

PKW-Klimaanlage mit Wärmepumpenmodus für Elektrofahrzeuge.

Vergleich der Kältemittel R1234yf und R134a

Prof. Dr.-Ing. Lutz Mardorf, Dipl.-Ing. Peter Menger

Hochschule Osnabrück, Labor für Angewandte Thermodynamik,

Postfach 1940, 49009 Osnabrück

http://www.mb.hs-osnabrueck.de/05_labore/klima/

Kurzfassung

Im Zweizonenklimaraum des Labors für Angewandte Thermodynamik wurde der Komponentenprüfstand eines Kältemaschinenkreislaufes für die Klimatisierung eines Mittelklasse-Pkws so gestaltet, dass zum Heizen der Fahrgastzelle der im Kältemaschinenkreislauf übliche Kondensator als Verdampfer und der übliche Verdampfer als Kondensator betrieben werden. Die Umschaltung zwischen Kühlbetrieb und Heizbetrieb erfolgt mit einer Ventilschaltung, wobei in beiden Kreisläufen ein innerer Wärmetauscher zum Einsatz kommt. Als Kältemittelverdichter wird ein elektrischer Scrollverdichter eingesetzt.

In experimentellen Untersuchungen werden die COP's der beiden Betriebsarten in Abhängigkeit der Außentemperatur im Sommer- und Winterbetrieb für unterschiedliche Fahrgastzellentemperaturen dargestellt. Besonderer Beurteilung findet der wechselseitige Hoch- und Niederdruckbetrieb der Kondensator- und Verdampfer-Komponenten mit den Luftströmungen im Sommer- und Winterbetrieb.

Da die Gesetzesformulierung der Europäischen Kommission das Kältemittel R134a ab dem 01.01.2017 für alle Neufahrzeuge nicht mehr gestattet, wurde in diesem Prüfstand ein Vergleich mit dem alternativen Kältemittel R1234yf vorgenommen. Hierbei werden sowohl die Auswirkungen auf die COP's im Kältemaschinenkreislauf und im Wärmepumpenmodus als auch die Auswirkungen auf die Betriebsdaten des elektrischen Scrollverdichters gezeigt.

Stichwörter: Klimaanlage mit Wärmepumpenmodus, elektrischer Scrollverdichter, Kältemittel R1234yf

1. Einleitung

Heute gehört die Klimaanlage im PKW zur Standardausstattung. Bei Erstzulassungen deutscher PKW-Marken beträgt der Anteil der Fahrzeuge mit Klimaanlage ungefähr 87 %. Klimaanlagen bieten nicht nur einen gesteigerten Komfort, sondern fördern auch die Sicherheit, da insbesondere bei hohen Temperaturen in der Fahrgastzelle die Konzentration des Fahrers erheblich abnehmen kann. Ebenfalls wird auch bei tieferen Außentemperaturen ein Komfort bei der Beheizung der Fahrgastzelle gefordert. Demnach hat eine PKW -Klimaanlage und -Heizung die Aufgabe die Fahrgastzellenluft so aufzubereiten, dass ein Zustandspunkt der thermischen Behaglichkeit nach DIN EN 13799 gewährleistet wird.

Die Marktakzeptanz von zukünftigen rein Batterie betriebenen Elektrofahrzeugen wird u.a. auch dadurch erreicht, dass der Kunde keine Komforteinbuße bei der Luftaufbereitung der Fahrgastzelle hinnehmen muss.

Bei verbrennungsmotorisch getriebenen PKW's erfolgt die Fahrgastzellenbeheizung i.d.R. über die an das Kühlmittel abgeführte Abwärme des Motors über Luftwärmetauscher. Durch die Verbrauchsoptimierung der Verbrennungsmotoren und mit dem damit verlangsamten Aufheizverhalten der Fahrgastzelle werden verstärkt Zusatzheizungen wie z.B. PTC-Elemente eingebaut. Auch wurden Zusatzheizungen unter Einbeziehung der Klimaanlage mit einem Wärmepumpenmodus oder eines sog. Dreiecksprozesses untersucht. Dabei liefert der Wärmepumpenmodus das schnellste Aufheizverhalten. In zukünftigen rein Batterie betriebenen Elektrofahrzeugen entsteht nur wenig nutzbare Abwärme an der elektrischen Maschine und der Leistungselektronik. Um die Reichweite des Elektrofahrzeuges nicht durch eine elektrische Direktheizung mittels PTC-Element zusätzlich zu verringern, bietet sich hier die Beheizung der Fahrgastzelle unter Einbeziehung der Klimaanlage mit einem Wärmepumpenmodus an.

Bei den aktuell eingesetzten PKW-Klimaanlagen wird standardmäßig das Kältemittel R134a eingesetzt. Bei dem Kältemittel R134a handelt es sich um einen Fluorkohlenwasserstoff (1,1,1,2-Tetrafluorethan), welches einen GWP₁₀₀-Wert von 1300 aufweist. Ausgehend von dem Kyoto-Protokoll von 2005 und der Umsetzung in „Directive 2006/40/EC of the European Parliament and of the Council“ wurde für Kältemittel, die innerhalb der EU in PKW-Neuserien ab 2011 und in Neufahrzeugen ab 2017 für PKW-Klimaanlagen eingesetzt werden, ein maximaler GWP₁₀₀-Wert von 150 festgelegt. Diese Randbedingung ist dann auch für zukünftige Elektrofahrzeuge einzuhalten.

Als eine Alternative zu R134a wurde das Kältemittel R1234yf vorgeschlagen, welches einen sehr niedrigen GWP₁₀₀-Wert von 4 aufweist. Das Kältemittel R1234yf wurde deshalb in den letzten Jahren in einem weltweiten Verbund von mehr als einem Dutzend Fahrzeugherstellern und rund 20 Zulieferern in umfangreichen Tests und Studien unterzogen. Dieses Kältemittel zeichnet sich im Vergleich zu R134a vor allem durch sehr ähnliche physikalische und thermodynamische Eigenschaften wie beispielsweise den Dampfdruck aus. Als Konsequenz könnte R1234yf aus dieser Sicht in bekannten Klimaanlagen mit geringer baulicher Modifizierung zur Anwendung kommen.

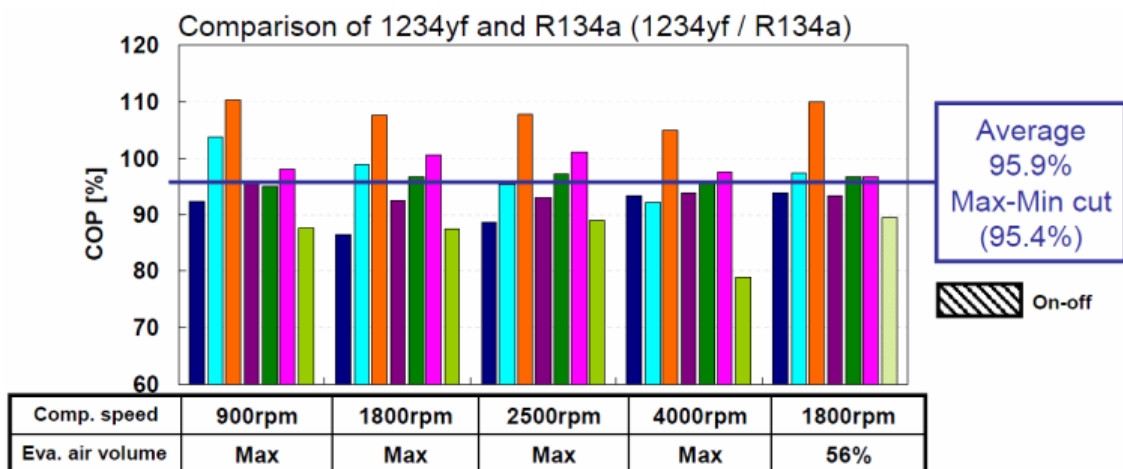


Bild 1: System-Benchmark Ergebnisse des COP's für konstante Verdichter-Drehzahlen des JAMA-JAPIA Konsortiums (Lufttemperatur Umgebung: 45°C, Verdampfer-Eintritt: 35°C) [1]

Ein besonderes Augenmerk bei dem Einsatz des Kältemittels R1234yf gilt dem Vergleich der Leistungszahl COP im Gegensatz zu R134a. In Veröffentlichungen des „SAE Alternative Refrigerant Systems Symposiums 2008“ liegt ein System-Benchmark der Japan Auto Parts Industrie Association— (JAMA-JAPIA Consortium) [1] vor; weiterhin wurde ein Kältemittelvergleich von „Visteon“ [2] vorgestellt. Die experimentellen Untersuchungen im Kältemittelvergleich im System-Benchmark des JAMA-JAPIA Consortiums mit serienmäßig verbauten PKW-Klimaanlagen in 7 unterschiedlichen Fahrzeugen wurden mit einer Außentemperatur von 45°C und Luft Eintrittstemperatur des Verdampfers von 35°C bei unterschiedlichen aber konstanten Drehzahlen durchgeführt und zeigen für das Kältemittel R1234yf im Mittel eine Verringerung des COP um 4,1 %. Vergleichbare Ergebnisse werden in der Veröffentlichung von Visteon gezeigt. In diesen untersuchten Fahrzeugen wurden überwiegend mechanisch angetriebene Schrägscheibenverdichter in der Klimaanlage eingesetzt.

Im Gegensatz zu den verbrennungsmotorisch getriebenen PKW's mit mechanisch angetriebenem Schrägscheibenverdichter wird in zukünftigen rein Batterie betriebenen Elektrofahrzeugen ein direkt elektrisch angetriebener Scroll-Verdichter in der Klimaanlage zum Einsatz kommen. Zusätzlich wird ein elektronisch einstellbares Expansionsventil in Verbindung mit der Drehzahlregelung des in dem Scroll-Verdichter enthaltenen bürstenlosen Gleichstrommotor immer einen den optimierten Betriebsbedingungen angepassten Kältemittelmassenstrom erzeugen. Eine Optimierung der Leistungszahl COP der Klimaanlage wird unter dem Gesichtspunkt der Reichweite des Elektrofahrzeuges einer hohen Priorität zugewiesen.

2. Prüfstands Aufbau

Die Komponenten des Kältemaschinenkreislaufes bestehen im Wesentlichen aus Verdichter, Kondensator, elektronisches Expansionsventil (EEV), Verdampfer, innerem Wärmetauscher (IWT) und Filtertrockner. Die Komponenten sind mittels Magnetventile so verschaltet, das zwischen Kältemaschinen- und Wärmepumpenmodus gewechselt werden kann. Dabei wechselt der Kondensator in die Funktion des Verdampfers und der Verdampfer in die Funktion des Kondensators. Beim Wechsel vom Kältemaschinen- zum Wärmepumpenmodus werden diese Komponenten entgegengesetzt durchströmt.

