit sowie zahlreiche interessante Anregungen, die meinen Horizont stets erweitert haben. Prof. Dr. rer. nat. Brabetz danke ich für seine Tätigkeit als Zweitgutachter und das aufrichtige Interesse. Mein ganz besonderer Dank gilt Dr.-Ing. Wilhelm „Willi“ Tegethoff, der mir fachlich und menschlich ein Vorbild bleiben wird. Zahlreiche interessante und intensive Diskussionen haben die Arbeit zu dem gemacht, was sie jetzt ist.

Des weiteren möchte ich mich bei den Mitarbeitern der Abteilung „Simulation Strömungstechnik/Thermomanagement Elektrifizierte Fahrzeuge“ für die kollegiale und freundschaftliche Zusammenarbeit bedanken. Insbesondere möchte ich meinem Vorgesetzten Dr.-Ing. Strasser für die bedingungslose Unterstützung und das entgegengebrachte Vertrauen bedanken. Dr.-Ing. Werner Bauer-Kugelmann danke ich für die vielen fachlichen Diskussionen und seine ausgeglichene Art, die mir geholfen hat, das Ziel nicht aus den Augen zu verlieren. Ich danke zudem meinen ehemaligen Vorgesetzten Dr. techn. Wolfgang Puntigam, Alois Stauber und Alwin Schludi sowie ehemaligen Kollegen Ernst-Peter Wachsmann und Dr.-Ing. Jan-Erik Körner für die Initiierung des Projektes. Zudem danke ich Dieter Walter für seine ansteckende und rastlose Innovationskraft.

Ein besonderer Dank gilt meinem Doktoranden-Kollegen Dr.-Ing. Jan Christoph Menken für viele fachliche und auch „über-fachliche“ Diskussionen. Neben vielen gemeinsamen Veröffentlichungen und Projekten bedanke ich mich für die entstandene Freundschaft. Mit seinen grundlegenden Untersuchungen zu Sekundärkreislaufsystemen hat er wichtige Voraussetzungen für diese Arbeit geschaffen.

Für ihren außerordentlichen Einsatz danke ich unseren ehemaligen Studenten Manuel Schwarz, Sophie Havenstein, Adrian Lenz, Jonathan Krost, Julian Beyer, Martin Ricke, Miguel Ángel Gaspar Celda, Patrick Schmidt, Claudia Cöper, Johannes Walter, Lukas Zollner und Constantin Sfirnaciuc.

Zuletzt danke ich meiner Familie, für ihr Verständnis und entgegengebrachtes Vertrauen, insbesondere meinen Eltern bin ich für ihre stets bedingungslose Liebe zutiefst dankbar. Allen voran danke ich meiner Mutter Dr. Traudel Weustenfeld für das Korrekturlesen nicht-ender Textabschnitte, die sie von drei Kontinenten der Welt erreichten. Shanshan Zheng danke ich für viel Geduld, Vertrauen und schöne Momente außerhalb der Doktorarbeit.

Ingolstadt, August 2017

Thomas Weustenfeld

I



# Kurzfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Untersuchung und Herleitung eines neuartigen Heiz- und Kühlsystems für ein batteriebetriebenes Fahrzeug. Das System basiert auf zwei Ansätzen: Zum einen dient ein kompakter Kältemittelkreislauf der zentralen Bereitstellung von Heiz- und Kühlleistung. Zum anderen erfolgt eine einfache Anbindung von thermischen Quellen und Senken über Sekundärkreisläufe. Im Rahmen dieser Arbeit werden neuartige Methoden zur systematischen Ableitung von Funktionen, Betriebsstrategien, Verschaltungsplänen und Simulationsmodellen für ein solches System mit Hilfe der Graphentheorie erarbeitet.

Dem konventionellen, verbrennungsmotorisch angetriebenem Fahrzeug stehen heute elektrische und teilelektrische Antriebskonzepte gegenüber. Mit dem Entfall des Verbrennungsmotors als zuverlässige Wärmequelle für die Innenraumklimatisierung sowie Heiz- und Kühlanforderungen neuer Antriebskomponenten ändern sich auch Heiz- und Kühlsysteme grundlegend. Verteilte Heiz- und Kühlsysteme müssen ganzheitlich betrachtet werden, um eine effiziente Nutzung der vorhandenen Energie zu gewährleisten und somit den negativen Einfluss auf die Reichweite batteriebetriebener Fahrzeuge im Kundenbetrieb zu minimieren.

Durch die Anwendung einer neuen Bewertungsmethode, die das statistisch repräsentative Nutzungsverhalten mit realen Klimaprofilen abbildet, werden erstmalig reale thermische Anforderungen an das Heiz- und Kühlsystem untersucht. Dazu wird ein Gesamtfahrzeugmodell eines batterieelektrischen Fahrzeugs vorgestellt. Dieses besteht aus einem Längsdynamik- und Antriebsstrangmodell zur Vorhersage thermischer Verluste der elektrischen Antriebskomponenten sowie einem Klimasystemmodell zur Vorhersage stationärer und transients Klimatisierungsbedarfe.

Im Mittelpunkt dieser Arbeit steht eine neue Methode zur Identifikation erforderlicher thermischer Energieströme zwischen Quellen und Senken des Heiz- und Kühlsystems bei gleichzeitiger Berücksichtigung von Temperaturdifferenzen, die für die Übertragung von Wärme Voraussetzung sind. Durch Anwendung der Methode werden energieflussbasierte Betriebsstrategien unter Annahme eines idealisierten Thermomanagements abgeleitet. Im Rahmen einer statistischen Analyse werden identifizierte Betriebsarten klassifiziert sowie Auftretishäufigkeiten und Wechselwirkungen für die Betriebsfälle Heizen/Kühlen und Entfeuchten untersucht.

Aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen folgt die systematische Ableitung, Untersuchung und Optimierung hydraulischer Realisierungen, die sich aus der energieflussbasierten Analyse ergeben. Dabei wird eine neue graphentheoretische Methode zur halbautomatisierten Ableitung von Simulationsmodellen beliebiger Verschaltungspläne erarbeitet. Die Anwendung der Simulationsmethoden erfolgt für die Bewertung eines ganzjahrestauglichen thermischen Energiespeichers hinsichtlich der Steigerung der elektrischen Reichweite.





