

Schlüsselwörter: Elektrischer Scrollverdichter, Kältemittel R1234yf, PKW Klimaanlage, Wärmepumpenmodus

In einem Zweizonenklimaraum wurde ein Kältemaschinenkreislauf zur Klimatisierung eines Elektro-Pkws so gestaltet, dass eine Umschaltung zwischen Kühl- und Heizbetrieb mittels Ventilschaltung erfolgt. Als Kältemittelverdichter wird ein elektrischer Scrollverdichter eingesetzt. In experimentellen Untersuchungen werden die COPs und Verdichterkennzahlen der beiden Betriebsarten dargestellt.

Electric Scroll Compressor for mobile air conditioning including heat pump

Keywords: electric scroll compressor, refrigerant R1234yf, mobile air conditioning, heat pump cycle

In a two-zone climatic chamber a refrigeration cycle for mobile air conditioning of an electric vehicle was designed by switching with multi way valves between cooling and heating cycle. As a refrigerant compressor, an electric scroll compressor is used. In experimental studies, the COPs and compressor ratios of the two modes are shown.

Autoren



Prof. Dr.-Ing. Lutz Mardorf,



Dipl.-Ing. Peter Menger,



B.Sc. Mathias Heiker,
Hochschule Osnabrück
Labor für Angewandte
Thermodynamik

Elektrischer Scrollverdichter in PKW Klimaanlage mit Wärmepumpe

Einleitung

Heute gehört die Klimaanlage im PKW zur Standardausstattung. Ebenfalls wird auch bei tieferen Außentemperaturen ein Komfort bei der Beheizung der Fahrgastzelle gefordert. Die Marktakzeptanz von zukünftigen, rein Batterie betriebenen Elektrofahrzeugen wird auch dadurch erreicht, dass der Kunde keine Komforteinbußen bei der Luftaufbereitung der Fahrgastzelle hinnehmen muss.

Bei verbrennungsmotorisch getriebenen PKWs erfolgt die Fahrgastzellenbeheizung über die an das Kühlmittel abgeführte Abwärme des Motors über Luftwärmetauscher. Dagegen entsteht in rein Batterie betriebenen Elektrofahrzeugen 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, welches einen GWP₁₀₀-Wert von 1300 aufweist. Innerhalb der EU ist in PKW-Neuserien ab 2011 für PKW-Klimaanlagen 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.

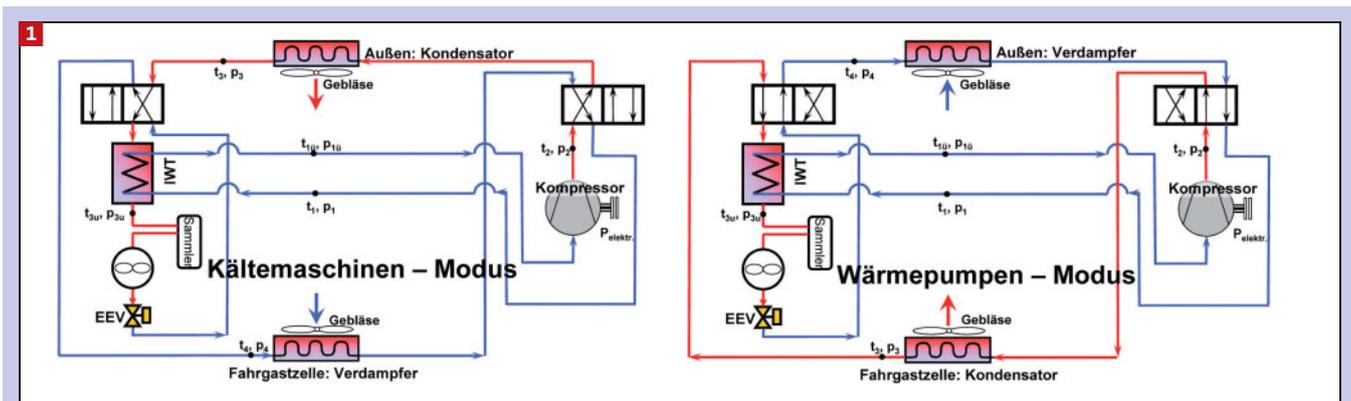
In rein Batterie betriebenen Elektro- und Hybridfahrzeugen wird ein direkt elektrisch angetriebener Scrollverdichter in der Klimaanlage zum Einsatz kommen. Zusätzlich kann ein elektronisch einstellbares Expansionsventil in Verbindung mit der Drehzahlregelung des Scrollverdichters immer einen, den optimierten Betriebsbedingungen angepassten Kältemittelmassenstrom erzeugen. Einer Optimierung der Leistungszahl COP der Klimaanlage wird unter dem Ge-