Der Prüfstand befindet sich in einer zweigeteilten Klimakammer, wobei sich in beiden Teilen unabhängig voneinander Lufttemperaturen einstellen lassen. Der Klimakammerteil für die Außentemperatursimulation (Umgebung) lässt sich zwischen -15°C und +50°C einstellen. Die Simulation der Fahrgastzelle kann in dem anderen Klimakammerteil durch den Lufteintritt in den Fahrzeuginnenraumwärmetauscher zwischen 20°C und 50°C eingestellt werden. Für die Wintersimulation kann diese Temperatur bis knapp oberhalb der Außentemperatur abgesenkt werden.

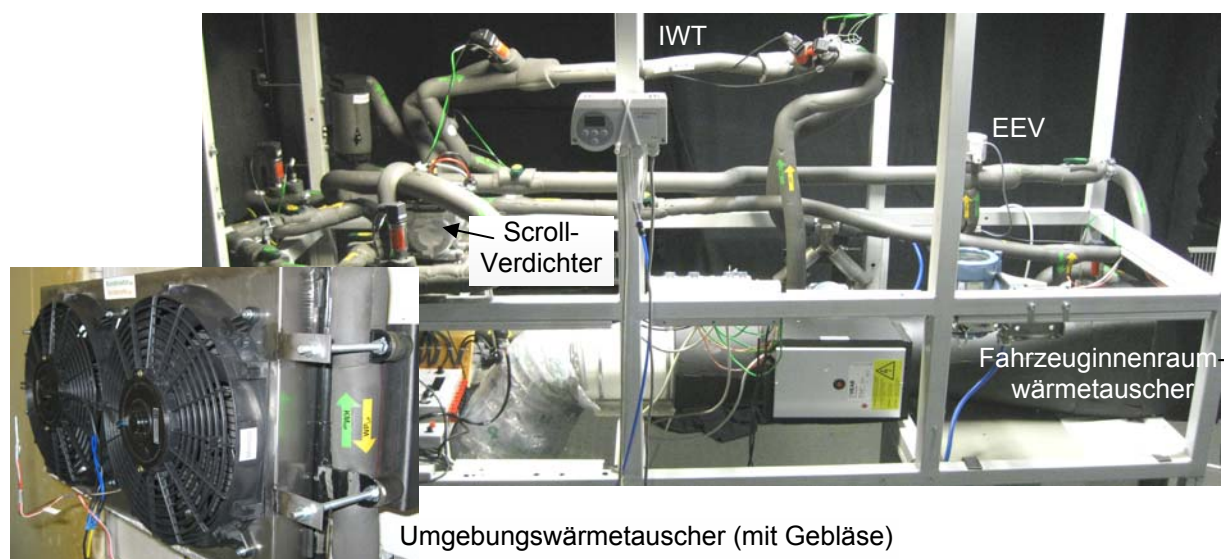


Bild 2: Anordnung der Komponenten im Prüfstand

Der Komponentenprüfstand wurde in Anlehnung an den Kältemaschinenkreislauf eines Mittelklasse-PKW's aufgebaut. Auch die Rohrleitungslängen entsprechen annähernd der eines Mittelklasse-PKW's. Als Fahrzeuginnenraumwärmetauscher (Verdampfer) und als Umgebungswärmetauscher (Kondensator) wurden OEM Replacement Parts gewählt. Als innerer Wärmetauscher kommt ein Koaxial-Gegenstrom-Wärmetauscher der Firma Eaton Corporation zum Einsatz. Als Drossel wurde ein frei einstellbares elektronisches Expansionsventil (EEV) verwendet.

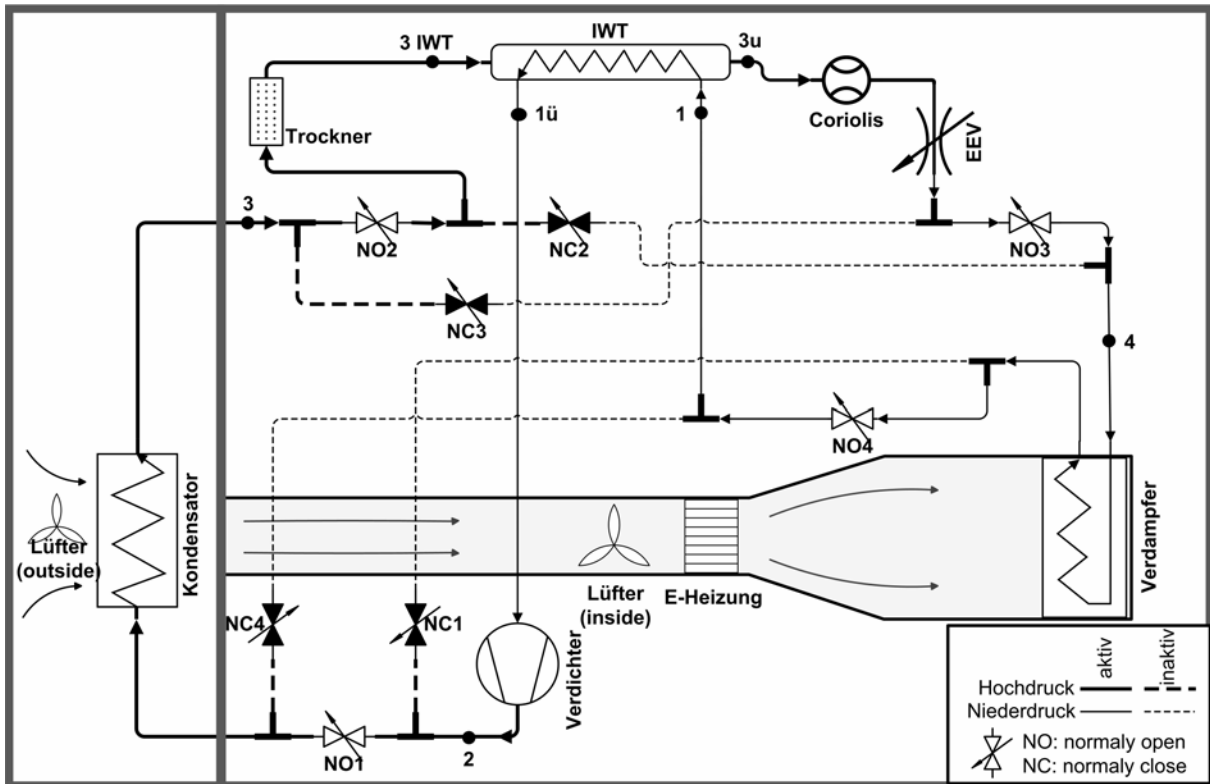


Bild 3: Schema Prüfsandaufbau

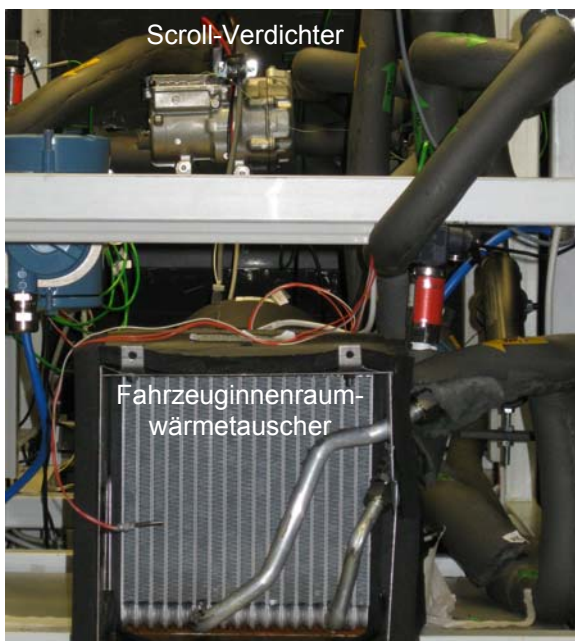


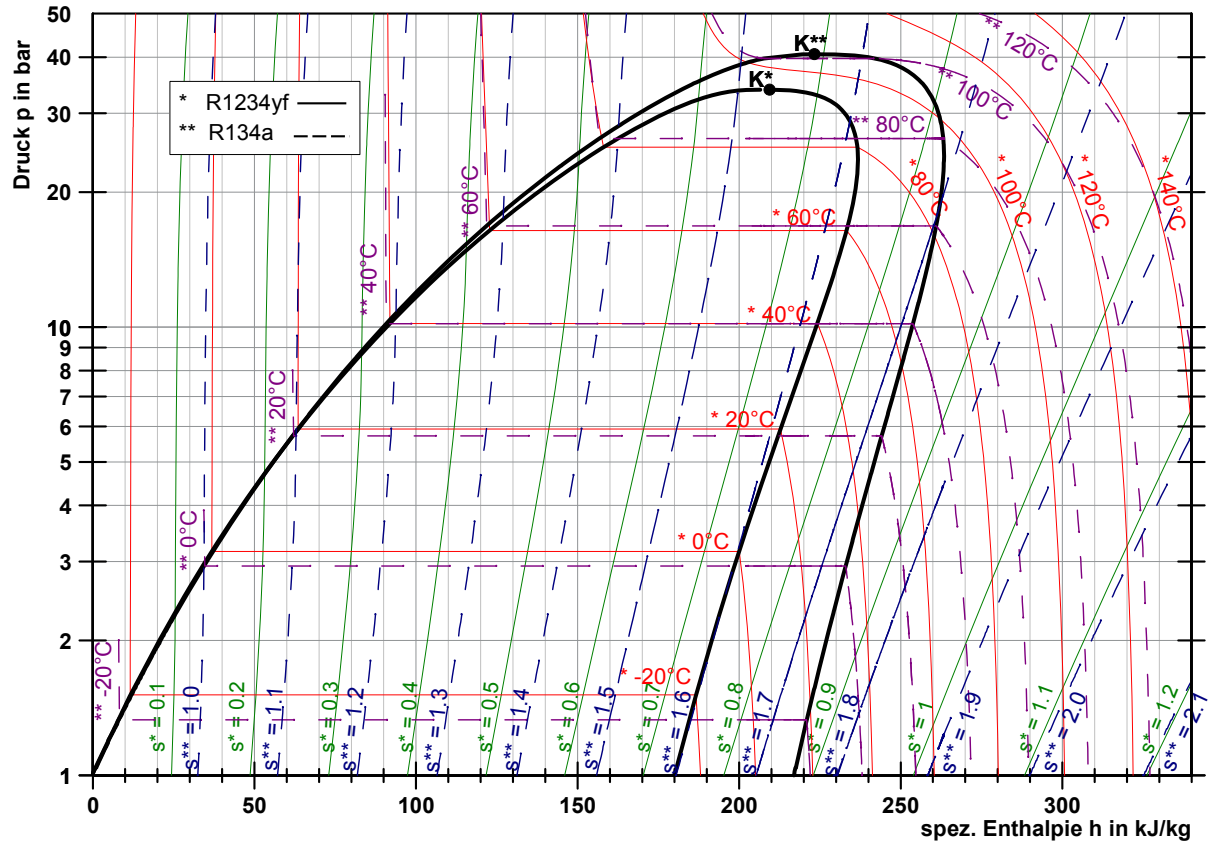
Bild 4: Ansicht des Scroll-Verdichters und des Innenraumwärmetauschers (Verdampfer)

Zur Kompression des Kältemittels wird ein elektrisch angetriebener Scroll-Verdichter mit einem Hubvolumen von 27 cm³ der Firma Denso eingesetzt (Typ ES27). Dieser Verdichter verfügt über einen integrierten Inverter und einen bürstenlosen Gleichstrommotor, dessen Drehzahl über Steuersignale vorgegeben werden kann.

