

Thermodynamische Analyse von Hochtemperaturwärmepumpen unter Verwendung von HFO und HCFO Kältemitteln

Kevin Diewald^{1,2,3,*}, Cordin Arpagaus², Babette Hebenstreit^{3,4}

¹Hoval Aktiengesellschaft, Austrasse 70, FL-9490 Vaduz, kevin.diewald@outlook.de, *Nachwuchsautor

²NTB Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs, Institut für Energiesysteme IES, Werdenbergstrasse 4, CH-9471 Buchs, cordin.arpagaus@ntb.ch

³Forschungszentrum Energie, FH Vorarlberg, Hochschulstr. 1, 6850 Dornbirn, Austria, +43 5572 792 5702, babette.hebenstreit@fhv.at

⁴Division of Energy Science, Dept. of Engineering Sciences and Mathematics, Luleå University of Technology, Luleå, 97187, Sweden

Kurzfassung: Industrielle Hochtemperaturwärmepumpen (HTWP) weisen im Temperaturbereich von 100 °C bis 160 °C ein großes Potenzial für die Nahrungsmittel-, Papier- und Chemieindustrie zur Prozesswärmebereitstellung auf. Insbesondere die low-GWP Kältemittel der Fluidgruppe HFO und HCFO eignen sich durch ihre thermophysikalischen Eigenschaften für die Anwendung in HTWP. Die vorliegende Arbeit vergleicht die HFO und HCFO Kältemittel R1336mzz(Z), R514A, R1234ze(Z), R1233zd(E) und R1224yd(Z) hinsichtlich ihrer Eigenschaften und ihrer Anwendbarkeit in drei verschiedenen Kältekreislaufkonfigurationen mittels thermodynamischer Simulationsanalyse. Insbesondere wird auf die erreichten COP Werte, die volumetrische Heizleistung (VHC), die Heißgastemperaturen und das Verdichtungsverhältnis eingegangen. Die Kältekreislaufkonfiguration mit einem internen Wärmeübertrager (IHX) wird bereits in HTWP, die am Markt verfügbar sind, bis 130 °C Senktemperatur eingesetzt. Die anderen beiden Kreislaufkonfigurationen eignen sich vor allem für hohe Senkenspreizungen und Temperaturhübe. R1336mzz(Z) weist bei Senktemperaturen ab 130 °C im IHX und 2SE Kreislauf die höchsten COP Werte, aber auch die geringsten VHCs auf. Im 2CP Kreislauf besitzt die Kältemittelkombination aus R514A in der unteren Stufe und R1336mzz(Z) in der oberen Stufe die höchsten COP Werte. Für den Ersatz von Fluorkohlenwasserstoffen wie R245fa in HTWP bis 130 °C Senktemperatur ist R1224yd(Z) ein optimaler Ersatz, da es identische COP Werte und eine ähnliche VHC aufweist. Im 2SE Kreislauf eignet es sich, abgesehen von R1336mzz(Z) oder R1233zd(E) aufgrund der höheren VHC für den Einsatz bis zu Senktemperaturen von 150 °C. Im 2CP Kreislauf ist vor allem die Kältemittelkombination von R1336mzz(Z) und R1234ze(Z) aufgrund der deutlich höheren VHC von R1234ze(Z) im Vergleich zu R514A vielversprechend.

Keywords: Hochtemperaturwärmepumpe, HFO, HCFO; COP; VHC; low-GWP, R1336mzz(Z), R514A, R1234ze(Z), R1233zd(E), R1224yd(Z)

1 Einleitung

Hochtemperaturwärmepumpen (HTWP) finden vor allem in der industriellen Prozesswärmeerzeugung Anwendung. Heutzutage erfolgt die Prozesswärmeerzeugung in Europa größtenteils

fossil [1]. HTWP können Abwärme zwischen 30 °C bis 80 °C nutzen, die auf einem für industrielle Prozesse nicht mehr nutzbaren Temperaturniveau ist. Durch einen Umstieg von fossiler Prozesswärmeerzeugung auf HTWP, lassen sich bei einem auf erneuerbarer Energie basierten Strommix die Energie- und Ressourceneffizienz steigern und die CO₂-Emissionen reduzieren [2]. Das größte Potential von HTWP liegt in der Lebensmittel-, Tabak-, Papier- und Chemieindustrie zur Prozesswärmeerzeugung und Wärmerückgewinnung für Trocknungs-, Sterilisations- und Verdampfungsprozesse [1]. Temperaturen bis 80 °C können mit heutigen Wärmepumpen bereits erreicht werden, daher konzentriert sich die Forschung auf Temperaturen > 80 °C [3]. Temperaturen oberhalb von 160 °C sind für Wärmepumpen bislang unzugänglich, da die erforderliche Technik und die Kältemittel noch nicht vorhanden sind [4]. Nellissen und Wolf [3] untersuchten in einer europaweiten Studie das Potenzial von Wärmepumpen für den industriellen Einsatz. Für Senktemperaturen von 100 °C bis 150 °C ermittelten sie ein jährliches Potenzial von 120 PJ, was in der Größenordnung des österreichischen Heizenergieeinsatz von ca. 200 PJ [5] liegt.