sichtspunkt der Reichweite des Elektrofahrzeuges eine hohe Priorität zugewiesen.

Prüfstands Aufbau und Kältemittel

Die Komponenten des Kältemaschinenkreislaufes bestehen im Wesentlichen aus Verdichter, Kondensator, elektronischem Expansionsventil (EEV), Verdampfer und innerem Wärmetauscher (IWT). Die Komponenten sind mittels Ventilen so verschaltet, dass zwischen Kältemaschinen- und Wärmepumpenmodus gewechselt werden kann (Abb. 1). Dabei wechseln der Kondensator und der Verdampfer ihre Strömungsrichtung und ihre gegenseitige Funktion. Der Prüfstand befindet sich in einer zweigeteilten Klimakammer. Der Klimakammerteil für die Außentemperatursimulation lässt sich zwischen -15°C und +50°C einstellen. Die Simulation der Fahrgastzelle kann in dem anderen Klimakammerteil durch den Lufteintritt in den Fahrzeuginnenraum-Wärmetauscher zwischen aktueller Außentemperatur und 50°C eingestellt werden. Der Komponentenprüfstand wurde in Anlehnung an den Kältemaschinenkreislauf eines Mittelklasse-PKWs einschließlich eines inneren Wärmetauschers aufgebaut. Als Drossel wurde ein frei einstellbares elektronisches Expansionsventil (EEV) verwendet. Zur Kompression des Kältemittels wird ein elektrisch angetriebener Scrollverdichter der Firma Denso eingesetzt. Dieser Verdichter verfügt über einen integrierten Inverter und einen bürstenlosen Gleichstrommotor, dessen Drehzahl über Steuersignale vorgegeben werden kann.

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.



1 Alternativ: Schema Prüfstands Aufbau im Kältemaschinenmodus (links) und im Wärmepumpenmodus (rechts)

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.

Untersuchung Kältemaschinen-Modus
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 Verdichteleistungen erfordern.

Auffällig sind die besseren Leistungszahlen für R1234yf in weiten Bereichen im Gegensatz zu R134a (Abb. 2) entgegen bisheriger Vergleiche in den System-Benchmarks [2] bei gleichen Verdichterdrehzahlen. 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 diese ergänzend zu den Versuchen in Abb. 2 für zwei feste Kälteleistungen bei konstanter Umgebungstemperatur von 45 °C zwischen 20 °C und 7 °C variiert. Diese Untersuchungen haben gezeigt, dass die effektive Kälteleistungszahl erwartungsgemäß mit sinkender Luftaustrittstemperatur leicht fällt. Das grundsätzliche Verhalten der beiden Kältemittel ändert sich nicht.

Für gleiche Kälteleistungen werden beim Kältemittel R1234yf geringere Verdichterdrehzahlen als beim Kältemittel R134a benötigt. Denn 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.

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.

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

Die geringere mittlere Temperaturdifferenz von R1234yf zwischen Verdampfer und dessen Luftströmung hat zur Folge, dass eine höhere Verdampfungstemperatur gegenüber R134a bei gleicher Lufttemperatur am Verdampfereintritt und ähnlicher Kälteleistung vorliegt. Daraus resultieren ein höherer Verdampfungsdruck und ein verringertes Druckverhältnis.

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.

Untersuchung Wärmepumpen Modus

Betrieht man den Wärmepumpenmodus bei Umgebungstemperaturen kleiner als ca. 5 °C, sinkt am Umgebungswärmetauscher (Verdampfer) die Luftaustrittstemperatur auf 0 °C und niedriger. Hierdurch gefriert der Wasserdampf der feuchten Luft und führt zur Reifbildung und Vereisung an den Lamellen.