Der Innenraumwärmetauscher ist in einem separierten Kanal eingebaut, in dem der Volumenstrom und die Temperatur variiert werden kann.

2.1 Kältemittel

Nach Angaben von Honeywell und DuPont ist der Betrieb mit dem alternativen Kältemittel R1234yf mit nur geringer technischer Anpassung in bestehenden Anlagen möglich. Ein theoretischer Vergleich beider Kältemittel in Bezug auf die praktische Anwendung im Kältemaschinenmodus ermöglicht einen ersten Ausblick auf das zu erwartende Prüfstandsverhalten. Die Stoffdaten beider Kältemittel wurden mit dem Programm REFPROP [3] ermittelt um mit einem Excelprogramm die Prüfstandsdaten auszuwerten, die mit Programm DIADEM erfasst wurden.



Quelle: LAT, 2010
HS Osnabrück

kritischer Punkt: R134a: $t = 101.061^{\circ}\text{C}$, $p = 40.59 \text{ bar}$
R1234yf: $t = 94.7^{\circ}\text{C}$, $p = 33.82 \text{ bar}$

spez. Entropie s in $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$

Bild 5: Vergleich von R1234yf und R134a im $\log(p)$ - h -Diagramm

Bei Auftragung des Kreisprozesses in das jeweilige $\log(p)$ - h -Diagramm zeigt sich das deutlich schmalere Nassdampfgebiet von R1234yf gegenüber R134a von ca. 18%. Diese verringerte spezifische Kälteleistung bei R1234yf kann durch einen höheren Massenstrom ausgeglichen werden. Jedoch müssen hierbei die Funktionsweise des Verdichters sowie die Lage des Kreisprozesses im $\log(p)$ - h -Diagramm und die damit verbundenen Gegebenheiten berücksichtigt werden.

Bei gleicher Verdampfungs- und Kondensationstemperatur ist das Druckverhältnis für R1234yf günstiger. Im Arbeitsbereich des Verdampfers liegen für R1234yf höhere Drücke vor wobei gleichzeitig im Arbeitsbereich des Kondensators die Drücke niedriger als bei R134a sind. Daher ist das Druckverhältnis beim Kreisprozess mit R1234yf geringer, woraus sich eine geringere Leistungsaufnahme des Verdichters ableiten lässt.

Das Kältemittel R1234yf hat am Verdichtereintritt ein kleineres spezifisches Volumen als R134a und führt somit zu einem größeren Massenstrom pro Hubvolumen des Verdichters. Aufgrund der deutlich geringeren spezifischen Kälteleistung ergibt sich dennoch bei R1234yf eine geringere volumetrische Kälteleistung, was höhere Verdichterdrehzahlen vermuten lässt. Allerdings steht dem gegenüber die vorteilhafte Drucklage bei R1234yf welches im Zusammenhang in den folgenden Versuchen untersucht werden soll.

3. Prüfstandsuntersuchungen

Bei der Festlegung der Randbedingungen für die Prüfstandsversuche zum Vergleich der beiden Kältemittel wurde nicht die identische Drehzahl gewählt, sondern die Betriebspunkte im Kältemaschinen- und im Wärmepumpenmodus wurden durch die jeweiligen äußeren Bedingungen festgelegt. Es wurde eine Versuchsmatrix entwickelt, die auf den errechneten Leistungsanforderungen des Verdampfers und Kondensators zur Klimatisierung und Beheizung der Fahrgastzelle beruhen (Tabelle 1 und Tabelle 2).

Ziel ist es dabei, die Luft bei einem gegebenen Luftmassenstrom im Klimabetrieb auf 20°C abzukühlen. Eine Leistungsvariation wird durch Verringerung der Luft Eintrittstemperatur in 5 K Schritten in den Verdampfer bei konstanter Luftaustrittstemperatur unter Vorgabe der Umgebungstemperatur von 45°C, 35°C und 25°C dargestellt.

Beim Heizbetrieb soll die Luft auf 30°C aufgeheizt werden. Die Leistungsvariation wurde in diesem Modus durch Erhöhung der Luft Eintrittstemperaturen in den Umgebungswärmetauscher in 5 K Schritten dargestellt. Die Außentemperatur wurde im Bereich von -12°C und +15°C variiert.

Mit dem EEV wurde eine Überhitzung am Verdampferaustritt von 3 K bis 5 K eingestellt, die Drehzahl des Verdichters wurde so vorgegeben, dass die Leistungsanforderung des Verdampfers bzw. des Kondensators durch Veränderung des Kältemittelmassenstroms gedeckt wurde. Dieses ist der wesentliche Unterschied zu den Veröffentlichungen des System-Benchmarks in [1] und [2], bei denen der Vergleich mit identischen Drehzahlen durchgeführt wurde.

3.1 Kältemaschinenmodus

Die optimale Kältemittel-Füllmenge für den Prüfstand wurde sowohl für R134a also auch für R1234yf an einer möglichst hohen Kälteleistungszahl (COP) ausgerichtet. Da dieses Kriterium nicht für alle Betriebspunkte eindeutig war, wurde als zusätzliches Kriterium die Unterkühlung des Kältemittels nach dem Kondensator hinzugezogen. Bei Steigerung der Füllmenge setzt ab einer bestimmten Füllmenge eine deutliche Unterkühlung ein, die zu einem höheren Druck führt. Eine Unterkühlung von etwa 5 K wurde als Kriterium herangezogen. [4]

Tabelle 1: Versuchsmatrix mit Teillastbetrieb des Kältemaschinenmodus in Anlehnung an [4],[7]

$t_{L,V,aus}$	20°C				
$t_{L,V,ein}$	45°C	40°C	35°C	30°C	25°C
\dot{Q}_0 , Kältemittel-seitig (Vorgabe)	3,78kW	3,02kW	2,27kW	1,51kW	0,76kW

Es werden keine bestehenden PKW-Klimaanlagen nachgebildet, sondern Untersuchungen zum möglichen Einsatz eines Elektrofahrzeugs durchgeführt. Da im Elektrofahrzeug die Luft nach dem Verdampferaustritt nicht mehr durch Motorabwärme aufgeheizt werden kann, wird die Luftaustrittstemperatur mit 20°C gewählt.

Für beide Kältemittel zeigten die Untersuchungen bekanntermaßen für steigende Außentemperaturen einen sinkenden COP. Höhere Außentemperaturen erfordern auch höhere Kondensationstemperaturen, die nur durch Steigerung der Drucklage zu erzielen sind. Da sich der Verdampfungsdruck bei dieser Betrachtung nicht verändert, führt das zu größeren Druckverhältnissen, die dadurch höhere Verdichterleistungen erfordern.

Auffällig sind die besseren Leistungszahlen für R1234yf in weiten Bereichen im Gegensatz zu R134a entgegen bisheriger Vergleiche in den System-Benchmarks bei gleichen Verdichterdrehzahlen (Bild 6). Bei den durchgeführten Versuchen wurden jedoch die äußeren Randbedingungen und die Anforderung an die Kältemaschine unabhängig der Drehzahl konstant gelassen.

Um den Einfluss der Luftaustrittstemperatur des Verdampfers zu zeigen, wurde abweichend von der Versuchsmatrix in Tab. 1 diese für zwei feste Kälteleistungen bei konstanter Umgebungstemperatur von 45°C zwischen 20°C und 7°C variiert (Bild 7). Somit werden Betriebsfälle gezeigt, bei denen eine Luftentfeuchtung über den Verdampfer möglich ist. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass das grundsätzliche Verhalten der unterschiedlichen Kältemittel sich dabei jedoch nicht ändern.

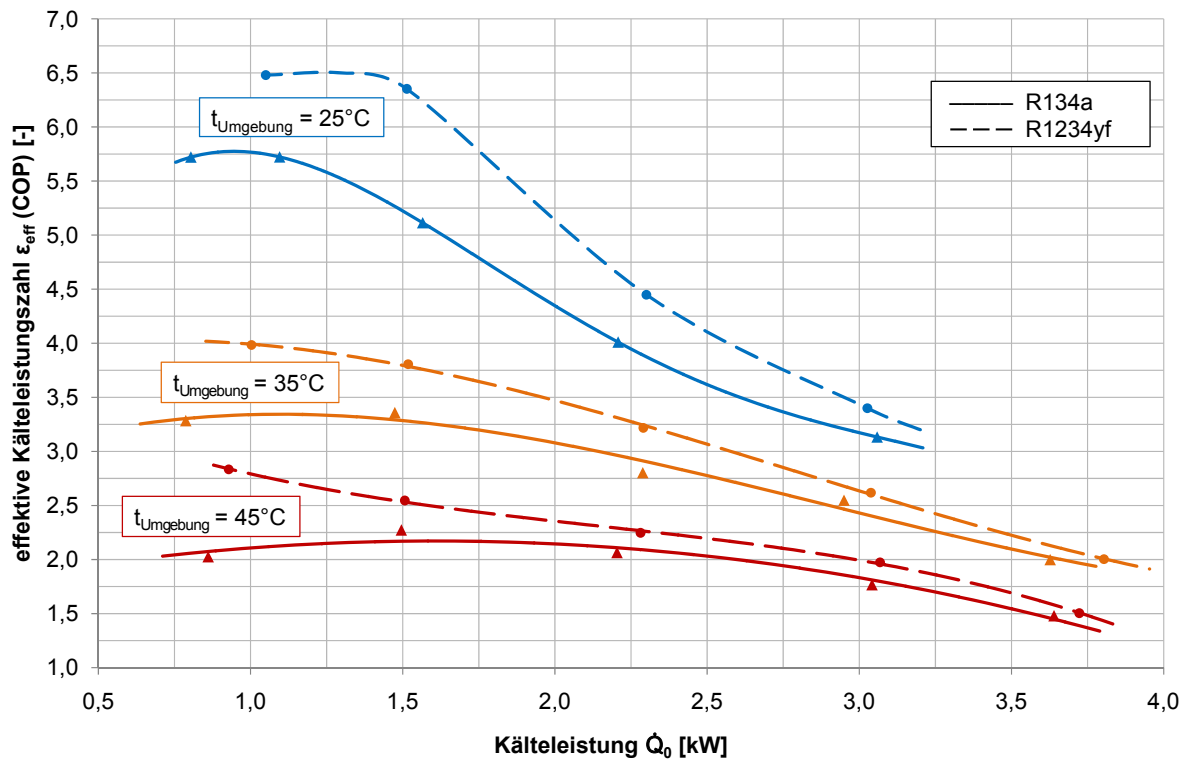


Bild 6: Vergleich der effektiven Kälteleistungszahl als Funktion der Kälteleistung