# Summary

The objective of this thesis is to study and establish a novel heating-and-cooling system for battery electric vehicles. This system is based on two principles: First, a compact refrigeration unit provides heating and cooling power centrally. Second, using secondary fluid loops simplifies the way thermal sources and thermal sinks are integrated. By applying graph theory, this work develops new methods for systematic deduction of functions, operational strategies, system designs and simulation models.

Nowadays, electric or partial-electric drive trains coexist with conventional combustion-engine-powered vehicles. The design for vehicle heating-and-cooling systems are undergoing rapid changes. This is because electric vehicles do not rely on combustion engine as the heat source for cabin heating. Furthermore electric vehicles have their own heating and cooling demands due to the incorporation of new drive train components. Various subsystems must be considered holistically in order to ensure most efficient usage of available energy and thus minimize the negative impact on real-world electric driving range.

This thesis also applies a new method using statistically-representative customer usage and climate profiles to the study real-world thermal demands of the heating and cooling system for the first time. This requires a model of a battery electric vehicle, which consists of a longitudinal dynamics model, a drive train model, and a climate system model. The longitudinal dynamics and drive train model are used to predict thermal losses of electric drive train components, while the climate system model is used to predict steady state and transient heating and cooling loads for interior air conditioning.

Central to this thesis is a new method for identifying the necessary thermal energy flows among components of the heating-and-cooling system while simultaneously considering temperature differences required for heat transfer. Using the new method, energy-flow-based operation modes are identified under the assumption of an ideal thermal management. Within the scope of a statistical analysis, such identified operation modes are classified and also their probability of occurrence and interaction is studied.

Finally, hydraulic realizations are derived (from the discovered energy-flow-based operation modes), analyzed and optimized. A new method generalizing the simulation of arbitrary coolant flow loops is developed. This simulation method evaluate a year-round available thermal energy storage system with respect to its ability to increase electric driving range.





# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b>	<b>III</b>
<b>Summary</b>	<b>V</b>
<b>1 Einleitung und Motivation</b>	<b>1</b>
1.1 Grundlagen und Stand der Wissenschaft . . . . .	2
1.2 Ziele der Arbeit und wissenschaftlicher Beitrag . . . . .	11
1.3 Vorgehensweise und Aufbau . . . . .	11
<b>2 Nutzungsverhalten, klimatische Randbedingungen und thermische Anforderungen</b>	<b>13</b>
2.1 Nutzungsverhalten bei Elektrofahrzeugen . . . . .	13
2.2 Klimatische Randbedingungen . . . . .	15
2.3 Relevante Randbedingungen und thermische Anforderungen . . . . .	15
2.4 Thermische Anforderungen des Innenraums . . . . .	17
2.5 Typische klimatische Randbedingungen für die drei Betriebsmodi Heizen, Kühlen und Entfeuchten . . . . .	18
2.6 Thermische Anforderungen des Antriebsstrangs . . . . .	21
<b>3 Systemkomponenten des Heiz- und Kühlsystems</b>	<b>23</b>
3.1 Elektrischer Zuheizler . . . . .	23
3.2 Umgebungswärmeübertrager . . . . .	24
3.3 Kompakter Kältemittelkreislauf . . . . .	25
3.4 Thermischer Energiespeicher . . . . .	30
<b>4 Methode zur strukturierten Herleitung erforderlicher thermischer Energieströme</b>	<b>35</b>
4.1 Annahmen zur Ableitung idealisierter Energieströme . . . . .	35
4.2 Definition von Systemkomponente, virtuellem Knoten und Funktion . . . . .	36
4.3 Eigenschaften der erforderlichen virtuellen Knoten . . . . .	41
4.4 Beschreibung der erforderlichen Funktionen . . . . .	44
4.5 Simulationsmodell und Berechnung der Betriebsarten . . . . .	46
4.6 Beispiele zur Veranschaulichung der energieflussbasierten Methode . . . . .	47
4.7 Diskussion und wissenschaftliche Einordnung . . . . .	48
<b>5 Strukturierte Herleitung erforderlicher thermischer Energieströme für das untersuchte BEV</b>	<b>51</b>
5.1 Dynamische Nutzungs- und Klima-Randbedingungen auf Basis von 48 repräsentativen Tagesfahrzyklen . . . . .	51
5.2 Betrachtung von zwei simulierten Tagesverläufen . . . . .	52
5.3 Statistische Analyse für die Region USA . . . . .	58
<b>6 Graphenbasierte Methode zur Simulation generischer Fluidkreisläufe</b>	<b>67</b>
6.1 Definition von Verschaltung und Verschaltungsplan . . . . .	67
6.2 Übersicht über das Simulationsmodell . . . . .	68
6.3 Methode zur thermischen Simulation beliebiger Verschaltungen . . . . .	71
	VII