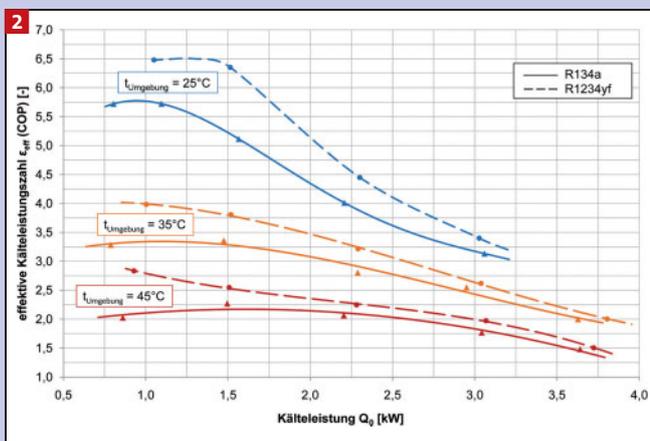
Wie auch im Kältemaschinenmodus ist der Liefergrad bei R1234yf besser als bei R134a. Obwohl die Verdichterkennzahlen bei R1234yf besser sind als bei R134a, führt die-

ses bei R1234yf nicht im gesamten Betriebsbereich zu höheren Wärmeleistungszahlen (Abb. 3). 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 hier der deutlich schlechtere Verdichtereffizienzgrad von R134a bei kleinen Drehzahlen bemerkbar macht.

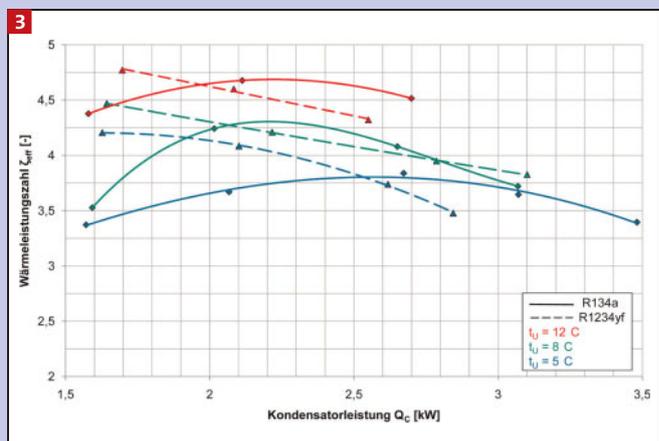
Anders als im Kältemaschinenmodus müssen die Drehzahlen bei R1234yf höher sein als bei R134a um die gleiche Wärmeleistung am Fahrzeuginnenraumwärmetauscher zu erzielen.

Im Gegensatz zum Kältemaschinenmodus ist hier im Wärmepumpenmodus die mittlere Verdampferetemperatur bei dem Kältemittel R1234yf niedriger als bei R134a, was aus den unterschiedlichen Stoffdaten zu erklären ist. Dadurch sinkt auch der Niederdruck, der zu einem höheren spezifischem Volumen am Verdichtereintritt führt. Im Wärmepumpenmodus sind höhere Drehzahlen mit dem Kältemittel R1234yf notwendig, um den erforderlichen größeren Kältemittel-Massenstrom zu liefern.

Die niedrigere mittlere Verdampferetemperatur bei R1234yf ist auf die Temperaturabhängigkeit der Wärmeübertragungseigenschaften zurückzuführen. Dieses liegt insbesondere im Unterschied der Prandtlzahl beider Kältemittel. 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. Bei den Versuchsreihen mit Umgebungstemperaturen kleiner 5 °C und damit verbunden mit Luftaustrittstemperaturen am Umgebungswärmetauscher (Verdampfer) kleiner 0 °C wird die Betriebszeit durch die stetig anwachsende Reifbildung begrenzt.