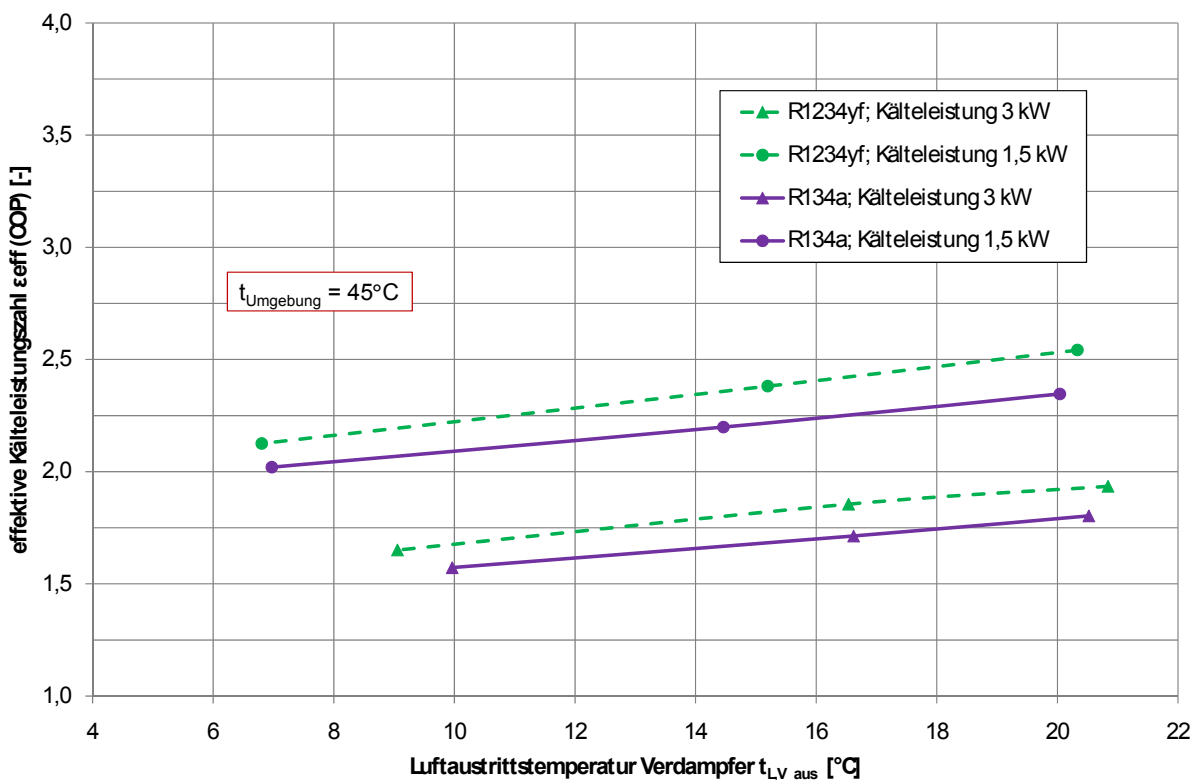


Bild 7: Vergleich der effekt. Kälteleistungszahl als Funktion der Verdampfer-Luftaustrittstemperatur

Für gleiche Kälteleistungen werden beim Kältemittel R1234yf geringere Verdichterdrehzahlen als beim Kältemittel R134a benötigt. Die Stoffdaten des Kältemittels R1234yf bewirken bei gleicher Kälteleistung ein geringeres Druckverhältnis, was sich positiv auf den Kreisprozess auswirkt. Auch wenn mit R1234yf in den Versuchen geringere Verdichterdrehzahlen benötigt werden, erhöht sich der

Kältemittelmassenstrom bei gleichen Kälteleistungen gegenüber R134a während die spezifischen Kälteleistungen bei R1234yf erwartungsgemäß deutlich kleiner ausfallen.

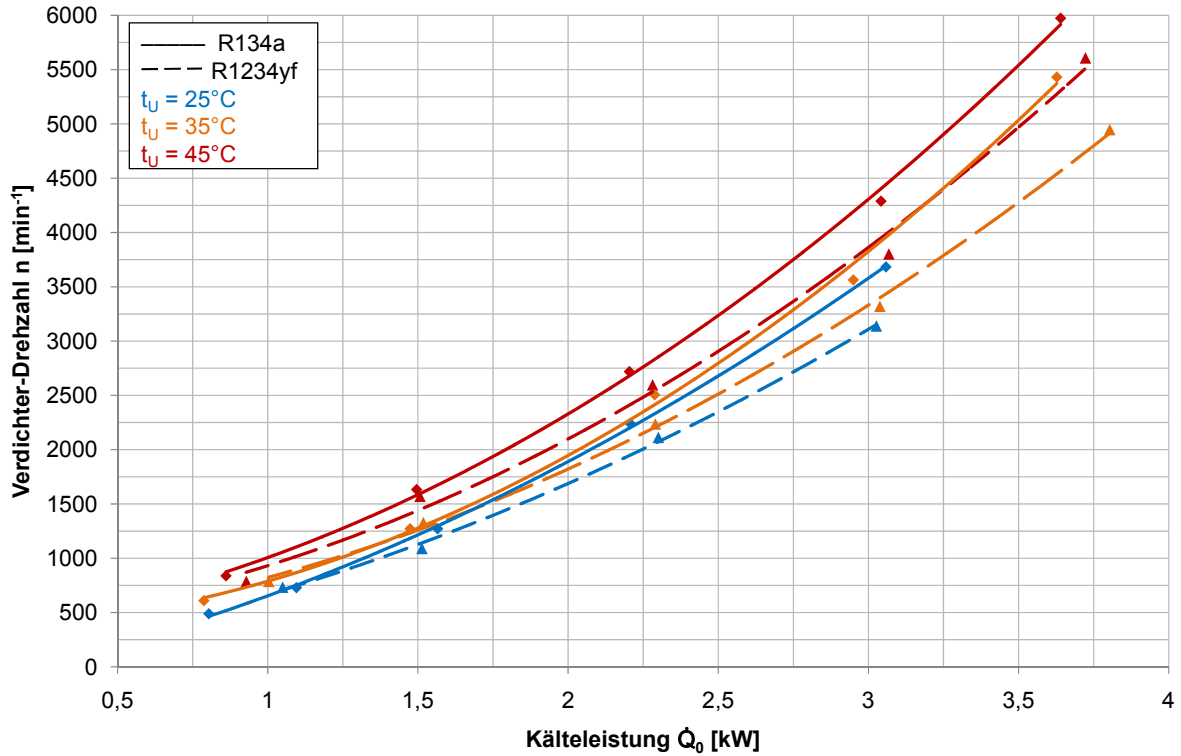


Bild 8: Vergleich der Verdichterdrehzahlen als Funktion der Kälteleistung

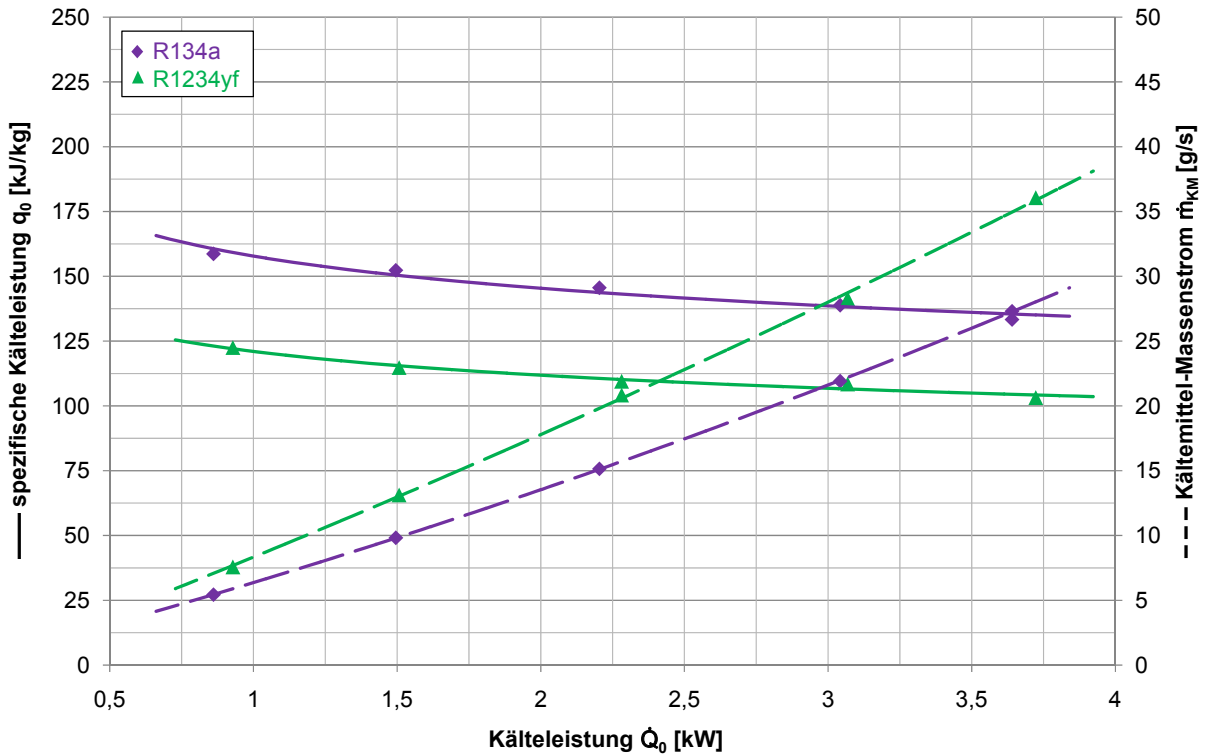


Bild 9: Vergleich von spezifischer Kälteleistung und Kältemittelmassenstrom als Funktion der absoluten Kälteleistung

Die experimentellen Ergebnisse mit R134a und R1234yf bestätigen nicht die theoretische Annahme gleicher Temperaturen bei der Wärmeübertragung im Verdampfer und Kondensator. Sowohl auf Verdampfer- als auch auf Kondensator-Seite zeigt das Kältemittel R1234yf eine geringere mittlere Temperaturdifferenz zum eintretenden Luftmassenstrom des jeweiligen Wärmetauschers.