In diesem Beitrag, basierend auf [6] werden HTWP mit Senktemperaturen zwischen 100 °C und 160 °C untersucht. Ein besonderes Augenmerk wird auf hohe Senkenspreizungen bis 90 °C gelegt. Als Senkenspreizung wird die Temperaturdifferenz zwischen Vorlauf und Rücklauf auf der Senkenseite definiert. Hohe Senkenspreizungen sind insbesondere für Aufwärmprozesse in der Industrie notwendig. Ziel ist die Auswahl geeigneter Kältemittel und Kreisläufe für HTWP. Auswahlkriterien sind der COP (Leistungszahl) als Kriterium für die energetische Performance und die VHC (volumetric heat capacity) als Kriterium für die Investitionskosten. Eine hohe VHC ermöglicht eine kompakte Dimensionierung der Komponenten, wodurch die Investitionskosten niedrig gehalten werden können. Des Weiteren werden technische Limits der Komponenten und ökologische Eigenschaften der Kältemittel bei der Auswahl berücksichtigt.

2 Kältemittel

Die Auswahl der Kältemittel erfolgte aufgrund ökologischer und sicherheitstechnischer Aspekte. Durch die F-Gase Verordnung müssen Kältemittel, die zukünftig in HTWP für den gewerblichen Einsatz vorgesehen werden ein GWP (Global Warming Potential) < 150 aufweisen [7]. Derzeit werden hauptsächlich Fluorkohlenwasserstoffen (HFKW) wie R245fa eingesetzt. HFKWs besitzen jedoch deutlich höhere GWP, im Fall von R245fa ein GWP von 858. Dadurch werden sie in naher Zukunft von der F-Gase Verordnung reglementiert. Dies bedingt die Notwendigkeit nach alternativen Kältemitteln mit niedrigem GWP und geeigneten charakteristischen Eigenschaften zu suchen [2].

Aus diesem Grund sind in den letzten Jahren vermehrt neue Kältemittel für HTWP entwickelt worden, dabei handelt es sich vor allem um Kältemittel der Fluidgruppen Hydrofluorolefine (HFO) und Hydrofluorchlorolefine (HCFO). Diese Kältemittel weisen ein sehr geringes Treibhauspotenzial (GWP < 10) und hervorragende thermophysikalische Eigenschaften für die Anwendung in HTWP auf [2]. Für HTWP wurden bisher R1224yd(Z), R1233zd(E), R1336mzz(Z) und R1234ze(Z) untersucht [4,8–10]. Als weiteres Kältemittel wurde R514A identifiziert, das aufgrund der besonders hohen kritischen Temperatur von 178,4 °C für HTWP geeignet erscheint. R514A wurde bisher nur von Juhasz et al. [11] und Kunjak et al. [12] für Chiller untersucht. Neben den aufgezählten HFO und HCFO Kältemitteln wird in dieser Studie auch R245fa

als Referenz betrachtet. Die Tabelle 1 zeigt die wichtigsten Eigenschaften der in dieser Studie betrachteten Kältemittel.

Tabelle 1: Wichtigste Eigenschaften der betrachteten Kältemittel für die Anwendung in HTWP

Kältemittel	Typ	T _{krit} [°C]	p _{krit} [bar]	ODP (R11=1)	GWP (CO ₂ =1)	SK ¹	SP ² [°C]
R245fa	HFKW	154,0	36,5	0	858	B1	14,9
R1336mzz(Z)	HFO	171,3	29,0	0	2	A1	33,4
R1234ze(Z)	HFO	150,1	35,3	0	< 1	A2L	9,8
R514A	HFO	178,4	34,0	0	2	B1	29,3
R1233zd(E)	HCFO	165,6	35,7	0,00034	1	A1	18,0
R1224yd(Z)	HCFO	155,5	33,4	0,00012	< 1	A1	14,0

¹SK = Sicherheitsklasse gemäß DIN EN 378-1:2018-04; ²SP = Siedepunkt bei Normdruck 1,013 bar, HFKW = Fluorokohlenwasserstoffe, HFO = Hydrofluorolefine, HCFO = Hydrofluorchlorolefine, ODP = Ozone Depletion Potential (Ozon Abbaupotenzial), GWP = Global Warming Potential (Treibauspotenzial).

Die GWPs der betrachteten Kältemittel liegen deutlich unter dem von R245fa, dadurch können sie in Bezug auf die F-Gase Verordnung als zukunftssicher angesehen werden. Die ODPs der HFO Kältemittel entsprechen den gesetzlichen Vorgaben des Montreal-Protokolls und sind null. Die HCFO besitzen durch das Chlor-Atom einen geringen ODP, wodurch sie nicht zugelassen sind. Jedoch gibt es nationale Bestimmungen, die die Verwendung von Kältemittel mit einem OPD < 0,0005 erlauben [13]. Aufgrund der Toxizität ist R514A, wie auch R245fa, in die Sicherheitsklasse B1 eingeteilt, wodurch erhöhte Anforderungen an den Aufstellungsraum einzuhalten sind. R514A, R1336mzz(Z) und R1233zd(E) besitzen hohe kritische Temperaturen und sind daher bei Senktemperaturen bis 160 °C geeignet. Eine unterkritische Anwendung von R1234ze(Z) und R1224yd(Z) bis zu dieser Senktemperatur ist aufgrund ihrer kritischen Temperaturen < 160 °C nicht möglich. Abbildung 1 zeigt die log(p)-h und T-s Diagramme der betrachteten Kältemittel.

