

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 CO₂-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 CO₂-Ausstoß für Neuwagenflotten aller Hersteller in Europa vor. Bis zum Jahr 2020 muss dieser auf durchschnittlich 95 g CO₂ 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 zaghaften 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°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

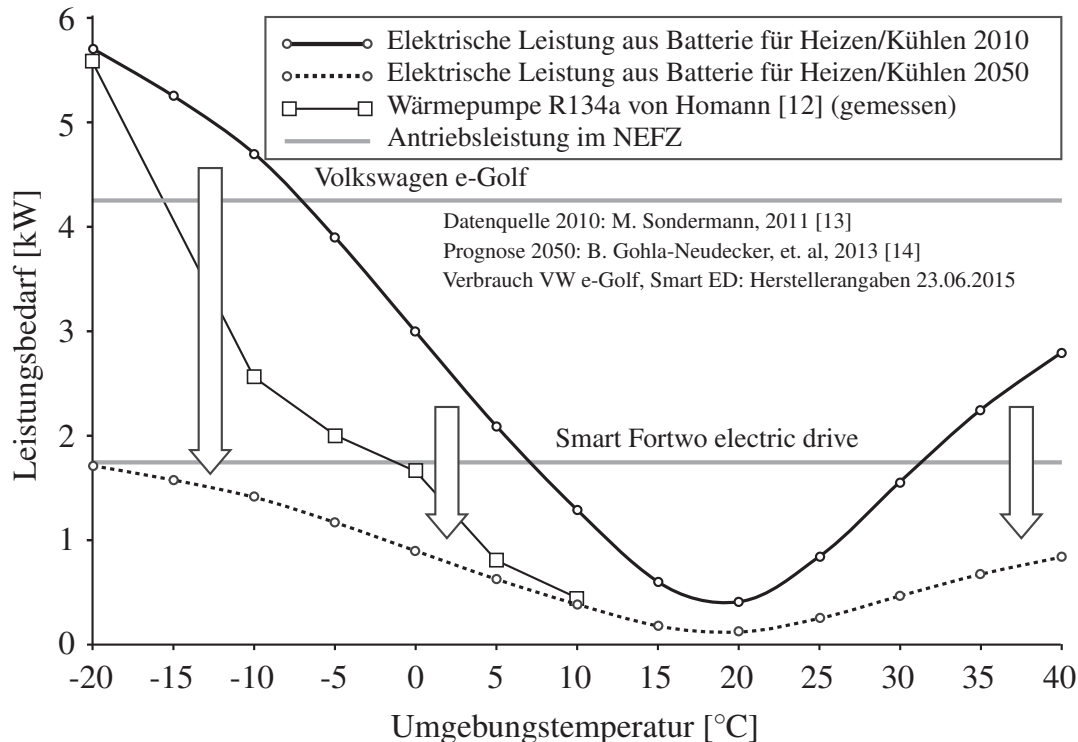


Abbildung 1.1: Stationäre Leistungsaufnahme des Heiz- und Kühlsystems mit Widerstandsheizung für ein batterieelektrisches Fahrzeug im Jahr 2010 und geschätzt für das Jahr 2050 ([14], [13]); zudem ein Wärmepumpensystem mit dem Kältemittel R134a [12].

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 Motorkühlwassers 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 CO₂ 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:

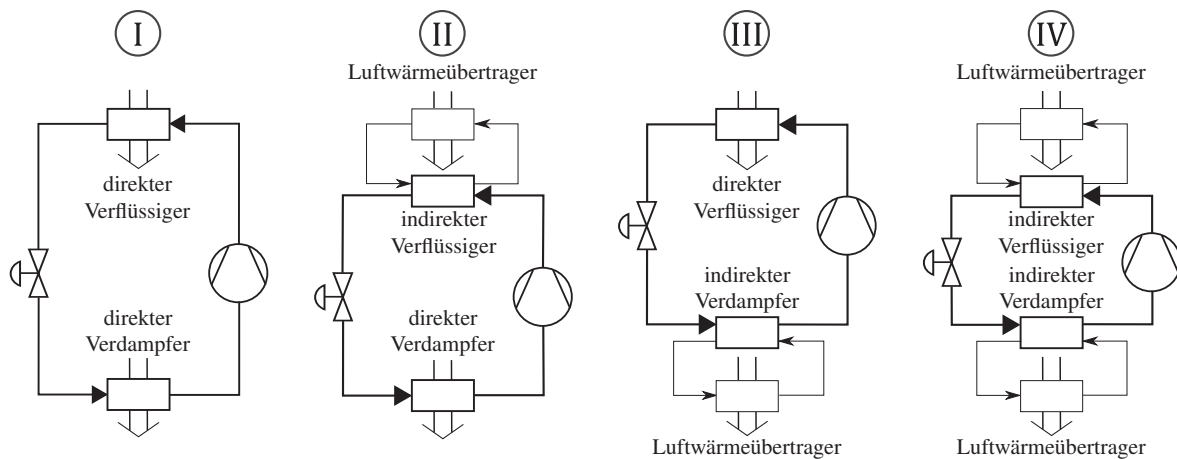


Abbildung 1.2: Anlagenschaltplan für ein konventionelles System (I), einseitige Sekundärkreislaufsysteme (II, III) und ein vollständiges Sekundärkreislaufsystem (IV) [44], [19].

- **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 CO₂ 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:

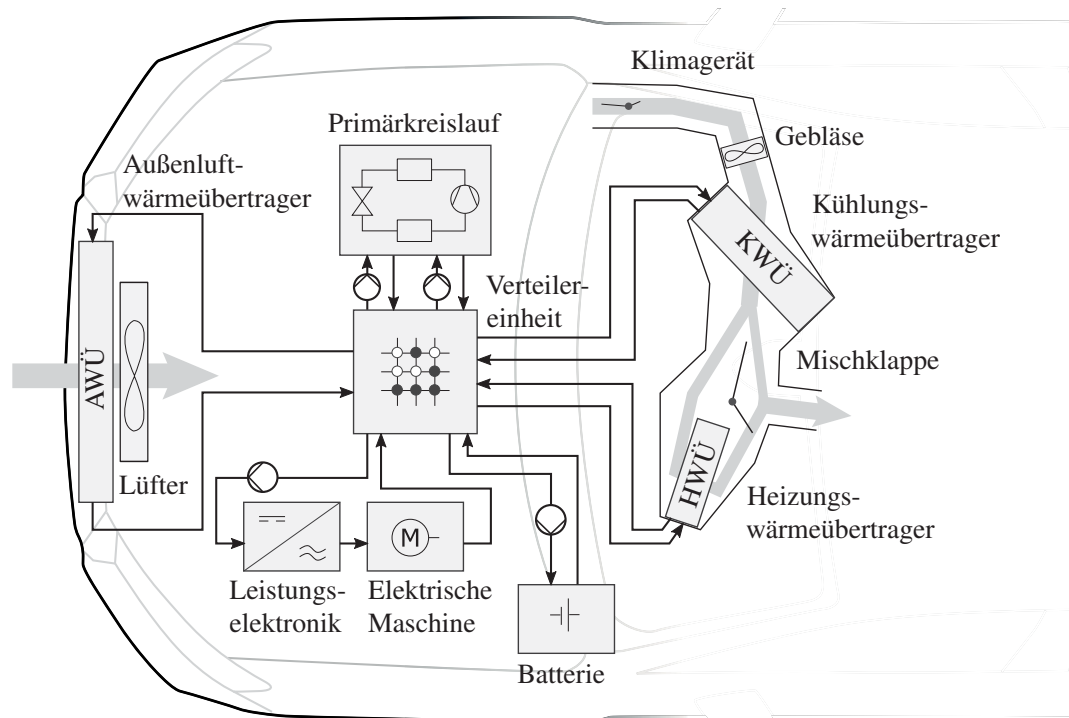


Abbildung 1.3: Vereinfachte Darstellung des hier betrachteten zentralisierten Heiz- und Kühlsystems für ein batterieelektrisches Fahrzeug. Vergleiche auch Menken [55].