## Inhaltsverzeichnis

6.4	Methode zur Berechnung von Verschaltungen aus Verschaltungsplänen bei gegebenen Stellwerten . . . . .	75
6.5	Diskussion und wissenschaftliche Einordnung . . . . .	77
<b>7</b>	<b>Realisierung der erforderlichen thermischen Energieströme durch ein Sekundärkreislaufsystem</b>	<b>81</b>
7.1	Freiheitsgrade bei der Realisierung von Funktionen . . . . .	81
7.2	Herleitung eines Verschaltungsplans . . . . .	83
7.3	Betrachtung von drei praxisrelevanten Fragestellungen . . . . .	88
<b>8</b>	<b>Energieflussoptimierte Integration eines thermischen Energiespeichers</b>	<b>97</b>
8.1	Anwendungen für einen thermischen Speicher . . . . .	97
8.2	Vor- und Nachteile eines thermischen Speichers . . . . .	98
8.3	Dimensionierung des thermischen Speichers . . . . .	98
8.4	Anpassung Verschaltungsplan und Betriebssystem . . . . .	103
8.5	Reichweitenanalyse mit Berücksichtigung der klimaabhängigen Unsicherheit	104
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>109</b>
	<b>Anhang</b>	<b>111</b>
<b>A</b>	<b>Dynamische Temperatur- und Leistungsbedarfe der Innenraumklimatisierung</b>	<b>113</b>
A.1	Aufgaben der Fahrzeugklimatisierung . . . . .	113
A.2	Modellierung des Fahrgastraums . . . . .	114
A.3	Modellierung des Klimageräts . . . . .	116
A.4	Modellierung und Anpassung des Klimareglers . . . . .	119
A.5	Simulation instationärer Klimatisierungsbedarfe . . . . .	123
<b>B</b>	<b>Dynamische Temperatur- und Leistungsbedarfe des Antriebsstrangs</b>	<b>127</b>
B.1	Angenommene Fahrzeugparameter . . . . .	129
B.2	Modellierung von Längsdynamik und Antriebsstrang . . . . .	130
B.3	Modellierung der Hochvolt-Batterie . . . . .	131
B.4	Thermische Modellierung der elektrischen Antriebskomponenten . . . . .	132
B.5	Simulation typischer Verlustwärmern . . . . .	134
<b>C</b>	<b>Graphen zur Beschreibung von thermodynamischen Systemen</b>	<b>135</b>
<b>D</b>	<b>Listen, Tabellen und Übersichten</b>	<b>143</b>
D.1	Übersicht Heiz- und Kühlsysteme für BEVs und PHEVs . . . . .	143
D.2	Auftrittshäufigkeiten von klimatischen Randbedingungen . . . . .	147
D.3	Automatisch generierte Übersicht aller Funktionen . . . . .	150
D.4	Übersicht prozessnaher Regler und Betriebsstrategie . . . . .	151
D.5	Überblick Simulationsmodell . . . . .	153
D.6	Modell Kühlerlüfter . . . . .	154
<b>E</b>	<b>Alle identifizierten energieflussbasierten Betriebsarten</b>	<b>155</b>
	<b>Nomenklatur</b>	<b>169</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>175</b>

# 1 Einleitung und Motivation

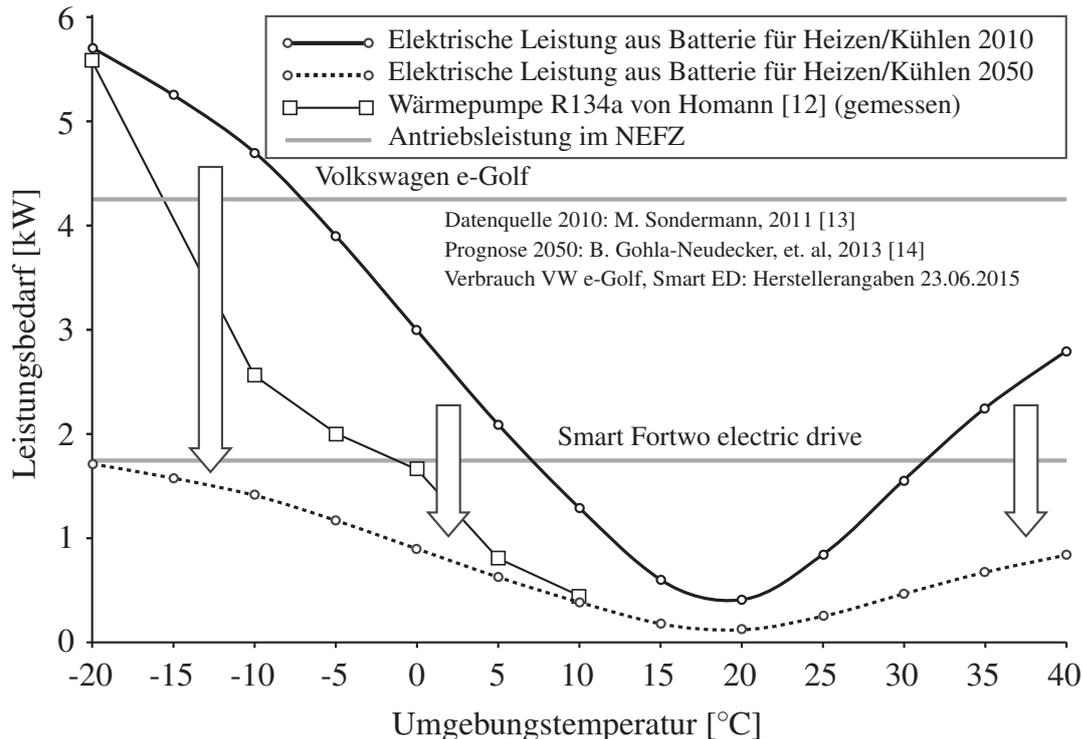
Elektrofahrzeuge (Battery Electric Vehicle - BEV) und Plug-In-Hybridfahrzeuge (Plug-In Hybrid Electric Vehicle - PHEV) sind eine vielversprechende Antwort auf zukünftige Fragestellungen der Energie- und Umweltpolitik. Die Europäische Umweltagentur (EUA) gibt an, dass im Jahr 2009 ca. 20% der durch die EU-15-Staaten emittierten Treibhausgase auf den straßengebundenen Transportsektor zurückzuführen waren [1]. In vielen Märkten wie Europa, USA und Japan werden heute und in den kommenden Jahren CO<sub>2</sub>-Grenzwerte vorgeschrieben und weiter verschärft. Zum April 2009 trat die EU-Verordnung zur Festsetzung von Emissionsnormen für neu zugelassene Automobile in Kraft [2]. Diese schreibt den CO<sub>2</sub>-Ausstoß für Neuwagenflotten aller Hersteller in Europa vor. Bis zum Jahr 2020 muss dieser auf durchschnittlich 95 g CO<sub>2</sub> pro Kilometer gesenkt werden. Sollten im Jahr 2025 Flottenziele unterhalb von 60 g/km gesetzlich vorgeschrieben sein, müssten BEVs und PHEVs in einem großen Umfang im Markt abgesetzt werden [3].