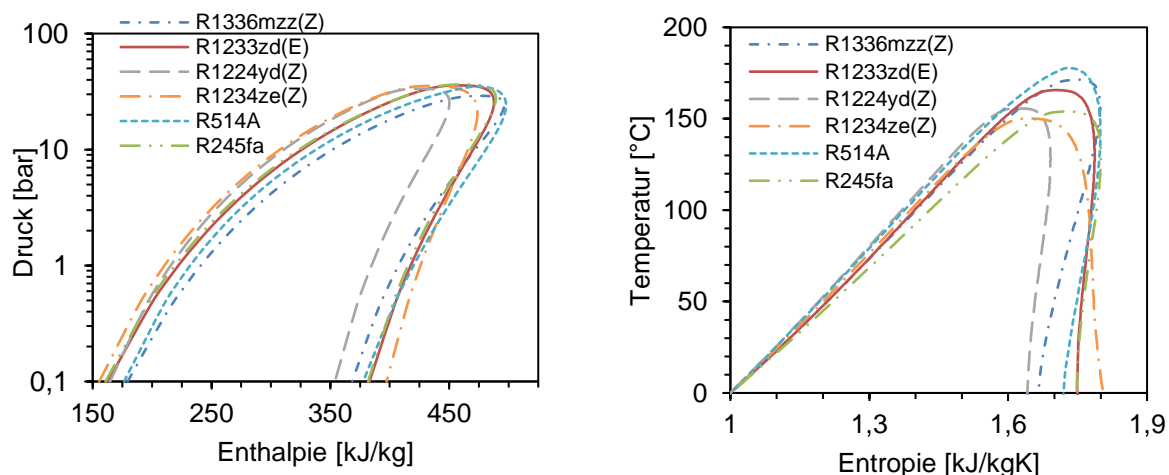


Abbildung 1: log(p)-h (links) und T-s (rechts) Diagramme der betrachteten Kältemittel.

Eine weitere Eigenschaft der HFO und HCFO, die im T-s Diagramm zu erkennen ist, ist die oftmals positive Steigung der Sattdampflinie ($dT/ds \geq 0$). Dadurch ist eine ausreichende Überhitzung des Sauggases erforderlich, um eine trockene Verdichtung zu gewährleisten [4,9].

3 Kreisläufe

Bereits am Markt verfügbar ist der Wärmepumpenkreislauf mit einem internen Wärmeübertrager (IHX). Dieser Kreislauf ist aufgrund der geringen Komponentenanzahl und der dadurch geringen Investitionskosten im Vergleich zu aufwendigeren Kreisläufen am vielversprechendsten. Ab einem Temperaturhub von 60 K zwischen Quelle und Senke ist der IHX Kreislauf aufgrund des erforderlichen Druckhubs technisch limitiert [4].

Für höhere Temperaturhübe und höhere -spreizungen sind aufwendigere Kreisläufe erforderlich. Kondou et al. [13,14] und Fukuda et al. [16] betrachten verschiedene mehrstufige Extrak-tionskreisläufe, welche für einen Temperaturhub von 80 K (W80/W160) und eine Senkensprei-zung von 90 K untersucht werden. Interessant ist vor allem der sogenannte „two-stage extrac-tion“-Kreislauf (2SE) nach Fukuda et al. [16], bei der zwei Verdichter in Reihe geschaltet sind und nach der ersten Verdichterstufe ein Teil der Kältemittelmassenstroms ausgekoppelt wird. Die Senke teilt sich auf zwei Kondensatoren auf, was insbesondere für hohe Senkenspreizung und hohe Druckhübe ein Vorteil sein sollte. Eine andere Möglichkeit, den Druckhub zu vertei-len, sind parallel angeordnete Kreisläufe. Helminger et al. [10] untersucht zwei parallel ange-ordnete IHX Kreisläufe (2CP). Wie beim 2SE Kreislauf wird die Senke über zwei Kondensato-ren erwärmt. Kondou et al. [13,14] betrachten eine Kreislaufkonfiguration bei der drei Wärmepumpen parallel angeordnet sind und die Senke über drei Kondensatoren erwärmt wird. Abbildung 2 zeigt die ausgewählten HTWP Kreisläufe.