2 Vergleich der effektiven Kälteleistungszahl als Funktion der Kälteleistung



3 Vergleich der Wärmeleistungszahlen als Funktion der Kondensatorleistung (Fahrzeuginnenraumwärmetauscher)

Die bei Umgebungstemperaturen kleiner 5°C entstehende Reifbildung und Eisschicht 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. Infolgedessen muss der Kältemittelmassenstrom und somit die Verdichter Drehzahl fortlaufend erhöht werden, um die erforderliche Leistung am Fahrzeuginnenraumwärmetauscher aufrecht zu erhalten. Die zeitliche Veränderung des Eisaufbaus ist sowohl von der Umgebungstemperatur, der Luftfeuchte, der Leistung der Wärmepumpe als auch vom Lamellenabstand des Wärmetauschers abhängig.

Untersuchung elektrischer Scrollverdichter

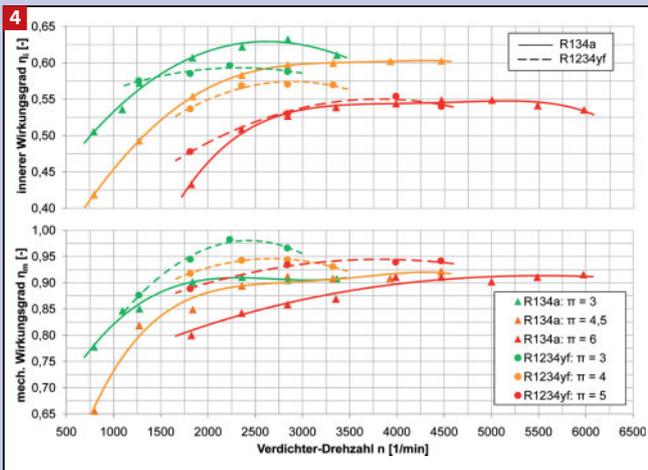
Bei der Untersuchung des Scrollverdichters im Vergleich der beiden Kältemittel mit Verwendung identischer Kältemittelöle wurden aufgrund der zuvor beschriebenen Stoffeigenschaften und der unterschiedli-

chen Drucklagen die jeweils notwendigen Druckverhältnisse angesetzt. Dadurch wird, wie oben beschrieben, eine Vergleichbarkeit der Kältemittel für identische Anforderungen hergestellt.

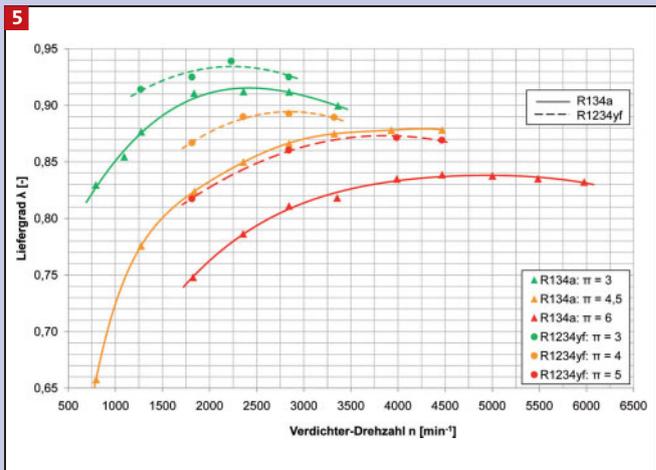
Für beide Kältemittel ist deutlich zu erkennen, dass die Verdichtung bei geringen Drehzahlen zu schlechteren Verdichterwirkungsgraden führt (Abb. 4). Die geringe Verdichter-Drehzahl bewirkt eine relativ langsame Bewegung der mechanischen Komponenten des Verdichters. Den Messergebnissen zufolge wurden diese Komponenten vor allem für Drehzahlen über 1500 min^{-1} ausgelegt. Bei geringen Drehzahlen zeigen vor allem die 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 direkten 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.

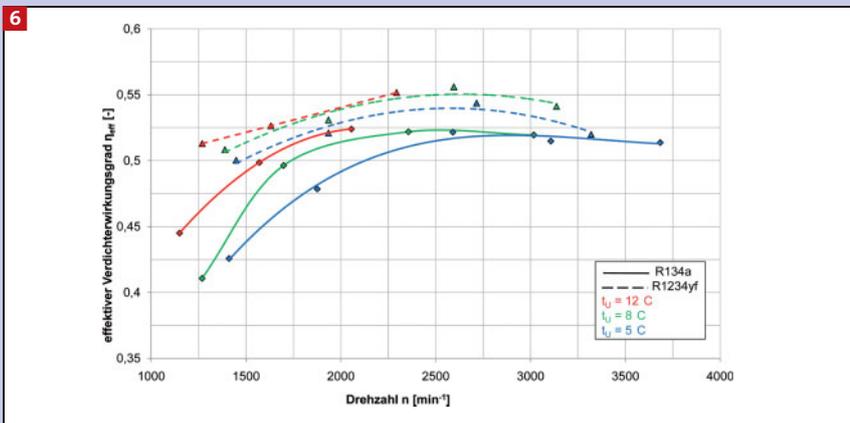
Der Vergleich der Kältemittel zeigt, dass mit R1234yf deutlich bessere mechanische Wirkungsgrade erreicht wurden als mit R134a. Dies ist vor allem auf die niedrigere kinematische Viskosität von R1234yf zurückzuführen. Durch eine niedrigere kinematische Viskosität ist der innere Widerstand gegen das Fließen 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. Zudem zeigt der Verdichter für geringere Drehzahlen geringere Liefergrade (Abb. 5). Ein Teil des zu verdichtenden Mediums kann durch Spalte des Verdichtungsraums in den Saugraum des Verdichters oder einen von den Spiralen des Scrollverdichters gebildeten sichelförmigen Verdichtungsraum mit geringerem Druckverhältnis zurückexpandieren. Dieser so genannte Leckstrom wird dadurch nochmals unter Aufwendung



4 Vergleich der Verdichterwirkungsgrade als Funktion der Verdichter-Drehzahl



5 Vergleich der Liefergrade als Funktion der Verdichter-Drehzahl



6 Vergleich des effektiven Verdichterwirkungsgrades als Funktion der Verdichter-Drehzahl

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. Bei Betrachtung des Verdichterwirkungsgrades im Wärmepumpenmodus stellt sich ein vergleichbares Verhalten wie im Kältemaschinenmodus ein. Der effektive Verdichterwirkungsgrad ist bei dem Kältemittel R1234yf durchweg besser als bei R134a. Aber im Wärmepumpenbetrieb fällt der Verdichterwirkungsgrad insbesondere bei R134a bei kleinen Drehzahlen stark ab, was auf den schlechteren inneren Wirkungsgrad bei relativ niedrigen Drehzahlen zurückzuführen ist (Abb. 6). Generell ist zu sagen, dass der effektive Verdichterwirkungsgrad mit sinkender Umgebungstemperatur fällt.

Zusammenfassung

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 Verdichterwirkungsgrade. Generell kann gesagt werden, dass der elektrische Scrollverdichter 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 wor-

den, um thermodynamische Zusammenhänge aufzuzeigen. Dazu wurde aus einer Vielzahl von Untersuchungen und ausgewerteten Daten ausgewählt, um die allgemeinen Anforderungen für ein mögliches Elektrofahrzeug darzustellen.

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 effizient zu beheizen. Der serienmäßige Kondensator 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 [3].

Literatur

- [1] Mardorf, L.; Menger, P.: PKW-Klimaanlage mit Wärmepumpenmodus für Elektrofahrzeuge. Vergleich der Kältemittel R1234yf und R134a. DKV-Tagungsbericht, 37 (2010), Bd. 3. ISBN 978-3-932715-46-4
- [2] Ikegami, T.; Iguchi, M.; Aoki, K.; Iijima, K.: New Refrigerants Evaluation Results, JAMA-JAPIA Consortium; Phoenix, SAE Alternative Refrigerant Systems Symposium, Arizona (2008)
- [3] Mardorf, L., Peter, T.: Experimentelle Untersuchungen und mathematische Simulation der Wärme- und Stofftransportvorgänge an bereiften Luftkühlern. DKV-Tagungsbericht, 19 (1992), Bd. 2.1, S.321-334, Bremen. ISBN 3-922429-68-8