

1 Einleitung

1.1 Motivation

Seit über einem Jahrhundert werden Personenkraftwagen (Pkw) vorwiegend mit einem Verbrennungsmotor betrieben. Aufgrund von umweltpolitischen Beschlüssen, Ressourcenknappheit sowie den Wünschen der Kunden nach ökologischen und ökonomischen Fahrzeugen [BU14] wurden in den letzten Jahren neue Antriebskonzepte auf den Markt gebracht. Die Entwicklung vom Verbrennungsmotor hin zu alternativen Antriebstechnologien hat einen großen Einfluss auf die Wärme- und Energiebilanz im Fahrzeug. Neben der unveränderten Kundenerwartungshaltung nach thermischem Komfort im Fahrzeuginnenraum stellen zusätzliche elektrische Antriebskomponenten wie die Batterie, die Leistungselektronik sowie der elektrische Motor weitere Anforderungen an das Pkw-Thermomanagement [BT10].

Da im Gegensatz zu konventionell angetriebenen Fahrzeugen die Abwärme des Verbrennungsmotors für das Heizen als Hauptwärmequelle oft nicht mehr ausreichend oder gar nicht verfügbar ist, müssen neue Heizkonzepte entwickelt werden. Auch die Grenztemperaturen der elektrischen Antriebskomponenten liegen im Vergleich mit denen eines Verbrennungsmotors wesentlich niedriger, sodass bei Hybrid-Fahrzeugen zwei Temperaturbereiche mit den Kühlmittelkreisläufen des Fahrzeugs abgedeckt werden müssen. Weiterhin kann es bei hohen Umgebungstemperaturen erforderlich sein, die Hochvoltbatterie mit Hilfe des Kältemittelkreislaufs auf ein Temperaturniveau unterhalb des Umgebungsniveaus zu kühlen [BGF11]. Eine weitere Herausforderung bei der Entwicklung eines Thermomanagement-Konzepts für elektrifizierte Pkw ist die Integration in bestehende Fahrzeugarchitekturen bei unveränderten Anforderungen hinsichtlich Fahrkomfort und Betriebssicherheit auch unter extremen klimatischen Bedingungen [Pis+14]. Vor allem der Kältemittelkreislauf, der in konventionellen Fahrzeugen ausschließlich der Klimatisierung des Fahrzeuginnenraums dient, wird in Zukunft vielseitige Heiz- und Kühlaufgaben übernehmen müssen und kann nicht mehr als ein entkoppeltes, isoliertes System betrachtet werden [Eur15]. Dies führt bei elektrifizierten Fahrzeugen oft zu einer Erhöhung der Komplexität des Kältemittelkreislaufs [Zho10, SH13, Jel+14].

Bei elektrisch betriebenen Fahrzeugen stellt das Thermomanagement den größten Nebenverbraucher dar und kann die elektrische Reichweite je nach Betriebsbedingungen um bis zu 50% reduzieren [FR00, Kon+11, SS14, SFF14, KLL15]. Dies gilt sowohl für teil elektrifizierte Hybrid-Fahrzeuge (*PHEV* - Plug-In Hybrid Electric Vehicle) als auch für rein batterieelektrisch betriebene Pkw (*BEV* - Battery Electric Vehicle). Ein wesentlicher Fokus bei der Entwicklung solcher Fahrzeuge liegt daher auf der Systemeffizienz, da der

Energiegehalt eines geladenen Hochvoltspeichers wesentlich kleiner als der eines gefüllten Kraftstofftanks ist. Vor allem bei batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen wirkt sich eine Verminderung der für das Heizen oder Kühlen benötigten Energie positiv auf die elektrische Reichweite des Fahrzeugs aus.