- **Primärkreislauf:** Das System soll einen einfachen und kompakten Kältemittelkreislauf ohne kältemittelseitige Verzweigungen und Umschaltmaßnahmen besitzen
- **Sekundärkreislaufsystem:** Die Verteilung von Energieströmen zwischen Quellen und Senken soll durch Schalten, Mischen und Verteilen von Sekundärfluidmassenströmen in einer zentralen Komponente erfolgen

Das System hat dabei nachfolgende Ansprüche zum Ziel:

- Die durch Verbindungs- und Umschaltelemente verursachte Komplexität soll durch Integration und Entfall von Komponenten reduziert werden
- Das System soll modular sein, um auf verschiedene Fahrzeugarchitekturen übertragen werden zu können
- Der Verbrauch verfügbarer elektrischer Energie soll minimiert werden

Der schematische Aufbau des hier betrachteten Heiz- und Kühlsystems ist in Abbildung 1.3 dargestellt. Die wesentlichen Grundfunktionen für Heiz-, Kühl- und Entfeuchtungsbetrieb werden von Menken für ein Sekundärkreislaufsystem unter verschiedenen klimatischen Bedingungen untersucht [55]. Menken kommt zu dem Ergebnis, dass ein solches System durch den Einsatz alternativer Kältemittel die relevanten Zielvorgaben erreichen kann. Dies stellt die Grundlage für die vorliegende Arbeit dar.

Thermische Speichersysteme

Sekundärkreislaufsysteme erlauben die einfache Integration von thermischen Speichern, wenn diese über das Sekundärkreislauffluid eingebunden werden. In der Vergangenheit tauchen Wärmespeicher als Effizienzmaßnahme zur Verbesserung des Kaltstartverhaltens von

1 Einleitung und Motivation

Verbrennungskraftmaschinen auf, z. B. bereits 1951 als Patent [59]. Dazu wird Abwärme des Verbrennungsmotors während einer Fahrt gespeichert und zu einem späteren Zeitpunkt zur Unterstützung der Warmlaufphase genutzt. Typischerweise kommen auf Grund der erforderlichen Temperaturen Salzgemische oder organische Substanzen wie Paraffin zum Einsatz (Schmelzenthalpie zwischen 200 und 240 kJ kg⁻¹).

Bei Fahrzeugen mit Start-Stopp-Systemen und mechanisch angetriebenem Verdichter kommt es zum häufigen Aussetzen des Verdichters. Daher werden zunehmend „Kältespeicher“ als unterstützende Maßnahme zum Kältemittelkreislauf vorgeschlagen, um eine Erhaltung der Innenraumkühlung zu gewährleisten (beispielsweise Michniacki [60]). Zunehmend wird bei Mildhybriden, also Hybridfahrzeugen ohne eigenständigen elektrischen Fahrbetrieb, auch im Freilauf der Verbrennungsmotor ausgeschaltet, womit die unterbrechungsfreie Bereitstellung von Kühlleistung weiter eingeschränkt wird. Im Zusammenhang mit Sekundärkreislaufsystemen werden Speichersysteme von Eisele untersucht [56]. Lemke [61] stellt ein Sekundärkreislaufsystem mit einem Paraffin-basierten Phase Change Material (PCM) vor. Lade- und Entladeprozess während einer virtuellen Testfahrt werden bezüglich der Innenraumtemperatur untersucht und zeigen einen signifikanten Vorteil während langer Standphasen. Neben thermischen Speichern werden auch thermochemische Speicher für den Einsatz im Fahrzeug diskutiert [62]. In der Regel speichern thermochemische Speicher Wärme durch endotherme Reaktionen und geben sie durch exotherme Reaktionen wieder ab. Dabei ergibt sich auch die Möglichkeit, in einem diskontinuierlichen Prozess die Prinzipien thermochemischer Speicher zur Wärme- und Kälteerzeugung zu nutzen (z. B. als Adsorptionskälteanlage [29]).

Durch die erheblichen Reichweitenverluste bei BEVs, die dadurch zustande kommen, dass bis zu 40% der elektrischen Energie zur Temperierung benötigt wird [7], werden thermische Speicher zur direkten Speicherung der erforderlichen Energie diskutiert. Grossman gibt an, dass ein wärmegeämmter Latentwärmespeicher mit Bariumhydroxid (Schmelzenthalpie 280 kJ kg⁻¹, spezifische Wärmekapazität 1.26 kJ kg⁻¹ K⁻¹) bei einem Volumen von 10 Litern bei einer Außenlufttemperatur von -20 °C bis zu 0.8 kWh für ca. 48 Stunden speichern könnte [63]. Zunehmend wird auch die „Batterie als thermischer Speicher“ diskutiert ([64], [65]). Fleming schlägt ein System vor, das die Temperierung des Innenraums vollständig mit Hilfe eines Wärme- und eines Kältespeichers gewährleistet und über eine externe Schnittstelle beladen werden kann [66]. Ein weiteres System, das von Fleming et. al. vorgeschlagen wird, kombiniert die beiden thermischen Speicher mit einer Wärmepumpe [67]. Eine entsprechende Vorkonditionierung des Speichersystems vorausgesetzt, kann der Speicher der Entlastung des Heiz- und Kühlsystems dienen und so die elektrische Reichweite erhöhen. Der Nachteil eines Systems mit zwei getrennten Speichern besteht darin, dass in vielen Fällen nur ein Speicher benötigt wird.