Den noch zaghafte Adaptionsraten (12 363 Neuzulassungen reiner Elektrofahrzeuge in Deutschland im Jahr 2015 [4]) von Fahrzeugen mit alternativem Antrieb stehen gesellschaftliche Megatrends und sozioökonomische Faktoren wie eine zunehmende Urbanisierung gegenüber. Diese können nachhaltige Veränderungen der Mobilitätsbedürfnisse zur Folge haben, welche die Nachfrage nach emissionsfreien und hocheffizienten elektrisch angetriebenen Fahrzeugen erwarten lassen [5].

Bei Elektrofahrzeugen ist das Heiz- und Kühlsystem der größte energetische Nebenverbraucher. Dies begründet sich durch den Entfall der Verbrennungskraftmaschine als Wärmeversorger sowie zusätzliche Temperierungsbedarfe von Antriebskomponenten wie der Batterie [6]. Der Verbrauch elektrischer Energie hat dabei unmittelbare Auswirkung auf die elektrische Reichweite des Fahrzeugs. Bis zu 40% der Reichweite kann durch den Einfluss äußerer Randbedingungen, insbesondere der Temperatur, verloren gehen ([7], [8], [9]). In bestimmten Situationen ist es möglich, dass Heiz- und Kühlsysteme mehr elektrische Energie aufnehmen, als für den Antrieb des Fahrzeugs erforderlich ist. Es müssen daher Lösungen gefunden werden, um die Energieeffizienz von Heiz- und Kühlsystemen zu steigern.

Abbildung 1.1 zeigt den elektrischen Energieverbrauch des Heiz- und Kühlsystems in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur. Dabei wird eine Wärmebereitstellung durch einen Widerstandsheizer als Stand der Technik 2010 angenommen. Bei einer Umgebungstemperatur von  $-20^{\circ}\text{C}$  können im stationären Betrieb ca. 6 kW elektrische Energie für das Heizen des Fahrgastraums erforderlich sein. Wird das Fahrzeug nicht vorgeheizt, sind im instationären Betrieb elektrische Leistungsaufnahmen von bis zu 10 kW möglich ([10], [11]). Ein Wärmepumpensystem ist eine Möglichkeit zur Reduktion des Bedarfs an elektrischer Energie [12]. Zum Vergleich enthält Abbildung 1.1 die durchschnittliche Antriebsleistung eines *Smart Fortwo electric drives* und eines *Volkswagen e-Golfs* im Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) entsprechend Herstellerangaben. Es wird deutlich, dass das Heiz- und Kühlsystem abhängig von den Umgebungsbedingungen einen deutlichen Einfluss auf die Reichweite haben kann.

## 1 Einleitung und Motivation



**Abbildung 1.1:** Stationäre Leistungsaufnahme des Heiz- und Kühlsystems mit Widerstandsheizern für ein batterieelektrisches Fahrzeug im Jahr 2010 und geschätzt für das Jahr 2050 ([14], [13]); zudem ein Wärmepumpensystem mit dem Kältemittel R134a [12].

Um die thermischen Anforderungen zukünftiger Fahrzeugarchitekturen mit rein elektrifiziertem Antriebsstrang erfüllen zu können, müssen neue energieeffiziente Klimatisierungs- und Thermomanagementkonzepte entwickelt werden. Dabei sind sowohl der Insassenkomfort als auch die spezifischen Temperaturanforderungen verschiedener Komponenten zu berücksichtigen. Das Thermomanagement des Fahrzeugs ist damit eine Schlüsseltechnologie für den Erfolg der Elektromobilität. Nach Prognosen von Gohla-Neudecker et al. [14] werden bis zum Jahr 2050 Senkungen des vom Heiz- und Kühlsystem verursachten Energieverbrauchs um ca. 60% erwartet. Dies macht ein ganzheitliches Thermomanagementkonzept mit einer intelligenten Verknüpfung der thermischen Quellen und Senken erforderlich.

### 1.1 Grundlagen und Stand der Wissenschaft

Während die Entwicklung verbrennungsmotorischer Antriebe mehr als 100 Jahre andauerte, sind Fahrzeuge mit alternativem Antrieb erst in den letzten 10 Jahren in den Fokus der aktiven Entwicklung gerückt. Heiz- und Kühlsysteme haben sich daher auch deutlich geändert. In der historischen Entwicklung war zunächst die Kühlung von Komponenten des Antriebsstrangs wie Verbrennungsmotor oder Getriebe erforderlich. Um die Leistung aufgeladener Motoren zu steigern und Schadstoffemissionen zu reduzieren, kam vermehrt eine Ladeluftkühlung zum Einsatz. Das große Angebot an Verlustwärme wurde genutzt: Mit Hilfe einer Heizung konnte die anfallende Wärme auch zum Heizen bei geringen Umgebungstemperaturen dem Innenraum zur Verfügung gestellt werden. Ab den 1960ern kam ein Kältemittelkreislauf zur Kühlung des Fahrzeuginnenraums bei hohen Umgebungstemperaturen vermehrt hinzu [15].

Im Jahre 2014 waren 94% aller in Deutschland verkauften Neufahrzeuge mit einer sogenannten Klimaanlage ausgestattet [16]. Heute ist die Erwartung des Kunden, dass ein Fahrzeug in der Lage ist, eine definierte thermische Behaglichkeit sicherzustellen. Zudem müssen gesetzliche Vorschriften z. B. zur Sicherstellung der Beschlagsfreiheit von Scheiben eingehalten werden.

Für den weiteren Verlauf der Arbeit werden die Untersuchungen auf BEVs eingeschränkt. Da viele der Erkenntnisse jedoch auch für PHEVs gültig und übertragbar sind, werden nachfolgend stellenweise auch PHEVs in die Diskussion einbezogen.

## Spezifische Anforderungen von batterieelektrischen Fahrzeugen

Bei BEVs kommt es im Wesentlichen zu drei grundlegenden Veränderungen: Zunächst entfällt der Verbrennungsmotor vollständig als Wärmequelle. Damit entfällt auch das bisherige Heizsystem quellenseitig großteils. Des Weiteren ist die erforderliche elektrische Traktionsbatterie ein temperatursensibles Bauteil. Die optimale Batterietemperatur hängt dabei stark vom Batterietyp ab. Typischerweise kommen bei BEVs Bleiakkumulatoren, Nickel-Metall-Hydrid- (NiMH) und Lithium-Ionen-Batterien zum Einsatz [17].