1.2 Stand der Wissenschaft und Technik

1.2.1 Sekundärkreislaufsysteme

Eine Möglichkeit, den steigenden Anforderungen an das Thermomanagement zu begegnen, ist der Einsatz von Sekundärkreislaufsystemen mit einem kompakten Kältemittelkreislauf [GCB07]. Dabei wird ein zentraler Kältemittelkreislauf über Sekundärfluidkreisläufe an die elektrischen Antriebskomponenten angebunden. Sekundärkreislauffluid-Wärmeübertrager für die Temperierung der in den Fahrzeuginnenraum eintretenden Luft sind im Klimagerät verbaut. Ein weiterer Wärmeübertrager in der Fahrzeugfront stellt eine thermische Verbindung des Sekundärkreislauffluids mit der Umgebungsluft her. Im Gegensatz zu konventionellen Klimaanlageanlagen, bei denen sich der Kältemittelverflüssiger in der Fahrzeugfront und der Verdampfer im Klimagerät befindet, erlauben Sekundärkreislaufsysteme eine kompakte und modulare Bauweise. Zudem ist die hermetische und crasht sichere Kapselung des kältemittelführenden Primärkreislaufs möglich. Aus diesem Grund eignen sich Kompaktkältemittelkreisläufe auch für den Einsatz von alternativen Kältemitteln, die teilweise eine hohe Entflammbarkeit besitzen. Bereits seit den 1990er Jahren werden solche Systeme für Pkw diskutiert [WOV97, Gho99], im Bereich der Omnibusklimatisierung sind sie vereinzelt serienmäßig eingesetzt [May98, Umw10]. Aufgrund der aktuellen Herausforderungen, die neue, elektrifizierte Antriebs- und Klimatisierungskonzepte mit sich bringen, rückt der Einsatz von Sekundärkreislaufsystemen im Pkw wieder in den Fokus [MS10, Kow+12, Eis12, Mal+12, MMW13, Lem15, Lin+14].

In bisher veröffentlichten Untersuchungen zu Sekundärkreislaufsystemen von Ghodbane et al. [GCB07], Eisele [Eis12] oder Lemke [Lem15] liegt der Fokus meist auf energetischen Bewertungen unter hohen Umgebungstemperaturen ($T_{\text{Umg}} \geq 20^\circ\text{C}$). Nur wenige Veröffentlichungen [Kow+12] gehen auf die Möglichkeit der Nutzung der Abwärme der elektrischen Antriebskomponenten und den Betrieb des kompakten Kältemittelkreislaufs in einem Wärmepumpenmodus zum Heizen des Fahrzeuginnenraums ein.

Während Eisele [Eis12] ein System beschreibt, das lediglich auf der Verdampferseite mit einem Sekundärkreislauf ausgerüstet ist und dies mit einem konventionellen System vergleicht, leistet Lemke [Lem15] einen Beitrag zur Beschreibung und Bewertung eines Sekundärkreislaufs auf der Verdampfer- und Verflüssigerseite im Vergleich mit einem konventionellen Referenzsystem. Ein systematischer Vergleich einer konventionellen Pkw-Klimaanlage mit verschiedenen Ausprägungen von Sekundärkreislaufsystemen (Verdampfer- und/oder Verflüssigerseite mit einem Sekundärkreislauf) im Bezug auf die für den Fahrzeuginnenraum nutzbare Heiz- oder Kühlleistung ist nicht bekannt.

Aufgrund des unterschiedlichen Anlagenverhaltens und der verschiedenen Anforderungen im dynamischen Betrieb war ein Vergleich von konventionellen Klimaanlage mit Sekundärkreislaufsystemen bisher kaum möglich [Lem15]. Zudem bleibt der durch die Klimaanlage herbeigeführte Mehrverbrauch in zulassungsrelevanten Fahrzyklen und Bewertungskriterien bisher weitgehend unberücksichtigt. Abhilfe könnte eine Überprüfung des Energieverbrauchs von Klimaanlage in einem zusätzlichen Fahrzyklus schaffen, durch den die Entwicklung und der Verkauf energieeffizienter Anlagen gefördert werden können [SJ10].

In einer Vielzahl von Arbeiten wird auf die veränderte Betriebscharakteristik von Sekundärkreislaufsystemen im Vergleich zu konventionellen Klimaanlage verwiesen. Aufgrund der thermischen Kapazitäten in den Sekundärfluidkreisläufen unterscheidet sich das dynamische Verhalten. Ling et al. [Lin+14] bewerten den Einfluss der Fluidmasse im niederdruckseitigen Sekundärkreislauf beim Abkühlen des Innenraums innerhalb definierter Randbedingungen. Auch bei Lemke [Lem15] werden energetische Einspeicherungen in der thermischen Masse der Sekundärkreisläufe ausschließlich während definierter stationärer und transientser Fahrzustände berücksichtigt, die lediglich durch Leerlaufphasen im Sekundenbereich unterbrochen sind. Hierbei sei auch Eisele [Eis12] erwähnt, der in seiner Bewertung die Länge der Leerlaufphasen während definierter Zyklen verdreifacht.