An dieser Stelle setzt diese Arbeit mit der Integration eines einzelnen ganzjahrestauglichen thermischen Speichers in das Gesamtfahrzeug-Thermomanagement an. Dabei wird auch eine Einbindung einer Wärmepumpe durch eine indirekte Prozessführung berücksichtigt. Thermische Speicher werden meist als eigenständige Systeme für dedizierte Aufgaben betrachtet und nicht in ein Gesamtkonzept integriert.

1.2 Ziele der Arbeit und wissenschaftlicher Beitrag

Ziel dieser Arbeit ist die Herleitung und Untersuchung eines neuartigen Heiz- und Kühlsystems für ein batteriebetriebenes Fahrzeug, welches mit einem kompakten Kältemittelkreislauf und einem optionalen thermischen Speicher zentral die zum Heizen und Kühlen erforderliche Leistung bereitstellt und Energieströme über Sekundärkreisläufe verteilt. Um dieses Ziel zu erreichen, sind folgende Schritte erforderlich und wissenschaftlich neu:

1. Ganzheitliche Erfassung transienter thermischer Anforderungen an das Heiz- und Kühlsystem durch die erstmalige Anwendung einer von Menken et. al. [68] entwickelten Methode zur Berücksichtigung des realen Nutzungsverhaltens basierend auf geclusterten Tagesfahrzyklen und geclusterten Klimaverläufen.
2. Strukturierte Generierung der erforderlichen thermischen Energieströme, die sich für Funktionen wie Heizen/Kühlen/Entfeuchten des Innenraums bei gleichzeitigem Heizen/Kühlen von Antriebsstrangkomponenten bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen für ein abstrahiertes Heiz- und Kühlsystem ergeben.
3. Systematische Ableitung, Untersuchung und Optimierung hydraulischer Realisierungen, die sich aus der energieflussbasierten Analyse ergeben sowie Erarbeitung einer Methode zur einfachen Simulation beliebiger Verschaltungspläne.
4. Bewertung eines ganzjahrestauglichen thermischen Energiespeichers mit einer quellen- und senkenseitigen Integration in das Heiz- und Kühlsystem zur Steigerung der elektrischen Reichweite.

Bislang werden verteilte Systeme meist getrennt betrachtet. Inhalt dieser Arbeit ist daher eine ganzheitliche Betrachtung thermischer Quellen und Senken in einem batterieelektrischen Fahrzeug.

1.3 Vorgehensweise und Aufbau

Nachdem in **Kapitel 1** eine Einordnung in das Forschungsfeld Fahrzeug-Thermomanagement vorgenommen und die Ziele der Arbeit definiert wurden, werden in **Kapitel 2** Randbedingungen, bei denen das System betrieben wird, definiert. Aus den Randbedingungen ergeben sich die dynamischen thermischen Anforderungen, die durch Innenraumklimatisierung und Komponententemperierung in einem batterieelektrischen Fahrzeug an das Heiz- und Kühlsystem gestellt werden. Die dafür erforderlichen Modelle werden ausführlich in **Anhang A** und **B** beschrieben.

In **Kapitel 3** werden den thermischen Anforderungen technische Mittel gegenübergestellt, die in der Lage sind, Heiz- und Kühlanforderungen zu kompensieren. In **Kapitel 4** wird eine Methode zur energieflussbasierten Analyse der erforderlichen Energieströme zwischen den beteiligten Komponenten unter der Annahme eines idealisierten Thermomanagements entwickelt und in **Kapitel 5** für ein untersuchtes kompaktes BEV angewendet. Mit Hilfe einer statistischen Analyse werden relevante Betriebsarten identifiziert, priorisiert und deren Wechselwirkung untersucht. In **Kapitel 6** werden Methoden zur einfachen Simulation von beliebigen Verschaltungen und Verschaltungsplänen entwickelt.