Betriebs man die Wärmetauscher mit konstanten Leistungen muss die geringere mittlere Temperaturdifferenz beim Kältemittel R1234yf durch eine Erhöhung des Wärmedurchgangskoeffizienten kompensiert werden. Eine Analyse der Stoffdaten bezüglich der Wärmeübertragungseigenschaften bestätigt den höheren Wärmedurchgangskoeffizienten bei R1234yf.

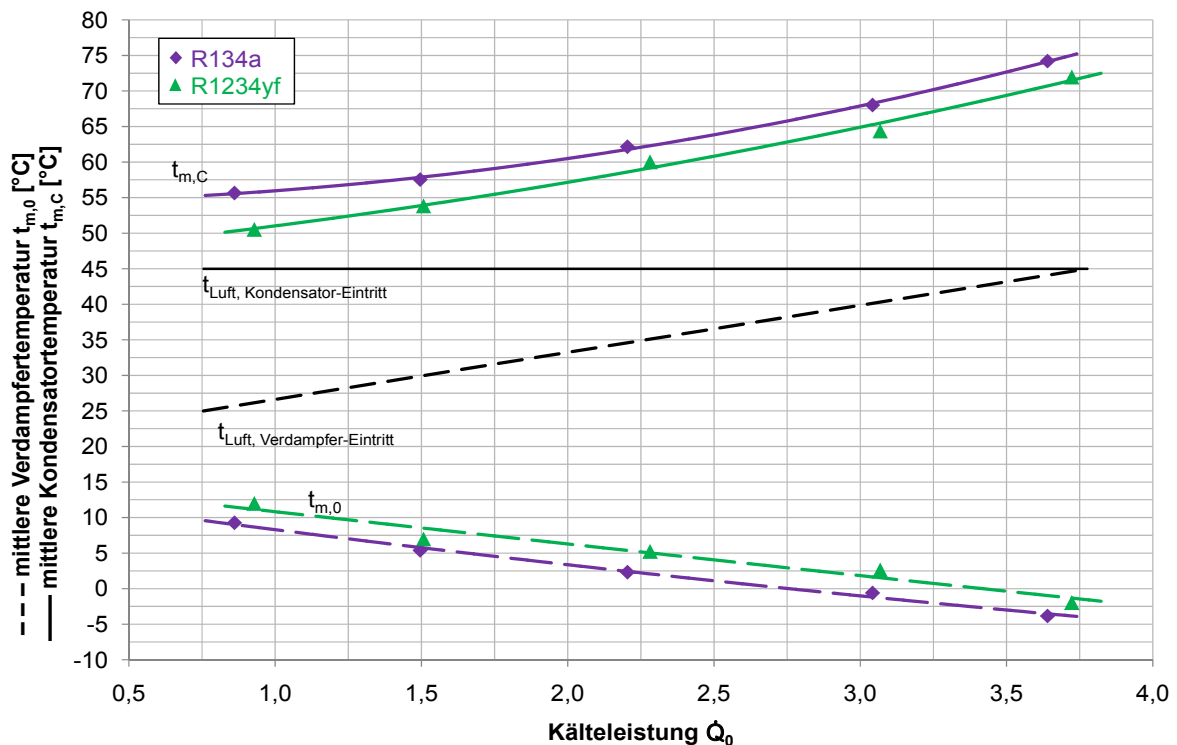


Bild 10: Vergleich der mittleren Temperaturdifferenzen als Funktion der Kälteleistung

Die geringere mittlere Temperaturdifferenz von R1234yf zwischen Verdampfer und dessen Luftströmung hat zur Folge, dass eine höhere Verdampfungstemperatur gegenüber R134a bei gleicher Lufttemperatur am Verdampfer-Eintritt und ähnlicher Kälteleistung vorliegt. Daraus resultieren ein höherer Verdampfungsdruck und ein verringertes Druckverhältnis. Die mittlere, gestrichelte Linie ohne Symbole zeigt in Bild 11 den theoretischen Verdampfungsdruck für R1234yf bei Annahme gleicher Verdampfungstemperaturen wie bei R134a.

Das spezifische Volumen zeigt eine hohe Druckabhängigkeit mit einer exponentiellen Abnahme bei einer isothermen Druckzunahme in der Gasphase.

Für den Verdichtungsprozess hat eine saugseitige Druckerhöhung mit einhergehender Senkung des spezifischen Volumens eine Steigerung des Kältemittelmassenstromes zur Folge. Darin erklärt sich der größere Massenstrom bei identischer Drehzahl des Verdichters bei R1234yf und die kleinere spezifische Kälteleistung wird sogar überkompensiert.

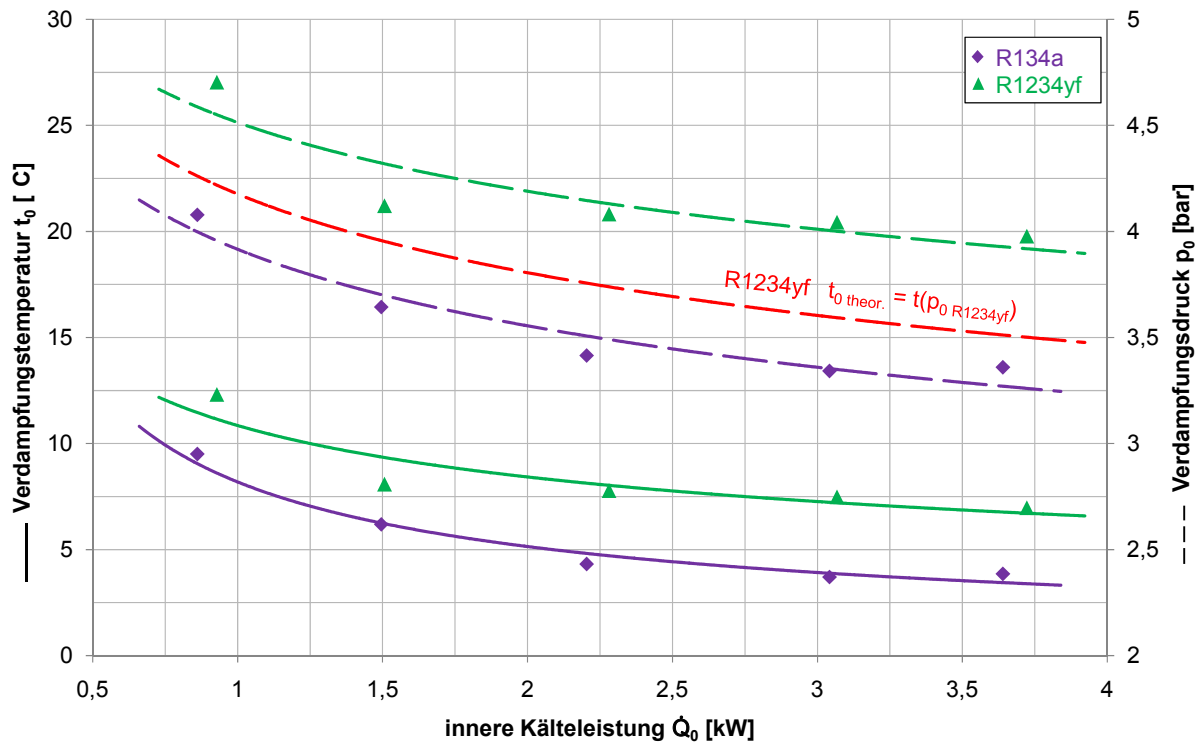


Bild 11: Vergleich der Verdampfungstemperatur und Verdampfungsdruck als Funktion der Kälteleistung

3.2 Verdichter

Bei der Untersuchung des Scroll-Verdichters im Vergleich der beiden Kältemittel wurden aufgrund der zuvor beschriebenen Stoffeigenschaften und der unterschiedlichen Drucklagen die jeweils notwendigen Druckverhältnisse angesetzt. Dadurch wird wie oben beschrieben eine Vergleichbarkeit der Kältemittel für identische Anforderungen hergestellt.

Für beide Kältemittel ist deutlich zu erkennen, dass die Verdichtung bei geringen Drehzahlen zu schlechteren Verdichterwirkungsgraden führt (Bild 12). Die geringe Verdichter-Drehzahl bewirkt eine relativ langsame Bewegung der mechanischen Komponenten des Verdichters. Den Messergebnissen zufolge, wurden diese Komponenten vor allem für Drehzahlen über 1500 min^{-1} ausgelegt. Bei geringen Drehzahlen zeigen vor allem Lagerungen ein Abreißen des hydrodynamischen Schmierfilms zwischen Wälzkörper und Lagerring, so dass der Schmierfilm durch die langsame Rotation des Wälzkörpers nicht mehr voll ausgebildet werden kann, wodurch der Wälzkörper in direktem Kontakt mit den Lagerringen tritt, was zu einer stark reibungsbehafteten, mechanischen Belastung der Lagerung und damit zu schlechten mechanischen Wirkungsgraden führt. Eine mechanische Reibung zwischen metallischen Lagerkomponenten führt wiederum zu einem Temperaturanstieg der Lager, die durch das umströmende Kältemittel gekühlt werden. Eine Aufnahme dieser Reibungsarbeit als Dissipationsarbeit während der Verdichtung des Kältemittels führt wiederum zu einem Temperaturanstieg des Kältemittels, was zu einem Zustand höherer Entropie und damit zu schlechten inneren Wirkungsgraden führt.

Der Vergleich der Kältemittel zeigt, dass mit R1234yf deutlich bessere mechanische Wirkungsgrade erreicht wurden als mit R134a. Dies ist vor allem auf die niedrigere kinematische Viskosität von R1234yf zurückzuführen. Durch eine niedrigere kinematische Viskosität ist der innere Widerstand gegen das Fließen niedriger bzw. die Fließfähigkeit von R1234yf höher. Der Transport des Kältemittels durch den Verdichter geschieht unter geringerer innerer Reibung des Mediums, was zu einem geringeren Strömungswiderstand des Kältemittels beim Transport durch den Verdichter führt. Dies zeigt sich in einer geringeren mechanischen Beanspruchung und damit in höheren mechanischen Wirkungsgraden des Verdichters [5].