Vor allem aufgrund der Möglichkeit einer hermetischen Kapselung eignen sich Sekundärkreislaufsysteme für den Einsatz alternativer, gegebenenfalls auch brennbarer Kältemittel. So wird bereits der Einsatz von R-152a [GCB07], dem hochentzündlichen Propan (R-290) [WOV97, Eis12] oder dem umweltfreundlichen, natürlichen Kältemittel R-744 (CO_2 , Kohlenstoffdioxid) [ixe13] beschrieben; ein Vergleich der verschiedenen Kältemittel in einem Kompaktkältemittelkreislauf ist jedoch noch nicht bekannt und erfolgt daher in dieser Arbeit.

1.2.2 Bewertungs- und Prüfkriterien für das Pkw-Thermomanagement

Obwohl in der Automobilindustrie ein großer Aufwand betrieben wird, messbare Ziele wie beispielsweise maximale Leistung bei einem minimalen Schadstoffausstoß und Energieverbrauch verschiedener Teilsysteme zu gewährleisten, werden zwei Einflussfaktoren oft nur unzureichend berücksichtigt. Zum einen ist dies das Mobilitätsverhalten der Kunden (insbesondere im Verlauf eines Tages) und zum anderen die während der Fahrten auftretenden klimatischen Randbedingungen (siehe Abbildung 1.1). Da das Pkw-Thermomanagement neben dem Antriebsstrang den größten Energiebedarf in einem batteriebetriebenen Elektrofahrzeug hat [FR00, Kon+11, KLL15], sind die Effizienzen der Heiz-, Kühl- und Klimatisierungssysteme somit von besonderer Bedeutung. In den meisten zulassungsrelevanten Zyklen wird die Energieaufnahme des Thermomanagements jedoch nicht berücksichtigt. Dazu zählen der neue Europäische Fahrzyklus (NEFZ) [EU 98], die United States Federal Test Procedure (FTP) [US 14] oder auch die verschiedenen Artemis-Zyklen [And04]. Lediglich die SC03 Supplemental Federal Test Procedure [US 12a] und die so genannte

5-Cycle-Method [US 06] berücksichtigen den Einfluss der Klimaanlage auf die Motorlast und somit die Pkw-Emissionen.

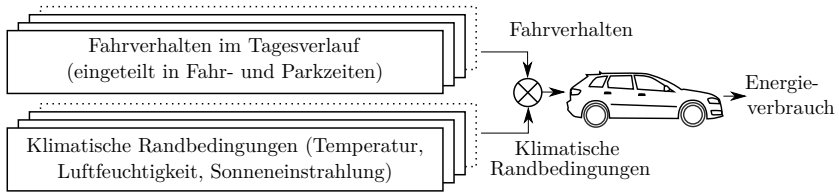


Abbildung 1.1: Einflüsse auf den Energieverbrauch von Pkw-Teilsystemen.

Die Auslegung und Dimensionierung der verschiedenen Komponenten für das Thermomanagement erfolgt meist unter stationären Extrembedingungen, die in firmenspezifischen und nationalen Standards dokumentiert sind. Für die Bewertung von Heizsystemen und Klimaanlage in der Automobilindustrie haben sich der Heizleistungstest nach VDA-Richtlinie 220 [Ver05] bzw. der so genannte Pulldown-Test [Ham08] für den Klimatisierungsbetrieb etabliert. Bei diesen beschriebenen Testverfahren steht die Bewertung der Leistungsfähigkeit der Systeme im Vordergrund. Hierzu zählen das Aufheizen der Fahrzeugkabine bei einer Umgebungstemperatur von $T_{\text{Umg}} = -20^\circ\text{C}$ sowie eine Abkühlung des Innenraums bei einer Umgebungstemperatur von $T_{\text{Umg}} = 40^\circ\text{C}$, einer Luftfeuchtigkeit von $\varphi_{\text{Umg}} = 40\%$, einer solaren Einstrahlung von $\dot{q}_{\text{sol}} = 1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ sowie einer entsprechenden Vorkonditionierung. Zwar sind eine schnelle Aufheizung oder Abkühlung des Innenraums wesentliche Kundenanforderungen; für eine Bewertung der Effizienz im Jahresverlauf sind sie jedoch ungeeignet. Hierfür sind nicht die eventuell auftretenden Extremwerte, sondern vielmehr die durchschnittlichen repräsentativen Betriebsbedingungen von Bedeutung.