Bei geringen Temperaturen können Batterien nur eingeschränkt betrieben werden, da sich die elektrochemischen Prozesse verlangsamen und der innere Widerstand steigt [18]. Bei hohen Temperaturen kommt es zudem zur Zersetzung des Elektrodenmaterials und im schlimmsten Fall zum sogenannten „Thermal Runaway“. Bei Lithium-Ionen-Batterien wird ein Temperaturbereich zwischen 10 °C und 30 °C als ideal betrachtet [19]. Neben der Zelltemperatur sind dabei auch Temperaturgradienten innerhalb der Batteriezellen sowie mittlere Temperaturunterschiede zwischen Zellen hinsichtlich der Lebensdauer von großer Bedeutung ([20], [21]). Bei den Kühlkonzepten für Batterien wird zwischen luftgekühlten und flüssigkeitsgekühlten Batterien unterschieden [22]. Auch eine direkte Kühlung der Batterie mit Kältemittel wird diskutiert [23]. Verschiedene Kühlkonzepte von flüssigkeitsgekühlten Lithium-Ionen-Batterien, wie nachfolgend angenommen, werden von Smith untersucht [21]. Bei einigen Batteriesystemen ist neben dem Kühlen der Batterie auch das Heizen der Batterie erforderlich [9]. Wird die Batterie bei Umgebungstemperaturen oberhalb von 30 °C gekühlt, muss der Kältemittelkreislauf der Klimaanlage um entsprechende Funktionalität erweitert werden. Zuletzt müssen die Komponenten des elektrischen Antriebsstrangs, Leistungselektronik und elektrische Maschinen gekühlt werden, da beispielsweise Halbleiter, Dioden und elektrische Kondensatoren bei derzeitiger Bauweise sowohl Leistung als auch Lebenszeit einbüßen, wenn diese zu heiß werden.

Bei PHEVs kommt es immer noch zum teilweisen Entfall der Verbrennungskraftmaschine als Wärmequelle während elektrischer Fahrphasen. Daher sind im Heizsystem betriebsmodusunabhängige Maßnahmen zur Sicherstellung der Heizleistung erforderlich. Bei PHEVs könnten die elektrischen Antriebskomponenten in den Motorkühlkreislauf eingebunden werden. Allerdings ist ein eigenständiger Kühlkreislauf bei einem Temperaturniveau von ca. 70 °C gegenüber der Einbindung in den Motorkühlkreislauf eines PHEVs bei einem Temperaturniveau bis zu 105 °C kostengünstiger, wenn die Lebensdauer berücksichtigt wird [24]. Zwar können die Prinzipien der verbrennungsmotorischen Kühlung übertragen werden, jedoch sind die absolut zulässigen maximalen Temperaturen deutlich geringer. Damit ergibt sich das Problem, dass das Temperaturdelta zwischen kühlmittelseitigem Kühlereintritt und

## 1 Einleitung und Motivation

Umgebungstemperatur geringer ist als bei einem Motorkühlkreislauf. Es würde bei gleicher Kühlerfläche weniger Leistung abgeführt werden. Da der elektrische Antriebsstrang jedoch deutlich effizienter ist, sinken die absoluten Abwärmen. Dies gilt auch, wenn berücksichtigt wird, dass ein großer Anteil der Verlustwärme der Verbrennungskraftmaschine über das Abgas abgeführt wird.

Der durch die Klimatisierung verursachte Verbrauch bei elektrisch betriebenen Fahrzeugen ist Thema der vom Verband deutscher Automobilindustrie in Auftrag gegebenen FAT 233 „Spezifische Anforderungen an das Heiz-Klimasystem elektromotorisch angetriebener Fahrzeuge“ [8]. Auch wenn der Insassenkomfort bei rein elektrisch angetriebenen Fahrzeugen noch nicht im Fokus der öffentlichen Wahrnehmung steht, so bietet er doch eines der wesentlichen Handlungsfelder bei der Entwicklung dieser Fahrzeuge [25].

### Maßnahmen zur Steigerung der Systemeffizienz

Neue Heiz- und Kühlsysteme für BEVs und PHEVs, die die Gesamtsystemeffizienz steigern, konzentrieren sich auf vier Ziele:

1. **Reduktion von thermischer Last:** Sowohl passive Maßnahmen wie der Einsatz von Infrarot-reflektierender Verglasung, Verbesserung der Dämmung oder eine verbesserte Beschattung als auch aktive Maßnahmen wie der Betrieb des Klimageräts im Umluft-Betrieb [8] oder selektives Heizen und Kühlen in Abhängigkeit der Insassenanzahl tragen dazu bei, den erforderlichen Energiebedarf zu senken. Zukünftige Klimageräte und Fahrzeugkabinen müssen bei einem geringen Bedarf an Heiz- oder Kühlleistung gleichen Komfort bereitstellen. Ebenso wird sich durch effizientere Antriebskomponenten der Kühlbedarf von Antriebskomponenten reduzieren.
2. **Rückgewinnung von Verlustwärme:** Bei Prozessen der Energiewandlung entsteht Wärme. Diese Wärme nutzbar zu machen, ist ein weiteres Ziel bei der Steigerung der Gesamtsystemeffizienz. Bei konventionellen Fahrzeugen ist die Nutzung des Motor-kühlwassers zur Innenraumbeheizung ein Beispiel. Technisch aufwendigere Systeme umfassen die Rückgewinnung von Abgasenthalpie zur Beheizung von Innenraum oder Antriebskomponenten ([26], [27]), die Wandlung von Abgasenthalpie in elektrische Energie [28] oder Adsorptionskälteanlagen, die mit Abwärme betrieben werden [29].
3. **Effiziente Bereitstellung von Heiz- und Kühlenergie:** Des Weiteren spielt die Bereitstellung der letztlich erforderlichen Heiz- und Kühlleistung eine entscheidende Rolle. Bei elektrisch betriebenen Fahrzeugen kommen zunehmend Wärmepumpen zum Einsatz (vgl. z. B. [30], [31], [12], [32]). Diese ermöglichen unter Verrichtung mechanischer Arbeit die Energieaufnahme auf einem geringen Temperaturniveau und Bereitstellung von Heizleistung zur Innenraumbeheizung auf einem hohen Temperaturniveau.
4. **Effizienter Transfer von Energie:** Neben Ansätzen zur Senkung des Energiebedarfs richtet sich der Fokus der Entwicklung zunehmend auf eine effizientere Nutzung und Verteilung der im Fahrzeug eingesetzten und vorhandenen Energie. Es ergeben sich dabei potentiell synergetische Effekte bei der geschickten Verknüpfung vorhandener Teilsysteme [33], beispielsweise durch eine optimale Positionierung von elektrischer Maschine und Leistungselektronik [34].