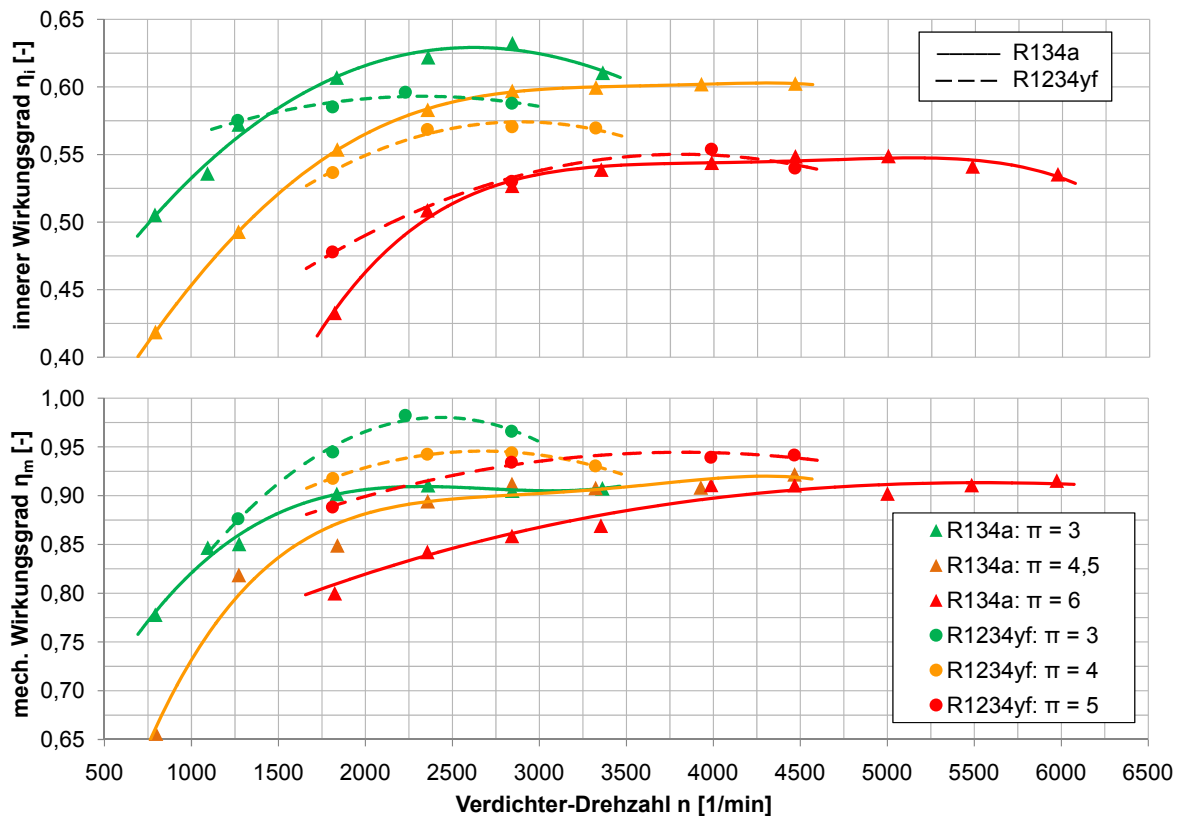


Bild 12: Vergleich der Verdichterwirkungsgrade als Funktion der Drehzahl

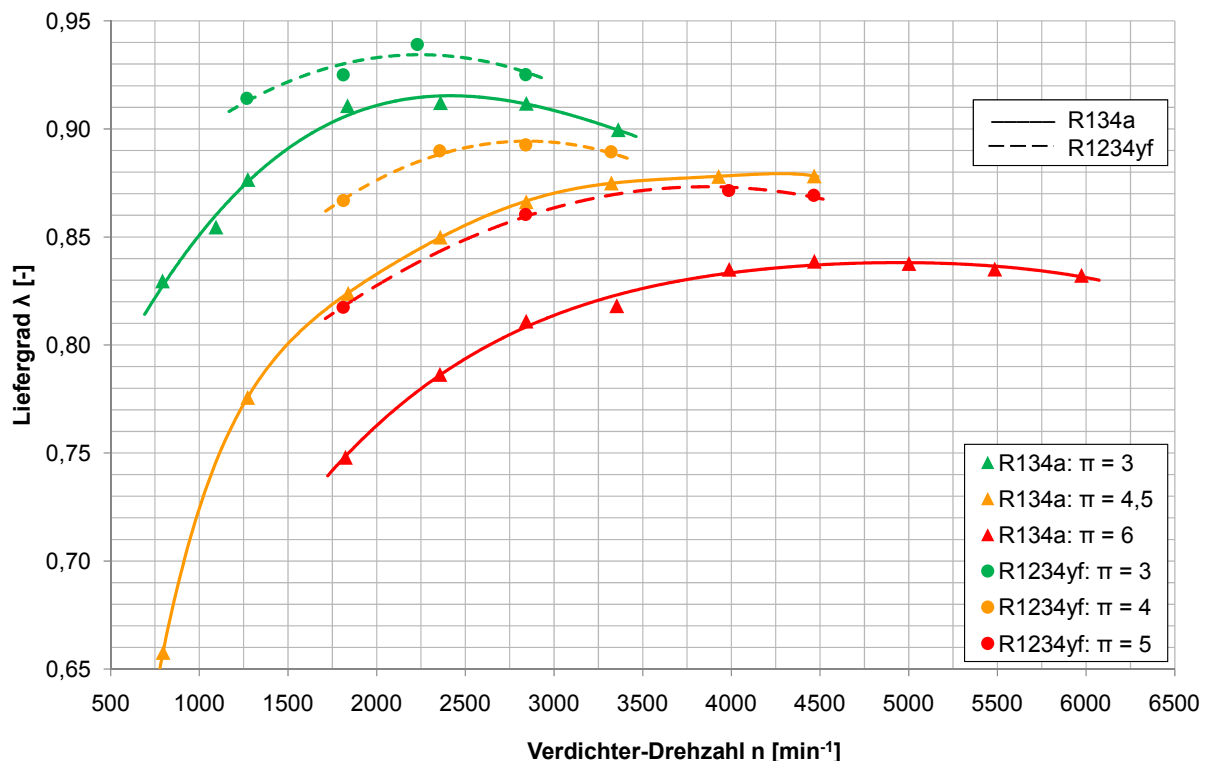


Bild 13: Vergleich der Liefergrade als Funktion der Verdichter Drehzahl

Zudem zeigt der Verdichter für geringere Drehzahlen geringere Liefergrade. Ein Teil des zu verdichtenden Mediums kann durch Spalte des Verdichtungsraums in den Saugraum des Verdichters oder einen von den Spiralen des Scroll-Verdichters gebildeten sichelförmigen Verdichtungsraum mit

geringerem Druckverhältnis zurückexpandieren. Dieser so genannte Leckstrom wird dadurch nochmals unter Aufwendung der Verdichterarbeit komprimiert, die zuvor zugeführte Verdichtungsenergie wurde demnach zum Großteil als Dissipationsenergie dem Medium zugeführt, was eine Entropiesteigerung mit einhergehender Temperaturerhöhung und damit zu schlechteren inneren Wirkungsgraden führt. Dadurch hat der Verdichter mit dem Kältemittel R1234yf einen höheren Liefergrad als mit dem Kältemittel R134a.

3.3 Wärmepumpenmodus

Im Wärmepumpenmodus sind die Komponenten so miteinander verschaltet, dass der Fahrzeuginnenraumwärmetauscher die Funktion des Kondensators zum Aufheizen der Luft übernimmt und der Außenwärmetauscher die Funktion des Verdampfers.

Da es sich bei dem Innenraumwärmetauscher um einen Verdampfer handelt, der im Serienfall im Niederdruck des Kältemaschinen-Kreisprozesses eingesetzt wird, ist der maximale Betriebsdruck für diese Versuche nach Angaben des Herstellers auf 14 bar begrenzt. Der Niederdruck wird auf 1 bar und die Eintrittstemperatur in den Verdichter auf $0,1^\circ\text{C}$ und dessen Drehzahl auf 5000 min^{-1} begrenzt.

Betrieibt man den Wärmepumpenmodus bei Umgebungstemperaturen kleiner als ca. 5°C , sinkt am Umgebungswärmetauscher die Luftaustrittstemperatur auf 0°C und niedriger. Hierdurch gefriert der Wasserdampf in der feuchten Luft und führt zur Reifbildung und Vereisung an den Lamellen des Umgebungswärmetauschers, da er in diesem Modus als Verdampfer betrieben wird. Aus diesem Grund sind für die nachfolgenden Betrachtungen vorerst nur stationäre Versuchsreihen mit Außentemperaturen ab 5°C aufwärts und mit einer relativen Luftfeuchtigkeit von ca. 80% in die Beurteilung eingeflossen.

Tabelle 2: Versuchsmatrix mit Teillastbetrieb des Wärmepumpenmodus in Anlehnung an [6]

$t_{LK,aus}$	30°C						
$t_{LK,ein}$	-10°C	-5°C	0°C	5°C	10°C	15°C	20°C
\dot{Q}_C , Kältemittel-seitig (Vorgabe)	6,1kW	5,3kW	4,5kW	3,7kW	3kW	2,3kW	1,5kW

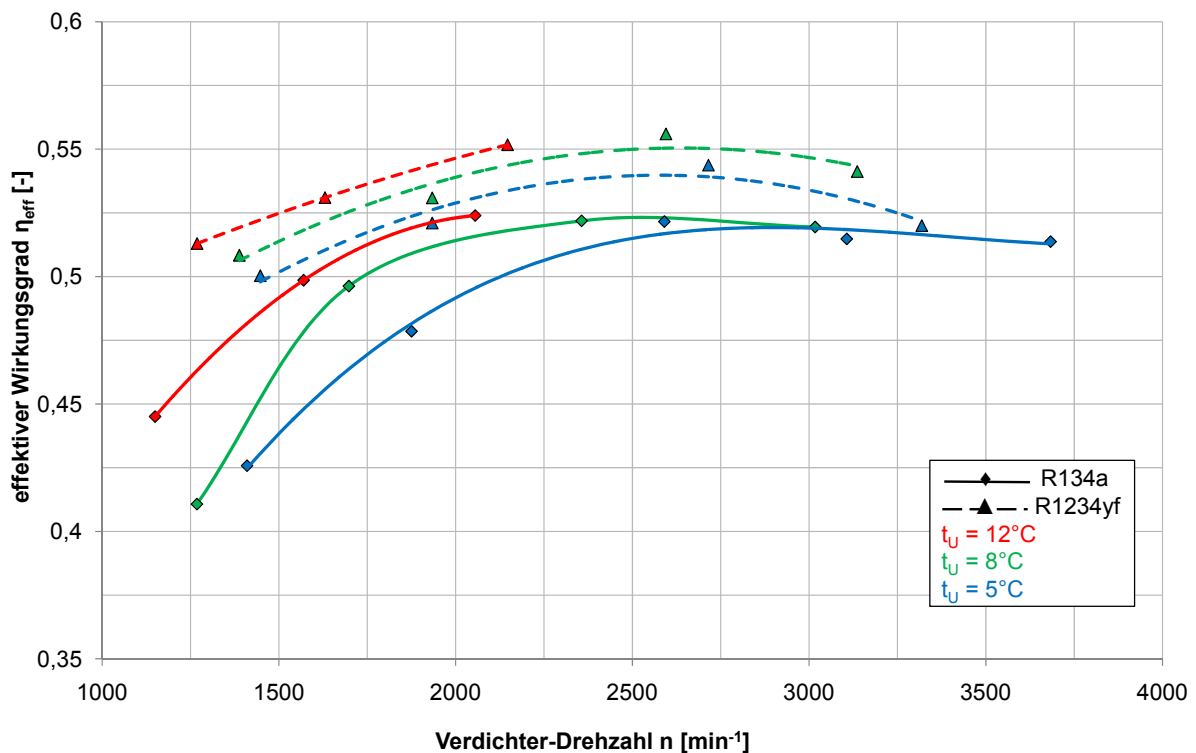


Bild 14: Vergleich des effektiven Verdichtewirkungsgrades als Funktion der Drehzahl

Bei Betrachtung der Verdichterwirkungsgrade zeigt sich im Wärmepumpenmodus ein vergleichbares Verhalten wie im Kältemaschinenmodus. Der effektive Verdichterwirkungsgrad (Bild 14) ist bei dem Kältemittel R1234yf durchweg besser als bei R134a. Dieser Wirkungsgrad fällt in dieser Betriebsweise insbesondere bei R134a bei kleinen Drehzahlen stark ab, was auf den schlechteren inneren Wirkungsgrad bei relativ niedrigen Drehzahlen zurückzuführen ist.