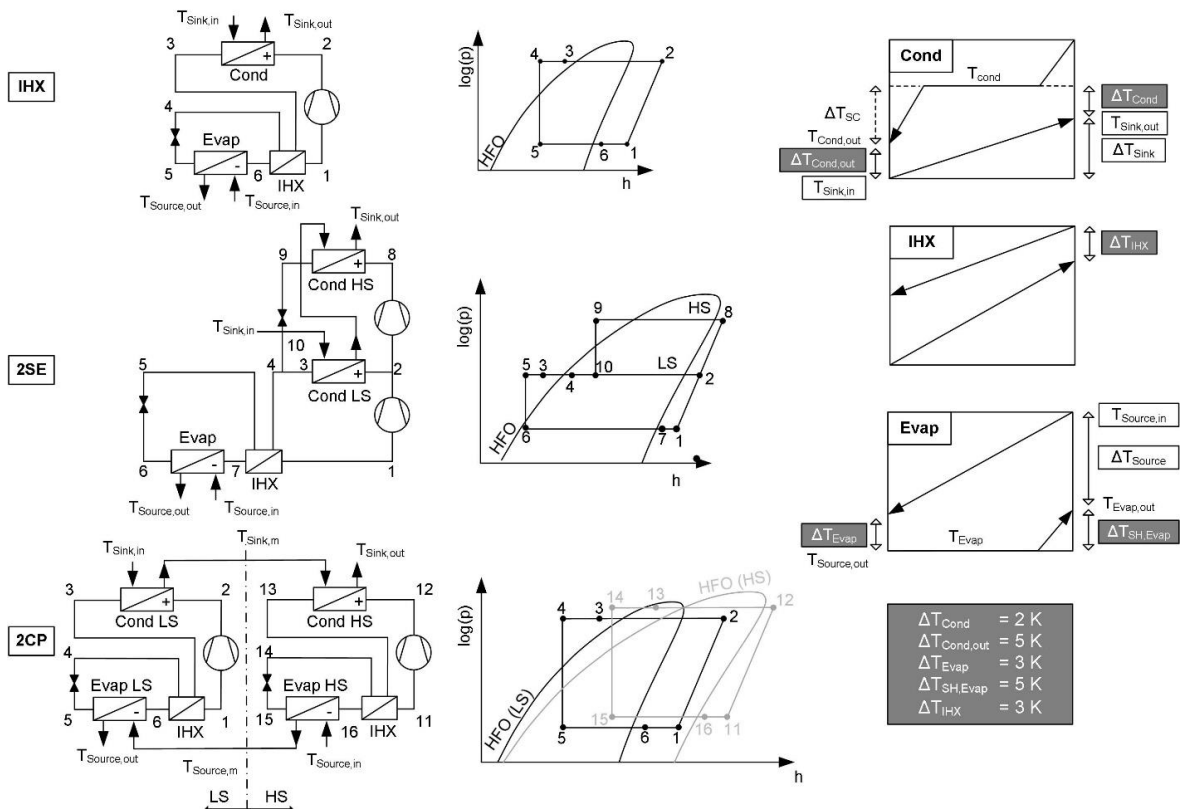


Abbildung 2: Untersuchte Kreislaufkonfigurationen (IHX, 2SE, 2CP) mit den log(p)-h Diagrammen und den an-genommenen Temperaturdifferenzen in den Wärmeübertragern.

4 Simulationsmodell

Die drei Kältekreisläufe (IHX, 2SE, 2CP) wurden im Softwareprogramm Engineering Equation Solver [17] modelliert und simuliert. Die Kreisläufe werden in stationären Betriebszuständen, unter Berücksichtigung der folgenden Annahmen, simuliert [4,16]:

- Keine Wärmeverluste in den Rohrleitungen und Komponenten
- Keine Druckverluste in den Wärmeübertragern und Rohrleitungen
- Isenthalpe Entspannung des Kältemittels im Expansionsventil
- Kompressoren weisen eine konstante isentrope Effizienz von 0,7 auf

Für die Wärmeübertrager wurden feste Temperaturdifferenzen implementiert, die in Abbildung 2 dargestellt sind. Bei der Untersuchung werden außerdem folgende technische Limits berücksichtigt:

- Die Heißgastemperaturen ($T_{\text{Heißgas}}$) sollten nicht zu hoch sein, damit das Kältemittelschmieröl nicht degradiert und eine ausreichende Schmierung des Verdichters gewährleistet wird. Als Grenze wird eine Heißgastemperatur zwischen 180 °C (vgl. Arpagaus et al. [4]) und 200 °C (vgl. Suemitsu [18]) definiert, bei der noch keine negativen Auswirkungen auftreten.
- Die VHCs haben ein unteres technisch realisierbares Limit von 500 bis 1000 kJ/m³ [19].
- Zum Einsatz in HTWP eignen sich vor allem Hubkolben- und Schraubenverdichter, diese arbeiten mit Verdichtungsverhältnissen zwischen 6,2 bis 10,6 bzw. 1,9 bis 4,17 [20]. Schraubenverdichter besitzen im Vergleich zu Hubkolbenverdichtern einen besseren isentropen Wirkungsgrad.
- Der Verdampfungsdruck soll über dem atmosphärischen Druck der Luft liegen. Dadurch wird ein Eindringen von Luft bzw. Fremdgasen in den Kältekreis verhindert [2].
- Bis zu einer Sauggastemperatur von 110 °C können klassische Verdichter eingesetzt werden. Bei höheren Temperaturen sind spezielle Verdichter erforderlich, die das Sauggas kühlen [8].
- Es werden nur unterkritische Kreisläufe betrachtet.