Eine umfassende Übersicht wissenschaftlicher Veröffentlichungen zum Fahrverhalten in Kombination mit Wetterdaten zeigt Strupp [Str11]. Dazu zählen die teilveröffentlichten Lastprofile der Firma Behr [Kam+96], das *Average Mobile Customer Usage Model* von Duthie [Dut02], das Berechnungswerkzeug *GREEN-MAC-LCCP* [PHB08] sowie die für die Forschungsvereinigung Automobiltechnik (FAT) entwickelte Datenbank *Klimatische Daten und Pkw-Nutzung* [SL09], in welcher klimatische Daten mit der Pkw-Nutzung und der Bevölkerungsdichte verknüpft sind.

Werden verschiedene Klimaanlage systeme miteinander verglichen (beispielsweise mit unterschiedlichen Kältemitteln oder verschiedenen Bauformen), so wird oft die jeweilige Kälteleistung als Bewertungsgröße herangezogen. Meist werden die Anlagen jedoch nicht auf den gleichen Wert für die Heiz- bzw. Kühlleistung geregelt. So ist zu beobachten, dass weder bei Untersuchungen verschiedener Kältemittel [Mem+05, Min06] noch beim Vergleich unterschiedlicher Anlagensysteme (konventionelle Klimaanlage und Sekundärkreislaufsystem) [Gho00, Kow+12] auf eine vergleichbare Kühlleistung geregelt wird. Alternativ dazu besteht die Möglichkeit, die zu vergleichenden Anlagen auf die selbe Kühlleistung zu regeln, was jedoch wiederum keinerlei Aussage hinsichtlich dynamischer Effekte zulässt. Lediglich Fietz et al. [FG07] regeln ihre Anlagen beim Vergleich von R-134a mit R-744

im Dynamikbetrieb auf die gleiche Kälteleistung. Eine weitere Möglichkeit für den Vergleich von Anlagen mit unterschiedlicher Betriebscharakteristik ist eine Integration der Anlagenleistung über die Versuchsdauer, wodurch der jeweiligen Anlagencharakteristik im dynamischen Betrieb Rechnung getragen werden kann [Eis12]. Im Hinblick auf den simulativen Vergleich von Sekundärkreislaufsystemen mit konventionellen Kältemittelkreisläufen schlägt Lemke [Lem15] den Vergleich der integrierten Kälteleistung am Ende des betrachteten transienten Fahrzustands vor. Im Falle einer Abweichung ist das Simulationsmodell des „leistungsschwächeren“ Systems zum Beispiel durch eine Vergrößerung des Hubvolumens, der Verdichterdrehzahl oder der Wärmeübertragungsfläche entsprechend anzupassen.

Eine Methodik zur Beschreibung des repräsentativen Fahrverhaltens im Tagesverlauf unter der Berücksichtigung von Fahr- und Parkzeiten sowie klimatischen Umgebungsbedingungen ist nicht bekannt und wird daher in dieser Arbeit beschrieben [Men+15a].

1.3 Ziele der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung und Bewertung eines Sekundärkreislaufsystems mit kompaktem Kältemittelkreislauf für das Pkw-Thermomanagement. Abbildung 1.2 zeigt den schematischen Aufbau des in dieser Arbeit untersuchten Systems. Alle dargestellten und für das Thermomanagement eines batteriebetriebenen Fahrzeugs relevanten Komponenten sind über Sekundärkreisläufe indirekt an den zentralen primären Kältemittelkreislauf angebunden. Die Verteilung der an das Sekundärfluid gebundenen Enthalpieströme erfolgt über eine kompakte Verteilereinheit, mit deren Hilfe verschiedene Verschaltungszustände dargestellt werden können.