1 Einleitung und Motivation

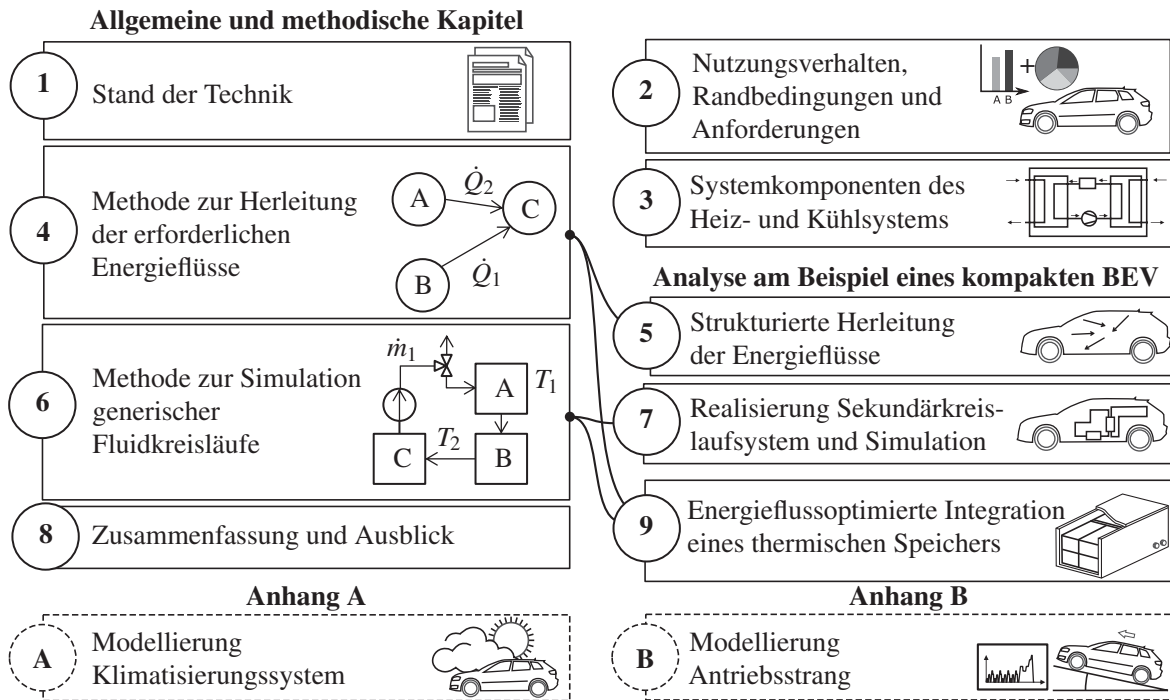


Abbildung 1.4: Gliederung der Arbeit

In **Kapitel 7** erfolgt die Untersuchung und simulative Optimierung von hydraulischen Verschaltungen, die aus der energieflussbasierten Analyse abgeleitet werden, für das untersuchte BEV. In **Kapitel 8** wird das zentrale Heiz- und Kühlsystem um einen thermischen Speicher erweitert. Dieser wird in das Sekundärkreislaufsystem energieflussoptimiert integriert und hinsichtlich des Reichweitenvorteils ganzjährig bewertet. **Kapitel 9** fasst die Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick auf weiterführende wissenschaftliche und technische Fragestellungen. Die wissenschaftliche Einordnung der entwickelten Methoden im Kontext der Graphen- und Netzwerktheorie erfolgt am Ende der methodenorientierten Kapitel 4 und 6.

2 Nutzungsverhalten, klimatische Randbedingungen und thermische Anforderungen

Sowohl für die Entwicklung neuer Systeme wie das untersuchte neuartige Heiz- und Kühlsystem als auch für die Bewertung neuartiger Funktionen wie die Integration eines thermischen Energiespeichers ist eine genaue Kenntnis darüber notwendig, wie entwickelte Systeme eingesetzt werden. Um die Anforderungen, die sich an das Heiz- und Kühlsystem stellen, ermitteln zu können, müssen klimatische Randbedingungen definiert werden. Aus diesen leiten sich wiederum die thermischen Anforderungen an das Heiz- und Kühlsystem ab. In diesem Kapitel werden relevante Randbedingungen und die dynamischen Anforderungen an das Heiz- und Kühlsystem definiert.