Der Betriebspunkt W60/W130 mit einem ΔT der Quelle von 10 K (Quellenspreizung) und einem ΔT der Senke von 60 K (Senkenspreizung) wird als Referenzpunkt festgelegt. Zudem wurde eine Parameterstudie durchgeführt, bei der die Austrittstemperatur der Senke zwischen 100 °C und 160 °C variiert wurde. Die Senkeneintrittstemperatur wurde dabei konstant auf 70 °C gehalten.

5 Simulationsergebnisse und Diskussion

5.1 IHX Kreislauf

In Tabelle 2 sind die Simulationsergebnisse der betrachteten HFO und HCFO Kältemittel im IHX-Kreislauf bei Referenzbedingungen relativ zu R245fa dargestellt. Die COP-Werte liegen im Bereich von 3,73 bis 3,95 und unterscheiden sich im einstelligen Prozentbereich. Die Differenzen zwischen den VHC sind deutlich höher. R1336mzz(Z) weist den höchsten COP und die geringste Heißgastemperatur auf, zeigt jedoch gleichzeitig die kleinste VHC und das größte

Verdichtungsverhältnis (p_{ratio}). Die Heißgastemperatur von R1234ze(Z) liegt bereits im Referenzpunkt bei 179 °C, wodurch es für höhere Senktemperaturen nicht geeignet ist.

Tabelle 2: Vergleich von COP, VHC, Verdichtungsverhältnis und Heißgastemperatur der betrachteten Kältemittel im IHX Kreislauf (relativ zu R245fa) im Referenzpunkt W60/W130.

Parameter	R1336mzz(Z)	R514A	R1224yd(Z)	R1233zd(E)	R1234ze(Z)
COP [-]	3,95 (+2%)	3,92 (+1%)	3,88 (0%)	3,85 (-1%)	3,73 (-4%)
VHC [kJ/m ³]	1'911 (-44%)	2'181 (-37%)	3'204 (-7%)	2'908 (-15%)	3'779 (+10%)
p_{ratio} [-]	8,66 (+12%)	8,14 (+5%)	7,22 (-7%)	7,39 (-5%)	7,11 (-8%)
$T_{Heißgas}$ [°C]	139 (-9%)	153 (0%)	152 (0%)	158 (+4%)	179 (+18%)

In Abbildung 3, rechts oben sind die COPs über den VHCs im Referenzpunkt aufgetragen. Dabei ist zu erkennen, dass es drei Kältemittel-Gruppen gibt. R1336mzz(Z) und R514A besitzen die höchsten COPs und die niedrigsten VHCs. R1233zd(E), R1224yd(Z) und R245fa in einer Gruppe mit vergleichbaren COPs und VHCs. R1234ze(Z) hat den niedrigsten COP, jedoch auch die höchste VHC.