Die wesentlichen Schwerpunkte dieser Arbeit sind:

Bewertung von Sekundärkreislaufsystemen für die Innenraumklimatisierung unter typischen Betriebsbedingungen im Jahresverlauf: Dies umfasst neben dem bisher hinreichend untersuchten Verhalten bei hohen Umgebungstemperaturen (Klimatisierungsbetrieb) auch den Betrieb einer Wärmepumpe im Heiz- und Reheat-Modus. Der in dieser Arbeit vorgestellte integrierte Ansatz unter Einbindung der elektrischen Antriebskomponenten (Leistungselektronik, Elektromotor) wird zusätzlich bei niedrigen und gemäßigten Umgebungstemperaturen untersucht. So kann der Kältemittelkreislauf unter Nutzung der elektrischen Abwärmen von E-Maschine, Leistungselektronik und gegebenenfalls auch der Batterie in einem Wärmepumpenmodus zum Heizen des Fahrgastraums betrieben werden.

Simulativer Vergleich des dynamischen Betriebsverhaltens von Sekundärkreislaufsystemen mit einem konventionellen Kältemittelkreislauf: Die vorliegende Arbeit vergleicht simulativ das dynamische Betriebsverhalten von Systemen, welche teilweise oder vollständig mit einem Sekundärkreislauf auf der Verdampfer- und/oder Verflüssigerseite versehen sind, mit dem einer konventionellen Serienanlage.

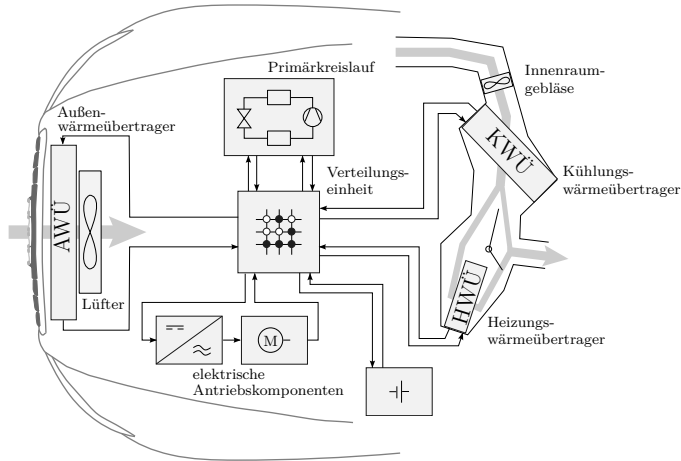


Abbildung 1.2: Grundlegender schematischer Aufbau des in dieser Arbeit untersuchten Sekundärkreislaufsystems mit einem kältemittelführenden Primärkreislauf. Die Verteilereinheit ermöglicht die Darstellung verschiedener vom jeweiligen Betriebsfall abhängiger Verschaltungszustände auf der Sekundärflüssigkeitsseite.

Entwicklung und Anwendung einer neuen klimatisierungsrelevanten Bewertungsmethodik unter Berücksichtigung des Mobilitätsverhaltens zur Bewertung des Jahresenergieverbrauchs für ein Thermomanagementsystem: Für eine mögliche Untersuchung des Einflusses thermischer Massen und Strategien zur Vorkonditionierung eines Pkw-Systems soll das Bewegungsprofil des Fahrzeugs im Tagesverlauf unter der Berücksichtigung von Parkzeiten beschrieben werden. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit eine Methode zur repräsentativen Beschreibung des Fahrverhaltens im Tagesverlauf entwickelt und deren Anwendungsmöglichkeiten aufgezeigt.

Vergleich verschiedener Kältemittel (R-134a, R-1234yf, R-290, R-744 u. a.) für den Einsatz in Kompaktkältemittelkreisläufen: Aufgrund der Möglichkeit einer hermetischen Kapselung eignen sich Kompaktkältemittelkreisläufe für den Einsatz von alternativen Kältemitteln, die teilweise eine hohe Entflammbarkeit besitzen. Die Einsatzmöglichkeiten verschiedener als Drop-In für R-134a-Anlagen geeigneter Kältemittel (wie beispielsweise Kohlenwasserstoffe) werden in der vorliegenden Arbeit unter extremen Randbedingungen simulativ bewertet. Durch entsprechende Modifikationen des Simulationsmodells erfolgt zudem eine Bewertung des umweltfreundlichen, natürlichen Kältemittels R-744 (CO_2 , Kohlenstoffdioxid).