Grundsätzlich können Bewertungsmethoden und die sich daraus ableitenden Randbedingungen in zwei Klassen unterteilt werden (vgl. [25], [69]): Vor allem kommt es in der Automobilbranche zu Grenzbetrachtungen unter definierten Extrembedingungen, die zum Teil standardisiert sind (zum Beispiel VDA-Empfehlung 220 [70] oder SAE Standard J2765 [71]), zum Teil unternehmensspezifisch (zum Beispiel *Common Spec Book for evaluating Air Condition Systems* von Hammer [72]) und zum Teil besonders markante Fahrstrecken (zum Beispiel die Großglockner-Hochalpenstraße) sind. Als verbrauchsrelevanter Zulassungstest mit Berücksichtigung klimatischer Randbedingungen sind die von der *US Environmental Protection Agency* (EPA) spezifizierten *Supplemental Federal Test Procedures* bei einer Temperatur von 35 °C und –7 °C zu nennen. Dem gegenüber stehen Studien und Veröffentlichungen, die den Anspruch erheben, real auftretende Umgebungsbedingungen für bestimmte Regionen der Welt abzubilden. Zu nennen sind beispielsweise Strupp [73] mit kombinierten Daten zu Klimabedingungen, Pkw-Nutzungshäufigkeit und Pkw-Dichte in hoher regionaler Auflösung, Duthie [74] mit statistisch ermittelten Randbedingungen auf Basis eines typischen meteorologischen Jahres unter Berücksichtigung der geographischen Verteilung der Pkw-Nutzer in den USA oder Baumgart mit einer Verbrauchsanalyse einer Klimaanlage durch Simulation eines synthetischen Jahreszyklus mit Berücksichtigung eines klimatischen Testreferenzjahres [75]. Eine im Rahmen der FAT 233 entwickelte Datenbank, enthält nach Bevölkerungsdichte und Pkw-Nutzung gewichtete klimatische Daten für USA, China, Indien und Europa [8].

2.1 Nutzungsverhalten bei Elektrofahrzeugen

Das reale Nutzungsverhalten umfasst alle Aktivitäten, die mit dem Fahrzeug durchgeführt werden. Aus Ort, an dem ein System eingesetzt wird und der Zeit, zu der ein System eingesetzt wird, ergeben sich die klimatischen Randbedingungen, denen das System ausgesetzt ist.

Hinsichtlich des Nutzungsverhaltens wird in dieser Arbeit auf die *National Household Travel Survey* (NHTS) als eine umfangreiche Datenquelle zurückgegriffen [76]. Die NHTS dokumentiert das Mobilitätsverhalten der zivilen, nicht-institutionellen Bevölkerung der USA. Mit einer Befragung von 113.000 Haushalten und 233.000 erfassten Einzelfahrten ist sie eine geeignete Datenbasis für die Untersuchung des Nutzungsverhaltens. Es wird angenommen, dass das in den USA ermittelte Fahrverhalten auf die Region Europa übertragbar ist [77]. Da-

2 Nutzungsverhalten, klimatische Randbedingungen und thermische Anforderungen

ten von Elektrofahrzeugen und dem damit verbunden Ladeverhalten wurden bei der NHTS bisher nicht erhoben. Auf Grund der noch geringen Datenlage (mit Ausnahme einer Studie der europäischen Kommission [78] für Europa) wird das Ladeverhalten für die Ermittlung repräsentativer Randbedingungen nicht weiter betrachtet. Es ist jedoch zu erwähnen, dass die während des Ladevorgangs anfallende Verlustwärme bei einer ganzheitlichen Betrachtung des Heiz- und Kühlsystems nicht vernachlässigt werden sollte [79] und daher in Kapitel 4 berücksichtigt wird.