Wie auch im Kältemaschinenmodus ist der Liefergrad bei R1234yf ebenfalls besser als bei R134a. Obwohl die Verdichterkennzahlen bei R1234yf deutlich besser sind als bei R134a, führt dieses bei R1234yf nicht im gesamten Betriebsbereich zu höheren Wärmeleistungszahlen (Bild 15). Mit dem Kältemittel R134a sind bei den größeren Leistungen etwas höhere Wärmeleistungszahlen zu erzielen. Im kleinen Leistungsbereich kehrt sich dieser Vorteil jedoch zugunsten des Kältemittels R1234yf um, da sich in diesen Bereichen der deutlich schlechtere Verdichterwirkungsgrad von R134a bei kleinen Drehzahlen stark bemerkbar macht.

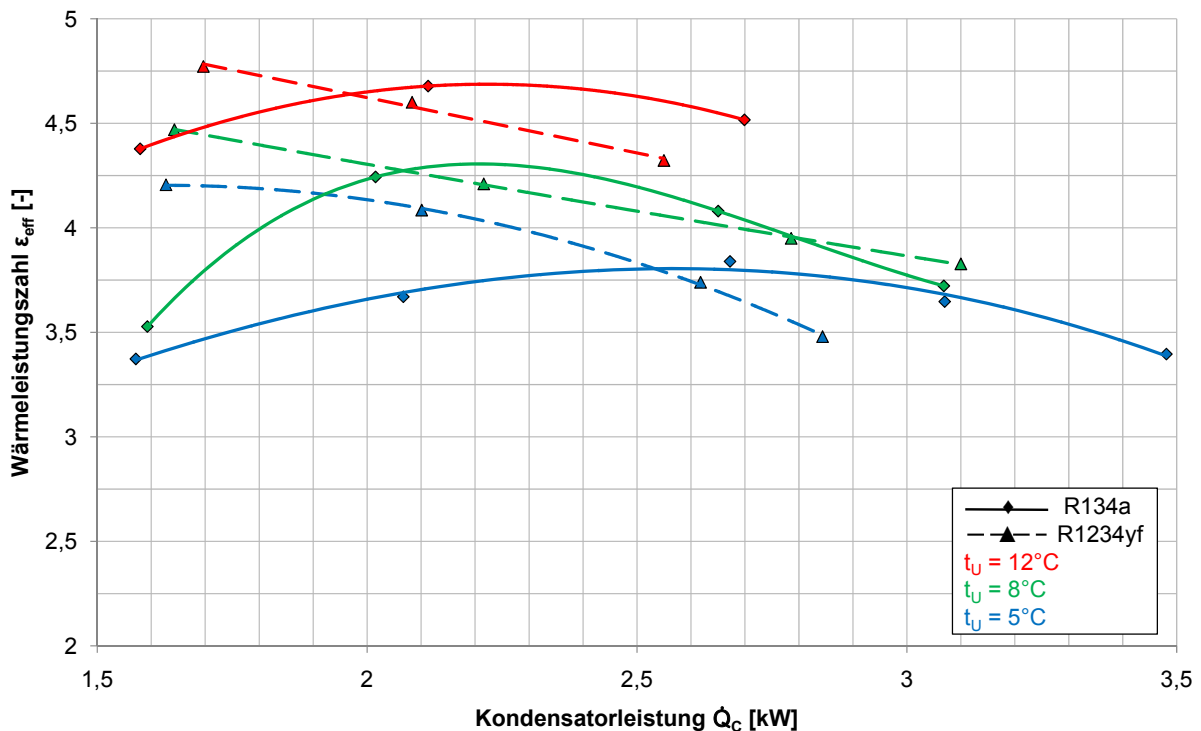


Bild 15: Vergleich der Wärmeleistungszahlen als Funktion der Kondensatorleistung (Fahrzeuginnenraumwärmetauscher)

Anders als im Kältemaschinenmodus müssen die Drehzahlen bei R1234yf höher sein als bei R134a um die gleiche Wärmeleistung am Fahrzeuginnenraumwärmetauscher zu erzielen (Bild 16). Aufgrund dieser höheren Drehzahlen bei R1234yf insbesondere bei den relativ niedrigen Außentemperaturen kann die maximale geforderte Leistung teilweise nicht erreicht werden, da der Prüfstand mit seinen Komponenten in die eingangs erklärten Grenzbereiche kommt.

Im Gegensatz zum Kältemaschinenmodus ist hier im Wärmepumpenmodus die mittlere Verdampfertemperatur bei dem Kältemittel R1234yf niedriger als bei R134a (Bild 17), was aus den unterschiedlichen Stoffdaten zu erklären ist. Dadurch sinkt auch der Niederdruck, der zu einem höheren spezifischem Volumen am Verdichtereintritt führt. Wie schon zuvor beschrieben, sind ein geringeres Druckverhältnis und ein niedrigeres spezifisches Volumen für den Kreisprozess von Vorteil. Im Wärmepumpenmodus sind daher höhere Drehzahlen mit dem Kältemittel R1234yf notwendig, um den erforderlichen größeren Kältemittel-Massenstrom zu liefern.

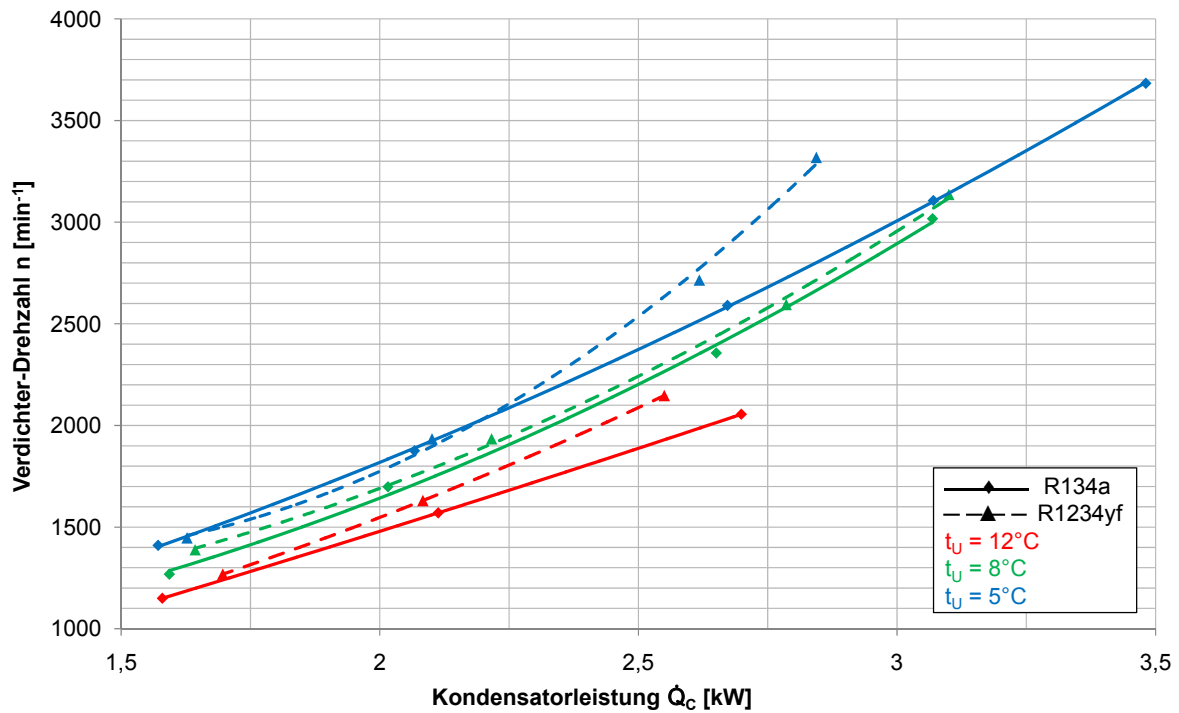


Bild 16: Vergleich der Drehzahlen als Funktion der Kondensatorleistung (Fahrzeuginnenraumwärmetauscher)

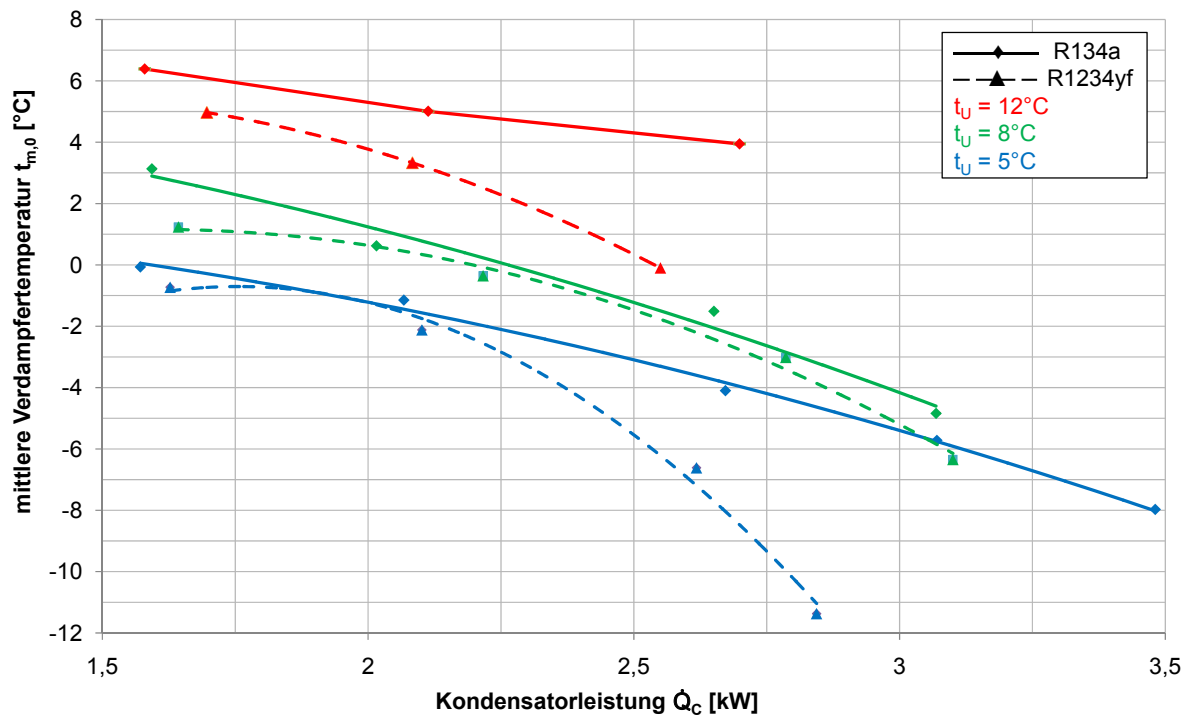


Bild 17: Vergleich der mittleren Verdampfungstemperaturen als Funktion der Kondensatorleistung (Fahrzeuginnenraumwärmetauscher)