Alle simulativen Untersuchungen in dieser Arbeit basieren auf Annahmen eines batteriebetriebenen Elektrofahrzeugs der Kompaktklasse. Meist wird bei dieser Art von Fahrzeugen ein drehzahlgesteuerter, elektrischer Verdichter im Kältemittelkreislauf verwendet. Bei allen folgenden Untersuchungen kommt zudem ein elektrisches Expansionsventil zum Einsatz. Somit können zwei Freiheitsgrade (die Drehzahl des Verdichters und der Öff-

nungsquerschnitt des Expansionsventils) für den Betrieb eines Kältemittelkreislaufs zur Einstellung sämtlicher Betriebsbedingungen ausgenutzt werden.

1.4 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in insgesamt 9 Kapitel. Abbildung 1.3 zeigt die schematische Darstellung des Aufbaus dieser Arbeit.

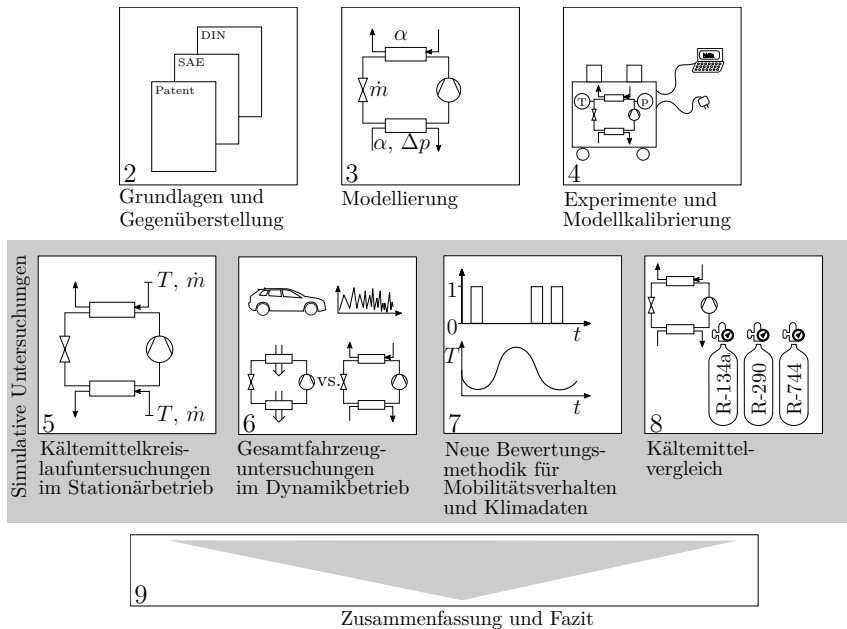


Abbildung 1.3: Schematische Darstellung des Aufbaus dieser Arbeit.

Kapitel 2 enthält Grundlagen zum Kaldampfprozess und stellt die grundsätzlichen Aufbauten von konventionellen Pkw-Klimatisierungssystemen und Sekundärkreislaufsystemen gegenüber. Es werden zudem die Rahmenbedingungen für den Einsatz verschiedener Kältemittel vorgestellt.

Kapitel 3 beschreibt den Aufbau der in dieser Arbeit verwendeten Simulationsmodelle. Die Komponenten des primären Kältemittelkreislaufs sowie der Sekundärkreisläufe werden vorgestellt. Ein besonderer Schwerpunkt liegt hierbei in der Modellierung von Plattenwärmeübertragern. Zudem werden der Aufbau und die Regelung des Gesamtsystems beschrieben.

Kapitel 4 geht auf die Versuchsanlage zur Kalibrierung des Simulationsmodells für den primären Kältemittelkreislauf ein. Die Komponenten, die Messtechnik sowie der Betrieb der Anlage werden beschrieben. Die Kältemittelfüllmenge wird experimentell bestimmt und das Simulationsmodell des Kältemittelkreislaufs in ausgewählten Betriebspunkten kalibriert.