## Bestehende Heiz- und Kühlsysteme

Bei konventionellen Fahrzeugen sind das System Motor-Thermomanagement und Innenraumheizung und das System Klimatisierung weitgehend getrennte Systeme, die sich lediglich einen Luftpfad im Kühlerpaket und Klimagerät teilen. Der Kältemittelkreislauf, welcher in konventionellen Fahrzeugen nur der Innenraumkühlung dient, könnte in Zukunft vielseitige Heiz- und Kühlaufgaben übernehmen und ist kein funktional isoliertes System mehr [35]. In intensiver Forschungs- und Entwicklungsaktivität der letzten Jahre ist eine große Anzahl an Heiz- und Kühlkonzepten entstanden. Dabei ist das Entwicklungsziel oft, bestehende Systeme so zu erweitern, dass diese die neuen Heiz- und Kühlaufgaben übernehmen können.

Um einen Wärmepumpenbetrieb zu ermöglichen, müssen vereinfacht die Funktionen Heizen und Kühlen von Verdampfer und Verflüssiger vertauscht werden. Bei Umgebungswärmepumpen kommt statt eines Verflüssigers im Frontbereich ein Außenluft-Wärmeübertrager zum Einsatz. Dieser übernimmt je nach Verschaltung die Funktion von Verdampfer oder Verflüssiger, vgl. Jung et. al. [32], Hörth [30], Schedel [31] und Homann [12].

Verschiedene Systeme nutzen zudem Abwärmen der elektrischen Antriebskomponenten; dazu wird ein indirekter Verdampfer in einem Niedertemperatur-Kühlmittelkreislauf zusammen mit den elektrischen Antriebskomponenten eingebunden. Des Weiteren wird bei flüssigkeitsgekühlten Batterien ein eigener Kühlmittelkreislauf für die Batterie vorgesehen. Der Kältemittelkreislauf kühlt über den (bereits vorhandenen) indirekten Verdampfer das Kühlmittel des Batterie-Kreislaufs. Einige Systeme weisen einen indirekten Verflüssiger auf; damit ist es möglich, einem Heizkreislauf Wärme zuzuführen, sodass der Heizkreislauf mit dem Heizungswärmeübertrager im Klimagerät bestehen bleibt ([36], [37]).

Yokoyama et. al [36] stellen ein System vor, welches auf einen Verdampfer im Klimagerät verzichtet. Mittels einer kombinierten indirekten Verdampfer-Verflüssiger-Einheit kann stattdessen der kühlmittelführende Heizkreislauf sowohl zum Heizen als auch zum Kühlen des Innenraums genutzt werden.

Kaplan et. al. präsentieren ein System, bei dem kältemittelseitig die Funktionen von Verdampfer und Verflüssiger durch entsprechende Kältemittelventile getauscht werden können, sodass neben dem Klimatisierungsbetrieb ein Wärmepumpenbetrieb möglich ist [38]. Ebenfalls existiert der Ansatz, den Heizungswärmeübertrager durch einen Kältemittelverflüssiger zu ersetzen und so auf den Heizkreislauf zu verzichten [39]. Homann [12] untersucht ein ähnliches Wärmepumpensystem in einem BEV hinsichtlich Funktionsfähigkeit, Heizleistung sowie Einfluss auf die Reichweite. Das System basiert auf einer Umgebungswärmepumpe mit zwei Kältemittel-Wärmeübertragern im Klimagerät. Es wird dabei eine Wärmepumpe, eine Innenraumkühlung und eine Luftentfeuchtung umgesetzt.

Ein anderer Fokus ist die Optimierung und geschickte Kombination von Kühlkreisläufen, die bei Ap et. al [40] im Vordergrund steht. Ziel ist es dabei, das Kühlerpaket durch einen Mehrschicht-Temperatur-Kühler zu ersetzen. Leighton, Bennion und Rugh zeigen die Vorteile auf, die durch das geschickte Zusammenfassen mehrerer Kühlkreisläufe möglich wären ([35], [33]). Der Ansatz wird ebenfalls von Herschold-Pließnig et. al. aufgegriffen [41]. Auch Kombinationen aus Umgebungswärmepumpe und Luft-Wasser-Wärmepumpe werden diskutiert (z. B. Schedel [31]). Über die klassische Anordnung von Kältemittelkreislauf und

## 1 Einleitung und Motivation

Kühlmittelkreisläufen hinaus werden neuartige Heiz- und Kühlsysteme beispielsweise auf Basis von Adsorptionskälteanlagen [29] oder der Kraft-Wärme-Kopplung [10] diskutiert. Hesse schlägt ein Kühlsystem mit dem Sekundärfluid CO<sub>2</sub> vor [42].