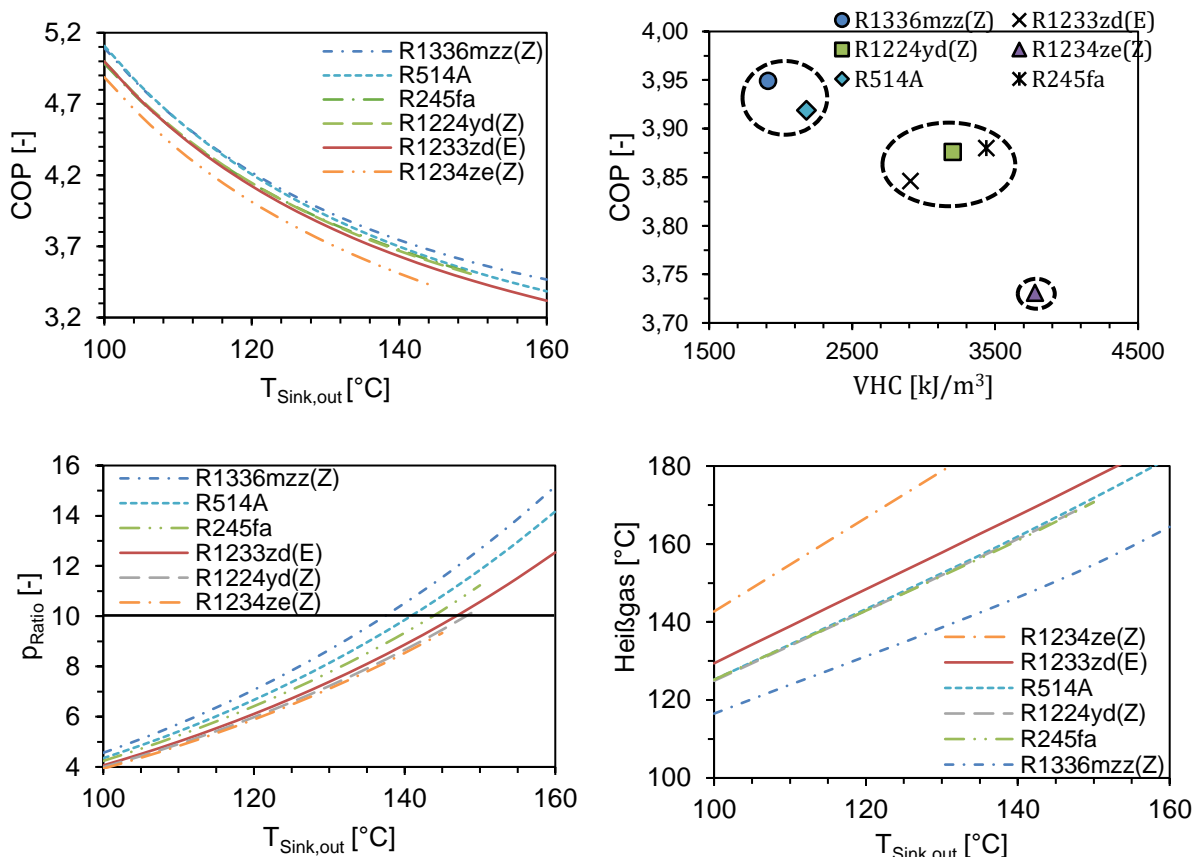


Abbildung 3: COP vs. VHC im Referenzpunkt und COP, Verdichtungsverhältnis und Heißgastemperatur der betrachteten Kältemittel im IHX Kreislauf bei Variation der Senkenaustrittstemperatur. Bei einer Senkeneintrittstemperatur von 70 °C, einer Quelleneintrittstemperatur von 60 °C und einem ΔT der Quelle von 10 ° K.

Wie beim Referenzpunkt bereits zu erkennen war, liegen die COP-Werte der Kältemittel nahe beieinander (siehe Abb 3 oben links). R1336mzz(Z) weist ab einer Senkenaustrittstemperatur von 110 °C die höchsten COP-Werte im Vergleich zu den anderen Kältemitteln auf, nur bei 100 °C ist der COP von R514A der höchste. R1234ze(Z) hat die niedrigsten COP-Werte und

kann nur bis zu einer Senkenaustrittstemperatur von 145 °C unterkritisch eingesetzt werden. Die COP-Werte von R1224yd(Z) und R245fa sind über den kompletten Senkentemperaturbereich nahezu identisch, beide können bis zu 150 °C unterkritisch verwendet werden. R1233zd(E) besitzt bis 130 °C vergleichbare COP Werte wie R1224yd(Z) und R245fa.

Die Verdichtungsverhältnisse (siehe Abb 3 unten links) von R1336mzz(Z) sind die höchsten, die von R1234ze(Z) die niedrigsten. Durch die Limitierung der Verdichter sind im IHX Kreislauf Senkenaustrittstemperaturen bis ca. 140 °C möglich. Die Heißgastemperaturen (siehe Abb 3 unten rechts) von R1234ze(Z) sind mit Abstand die höchsten und ab einer Senkenaustrittstemperatur von 130 °C über den technischen Limits. Die Heißgastemperaturen aller anderen Kältemittel weisen Heißgastemperaturen innerhalb der technischen Limits auf, jedenfalls bis zu einer Senkenaustrittstemperatur von ca. 140 °C.

5.2 2SE Kreislauf

Wie im vorherigen Kapitel gezeigt, kann der IHX Kreislauf bei den angenommenen Bedingungen bis zu einer Senkentemperatur von 140 °C verwendet werden. In Abbildung 4 sind die Ergebnisse im 2SE Kreislauf dargestellt. Im rechten oberen Diagramm sind die COP-Werte über den Senkenaustrittstemperaturen dargestellt.

