Modulares Wärmepumpensystem für Fahrzeuge

Dr. Kemal-Edip Yildirim

Pepper Motion GmbH, Experte Thermomanagement, HVAC, Innovationen,
Alemannenstraße 14, 85095 Denkendorf, Deutschland
dr.key@web.de

Kurzfassung

Die Temperierungen der verschiedenen Klimabereiche von Fahrzeugen, wie Fahrerarbeitsplatz, Kabine, Boden, Windschutzscheibe, etc. erfordern hohe Flexibilität hinsichtlich der geforderten Leistungen und des Temperaturniveaus. In den elektromotorisch angetriebenen Fahrzeugen werden die Klimasysteme zu Thermomanagementsystemen zur Steigerung der Effizienz und Reichweite ausgebaut, wodurch die Anforderungen an die Flexibilität und damit auch an die Komplexität erheblich steigen, da die Hochvoltkomponenten sich in unterschiedliche Temperaturbereichen wohl fühlen und Leistungsniveaus in wechselnden Zeitrahmen bzw. zu wechselnden Zeitpunkten anfordern. Dazu kommen zusätzlich Anforderungen bei der Vorkonditionierung der Kabine und der elektrischen Komponenten sowie der Ladevorgänge. Die Bedienung all dieser vielfältigen Anforderungen aus einem System ist entsprechend sehr komplex und erfordert einen sehr hohen Regelungsgrad.

Ein aus Teilsystemen aufgebautes modulares Wärmepumpen- bzw. Thermomanagementsystem erfüllt alle Anforderungen bedarfsgerecht und vereinfacht deutlich die Regelungsvorgänge. Zudem bietet ein modulares System noch weitere Vorteile. Die Module können nah an die jeweiligen Bedarfe angebunden werden, was die Integration des Systems in den Fahrzeugen vereinfacht. Es gibt verschiedene Fahrzeugausstattungen, -klassen und -typen. Durch die Anzahl der Module kann das Wärmepumpen- bzw. Thermomanagement im jeweiligen Fahrzeug bedarfsgerecht appliziert werden. Somit kann ein modulares Konzept die System- und Komponentenvarianten reduzieren. Zudem bietet ein modulares System Vorteile hinsichtlich Fehleridentifizierung und Reparatur aufgrund seiner Einfachheit.

Die Module können miteinander vorteilhaft verbunden werden, um die Flexibilität und Effizienz zu erhöhen. Die Kältekreisläufe haben optimale Arbeitsbereiche hinsichtlich der Effizienz. Im Teillast kann sich das Gesamtsystem im weniger effizienten Bereich befinden. In solchen Fällen kann durch Abschaltung einzelner Module die Gesamteffizienz des Systems erhöht werden. Zusätzlich kann durch diese bedarfsgerechte Abschaltung der Module die Lebensdauer der Komponenten erhöht werden.

Stichwörter:
Modular, Wärmepumpe, Thermomanagement, Effizienz, Stadtbus

1 Einleitung

Die meisten bzw. alle aktuell vorhandenen Stadt- /Linienbusse der Verkehrsbetriebe haben einen Dieselantrieb und eine Lebensdauer von ca. 15 Jahren. Im Zuge der Elektrisierung aus Klima- und Umweltgründen wollen die Verkehrsbetriebe, insbesondere von Großstädten, aber ihre Flotten in kürzerer Zeit elektrifizieren. Ein möglicher kurzer Weg ist die Umrüstung der Dieselbusse auf batterie-elektrischen Antrieb. Die Firma Pepper Motion GmbH führt solche Umrüstungen unter dem Brandname etrofit durch.

Bild 1: Umrüstung eines Diesel-Stadtbusses auf batterie-elektrischen Antrieb

Von dieser Umrüstung sind u.a. nicht nur der Antriebstrang, die Antriebsenergie (Batteriestrom statt Diesel) und die Software für Fahrzeugkontrolle betroffen, sondern auch die Heizung und Klimatisierung (HLK). Die Umrüstung der HLK-Anlage ist notwendig einerseits wegen des erforderlichen Wechsels des Kältemittelverdichters von mechanischen auf elektrischen Antrieb und andererseits auch wegen der Erweiterung der Anlage um die Wärmepumpenfunktion aufgrund der fehlenden Abwärme des Dieselmotors.

Zur Effizienzsteigerung sind neben dem Einsatz der Wärmepumpe weitere innovative Maßnahmen notwendig, um die Reichweite insbesondere im Winter zu erhöhen.

In den elektromotorisch angetriebenen Fahrzeugen werden die Klimasysteme zu Thermomanagementsystemen zur Steigerung der Effizienz und Reichweite ausgebaut, wodurch die Anforderungen an die Flexibilität und damit auch an die Komplexität erheblich steigen, da die Hochvoltkomponenten sich in unterschiedliche Temperaturbereichen wohl fühlen und Leistungsniveaus in wechselnden Zeitrahmen bzw. zu wechselnden Zeitpunkten anfordern.

Darüber hinaus erfordern die Temperierungen der verschiedenen Klimabereiche von Fahrzeugen, wie Fahrerarbeitsplatz, Kabine, Boden, Windschutzscheibe, etc. hohe Flexibilität hinsichtlich der geforderten Leistungen und des Temperaturniveaus.

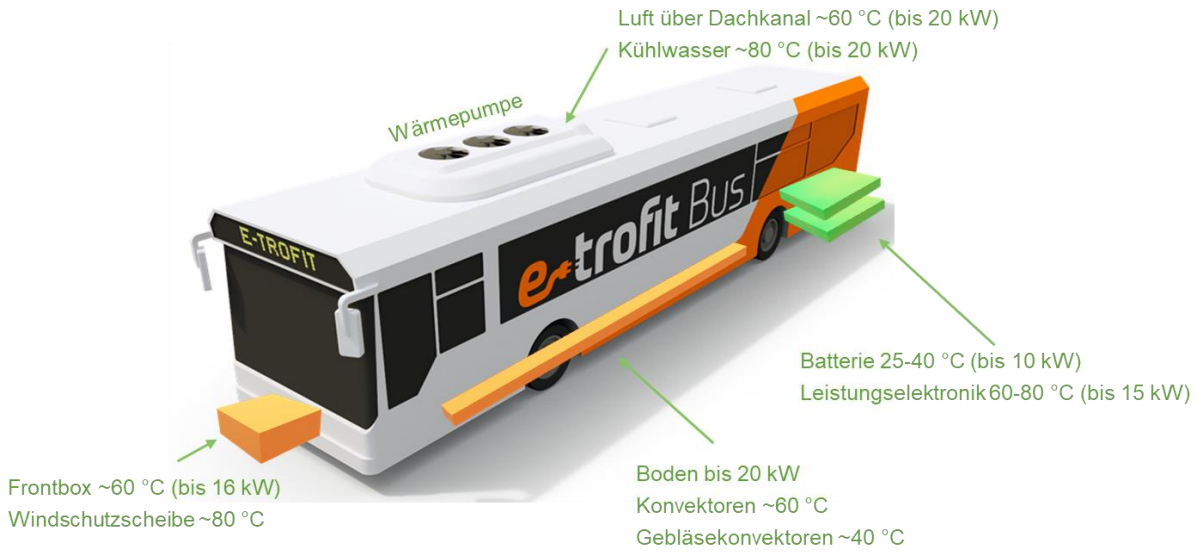

Bild 2: Thermische Anforderungen in Stadtbussen mit batterie-elektrischem Antrieb

Dazu kommen zusätzlich Anforderungen bei der Vorkonditionierung der Kabine und der elektrischen Komponenten sowie der Ladevorgänge. Die Bedienung all dieser vielfältigen Anforderungen aus einem System ist entsprechend sehr komplex und erfordert einen sehr hohen Regelungsgrad.

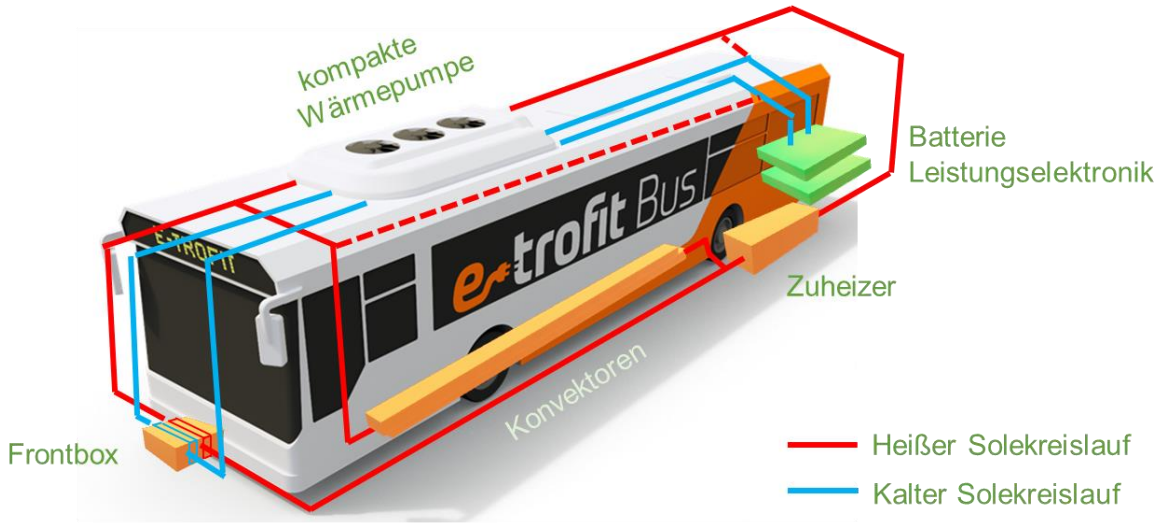

Bild 3: Thermomanagament in Stadtbussen mit einer kompakten Wärmepumpe

2 Modulares Wärmepumpensystem

2.1 Modulares Konzept

Ein aus Teilsystemen aufgebautes modulares Wärmepumpen- bzw. Thermomanagementsystem erfüllt alle Anforderungen bedarfsgerecht und vereinfacht deutlich die Regelungsvorgänge. Zudem bietet ein modulares System noch weitere Vorteile. Die Module können nah an die jeweiligen Bedarfe angebunden werden, was die Integration des Systems in den Fahrzeugen vereinfacht. Es gibt verschiedene Fahrzeugausstattungen, -klassen und -typen. Durch die Anzahl der Module kann das Wärmepumpen- bzw. Thermomanagement im jeweiligen Fahrzeug bedarfsgerecht appliziert werden. Somit kann ein modulares Konzept die System- und Komponentenvarianten reduzieren. Zudem bietet ein modulares System Vorteile hinsichtlich Fehleridentifizierung und Reparatur aufgrund seiner Einfachheit.

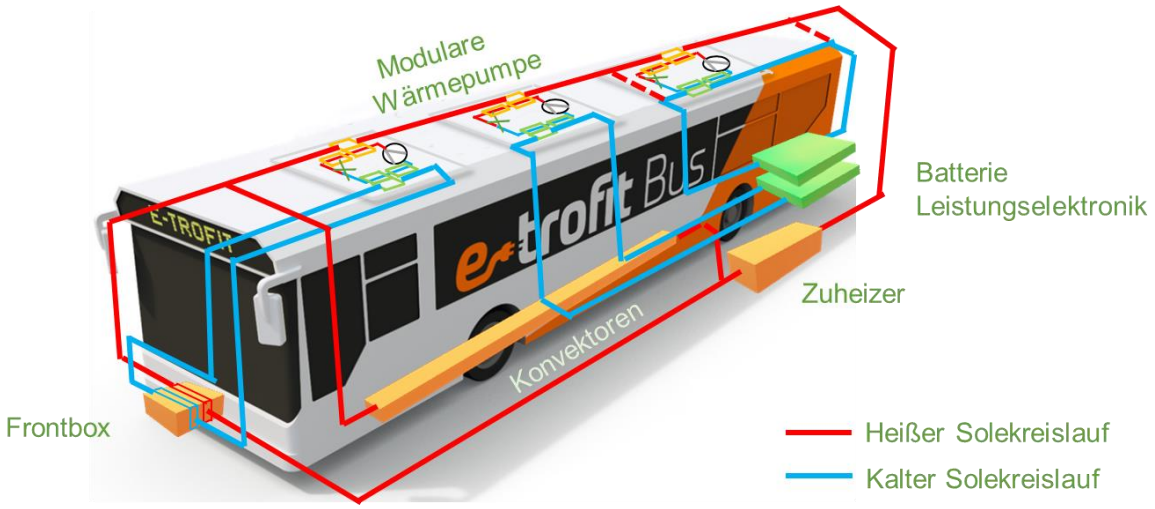

Bild 4: Thermomanagament in Stadtbussen mit einem modularen Wärmepumpensystem

2.2 Aufbau eines Moduls

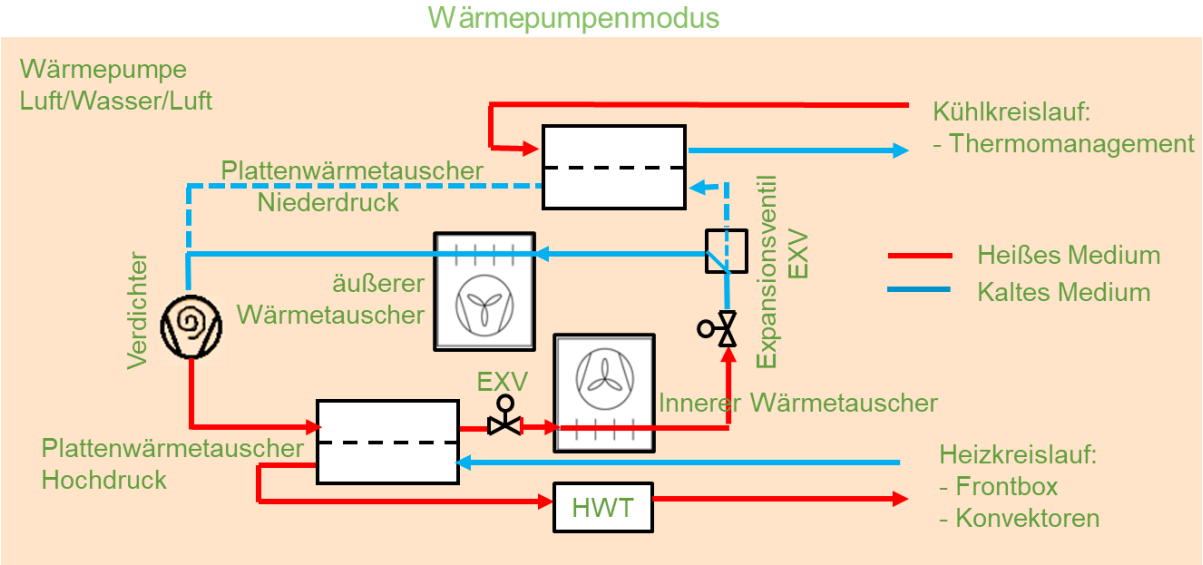

Bild 5: Aufbau eines Moduls

In den Kältekreislauf bestehend aus Verdichter, elektronischem Expansionsventil und internen und externen Wärmetauschern (Kältemittel/Luft) sind jeweils ein Plattenwärmetauscher (Kältemittel/Kühlmittel) in Niederdruck- und Hochdruckseite integriert. Während der Plattenwärmetauscher in der Hochdruckseite seriell zum Luft-Wärmetauscher angeordnet ist, befindet sich der Plattenwärmetauscher in der Niederdruckseite in der Regel parallel zum Luft-Wärmetauscher. Die parallele Schaltung in der Niederdruckseite erhöht die Effizienz und damit COP.

Über die jeweiligen Plattenwärmetauscher können die Module der Wärmepumpe nun mit den externen Bedarfen (Frontbox, Bodenbereich, HV-Komponenten) flexibel in Abhängigkeit von den geforderten Leistungen und Temperaturniveaus separat verbunden werden. Hierbei ist die Schlüsselkomponente zur Regelung des Temperaturniveaus das elektronische Expansionsventil (Bild 6).

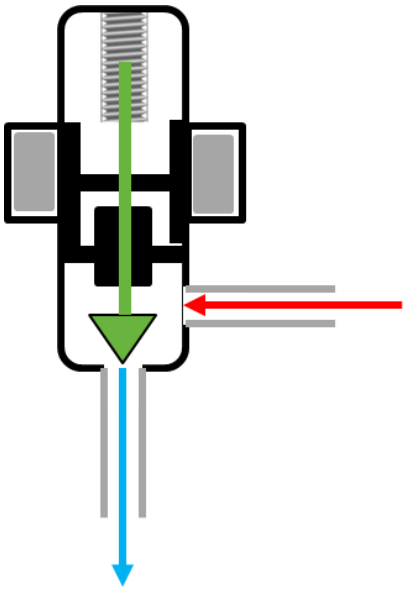

Bild 6: Elektronisches Expansionsventil, Schlüsselkomponente zur Regelung der Temperaturniveaus.

In Bild 7 ist der Aufbau eines Moduls auf dem p-h-Diagramm dargestellt, wobei CO_2 als Kältemittel für die beispielhafte Ausführung ausgewählt wurde.

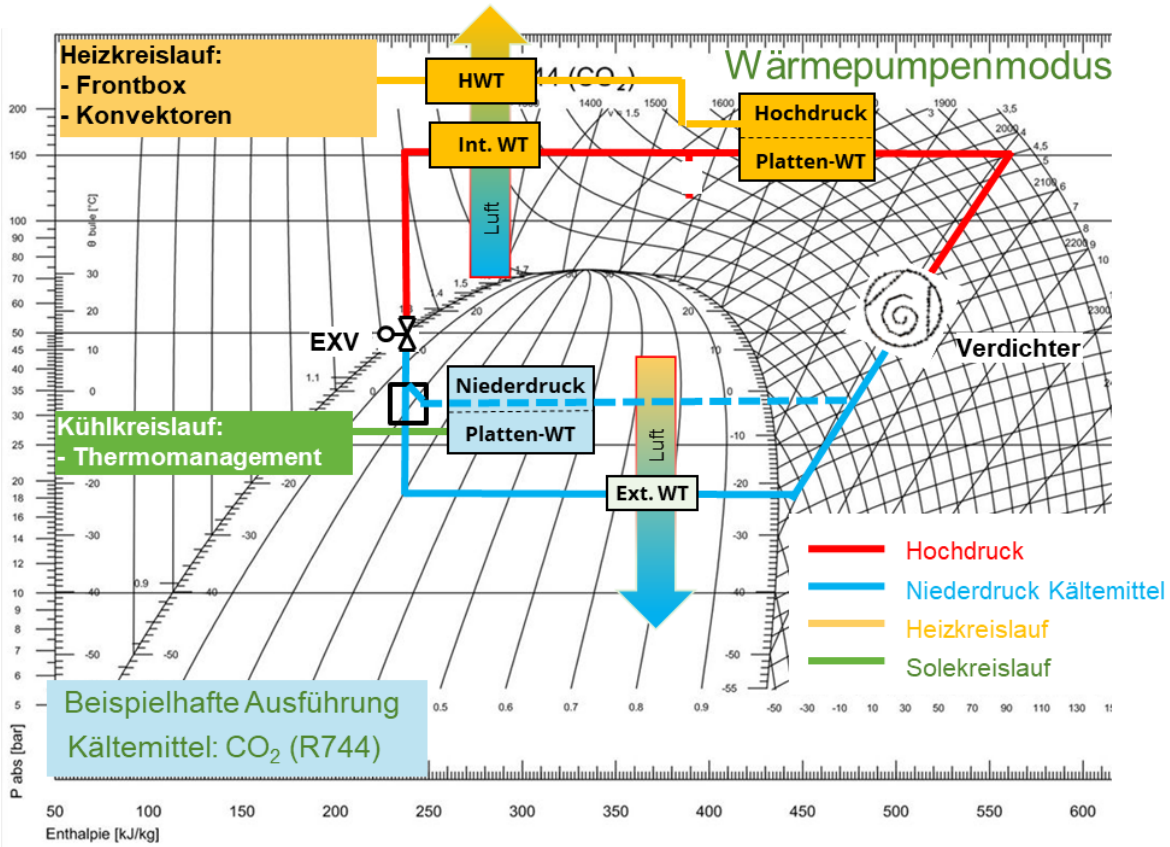

Bild 7: Aufbau eines Moduls auf dem p-h-Diagramm

2.3 Modulares System

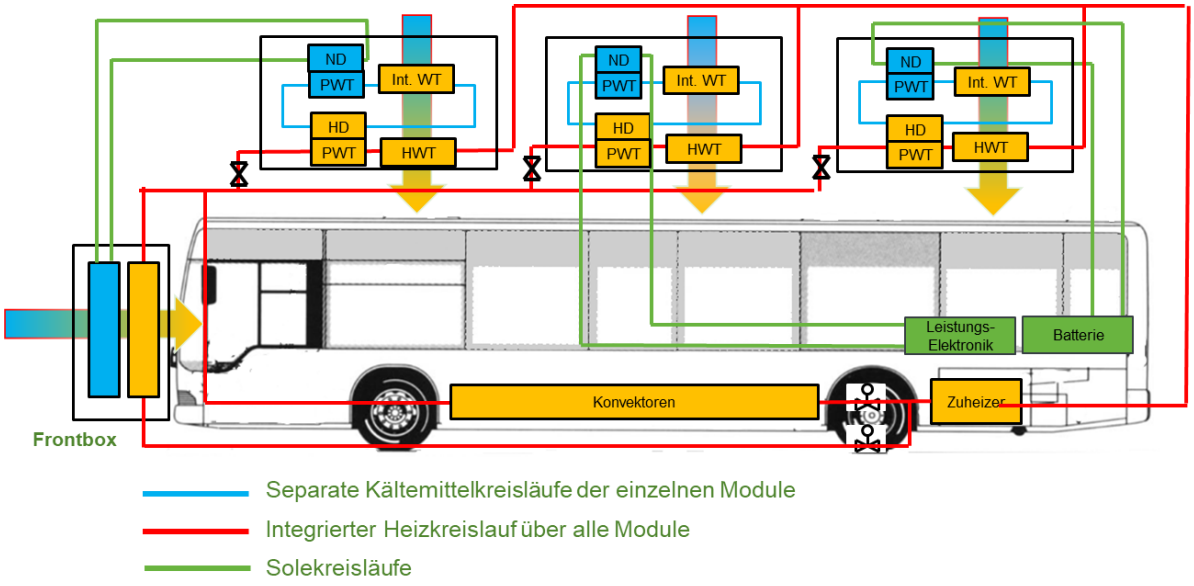

Bild 8: Modulares System
Abkürzungen: ND: Niederdruck, HD: Hochdruck, PWT: Plattenwärmetauscher (Kältemittel/Kühlmittel), int. WT: interner Wärmetauscher (Kältemittel/Luft) und HWT: Heizwärmetauscher (Kühlmittel/Luft)

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die einzelne Module miteinander zu kombinieren. Als vorteilhaft hat sich die Variante herauskristallisiert, in der die Kältemittelkreisläufe voneinander separat laufen und der Heizkreislauf über alle Module verbunden ist. Somit können die Kältemittelkreisläufe voneinander unabhängig in unterschiedlichen Leistungs- und Temperaturniveaus laufen. Der Heizkreislauf über alle Module ermöglicht, dass die Wärme von einem beliebigen Modul zu einem beliebigen Verbraucher transportiert werden kann. Dieses System ist zusätzlich mit Solekreisläufen über den jeweiligen Plattenwärmetauscher mit den Verbrauchern (Frontbox, HV-Komponenten, etc.) flexibel verbunden, um diese mit entsprechenden Leistungs- und Temperaturniveaus zu bedienen.

2.4 Isentroper Wirkungsgrad im Teillast

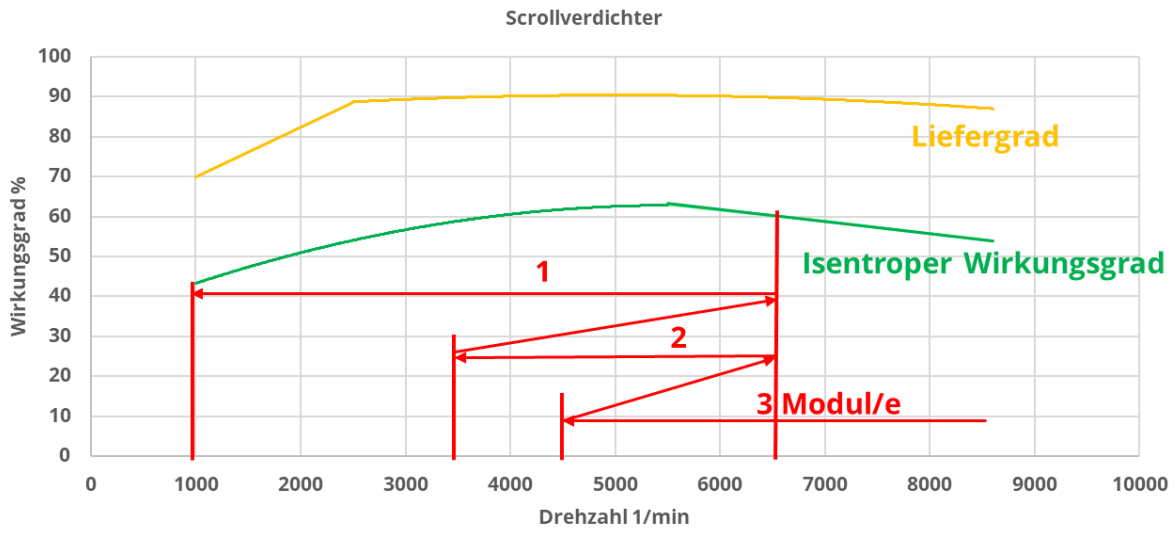

Bild 9: Isentroper Wirkungsgrad und Anzahl der Module im Betrieb in Teillast

In den elektrischen Klimaanlagen werden in der Regel Scrollverdichter verwendet, da der isentrope Wirkungsgrad sein Maximum im mittleren Drehzahlbereich hat, wodurch die Drehzahlregelung in Abhängigkeit des Leistungsbedarfs im Bereich des hohen isentropen Wirkungsgrades läuft. Der Liefergrad des Scrollverdichters bleibt oberhalb einer Drehzahl im niedrigen Bereich weitgehend konstant.

Diese Eigenschaften des Scrollverdichters werden genutzt, um die Gesamteffizienz des modularen Wärmepumpensystems zu erhöhen. In Teillast können bei wechselnden Leistungsbedarfen bzw. Drehzahlen der Scrollverdichters einzelne Module aus- und eingeschaltet werden, damit das Wärmepumpensystem auf einem höheren isentropen Wirkungsgrad (bis 13% in Bild 10) arbeitet. Beim Ausschalten eines Moduls steigen die Drehzahl der restlichen Module bzw. sinken beim Einschalten eines Moduls, um die äquivalenten Leistungsbedarfe abzudecken.

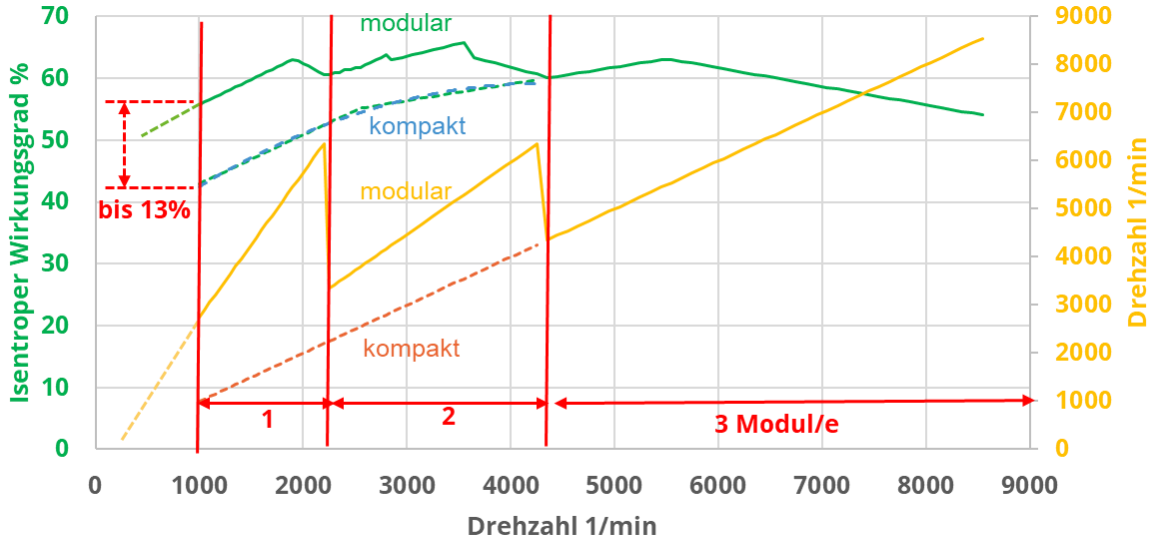

Bild 10: Isentroper Wirkungsgrad der modularen Wärmepumpensystem im Vergleich zum Kompaktsystem

2.5 Deckung der Leistungsbedarfe

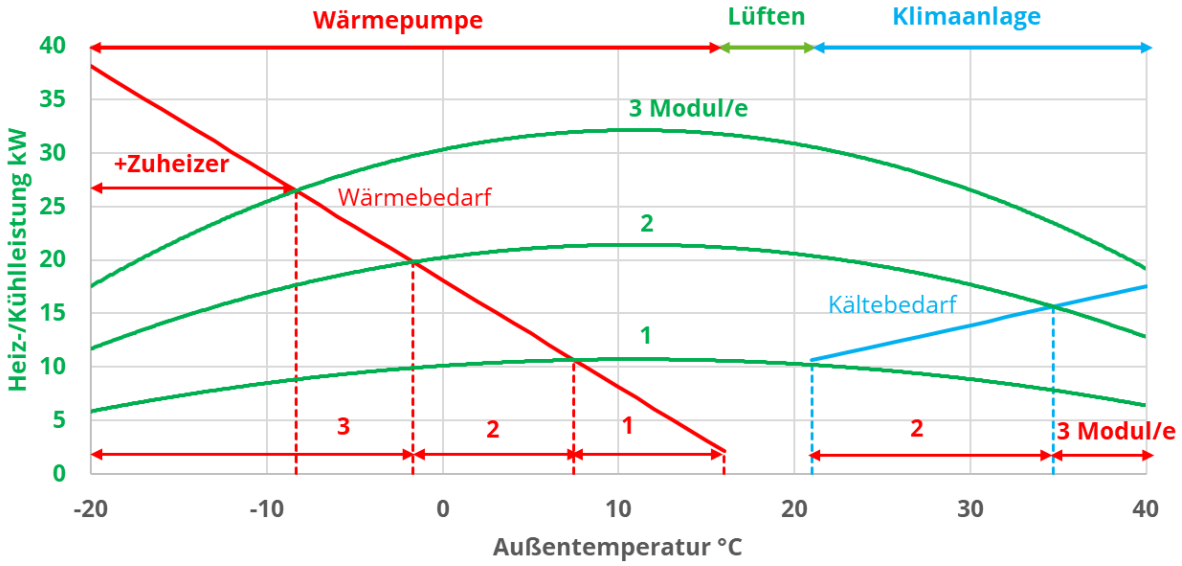

Bild 11: Deckung der Leistungsbedarfe in Abhängigkeit von der Anzahl der Module

In Bild 11 sind die Leistungsbedarfe eines Stadtbusses zu sehen. Im Sommer mit steigenden Außentemperaturen steigt der Kältebedarf und im Winter mit sinkenden Außentemperaturen steigt der Wärmebedarf. Mit den steigenden Kälte- bzw. Wärmebedarfen steigt auch die benötigte Anzahl der Module, wobei unterhalb von -8 °C zusätzlich ein Zuheizer benötigt wird, um den Wärmebedarf abzudecken.

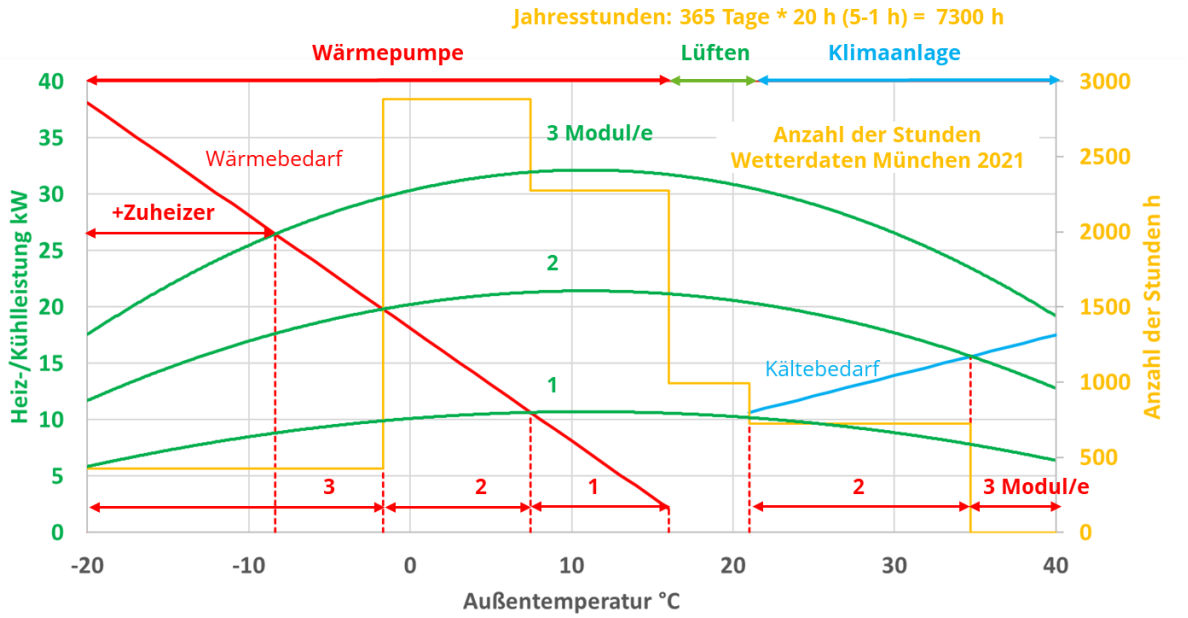

Bild 12: Verteilung der Anzahl der Stunden in Abhängigkeit von der Anzahl der Module über die jeweiligen Außentemperaturbereiche

Wird die Anzahl der Stunden in Abhängigkeit von der Anzahl der Module über die jeweiligen Außentemperaturbereiche übertragen, wird deutlich, dass die Anzahl der Stunden in den moderaten Temperaturbereichen mit reduzierter Anzahl der Module in Teillast überwiegen. Dies macht die Ein- und Ausschaltvorgänge im Teillast zur Effizienzsteigerung besonders vorteilhaft.

2.6 Verbesserung der Effizienz (COP)

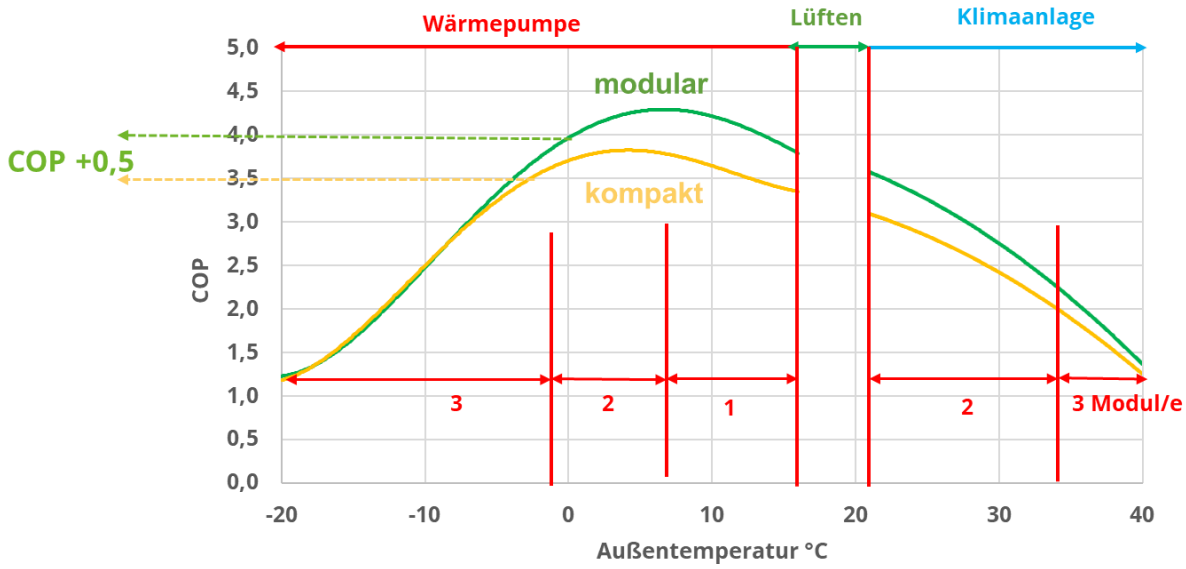

Bild 13: Verbessertes COP eines modularen Systems im Vergleich zum Kompaktsystem

Durch das Ein- und Ausschalten der einzelnen Module in Abhängigkeit der Leistungsbedarfe kann der isentrope Wirkungsgrad des Verdichters damit auch das COP des Kältemittelkreislaufes verbessert werden.

2.7 Energieeinsparung über das Jahr

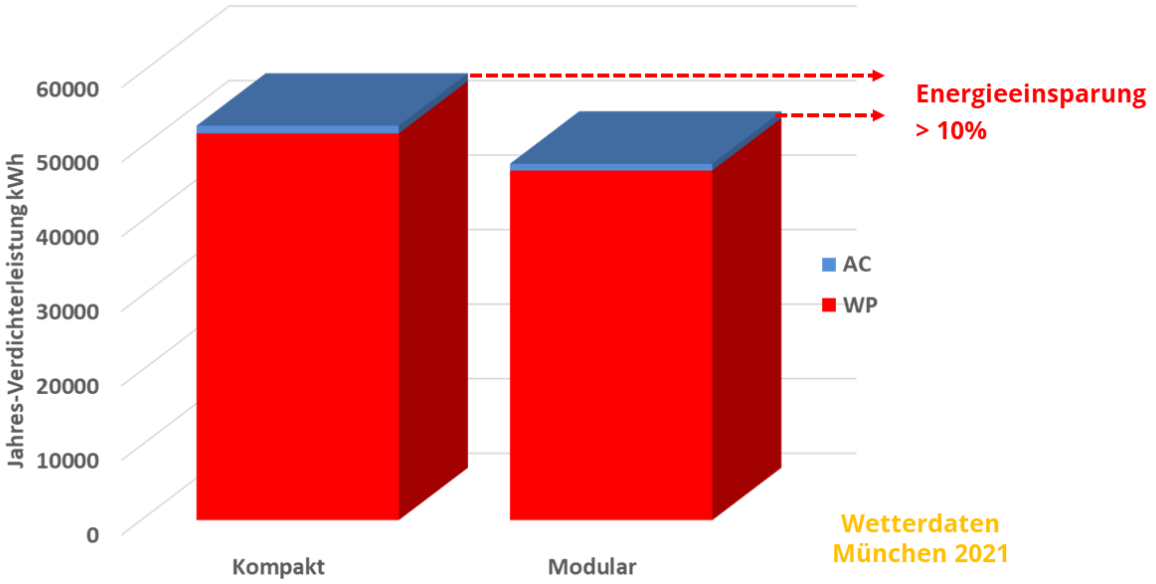

Bild 14: Die elektrische Verdichterleistung des modularen Systems über das Jahr im Vergleich zum Kompaktsystem

Damit kann auch der Jahresenergieverbrauch des Scrollverdichters über das Jahr um ca. 10 % reduziert werden, wobei der Wärmepumpenanteil im Winter deutlich überwiegt.

2.8 Lebensdauer

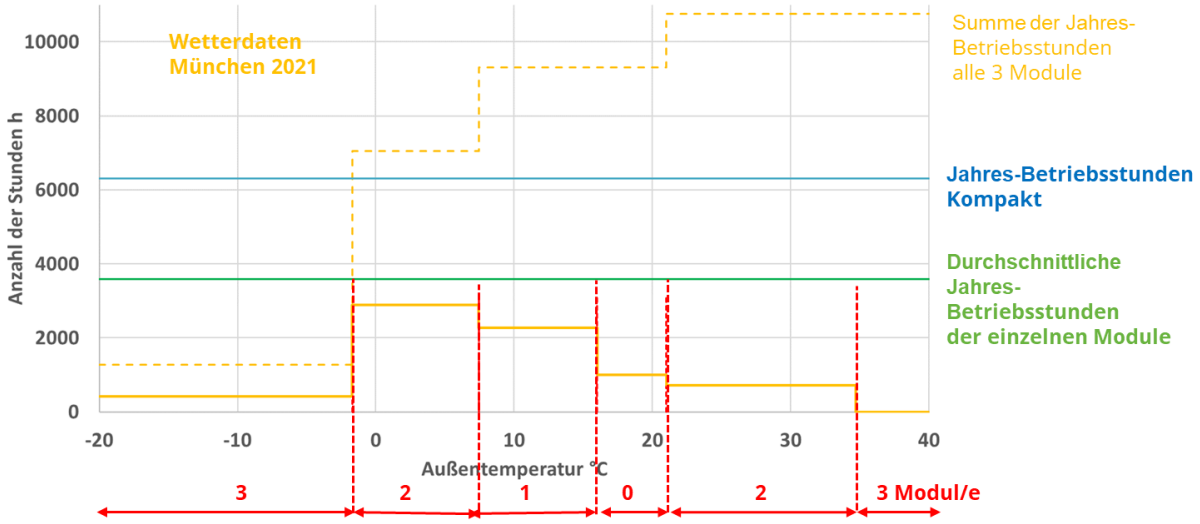

Bild 15: Betriebsstunden über die Außentemperatur

Da im Teillast einzelne Module in Abhängigkeit der Leistungsbedarfe ausgeschaltet werden, halbieren sich in großer Ordnung die Betriebsstunden der einzelnen Module, wodurch die Lebensdauer der Module sich in etwa verdoppelt.

2.9 Schlussfolgerungen

Durch eine geschickte Ein- und Ausschaltstrategie der einzelnen Module eines modularen Wärmepumpensystems kann die Effizienz und damit die Reichweite der elektrischen Fahrzeuge insbesondere im Heizfall im Winter verbessert werden.

Zusätzlich können durch das Ausschalten der einzelnen Module in Abhängigkeit der Leistungsbedarfe die Betriebsstunden der einzelnen Module halbiert und damit die Lebensdauer verdoppelt werden.

2.10 Zusammenfassung

Ein modulares Wärmepumpensystem bietet folgende Vorteile:

- Flexible Integration
- Flexible Applikation in Abhängigkeit von den Anforderungen (z.B. Gelenkbus, Kaltland)
- Einfache Regelung
- Steigerung der Effizienz in Teillast
- Steigerung der Lebensdauer der einzelnen Module
- Zusätzlicher Effizienz- und Lebensdauereffekt durch die Vorkonditionierung
- Vereinfachte Fehleridentifikation und Diagnose
- Einfache und kostengünstigere Reparatur
- Geringere Leckage infolge der kleinen Gleitringdichtung (bei nicht hermetischen Systemen)
- Kostengünstige Komponenten (aus dem automotiven Bereich)
- Gewichts- und Bauraumvorteile

2.11 Nomenklatur

Formelzeichen

$\dot{h}$	Enthalpie $(\mathrm{kJ/kg})$
p	Druck $(\mathrm{bar_abs})$

Abkürzungen

COP	Coefficient Of Performance
$\mathrm{ext.\,WT}$	Externer Wärmetauscher
EXV	Elektronisches Expansionsventil
HD	Hochdruck
HV	Hochvolt
HWT	Heizwärmetauscher
$\mathrm{int.\,WT}$	Interner Wärmetauscher
ND	Niederdruck
PWT	Plattenwärmetauscher
R744	Kältemittel CO_2