Kapitel 5 enthält die Ergebnisse der simulativen Untersuchungen des primären Kältemittelkreislaufs im Stationärbetrieb. Es werden die Potentiale einer Reduktion der Kältemittelfüllmenge durch kompakte Bauweise aufgezeigt sowie die Ergebnisse verschiedener Sensitivitätsanalysen für den Aufbau und den Betrieb des primären Kältemittelkreislaufs vorgestellt.

Kapitel 6 beschreibt die simulativen Untersuchungen des Betriebs von Sekundärkreislaufsystemen im Fahrzeug. Zunächst werden die Randbedingungen für die dynamischen Untersuchungen vorgestellt. Weiterhin wird der Einfluss der Positionierung des kompakten Kältemittelkreislaufs im Vorderwagen untersucht. Der Schwerpunkt dieses Kapitels liegt auf dem Vergleich von Sekundärkreislaufsystemen mit einem konventionellen Kältemittelkreislauf.

Kapitel 7 enthält die Entwicklung einer neuen klimarelevanten Bewertungsmethodik unter statistischer Berücksichtigung des Fahrverhaltens zur Ermittlung des Jahresenergieverbrauchs von Thermomanagementsystemen. Hierbei wird das Bewegungsprofil eines Fahrzeugs im Tagesverlauf berücksichtigt. Anschließend wird eine Anwendung dieser Methode für den Vergleich der in dieser Arbeit diskutierten Sekundärkreislaufsysteme mit einer konventionellen Serienanlage vorgestellt.

Kapitel 8 beinhaltet einen Vergleich verschiedener Kältemittel für den Primärkreislauf. Zunächst werden mögliche alternative Kältemittel anhand ihrer thermophysikalischen Eigenschaften für den Einsatz als Drop-In-Kältemittel in einem R-134a-System bewertet. Anschließend erfolgen die notwendigen Anpassungen des primären Kältemittelkreislaufs für den Betrieb mit dem natürlichen Kältemittel R-744 (Kohlenstoffdioxid, CO_2). Schließlich wird eine simulative Untersuchung der verschiedenen Kältemittel im stationären und dynamischen Betrieb durchgeführt.

Kapitel 9 fasst die Ergebnisse der vorangegangenen Kapitel zusammen und gibt einen Ausblick auf weitere Entwicklungsschwerpunkte.

2 Grundlagen und Gegenüberstellung von konventionellen Thermomanagementkonzepten und Sekundärkreislaufsystemen

2.1 Grundlagen des Kaltdampfprozesses

Die meisten kommerziell eingesetzten stationären sowie mobilen Kälte- und Klimaanlage arbeiten nach dem so genannten Kaltdampfprinzip. Dieser Kaltdampfprozess ist auch unter dem Namen Evans-Perkins- oder Plank-Prozess bekannt. Es handelt sich hierbei um einen linksläufigen Kreisprozess, bei dem ein Arbeitsmedium, im Folgenden Kältemittel genannt, in einem geschlossenen System zirkuliert. Abbildung 2.1 zeigt die Prinzipskizze eines solchen thermischen Kreisprozesses.

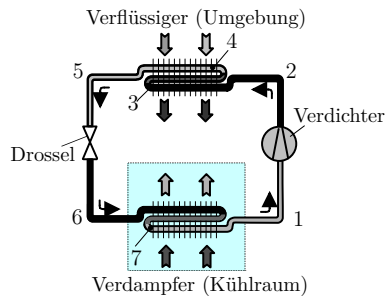


Abbildung 2.1: Prinzipskizze eines Kaltdampfprozesses [WKW13].

Die zugehörigen idealen Zustandsänderungen werden in Abbildung 2.2 in einem T, s - und einem $\log p, h$ -Diagramm dargestellt. Nach Weigand et al. [WKW13] setzt sich der Kreisprozess aus den folgenden Zustandsänderungen zusammen: Bei der Zustandsänderung 1 bis 2 wird überhitzter Kältemittel-Dampf vom Verdichter angesaugt und adiabat isentrop von einem niedrigen Druckniveau p_{ND} auf ein hohes Druckniveau p_{HD} verdichtet. Nach dem Austritt aus dem Verdichter wird das Kältemittel zunächst isobar von 2 nach 3 bis zur Taulinie abgekühlt (enthitzt). Anschließend erfolgt im selben Wärmeübertrager, dem Verflüssiger, die ebenfalls isbare und isotherme Zustandsänderung von 3 nach 4, bei der das Kältemittel vollständig verflüssigt wird. Im Anschluss daran findet eine isobare Unterkühlung der Flüssigkeit von 4 nach 5 statt. Im Expansionsventil (Drossel)