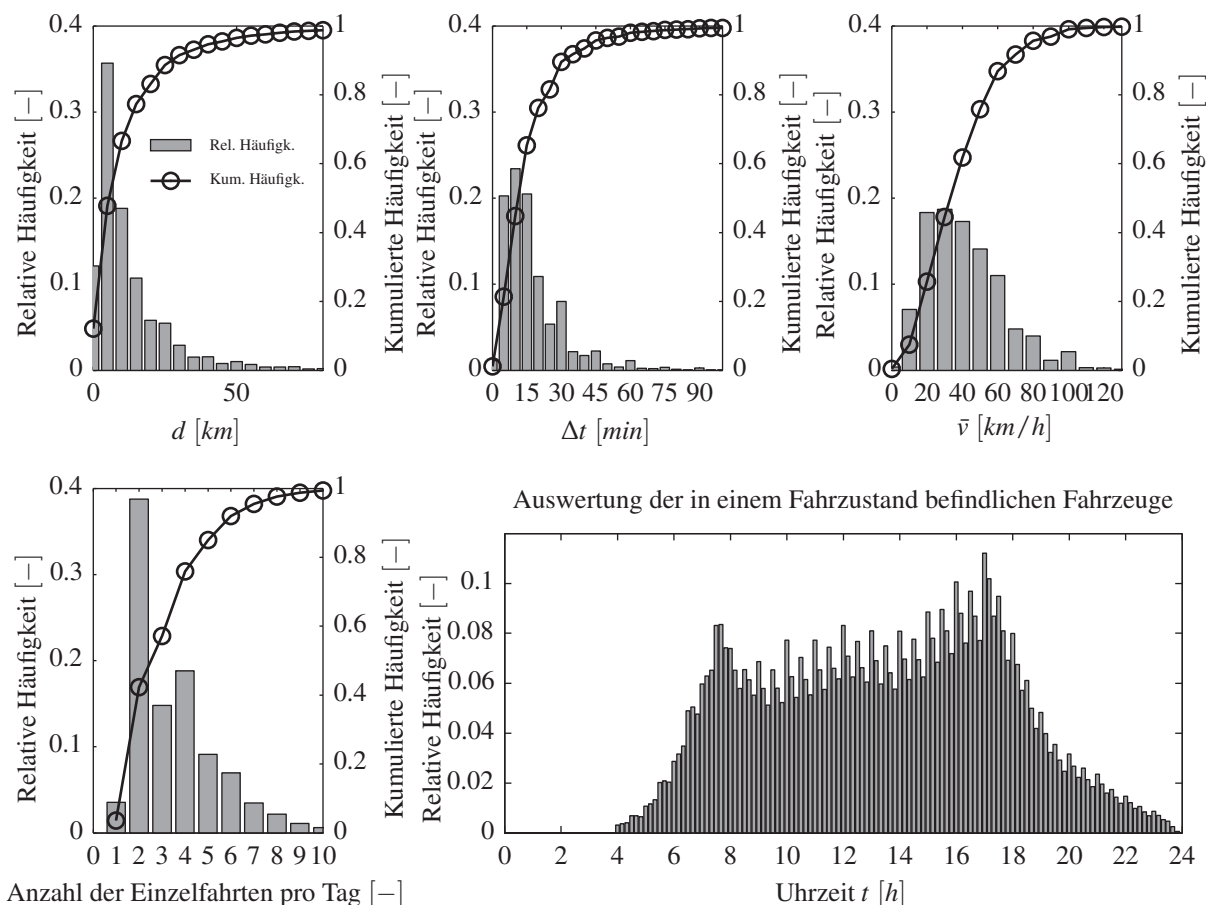


Abbildung 2.1: Statistische Auswertung der NHTS-Parameter Distanz d , Dauer Δt und mittlere Geschwindigkeit \bar{v} für Einzelfahrten sowie Anzahl der Einzelfahrten und uhrzeitabhängiges Verkehrsaufkommen [68].

Relevante Daten der NHTS aus dem Jahr 2001 sind in Abbildung 2.1 dargestellt. Es werden die Auftrittshäufigkeiten von gefahrener Strecke d , zeitliche Länge Δt sowie durchschnittliche Geschwindigkeit \bar{v} angegeben. Mit Hilfe der kumulierten Auftrittshäufigkeit, welche ebenfalls angegeben ist, ist ersichtlich, dass 80% aller Fahrten weniger als 17 km umfassen und weniger als 24 min dauern. Lediglich 2% der Fahrten dauern länger als 60 min. Fahrten mit einer Fahrstrecke über 100 km sind mit 0,8% Häufigkeit sehr selten. Wird die Anzahl der Fahrten an einem Tag betrachtet, fällt auf, dass mit einer 39%-igen Wahrscheinlichkeit genau zwei Fahrten an einem Tag stattfinden. In 43% der Fälle finden drei oder mehr Fahrten statt. Fahrten treten vor allem morgens zwischen 7 Uhr und 8 Uhr sowie abends zwischen 17 Uhr und 18 Uhr auf, was durch das berufsbedingte Fahraufkommen zu erklären ist. Auf Grund der Tatsache, dass Einzelfahrten an einem Tag eine Ausnahme bilden und der Großteil