Die niedrigere mittlere Verdampfungstemperatur bei R1234yf ist auf die Temperaturabhängigkeit der Wärmeübertragungseigenschaften zurückzuführen. Dieses liegt insbesondere im Unterschied der Prandtlzahl beider Kältemittel. Während sich die Prandtlzahl bei Temperaturen unter 0°C bei dem Kältemittel R134a kaum verändert, fällt sie bei R1234yf weiter nahezu proportional mit sinkender Temperatur ab. Da die Prandtlzahl in die Wärmeübertragung eingeht, ist eine größere

Temperaturdifferenz zwischen dem Kältemittel und der umgebenden Luft notwendig, um die gleiche Leistung zu übertragen.

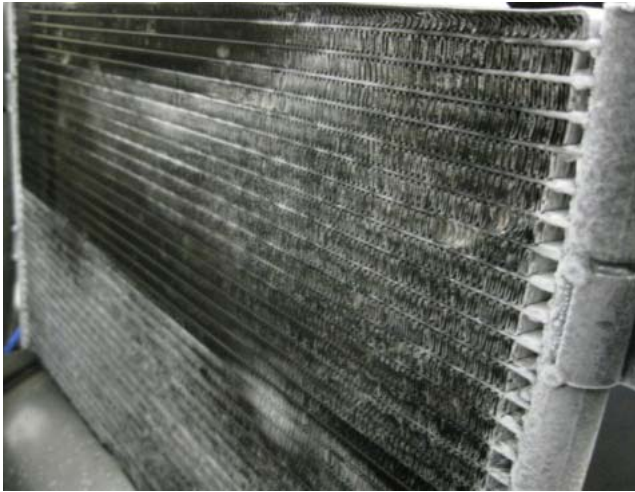


Bild 18: Bereifung des Umgebungswärmetauschers (Verdampfer)

Bei den Versuchsreihen mit Umgebungstemperaturen kleiner 5°C und damit verbunden mit Luftaustrittstemperaturen am Umgebungswärmetauscher (Verdampfer) kleiner 0°C lässt die stetig anwachsende Reifbildung keinen ausreichend langen Betrieb zu, um stationäre Betriebszustände darzustellen. Generell ist aber zu sagen, dass der effektive Verdichterwirkungsgrad mit sinkender Umgebungstemperatur fällt.

Die bei Umgebungstemperaturen kleiner 5°C entstehende Reifbildung und Eisschicht (Bild 18) verringert den freien Strömungsquerschnitt des Lamellenverdampfers und erhöht damit die luftseitigen Druckverluste. Aufgrund der Ventilator Kennlinie sinkt der Luftvolumenstrom im Lamellenwärmetauscher. Zudem wirkt die entstehende Eisschicht

isolierend und vermindert damit den Wärmeübergang am Lamellenwärmetauscher. Bei zunehmender Reif- und Eisschicht sinkt somit auch das Vermögen des Umgebungswärmetauschers (Verdampfer), Wärme aus der Umgebung aufnehmen zu können. Infolge dessen muss der Kältemittelmassenstrom und somit die Verdichterdrehzahl fortlaufend erhöht werden, um die erforderliche Leistung am Fahrzeuginnenraumwärmetauscher aufrecht zu erhalten.

Eine Möglichkeit des Abtauens wurde bei Umgebungstemperaturen $>2^{\circ}\text{C}$ durchgeführt, indem der Kreisprozess gestoppt wird und die über dem Gefrierpunkt liegende Umgebungsluft einen ausreichenden Wärmestrom zum Abtauen liefert. Unterstützend kann dabei ein weiterer Betrieb des Kreisprozesses mit geringer Verdichterdrehzahl und geöffnetem EEV wirken. Durch das voll geöffnete Expansionsventil wurde der Drosseleffekt unterbrochen, die Wärme der Komponenten vor dem Verdampfer sowie die Verdichter-Antriebsleistung wurden nur noch minimal am Kondensator abgeführt und konnten am Verdampfer als Wärmestrom zur Abtaung der Frostschicht des Wärmetauschers genutzt werden.



Bild 19: Anlagerung von Wasser beim Abtauvorgang zwischen den Lamellen des Umgebungswärmetauschers (Verdampfer)

Als problematisch zeigte sich jedoch das angesammelte Kondensat zwischen den Lamellen (Bild 19). Durch die vorliegende Konstruktion des Wärmetauschers konnte das Wasser vom Gebläse nicht abgeführt werden und verblieb zwischen den Lamellen. Der dadurch nach wie vor erhöhte Druckverlust verringerte den Luftstrom und führte bei Wiederinbetriebnahme des Wärmepumpenmodus sehr schnell zu erneuter vollständiger Vereisung.

Das Verhalten der Vereisung zeigt keine nennenswerten Unterschiede bei den verwendeten Kältemitteln. Die zeitliche Veränderung des Eisaufbaus ist sowohl von der Umgebungstemperatur als auch von der Leistung der Wärmepumpe abhängig.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Die Untersuchungen im Komponentenprüfstand mit serienmäßigen Wärmetauschern eines Mittelklassefahrzeugs und einem elektrisch betriebenen Scroll-Verdichter zeigten im Vergleich der Kältemittel R1234yf und R134a für das vorgeschlagene alternative Kältemittel R1234yf sowohl günstigere Kälteleistungszahlen als auch höhere Verdichtereffizienzen. Generell kann gesagt werden, dass der elektrische Scroll-Verdichter von Denso sich für das vorgeschlagene alternative Kältemittel R1234yf aus thermodynamischer und fluidmechanischer Sichtweise im Kältemaschinenmodus gut eignet.

Die Kältemittelfüllmenge wurde für den Kältemaschinenmodus an einer möglichst hohen Kälteleistungszahl COP ausgerichtet und bestimmt dadurch auch die Betriebszustände im Wärmepumpenmodus. Dabei konnte der wechselseitige Hoch- und Niederdruckbetrieb im Verdampfer und Kondensator problemlos betrieben werden. Diese Untersuchung ist durchgeführt worden, um thermodynamische Zusammenhänge aufzuzeigen. Dazu wurde aus einer Vielzahl von Untersuchungen und ausgewerteten Daten ausgewählt, um die allgemeinen Anforderungen für ein mögliches Elektrofahrzeug darzustellen und weniger die Klimaanlage eines bestimmten herkömmlichen Fahrzeugtyps nachzubilden.

Für beide Kältemittel wurden im Wärmepumpenmodus zur Aufrechterhaltung der Fahrgastzelleninnentemperatur mit den oben genannten Komponenten einer Klimaanlage Wärmeleistungszahlen bis ca. 5 erreicht. Dadurch ist es möglich, Elektrofahrzeuge mit einer elektrischen Leistungsaufnahme am Verdichter zwischen 350 W (bei 12°C Umgebungstemperatur) und 1000 W effizient zu beheizen. Der serienmäßige Kondensator (Umgebungswärmetauscher) benötigt bei Umgebungstemperaturen kleiner 5°C einen Abtauvorgang. Hier wäre es vorteilhaft, zukünftige Kondensatoren für den Einsatz im Wärmepumpenmodus mit größeren Lamellenabständen zu versehen. Durch die Vergrößerung des Lamellenabstandes verlagert sich die Reifmassenverteilung. Eine optimierte Abstimmung zwischen Lamellenabstand und Betriebszustand hat einen positiven Einfluss auf die Betriebszeit wegen des geringeren Anstieges des luftseitigen Druckverlustes [8]. Weiterhin muss der serienmäßige Verdampfer (Fahrzeuginnenraumwärmetauscher) für höhere Betriebsdrücke zur Anwendung im Wärmepumpenmodus ausgelegt werden.

5. Literaturverzeichnis

- [1] Ikegamie, T.; Iguchi, M.; Aoki, K.; Iijima, K.: New Refrigerants Evaluation Results, JAMA-JAPIA Consortium; Phoenix, SAE Alternative Refrigerant Systems Symposium, Arizona 2008
- [2] Meyer, J.: R1234yf System Enhancements and Comparison to R134a; Visteon 2008
- [3] Lemmon, E.W.; Huber, M.L.; McLinden, M.O.: NIST Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties – REFPROP Version 8.1; Boulder, Colorado 2010
- [4] Mager, R.: Optimierung von PKW-Klimaanlagen mit dem Kältemittel CO₂ für niedrige Fahrgeschwindigkeiten; Dissertation TU München 2002
- [5] Heiker, M.: Experimentelle Untersuchung einer PKW-Klimaanlage mit Wärmepumpen-Modus. Bachelorarbeit Fachhochschule Osnabrück SS 2010.
- [6] Schäfer, B.; Feuerecker, G.; Heinle, D.; Strauß, T.: Vergleich konventioneller Zuheizsysteme mit R744-Zuheizsystemen in Automobilen mit geringerem Kraftstoffverbrauch auf Basis eines 1,9 l TDI Motors; in Schlenz, D. (Hrsg.): PKW-Klimatisierung III – Klimakonzepte; ISBN 3-8169-2268-6
- [7] Vollmer, D.; Horstmann, P.; Kneifel, M.: Elektrische Standklimatisierung in Hybridfahrzeugen; Robert Bosch GmbH; Stuttgart 2006
- [8] Mardorf, L., Peter, T.: Experimentelle Untersuchungen und mathematische Simulation der Wärme- und Stofftransportvorgänge an bereiften Luftkühlern. DKV-Tagungsbericht, 19. Jrg.(1992), Bd. 2.1, S. 321-334, Bremen. ISBN 3-922429-68-8