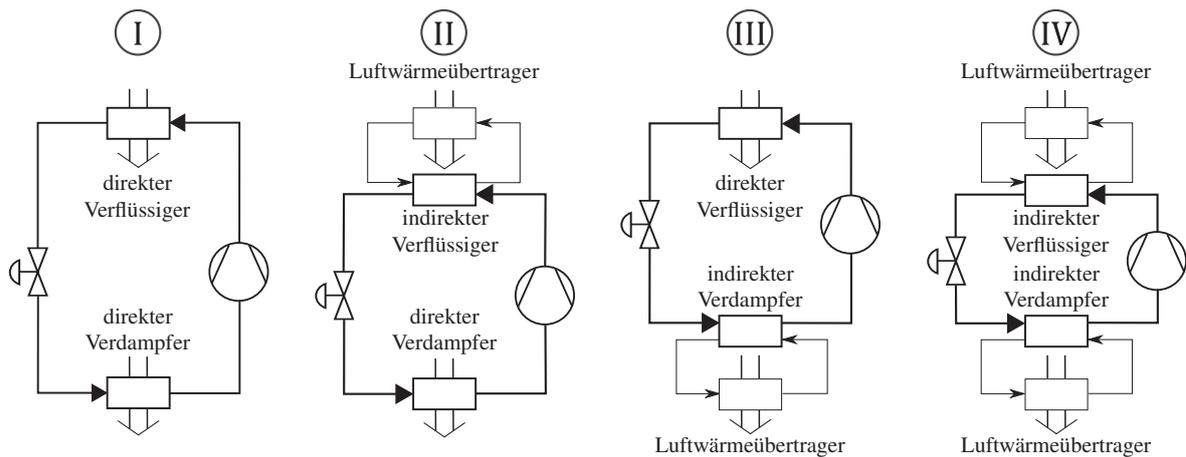
Der überwiegende Teil der veröffentlichten Systeme realisiert eine Wärmepumpenfunktion sowie die Batteriekühlung durch Verschalten des Kältemittelkreislaufs. Dies stellt besondere Anforderungen an Ventile. Zudem erhöht sich die Kältemittelmenge und es kann zur Verlagerung von Kältemittel in ungenutzte Verzweigungen des Kältemittelkreislaufs kommen.

In Anhang D.1 wird ein Überblick über 27 verschiedene Heiz- und Kühlsysteme für BEVs und PHEVs gegeben, die zur Zeit in Serie sind oder gegenwärtig in der Forschung diskutiert werden. Es wird deutlich, dass bisher keine Einigkeit für das ideale System besteht. Zwar weisen viele Systeme Gemeinsamkeiten auf, die große Anzahl an Varianten macht jedoch deutlich, dass sich bisher keine allgemeingültige Lösung hat durchsetzen können.

### Sekundärkreislaufsysteme

Bei der Entwicklung energieeffizienter und modularisierbarer Klimatisierungs- und Thermomanagementkonzepte insbesondere für Fahrzeuge mit alternativem Antrieb stellen Sekundärkreislaufsysteme mit kompaktem Kältemittelkreislauf und sekundären Fluidkreisläufen eine Alternative zur Sicherstellung der thermischen Rahmenbedingungen dar. Dabei wird ein kompakter Kältemittelkreislauf (Primärkreislauf) zur zentralen Bereitstellung von Heiz- und Kühlleistung genutzt. Über Sekundärkreisläufe als Zwischenmedium wird der Primärkreislauf an die elektrischen Antriebskomponenten sowie mit Luft-Sekundärfluid-Wärmeübertragern an die Umgebung und an den Fahrzeuginnenraum angebunden. Die Verdampfung und Kondensation des Kältemittels erfolgt somit nicht mehr mit Hilfe der Luft, sondern über ein Sekundärfluid. Als Sekundärfluid könnte beispielsweise eine Wasser-Ethylen-Glykol-Mischung zum Einsatz kommen. Statt des gängigen Begriffs Kühlmittel wird der Begriff Sekundärfluid genutzt, da das Fluid ebenfalls zum Heizen verwendet werden kann. Es entfallen Verflüssiger in der Fahrzeug-Front und Verdampfer im Klimagerät. Diese müssen durch Sekundärfluid-Luft-Wärmeübertrager ersetzt werden. Zusätzlich werden Wärmeübertrager, meist Plattenwärmeübertrager [43], für den Wärmetransfer zwischen Primär- und Sekundärfluid benötigt. Diese werden als indirekter Verflüssiger (auch indirekter Kondensator) und indirekter Verdampfer (auch Chiller) bezeichnet, da die Wärmeabgabe des Kältemittels an die Umgebung und Innenraum indirekt erfolgt. Verdichter und Expansionsorgan können bestehen bleiben.

Abbildung 1.2 zeigt den grundlegenden Aufbau mehrerer indirekter Sekundärkreislaufsysteme im Vergleich zu einem konventionellen direkten System. Auch wenn vollständige Sekundärkreislaufsysteme bisher nicht in Personenkraftwagen in Serie umgesetzt wurden, ist die Idee nicht neu. Die in der Literatur beschriebenen Systeme lassen sich dabei im Wesentlichen auf drei Motivationen zurückführen: (1) Verwendung alternativer, insbesondere toxischer oder brennbarer Kältemittel [44], (2) Vereinfachung des Frontkühler-Pakets [45], [40] und (3) eine Vereinfachung des Gesamtsystems durch Erhöhung der Integration [35], [46]. Speziell für die Verwendung eines Sekundärkreislaufsystems im Fahrzeug ergeben sich dabei im Vergleich mit konventionellen Klimatisierungssystemen eine Reihe von Vorteilen:



**Abbildung 1.2:** Anlagenschaltplan für ein konventionelles System (I), einseitige Sekundärkreislaufsysteme (II, III) und ein vollständiges Sekundärkreislaufsystem (IV) [44], [19].