aller Fahrten zwischen 7 Uhr und 18 Uhr stattfindet, können Wechselwirkungen zwischen Fahrten nicht ausgeschlossen werden.

Zur Bewertung des realen Nutzungsverhaltens ist ebenfalls von Interesse, welche Zeitspannen zwischen Einzelfahrten liegen. Daraus leitet sich die Idee ab, ganze Tagesverläufe inklusive Pausenzeiten zu simulieren. Dies wird zum Beispiel in [80] aufgegriffen, um das Verhalten von PHEVs über einen realen 24-stündigen Zyklus zu untersuchen. Die Simulation von Tagesverläufen wird von Basler [81] um klimatische Daten erweitert, um den Einfluss der Klimaanlage auf die Reichweite bei BEVs zu ermitteln. Darauf aufbauend stellen Menken et. al. eine neuartige Methode zur Berechnung des realen Jahresenergieverbrauchs eines Pkw-Teilsystems vor [68]. Im Gegensatz zu bisherigen Methoden berücksichtigt die neu entwickelte Methode die Fahr- und Parkzeiten des Fahrzeugs durch eine geringe Anzahl statistisch repräsentativer Tagesverläufe bei repräsentativen Verläufen meteorologischer Größen.

2.2 Klimatische Randbedingungen

Während Lufttemperatur, Luftfeuchte und Solarstrahlung deutlichen Einfluss auf die Fahrzeugklimatisierung haben, werden meteorologische Größen wie Luftdichte, Luftdruck, Windstärke und -richtung, Niederschlagsart und -menge vernachlässigt.

Die Solarstrahlung erreicht die Erdoberfläche als direkte und diffuse Strahlung. Die sich aus der Summe von direkter Strahlungsstromdichte Φ_{dir} und diffuser Strahlungsstromdichte Φ_{diff} ergebende Globalstrahlung Φ_{global} bei gegebener Tageszeit, Tag des Jahres und Ort sowie Zustand der Atmosphäre erreicht das Fahrzeug nur, wenn dieses vollständig exponiert im Freien steht. Laut Aussage der Europäischen Kommission kann angenommen werden, dass sich Personenkraftwagen zu 51% der Zeit im Schatten aufhalten. Es wird zudem eine mittlere Schattenhäufigkeit während des Parkens von 57% und eine mittlere Schattenhäufigkeit während des Fahrens von 20% angegeben [82]. Die das Fahrzeug erreichende Strahlung $\Phi_{fzg}(t)$ setzt sich mit dem Verschattungsgrad $B(t)$ wie folgt zusammen:

$$\Phi_{fzg}(t) = B(t) \cdot \underbrace{(\Phi_{dir}(t) + \Phi_{diff}(t))}_{=\Phi_{global}(t)} + \underbrace{\Phi_{refl}(t)}_{=0} \quad (2.1)$$

Die zum Beispiel von Fassaden reflektierte Strahlung $\Phi_{refl}(t)$ sowie die Richtung der direkten Strahlung wird vernachlässigt. Es ist zu erwähnen, dass eine Zusammenfassung der Strahlungen nach Gleichung 2.1 nicht immer zulässig ist. So werden direkte und diffuse Strahlung für das Fahrzeugkabinenmodell getrennt behandelt, da diese zu unterschiedlich starker Erwärmung des Innenraums führen. Die hier genutzten klimatischen Daten für die Regionen Europa, USA und China werden der Wetter- und Klimadatenbank METEONORM [83] entnommen.

2.3 Relevante Randbedingungen und thermische Anforderungen

In diesem Abschnitt werden die für die Simulation relevanten Randbedingungen R festgelegt. In Abhängigkeit der Randbedingungen ergeben sich die dynamischen thermischen Anforder-