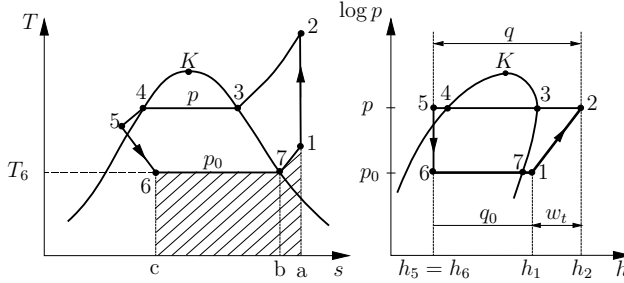


Abbildung 2.2: Zustandsänderungen eines Kaltdampfprozesses in einem T, s - und einem $\log p, h$ -Diagramm [WKW13].

wird die Kältemittelflüssigkeit bei entsprechender Druckreduzierung ins Nassdampfgebiet hinein von 5 auf 6 isenthalp gedrosselt. Schließlich erfolgt nun die vollständig isobare und isotherme Verdampfung des Flüssigkeitsanteils $(1-x)$ von 6 auf 7 sowie gegebenenfalls eine anschließende ebenso isobare Überhitzung des Arbeitsmediums von 7 auf 1, womit sich der Kreis schließt. Im kältemittelabhängigen $\log p, h$ -Diagramm lassen sich die spezifische Verdichterarbeit w sowie die im Verdampfer und Verflüssiger umgesetzten spezifischen Wärmen q als Enthalpiedifferenzen ablesen, sodass für die Leistungszahl $\epsilon_{\text{kühl}}$ gilt:

$$\epsilon_{\text{kühl}} = \frac{q_0}{|q| - q_0} = \frac{q_0}{w_t} = \frac{h_1 - h_6}{h_2 - h_1} \quad (2.1)$$

Die Kälteleistung am Verdampfer lässt sich mit dem umgewälzten Kältemittelmassenstrom \dot{m}_{KM} berechnen:

$$\dot{Q}_0 = \dot{m}_{\text{KM}} \cdot (h_1 - h_6) \quad (2.2)$$

Vergleichbar mit dem vorgestellten Kaltdampfprozess ist der Wärmepumpenprozess. Bei diesem Prozess ist jedoch nicht mehr die auf tiefem Temperaturniveau zugeführte, sondern die auf hohem Temperaturniveau abgeführte Wärme der Nutzen. Abbildung 2.3 zeigt die Prinzipskizze einer auf dem Kaltdampfprozess basierenden Wärmepumpe. Hierbei wird einer Wärmequelle auf einem niedrigen Temperaturniveau Wärme entzogen. Wärmequellen können im Pkw beispielsweise die Umgebungsluft oder Abwärmen aus einem Kühlkreislauf sein. Durch den Wärmepumpenprozess wird schließlich Heizwärme im Verflüssiger auf hohem Temperaturniveau bereit gestellt. Abbildung 2.4 zeigt den Wärmepumpen-Kaltdampfprozess im T, s - und $\log p, h$ -Diagramm. Die durch den Prozess zur Verfügung gestellte Heizwärme entspricht im T, s -Diagramm der von den Punkten 2345ca2 eingeschlossenen Fläche. Im $\log p, h$ -Diagramm sind die spezifische Verdichterarbeit und die abgeführte Heizwärme als Strecken eingetragen, sodass sich die Leistungszahl einer Wärmepumpe aus der Heizwärme (Nutzwärme) des Verflüssigers und der Verdichterleistung ergibt.

$$\epsilon_{\text{heiz}} = \frac{|q|}{|q| - q_0} = \frac{|q|}{w_t} = \frac{h_2 - h_5}{h_2 - h_1} = 1 + \epsilon_{\text{kühl}} \quad (2.3)$$