- **Reduktion der Kältemittelfüllmenge** durch Reduktion der Leitungslängen im Kältemittelkreislauf ([47], [48]).
- **Hermetische und crashsichere Kapselung des Kältemittelkreislaufs** durch Aufbau des Kältemittelkreislaufs als kompakte Einheit. Dies führt auch zur Reduktion der Kältemittelleckage ([49], [50], [48]).
- **Einfache Einbindung zusätzlicher Wärmequellen und Wärmesenken** wie Batterie, Leistungselektronik, elektrische Maschine oder Fahrzeugumgebung durch Anbindung dieser an den Kältemittelkreislauf. Auch ein Wärmepumpenmodus kann so ohne Erhöhung der Komplexität des Kältemittelkreislaufs realisiert werden [51].
- **Entfall des Verflüssigers in der Fahrzeugfront** durch Einsatz eines indirekten Verflüssigers ([45], [52]). Stattdessen kann ein Außenluftwärmeübertrager eingesetzt werden, der die Funktionen eines Niedertemperaturkühlers und eines konventionellen Verflüssigers zusammenfasst.
- **Reduktion der Wartungs- und Herstellungskosten** durch einfache Installation des Systems. Wird das System vor Verbau mit Kältemittel befüllt, entfällt die Handhabung des Kältemittels durch den Automobilhersteller.

Den Vorteilen von Sekundärkreislaufsystemen stehen jedoch offensichtliche und grundsätzliche Nachteile gegenüber:

- **Mögliche Herabsenkung der Systemeffizienz** durch die erforderlichen zusätzlichen Wärmeübergänge zwischen Kältemittel und Sekundärfluid. Auf Grund der zusätzlich erforderlichen Antriebsleistung der Pumpen im Sekundärfluidkreislauf sinkt die Effizienz des Gesamtsystems weiter. Effizienzeinbußen von bis zu 20% werden insbesondere bei hohen Umgebungstemperaturen beschrieben ([53], [54]).
- **Verschlechterung des dynamischen Verhaltens** durch die Trägheit des Systems im transienten Betrieb. Thermische Kapazitäten der zusätzlichen Wärmeübertrager und des Sekundärfluids führen zu Nachteilen bei der dynamischen Innenraumklimatisierung [55], jedoch auch zu Vorteilen bei der Erhaltungsklimatisierung [56].
- Ein **zusätzlicher Komponentenbedarf** ergibt sich durch zusätzliche Wärmeübertrager und Pumpen in den Sekundärkreisläufen. Außerdem werden sekundärfluidseitige Um-

## 1 Einleitung und Motivation

schaltventile oder eine entsprechende Verteilungseinheit zur Aufteilung der Energie- und Massenströme in den Sekundärkreisläufen benötigt [55].

Für einen ausführlichen Überblick über Vor- und Nachteile beim Einsatz von Sekundärkreislauflsystemen im Fahrzeug wird an dieser Stelle auf Menken [55] verwiesen. Eine vereinfachte technische Machbarkeitsstudie wurde beispielsweise von der Firma Ixetic [57] mit dem Kältemittel CO<sub>2</sub> vorgestellt. Zusammengefasst lässt sich sagen, dass Sekundärkreislauflsysteme sowie die damit verbundenen Möglichkeiten zu einer systematischen Vereinfachung des Heiz- und Kühlsystems führen können. Entscheidend für den Erfolg eines solchen Systems ist es jedoch auch, mögliche Potentiale zur Effizienzsteigerung auszuschöpfen. Die Herausforderung besteht daher darin, Betriebsstrategien und Verschaltungspläne zu finden, die zu einer optimalen Verknüpfung von thermischen Quellen und Senken führen. Dafür geeignete Methoden müssen entwickelt werden.

Grundsätzlich lassen sich viele Funktionen sowohl auf Seite des Kältemittelkreislaufs als auch auf Seite der Kühlmittelkreisläufe realisieren. Ein einfaches Beispiel stellt eine Wärmepumpenfunktion dar. Hier kann beispielsweise im Kältemittelkreislauf parallel zum Verflüssiger ein Kältemittel-Kühlmittel-Wärmeübertrager, der kühlmittelseitig in den Heizkreislauf integriert wird, vorgesehen werden. Wird, wie bei Homann [12], die erforderliche Wärme über die Umgebung aufgenommen, muss ein weiterer paralleler Kältemittel-Luft-Wärmeübertrager vorgesehen oder stattdessen der bestehende Verflüssiger als Verdampfer eingebunden werden. Alternativ dazu kann eine äquivalente Funktion kühlmittelseitig realisiert werden. Dabei bleibt der Kältemittelkreislauf bestehen und die Anbindung der Umgebung und des Innenraums erfolgt je nach Betriebsmodus Innenraumkühlen oder Innenraumheizen durch Umschalten von Kühlmittelkreisläufen. Dazu müssen allerdings die Kondensationswärme und Verdampfungswärme immer über einen Kühlmittelkreislauf abgeführt beziehungsweise zugeführt werden. Sekundärkreislauflsysteme ermöglichen also die Realisierung von Funktionen auf Seite des Sekundärfluids.

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein System diskutiert, das alle erforderlichen Funktionen durch Sekundärkreisläufe realisiert. Der wesentlich einfacheren Realisierung von Funktionen auf der Sekundärfluidseite wurde in der Vergangenheit, vor allem begründet durch eine geringere Effizienz und die grundlegenden architektonischen Änderungen, wenig Beachtung geschenkt. Die vorliegende Arbeit soll einen Beitrag dazu leisten, diese wissenschaftliche Lücke durch die Erarbeitung geeigneter Methoden zu schließen.

### **Zentrales Heiz- und Kühlsystem**

Fahrzeug-Heiz- und Kühlsysteme werden selten als vernetztes System betrachtet, stattdessen basieren viele Systeme auf dem Ansatz, für jedes zu kühlende Teilsystem eigene zugeordnete Kühlkreisläufe zu entwickeln. Ein starker Fokus vergangener Untersuchung in Forschung und Entwicklung bezieht sich daher auf isolierte Teilsysteme, anstatt einen ganzheitlichen Ansatz zu wählen, bei dem synergetische Effekte durch die mögliche Kombination von Kühl- und Heizkreisläufen entstehen [58]. Diese Potentiale sollen durch ein neuartiges Heiz- und Kühlsystem, das im Rahmen dieser Arbeit vorgestellt wird, ausgenutzt werden. Das neuartige Heiz- und Kühlkonzept basiert auf der Idee einer zentralisierten Bereitstellung und Verteilung von Heiz- und Kühlleistung. Für das Konzept eines „Zentralen Thermomanagements“ werden nachfolgende bauliche Prämissen gesetzt: