

Fotos: Fraunhofer ISE

Abb. 1: Links: Schematische Darstellung eines Kältekreislaufs mit Kältemittelrichtung im Heizbetrieb (rot) und Kühl- bzw. Abtaubetrieb (blau). Rechts: Prinzipskizze eines 4-Wege-Schieberventils und dessen Position in Heiz- und Kühlbetrieb.

# Effizienzsteigerung von Wärmepumpen

## Experimentelle und simulative Analyse der Verlustmechanismen in 4-Wege-Ventilen.

TORSTEN WILL, TIMO METHLER (BEIDE FRAUNHOFER ISE), FABIAN SCHMID, PETRA WEINBRECHT, ANDREAS KLEIN, (ALLE ROBERT BOSCH GMBH, CORPORATE RESEARCH)

Im Rahmen des öffentlich geförderten Projekts QUEEN-HP – MEEP wurde am Fraunhofer ISE gemeinsam mit Corporate Research der Robert Bosch GmbH ein Prüfstand zur Analyse von 4-Wege-Ventilen entwickelt, um deren Einfluss auf Wärmepumpensysteme detailliert zu analysieren. Der Prüfstand ermöglicht die gezielte Untersuchung des internen Leckagemassenstroms, des internen und externen Wärmestroms sowie der Druckverluste unter realitätsnahen Betriebsbedingungen. Mithilfe präziser Messtechnik können sowohl statische als auch dynamische Kennwerte erfasst werden, um Verlustleistungen zu berechnen. Die gewonnenen Daten werden verwendet, um das 4-Wege-Ventil in einem Simulationsmodell abzubilden.



Torsten Will, Fraunhofer ISE

In der Systemsimulation wird festgestellt, dass das 4-Wege-Ventil in der überwiegenden Zahl der Fälle zu einer Reduktion des COPs der Wärmepumpe von 1 % bis 2 % führt. Größtes Optimierungspotential bietet der Druckverlust auf der Niederdruckseite.

### Einleitung

Das 4-Wege-Ventil ist ein zentrales Bauteil in Luft-Wasser-Wärmepumpen, das die Kreislaufumkehr des Kältemittels ermöglicht. Es verbindet im Heizbetrieb die Saugleitung mit dem luftseitigen Lamellen-Wärmeübertrager und die Heißgasleitung mit dem wasserseitigen Plattenwärmeübertrager. Im Heizbetrieb wird das Kältemittel vom Verdichter durch den Plattenwärmeübertrager geleitet, wo es Heizwärme abgibt und sich verflüssigt.

Anschließend strömt es durch ein Expansionsventil zum Lamellen-Wärmeübertrager, nimmt Umgebungswärme auf, verdampft und wird wieder dem Verdichter zugeführt. Im Kühlbetrieb wird das 4-Wege-Ventil umgeschaltet und das Kältemittel strömt zuerst in den Lamellen-Wärmeübertrager, wo es Wärme an die Umgebung abgibt. Die Verdampfung erfolgt im Plattenwärmeübertrager, wo Wärme aus dem Heizwasserkreislauf des Gebäudes aufgenommen wird. Dieser Betrieb ermöglicht nicht nur die Kühlung des Gebäudes in den Sommermonaten, sondern wird auch im Winter zur Enteisung des Lamellen-Wärmeübertragers aktiviert. Besonders bei hoher Luftfeuchtigkeit und niedrigen Temperaturen vereist der Lamellen-Wärmeübertrager luftseitig, was die Effizienz der Wärmepumpe beeinträchtigt und in regelmäßigen Abständen eine Enteisung erfordert. Die Einbauposition und die Auswirkung auf die Kältemittelrichtung sind in Abb. 1 dargestellt.

Nach dem aktuellen Stand der Technik sind die meisten eingesetzten 4-Wege-Ventile Schieberventile, die aus einem zylindrischen Ventilkörper bestehen, in dem sich ein beweglicher Schieber befindet (Abb. 1 rechts). Der Schieber wird durch den Kältemitteldruck der Hoch- bzw. Niederdruckseite in seine Position gebracht. Der Kältemitteldruck auf der jeweiligen Seite des Schiebers wird durch ein Steuerimpulsventil (Pilotventil) geschaltet. Seitlich am zylindrischen Ventilkörper sind vier Hauptanschlüsse angebracht für den Anschluss der Heiß- und Sauggasseite des Verdichters sowie zwei Leitungen zum Plattenwärmeübertrager und Lamellen-Wärmeübertrager. Durch den Schieber wird der Anschluss des Sauggases entweder mit dem Plattenwärmeübertrager oder dem Lamellen-Wärmeübertrager verbunden. Durch den offenen Raum im Ventilkörper strömt das Heißgas vom Verdichter zum jeweils anderen Wärmeübertrager.

Durch den Schieber und den Ventilkörper kann ein Leckagemassenstrom von der Hochdruck- zur Niederdruckseite auftreten. Außerdem findet durch Schieber und Ventilkörper ein Wärmetransport von der Heißgas- zur Sauggasseite sowie von und zur Umgebung statt, wie in Abb. 2 dargestellt. Zusätzlich verursachen die Umlenkungen der Strömung vom Saug- und Heißgas Druckverluste. In der Literatur existieren Untersuchungen, die den generellen Ein-



Fabian Schmid, Corporate Research, Robert Bosch GmbH

satz von 4-Wege-Ventilen im Vergleich zu anderen Abtaumethoden bewerten, so z. B. Dong et al. 2008. Eine gezielte Untersuchung der beschriebenen internen Effekte im 4-Wege-Ventil ist bisher nur sporadisch Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen gewesen. Zhang et al. (2023) untersuchen die Druckverluste simulativ und validieren diese mittels eines Versuchsaufbaus.

Ziel der Arbeit ist die Quantifizierung der beschriebenen Effekte mit dem Kältemittel Propan (R290) bei realitätsnahen Temperatur- und Druckdifferenzen zwischen Hoch- und Niederdruckseite.

### Messmethodik

Für die Analyse der beschriebenen Effekte ist eine möglichst genaue Erfassung des Kältemittelmassenstroms erforderlich, was mit der höchsten Genauigkeit in rein flüssigem Zustand erreicht wird. Die unzureichende Messgenauigkeit der gasförmigen Massenstrommessung beeinträchtigt die Ermittlung des Leckagemassenstroms als direkte Messgröße aus der Differenz zwischen dem Ein- und Austritt des Ventils auf der Heißgas- oder Sauggasseite. Eine alternative Methode ist, den Gesamtkältemittelmassenstrom in zwei verschiedenen Aufbauten mit sowie ohne 4-Wege-Ventil zu messen und über die Differenz den Leckagemassenstrom zu ermitteln. Dieses Vorgehen erfordert eine exakte Reproduktion des Betriebszustandes, was nicht sichergestellt werden ▶

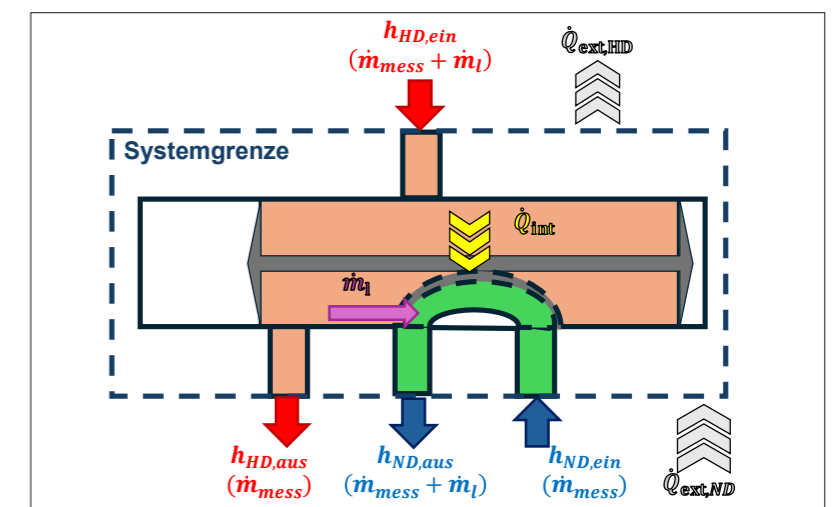


Abb. 2: Bilanzraum 4-Wege-Ventil mit den externen  $\dot{Q}_{ext}$  und internen  $\dot{Q}_{int}$  Wärmeströmen, dem gemessenen Massenstrom  $\dot{m}_{mess}$  sowie dem Leckagemassenstrom  $\dot{m}_l$  und den Enthalpien  $h$ .

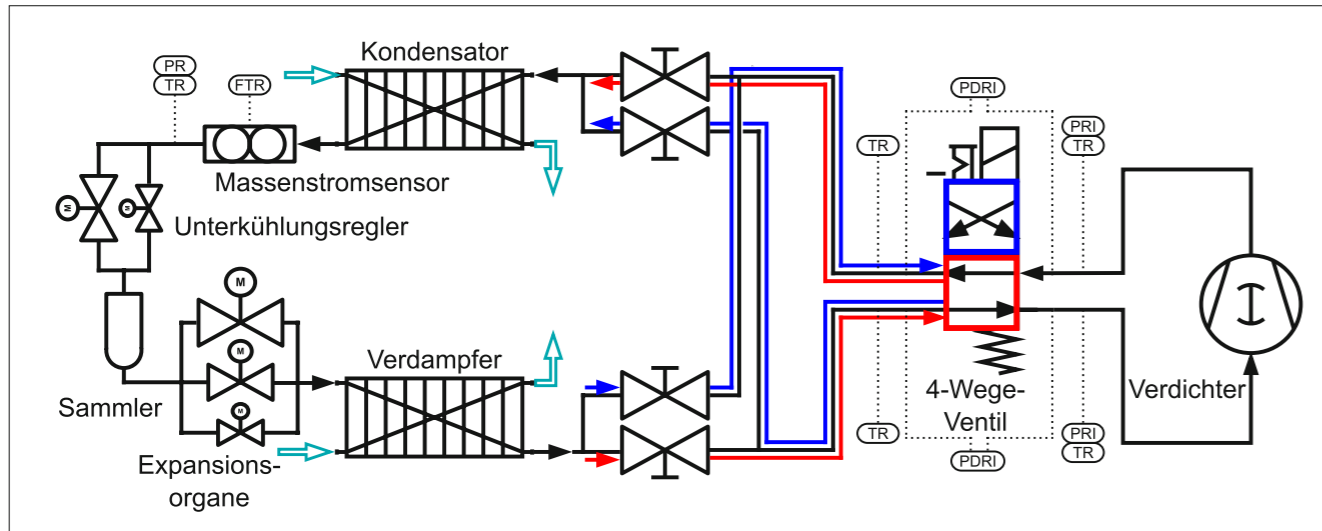


Abb. 3: Schematischer Aufbau des Prüfstands für die Analyse eines 4-Wege-Ventils am Fraunhofer ISE. Messstellenbezeichnung siehe Tabelle 1.

kann. Die verwendete Methode basiert auf der Energiebilanz entlang der Systemgrenzen am 4-Wege-Ventil (► Abb. 2), damit kann sowohl der Leckagemassenstrom als auch der interne Wärmestrom rechnerisch ermittelt werden. Diese Methode erfordert keine Reproduzierbarkeit der Messbedingungen, jedoch eine hohe Messgenauigkeit der Messgeräte zur Erfassung der Enthalpie- und Stoffströme und eine Wärmedämmung des Ventils zur Umgebung zur Reduktion des Wärmestroms von und zur Umgebung.

Basierend darauf wird die Annahme getroffen, dass es sich um ein adiabates System handelt ( $\dot{Q}_{ext} = 0 \text{ W}$ ), also kein Wärmestrom von und zur Umgebung existieren. Des Weiteren wird angenommen, dass der Leckagemassenstrom von der Hoch- zur Niederdruckseite übergeht und die Enthalpie des Gases am Austritt der Hochdruckseite  $h_{HD, aus}$  hat. Der interne Wärmestrom geht ebenfalls von der Hoch- zur Niederdruckseite über.

Aus den Stoffströmen und Enthalpien ergibt sich dann folgende Energiebilanz mit dem Leckagemassenstrom  $\dot{m}_l$  als Unbekannte.

$$\dot{m}_l = \frac{\dot{m}_{mess} \cdot (h_{HD, ein} - h_{HD, aus} + h_{ND, ein} - h_{ND, aus})}{h_{ND, aus} - h_{HD, ein}} \quad \text{Gl (1)}$$

Der gemessene Massenstrom  $\dot{m}_{mess}$  wird dabei als direkte Messgröße erfasst und die Enthalpien auf Hoch-  $h_{HD}$  und Niederdruckseite  $h_{ND}$  über die Stoffdatenbank REFPROP (Version 10) aus Druck und Temperatur berechnet.



Petra Weinbrecht,  
Corporate Research,  
Robert Bosch GmbH

Betrachtet man innerhalb der Systemgrenzen den Bilanzraum um die Hochdruckseite ergibt sich der interne Wärmestrom aus,

$$\dot{Q}_{int} = (\dot{m}_{mess} + \dot{m}_l) \cdot h_{HD, ein} - \dot{m}_{mess} \cdot h_{HD, aus} - \dot{m}_l \cdot h_{HD, aus} \quad \text{Gl (2)}$$

Mit Hilfe dieser Gleichungen kann aus den gemessenen Größen der Leckagemassenstrom und der interne Wärmestrom bestimmt werden.

In einem zweiten Schritt wird der externe Wärmestrom des nicht isolierten 4-Wege-Ventils ermittelt, welcher in ► Abb. 2 ausgegraut dargestellt ist, indem die Dämmung entfernt wird. Unter der Annahme, dass sich der Leckagemassenstrom sowie der interne Wärmestrom bei gleichen Betriebsbedingungen im Vergleich zur Messung mit Dämmung nicht verändert, wird der zugeführte Wärmestrom im Niederdruckbereich sowie der abgeführte Wärmestrom im Hochdruckbereich bestimmt.

#### Prüfstand

Zur Analyse der Verlustmechanismen im 4-Wege-Ventil ist am Fraunhofer ISE ein Prüfstand entworfen, aufgebaut und in Betrieb genommen worden. Der Prüfstand besteht aus einem Kältekreisprozess mit R290 (Propan) als Kältemittel, mit den Komponenten Verdichter, Kondensator, Verdampfer, Expansionsorgane, Sammler und Unter Kühlungsregler. Kondensator und Verdampfer sind Plattenwärmeübertrager mit Wasser bzw. Sole als Wärmeträgerme-

dium. Der Kreislauf ist schematisch in ► Abb. 3 dargestellt.

Für die Einstellung der Betriebsbereiche von  $-30 \text{ }^\circ\text{C}$  bis  $+20 \text{ }^\circ\text{C}$  Verdampfungstemperatur und  $+20 \text{ }^\circ\text{C}$  bis  $+75 \text{ }^\circ\text{C}$  Kondensationstemperatur wird der Prüfstand mithilfe von zwei unterschiedlich großen Unter Kühlungsreglern sowie drei unterschiedlich großen Expansionsorganen geregelt. Der Einsatz von zwei bzw. drei Regelventilen unterschiedlicher Größen ermöglicht einen weiten und präzisen Regelbereich für den Durchfluss. Die Fließrichtung in Wärmeübertragern, Massenstromsensor, Ventilen und Sammler wird im Umkehrbetrieb durch die vier Kugelhähne fixiert, die je nach Betriebszustand gegenläufig geöffnet bzw. geschlossen werden. Der Verdichter kann ausgetauscht werden, um die realen Bedingungen der Anlage, in der das Umschaltventil installiert ist, zu realisieren. Die Wärmeübertrager, Ventile und der Massenstromsensor sind auf eine maximale Heizleistung von ca. 25 kW bei



Andreas Klein,  
Corporate Research,  
Robert Bosch GmbH

$+35 \text{ }^\circ\text{C}$  Kondensationstemperatur und  $-5 \text{ }^\circ\text{C}$  Verdampfungstemperatur ausgelegt.

Als Messtechnik ist ein Coriolis Massenstromsensor in der Flüssigleitung vor dem Unter Kühlungsregler installiert, mit dem der Massenstrom  $\dot{m}_{mess}$  ermittelt wird. Der Unter Kühlungsregler sorgt für eine vollständig flüssige Phase im Massenstromsensor. Die thermodynamischen Zustände des Propan am Massenstromsensor sowie an den vier Anschlüssen des 4-Wege-Ventils werden mit Temperatur- und Absolutdrucksensoren festgestellt. Die Differenzdrücke zwischen Ein- und Austritt von Hoch- und Niederdruckseite werden mit Differenzdrucksensoren bestimmt. Beim Umschalten des 4-Wege-Ventils müssen die Anschlüsse der Differenzdrucksensoren getauscht werden. Alle Temperatursensoren sind Pt100-Widerstandssensoren, welche die Temperatur mittels Schutzrohr innerhalb der Strömung messen. Die komplette Messtechnik ist zur Reduktion von Messunsicherheiten inklu- ►

Kein Jobportal mit  
500.000+ Stellen, sondern  
ausschließlich Jobs bei  
den **Marktführern.**

Arbeite bei den Besten

**HIDDEN  
CHAMPIONS**

Scan mich!



Tabelle 1: Verwendete Messtechnik mit Messbereich und Genauigkeit

Messstelle (Bezeichnung in Abb. 3)	Sensor	Messbereich	Genauigkeit
Temperatur (TR)	Pt100 4-Leiter, Aufzeichnung mit Beckhoff KL3222	-20 °C..150 °C	<0,1 K
Absolutdruck (PRI)	ABB AST266	0–40 bar absolut	<0,04 % vom Messbereich (= 16 mbar)
Differenzdruck (PDRI)	ABB DSH266	0–1 bar	<0,075 % vom Messbereich (= 0,75 mbar)
Massenstrom / Dichte (FTR)	Emerson Micro Motion ELITE 1/4"	Massenstrom 2–100 g/s Dichte	<0,1 % vom Messwert <0,5 kg/m³

sive der verwendeten Messkarten kalibriert. Die verwendeten Sensoren mit Messbereich und Genauigkeit sind in ► Tabelle 1 angegeben. Die Positionierung der Temperaturmessstellen erfolgt zur Verringerung der Umgebungseinflüsse nah am Ventil, die Druck- und Differenzdruckmessung erfolgt im Abstand von ca. 10 x Innenrohrdurchmesser zu den Anschlüssen des 4-Wege-Ventils. Es folgen weitere ca. 10 x Innenrohrdurchmesser, in denen das Kältemittel ohne Umlenkung im Ringspalt zwischen Rohr und Schutzhülse des Temperatursensors strömt. Die Gestaltung der Messstelle ist in ► Abb. 4 dargestellt. Das Kältemittel strömt vom Verdichter oder



Timo Methler, Fraunhofer ISE

Wärmeübertrager (1) zum 4-Wege-Ventil (2) bzw. umgekehrt. Der Anschluss zu den Absolut- und Differenzdrucksensoren (3) erfolgt über einen Ringspalt (4), der um das Rohr angeordnet ist und durch vier radialsymmetrische Bohrungen (5) mit 1 mm Lochdurchmesser mit dem Rohr verbunden ist. Die Bohrungen sollen den Einfluss der Anschlüsse der Drucksensoren auf die Strömung verringern und zu einer exakteren Druckmessung führen. Eine weitere 1 mm-Bohrung (6) im Tiefpunkt des Anschlussrohres sorgt für die Ölrückführung. Die Sensorspitze des Temperatursensors (7) ist im Abstand von ca. 30 mm zum 4-Wege-Ventil angeordnet und ragt durch das gerade Rohrstück mit der Druckmessstelle hindurch. Die Leitungen vom Drucksensoranschluss am Ringspalt bis zum Drucksensor sind beheizt, um eine Kondensation des Kältemittels in der Leitung zu verhindern.

Das untersuchte 4-Wege-Ventil hat eine Körperlänge von L = 132 mm und einen Außendurchmesser (D) von 34 mm. Der Heißgasanschluss hat L = 41 mm und D = 13 mm. Der Sauggasanschluss hat L = 64 mm und D = 16 mm, die Anschlüsse zu den Wärmeübertragern sind L = 54 mm und D = 16 mm. Körper und Anschlüsse sind aus Edelstahl gefertigt. Es wurde in beiden Stellungen an 25 ausgewählten Betriebspunkten mit hoher und niedriger Temperaturdifferenz zwischen Hoch- und Niederdruckseite und einer weiten Spanne im Massenstrom betrieben. Für die nachfolgende Auswertung werden nur stabile Messpunkte des Heizbetriebs verwendet.

**Auswertung und Analyse der Messergebnisse**

Eine Auswertung der Messdaten nach Gl (1) führt zu dem in ► Abb. 5 links dargestellten Leckagemassenstrom. Normiert man diesen auf den gemessenen Gesamtmassenstrom so ergibt sich die in ► Abb. 5 rechts dargestellte relative Leckage.

Der berechnete Leckagemassenstrom ist gering und liegt überwiegend innerhalb der Messgenauigkeit des Prüfstandes von 0,12 g/s. Die Genauigkeitsgrenze des Prüfstandes wurde durch vorherige Messungen ohne eingebautes 4-Wege-Ventil bestimmt.

Der nach Gl (2) berechnete interne Wärmestrom von der Hochdruckseite (HD) zur Niederdruckseite (ND) des 4-Wege-Ventils ist in ► Abb. 6 links dargestellt. Teilt man den

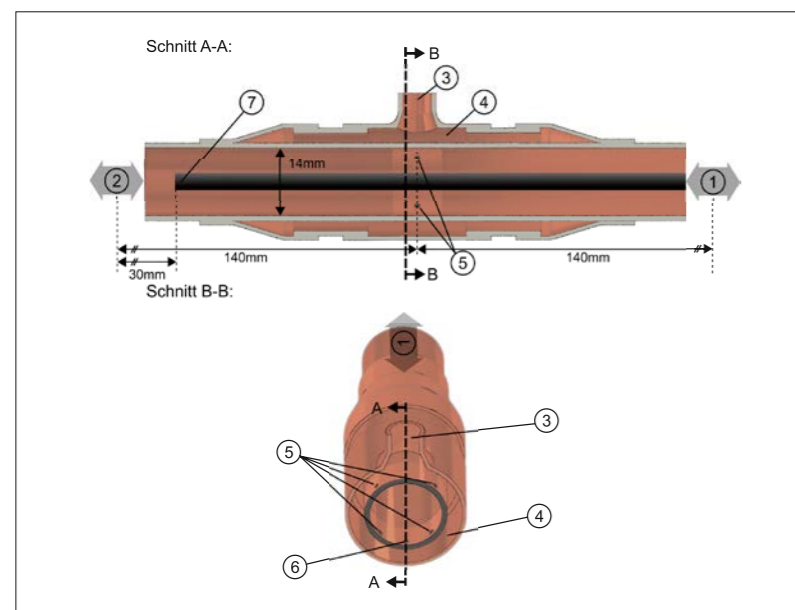


Abb. 4: Gestaltung des Anschlusses für die Druck- und Temperatursensoren. Oben: Schnitt A (parallel zur Strömungsrichtung). Unten: Schnitt B (quer zur Strömungsrichtung).

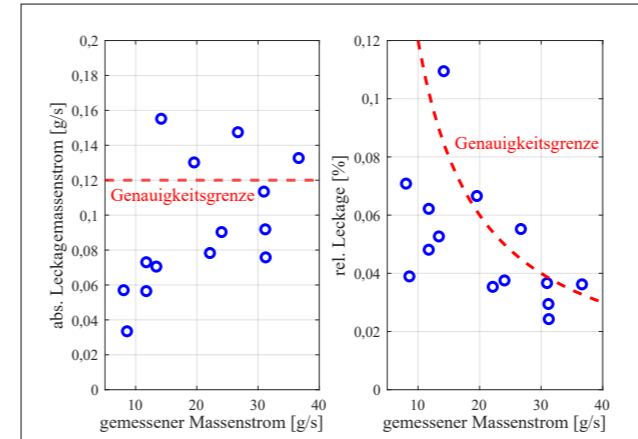


Abb. 5: Berechneter absoluter Leckagemassenstrom (links) und relative Leckage (rechts).

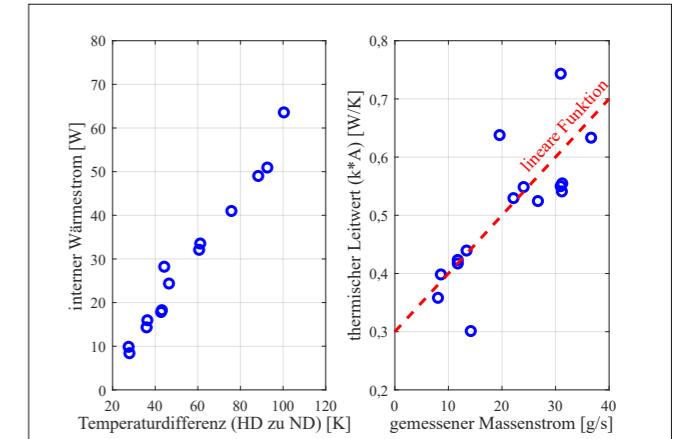


Abb. 6: Berechneter interner Wärmestrom (links) und interner thermischer Leitwert (rechts).

internen Wärmestrom durch die jeweilige Temperaturdifferenz, so erhält man den thermischen Leitwert  $k \cdot A$  in  $\frac{W}{K}$ . Stellt man diesen über dem gemessenen Massenstrom dar (► Abb. 6 rechts), so lässt sich der thermische Leitwert im gemessenen Bereich durch eine lineare Funktion annähern.

Der externe Wärmestrom, der nicht in einer Abbildung dargestellt ist, wurde an zwei Betriebspunkten bestimmt. Aus diesen beiden Messpunkten werden folgende Erkenntnisse abgeleitet:

- Der externe Wärmestrom ist nur auf der Hochdruckseite relevant aber <15 W. Auf der Niederdruckseite hingegen ist der Wärmestrom aufgrund der Oberflächentemperaturverteilung vernachlässigbar klein.
- Der externe Wärmestrom auf der Hochdruckseite zeigt ein ähnliches Verhalten wie der interne Wärmestrom: der thermische Leitwert  $k \cdot A$  kann mit einer linearen Ansatzfunktion in Abhängigkeit vom gemessenen Gesamtmassenstrom angenähert werden.

Die Infrarotaufnahme in ► Abb. 7 zeigt die Oberflächentemperatur des ungedämmten 4-Wege-Ventils. Diese bestätigt die Annahme, dass der hauptsächlich externe Wärmestrom im Heizbetrieb auf der Hochdruckseite vorliegt.

Die gemessenen Druckverluste des 4-Wege-Ventils sind in ► Abb. 8 links in Abhängigkeit vom Volumenstrom dargestellt. Der dominierende Druckverlust befindet sich auf der Niederdruckseite. Die Druckverluste

lassen sich in  $K_v$ -Werte umrechnen:

$$K_v = \dot{V} \cdot \sqrt{\frac{1 \text{ bar}}{\Delta p} \cdot \frac{\rho}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}} \quad \text{Gl (3)}$$

Hierfür sind der Volumenstrom  $\dot{V}$  in  $\frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ , die Druckdifferenz  $\Delta p$  in bar und die Dichte  $\rho$  in  $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  einzusetzen. ► Abb. 8 rechts zeigt den  $K_v$ -Wert über dem gemessenen Massenstrom.

**Modellierung und Simulation**

Um den Einfluss eines 4-Wege-Ventils hinsichtlich Heizleistung und COP einer Wärmepumpe zu analysieren, werden in einem Simulationsmodell alle untersuchten Effekte möglichst real nachgebildet. Dazu wird wie folgt vorgegangen: ►

Der dominierende Druckverlust befindet sich auf der Niederdruckseite.

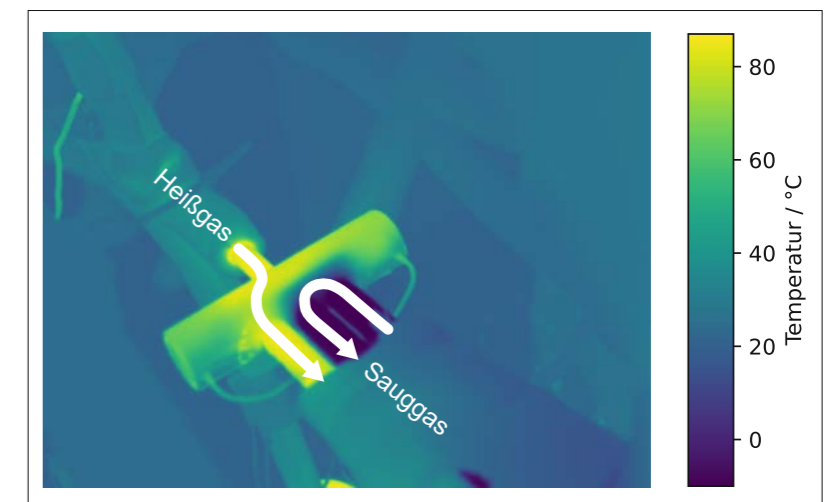


Abb. 7: Aufnahme des ungedämmten Ventils mit Wärmebildkamera.

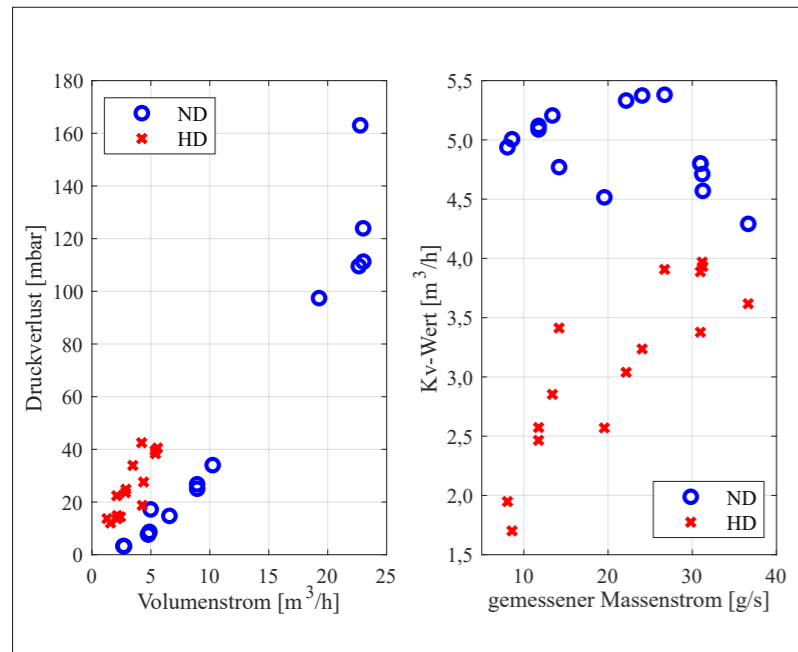


Abb. 8: Gemessene Druckverluste des Ventils (links) und berechnete  $K_v$ -Werte (rechts).

Damit ist das Simulationsmodell für das 4-Wege-Ventil ausreichend charakterisiert. Dieses wird in ein bereits vorhandenes Simulationsmodell eines kompletten Kältekreis integriert. Das Kältekreismodell ist in der Modellierungssprache Modelica in der Software Dymola unter Verwendung der TIL-Suite aufgebaut. Damit lassen sich die Auswirkungen des 4-Wege-Ventils auf den Kältekreis simulativ ermitteln. ▶ Abb. 9 zeigt den Vergleich der Auswirkungen aller Effekte des 4-Wege-Ventils an ausgewählten Betriebspunkten gegenüber demselben Kältekreis ohne 4-Wege-Ventil. Zusätzlich sind die Einzeleffekte dargestellt.

Es fällt auf, dass sich an einem der untersuchten Punkte eine Erhöhung der Heizleistung und des COPs aufgrund des internen Wärmestrom ergibt, welcher an diesem Punkt alle anderen Effekte dominiert. Das 4-Wege-Ventil fungiert in allen Betriebspunkten als Art „interner Wärmeübertrager“. Jedoch wird hier – im Gegensatz zur üblichen Verschaltung

Für das Modell wird ein konstanter Leckagemassenstrom von 0,15 g/s angenommen, da der gemessene Leckagemassenstrom weder mit der Druckdifferenz (von der Hochdruckseite zur Niederdruckseite) noch mit dem Gesamtmassenstrom, und auch mit keiner anderen sinnvollen physikalischen Größe korreliert. Sein Wert orientiert sich an dem maximal gemessenen absoluten Leckagemassenstrom (▶ Abb. 5).

Für die Modellierung der Druckverluste wird jeweils für Hoch- und Niederdruck ein konstanter  $K_v$ -Wert angenommen, der sich am jeweiligen Mittelwert der Messung orientiert (▶ Abb. 8):

- $K_{v,ND} = 4,5$
- $K_{v,HD} = 3,5$

Der interne Wärmestrom wird mit einer linearen Ansatzfunktion angenähert (Abb. ▶ 6 rechts):

$$k \cdot A = c_0 + c_1 \cdot |\dot{m}| \quad \text{Gl (4)}$$

Die Koeffizienten  $c_0$  und  $c_1$  werden zu  $c_0 = 0,3 \frac{W}{K}$ ,  $c_1 = 10 \frac{W}{K} \cdot \frac{s}{kg}$  bestimmt.

In analoger Weise werden die Koeffizienten  $c_0 = 0,075 \frac{W}{K}$  und  $c_1 = 3,5 \frac{W}{K} \cdot \frac{s}{kg}$  für den externen Wärmestrom auf der Hochdruckseite aus den Messdaten bestimmt. Der Wärmestrom auf der Niederdruckseite wird vernachlässigt.

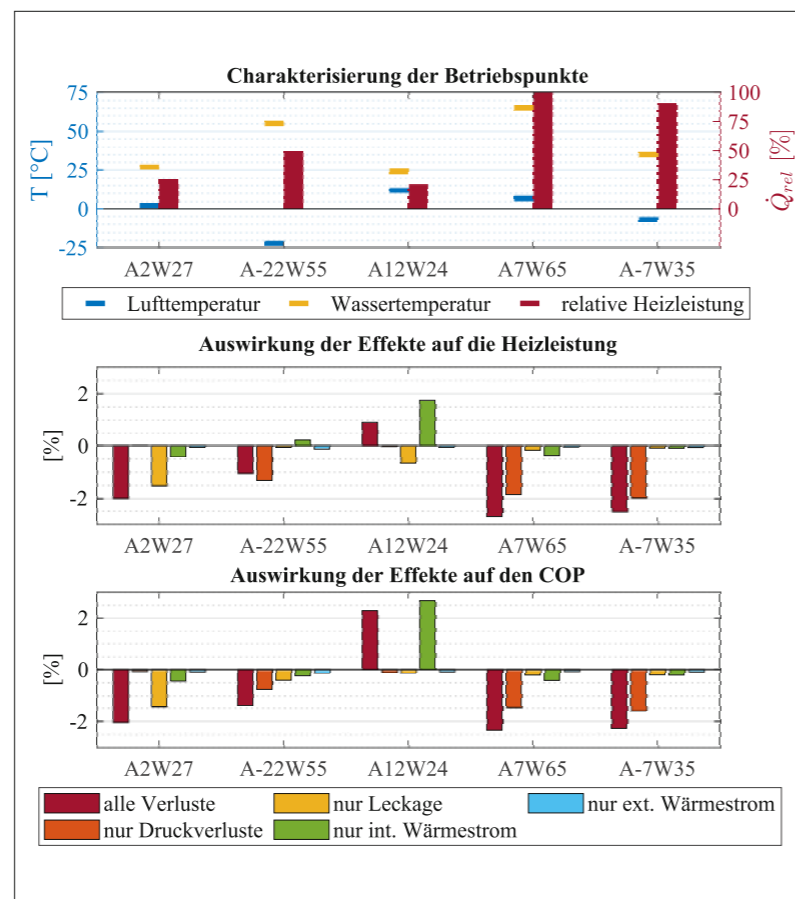


Abb. 9: Einfluss eines 4-Wege-Ventils auf die Heizleistung und den COP eines Kältekreis.

eines internen Wärmeübertragers – der eigentlich zur Beheizung nutzbare Wärmestrom vor dem Kondensator auf der Hochdruckseite verwendet. Die Überhitzung des Sauggases wirkt sich positiv aus, die Entnahme des Wärmestroms auf der Hochdruckseite negativ. Am Punkt A12/W24 überwiegt aufgrund der geringen Heizleistung und geringen Temperaturdifferenz der positive Effekt.

An allen anderen Punkten beeinflusst das 4-Wege-Ventil den COP und die Heizleistung negativ. Dabei hat nicht nur der interne Wärmestrom einen negativen Einfluss, sondern auch die anderen Effekte. Beim Punkt A2/W27 dominiert die interne Leckage, bei A7/W65 und A-7/W35 die Druckverluste. Die Druckverluste resultieren aus einem hohen Kältemittelmassenstrom und somit auch Volumenstrom aufgrund der hohen Heizleistung.

In einer größeren, hier nicht dargestellten Simulationsstudie hat das 4-Wege-Ventil in der überwiegenden Zahl der Fälle zu einer Reduktion des COPs von 1 % bis 2 % geführt.

### Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Untersuchung eines 4-Wege-Ventils zeigt, dass der saugseitige Druckverlust in vielen Betriebspunkten der relevante negative Effekt auf den COP in einer Wärmepumpe ist. Bei ansteigender Drehzahl des Verdichters nimmt er infolge des zunehmenden Kältemittel-Volumenstroms zu. Aufgrund des höheren  $K_v$ -Werts der Niederdruck- im Gegensatz zur Hochdruckseite hat der korrekte Anschluss der Nieder- und Hochdruckseite am 4-Wege-Ventil einen relevanten Einfluss auf die Systemeffizienz. Der externe Wärmestrom mit <15 W, der interne Wärmestrom mit 10 bis 65 W und die relative Leckage von 0,3–1,1 % zeigen im Allgemeinen geringere Auswirkungen auf die Systemeffizienz. Der interne Wärmestrom kann sogar zu einem positiven Effekt auf die Systemeffizienz führen. Im Allgemeinen führt das 4-Wege-Ventil zu einer Reduktion des COPs von 1–2 %. Bei Neuentwicklungen von 4-Wege-Ventilen sollten alle Verlustmechanismen gleichermaßen beachtet und minimiert werden. ■

### Danksagung

Die Autoren danken dem BMWK und dem PtJ für die finanzielle Unterstützung im Rahmen des Projekts QUEEN-HP – MEEP (FKZ 03EN4055A-B), in dem der Aufbau des Prüfstands sowie die Analysen des 4-Wege-Ventils realisiert wurden.

Im Allgemeinen führt das 4-Wege-Ventil zu einer Reduktion des COPs von 1 bis 2 %.

### Referenzen

- [1] Zhang, K.; Wu, D.; Yuan, Y.; Zhu, J.; Feng, Z.; Li, J.; Xuan, L.; Xiong, Y. Numerical Simulation and Experimental Validation of the Flow-Induced Excitation Characteristics of a Four-Way Reversing Valve. *Processes* 2023, 11, 2177. <https://doi.org/10.3390/pr11072177>.
- [2] Dong Huang, Quanxu Li, Xiuling Yuan, Comparison between hot-gas bypass defrosting and reverse-cycle defrosting methods on an air-to-water heat pump, *Applied Energy*, Volume 86, Issue 9, 2009, Pages 1697-1703, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.11.023>.

### Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Abkürzung/ Index/ Formelzeichen	Beschreibung	Einheit
COP	Coefficient of Performance	
A-/W--	Betriebspunkt (z. B. A7/W55 - Lufttemperatur (A) 7°C, Wassertemperatur (W) 55°C)	
HD	Hochdruckseite	
ND	Niederdruckseite	
$\Delta p$	Differenzdruck	mbar
$c_0$	Koeffizienten für die Modellierung des internen und externen Wärmestroms	$\frac{W}{K}$
$c_1$		$\frac{W}{K} \cdot \frac{s}{kg}$
$h$	Spezifische Enthalpie	$\frac{kJ}{kg}$
$k$	Gesamt-Wärmedurchgangskoeffizient	$\frac{W}{m^2K}$
$\dot{m}$	Massenstrom	g/s
A	Wärmeübertragende Fläche	m <sup>2</sup>
D	Durchmesser	mm
$K_v$	Durchflusskoeffizient	m <sup>3</sup> /h
L	Länge	mm
$\dot{Q}$	Wärmestrom	W
$\dot{Q}_{rel}$	Relativer Wärmestrom (bezogen auf Nennleistung)	%
T	Temperatur	°C
$\dot{V}$	Volumenstrom	m <sup>3</sup> /h
$\rho$	Dichte	kg/m <sup>3</sup>
aus	Austritt	
ein	Eintritt	
ext	Über die Systemgrenze hinweg	
int	Innerhalb der Systemgrenze	
mess	Gemessen	
l	Leckage	