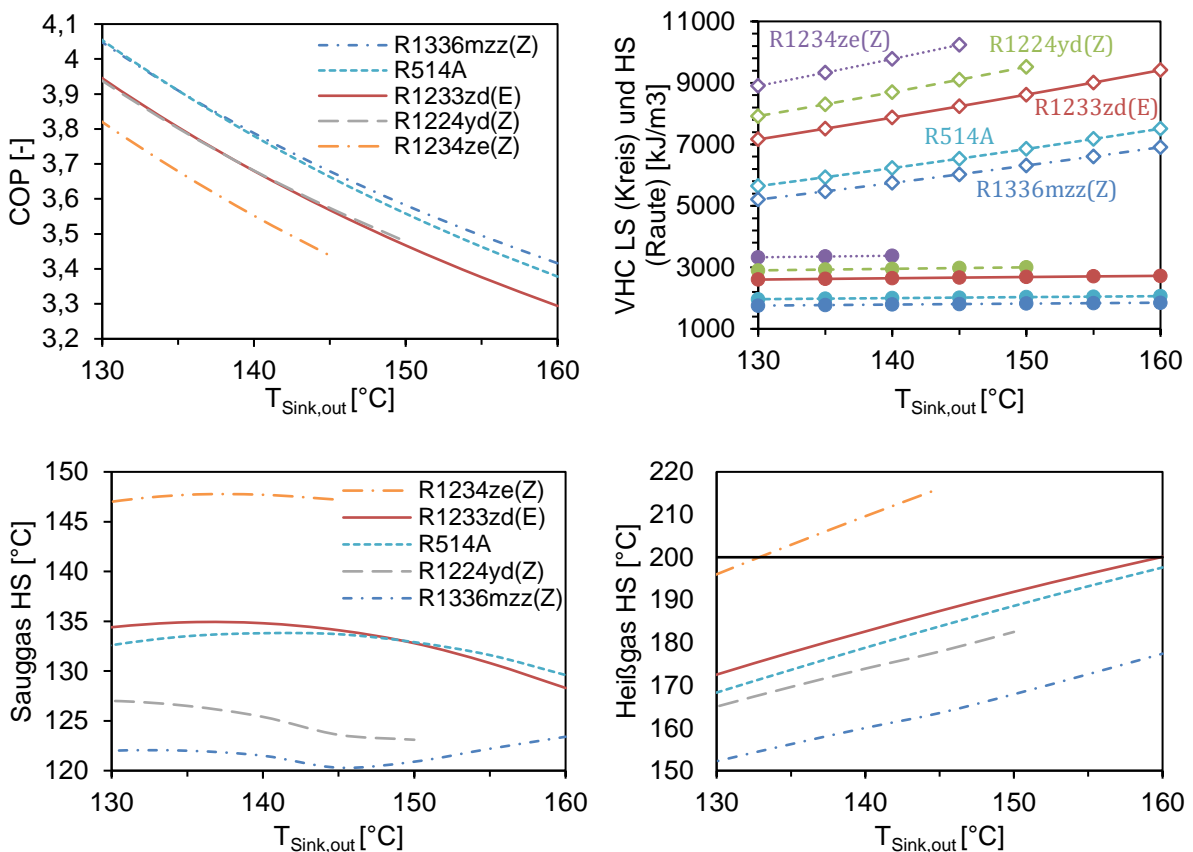


Abbildung 4: COP, VHC, Verdichtungsverhältnis in der LS und HS, Sauggas- und Heißgastemperatur der HS im 2SE-Kreislauf über der Senkenaustrittstemperatur, bei einer Senkeneintrittstemperatur von 70 °C, einer Quellentemperatur von 60 °C und einem ΔT der Quelle von 10 °K.

R514A erreicht bis zu einer Senkenaustrittstemperatur von 135 °C identische COP Werte wie R1336mzz(Z). Mit steigender Senkenaustrittstemperatur wird wie im IHX Kreislauf der COP von R1336mzz(Z) besser als der von R514A. R1233zd(E) und R1224yd(Z) weisen nahezu dieselben COP-Werte auf, allerdings sind mit R1233zd(E) Senkentemperaturen bis 160 °C möglich. R1234ze(Z) hat die niedrigsten COP Werte, jedoch sind wie im nebenstehenden Diagramm dargestellt, die VHC Werte am höchsten. In der oberen Stufe (HS) liegen die VHCs der Kältemittel deutlich über denen der unteren Stufe (LS), daher kann die HS kompakter dimensioniert werden. Die Verdichtungsverhältnisse in der LS sowie der HS sind im Vergleich zum IHX Kreislauf deutlich geringer. In der HS sind spezielle Verdichter notwendig, da die Sauggastemperaturen allesamt über 110 °C liegen. Betrachtet man die Heißgastemperaturen fällt auch hier, wie im IHX Kreislauf, auf, dass R1234ze(Z) Heißgastemperaturen über dem technischen Limit (schwarze Linie) aufweist.

5.3 2CP Kreislauf

Im 2CP Kreislauf wurden verschiedene Kältemittelkombinationen für HS und LS untersucht. Dabei ergab sich aus den Erkenntnissen des IHX Kreislaufs die Einschränkung, dass nur die Kältemittel R1336mzz(Z), R514A und R1233zd(E) in der HS zur Anwendung kommen können, da diese eine Senkenaustrittstemperatur von 160 °C unterkritisch erreichen können. Um aus den diversen Kältemittelkombinationen diejenigen ausfindig zu machen, die sich am besten eignen, wurden zuerst die Heißgastemperaturen und Verdichtungsverhältnisse in der HS untersucht. Dabei sind nur die drei Kältemittel relevant, die für die HS in Frage kommen. Abbildung 5 oben zeigt die Heißgastemperatur und das Verdichtungsverhältnis in der HS. Sowohl R1233zd(E) als auch R514A liegen bereits ab einer Senkenaustrittstemperatur von ca. 145 °C über der maximalen Heißgastemperatur von 200 °C. Aus diesem Grund wird ausschließlich R1336mzz(Z) in der HS betrachtet.

Abbildung 5 unten zeigt die COP und VHC für den 2CP Kreislauf mit R1336mzz(Z) in der HS. Die höchsten COP-Werte der möglichen Kältemittelkombinationen weisen HS:R1336mzz(Z)/LS:R1336mzz(Z) und HS:R1336mzz(Z)/LS:R514A auf. Die niedrigsten COP-Werte besitzt die Kombination aus HS:R1336mzz(Z)/LS:R1234ze(Z). Der Unterschied zwischen den höchsten und niedrigsten COP-Werten ist mit ca. 1,8 % gering. Betrachtet man jedoch die VHC in der LS, ist zu erkennen, dass R1234ze(Z) eine um ca. 96 % (R1336mzz(Z)) bzw. 83 % (R514A) höhere VHCs besitzt.

Eine zusätzliche Simulation bei höheren Quellentemperaturen zeigte, dass für R1336mzz(Z) in der LS eine erhöhte Überhitzung aufgrund des überhängenden Nassdampfgebiets erforderlich ist. Dadurch stellt sich bei höheren Quellentemperaturen ein schlechterer COP im Vergleich zu den anderen Kältemittelkombinationen ein. Daher sind für die LS die Kältemittel R514A aufgrund des höchsten COPs und R1234ze(Z) aufgrund der höchsten VHC zu empfehlen.

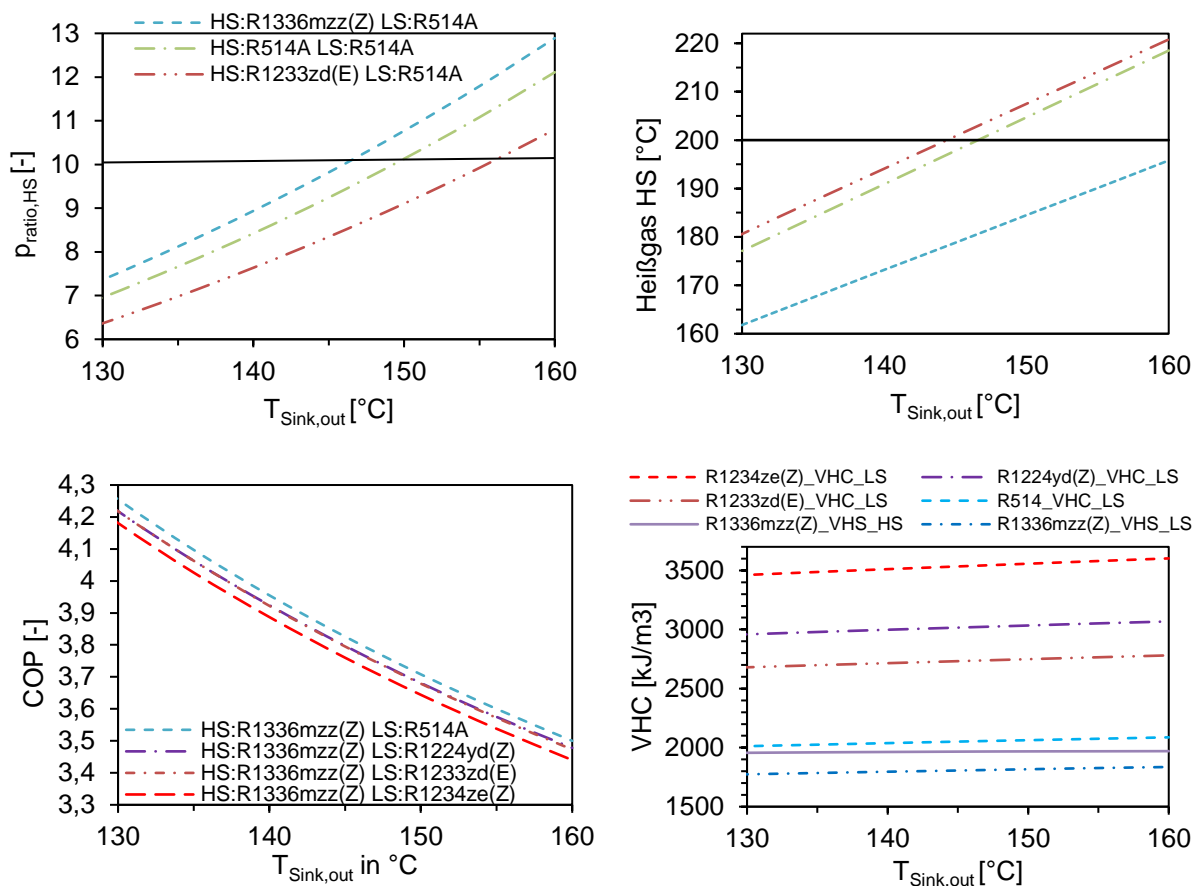


Abbildung 5: Verdichtungsverhältnis in der HS, Heißgastemperatur der HS, COP und VHC im 2CP Kreislauf bei unterschiedlichen Senkenaustrittstemperaturen und bei einer Senkeneintrittstemperatur von 70°C , einer Quellentemperatur von 60°C und einem ΔT der Quelle von 10 K .

6 Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war es drei HTWP Kreisläufe mit HFO und HCFO Kältemitteln zu analysieren, da HTWP in der industriellen Anwendung ein großes Potenzial aufweisen. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf hohe Senkenspreizungen bis 90°C und hohe Temperaturhübe bis 100°C gelegt. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass R1336mzz(Z) im Senktemperaturbereich von 130°C bis 160°C im IHX und 2SE Kreislauf die höchsten COP-Werte aller betrachteten Kältemittel besitzt. Im 2CP-Kreislauf sind die COPs der Kältemittelkombination HS:R1336mzz(Z)/LS:R514A am höchsten. Jedoch muss ein Kompromiss aus COP und VHC gefunden werden, da R1336mzz(Z) die geringste VHC aufweist. Im IHX-Kreislauf bis 130°C kann R1224yd(Z) aufgrund der vergleichbaren COPs und VHCs als Ersatz für R245fa betrachtet werden. R1233zd(E) besitzt ein weites Einsatzgebiet, da es vergleichbare COPs ausweist, Senktemperaturen von 160°C erreichen kann, und eine höhere VHC als R1336mzz(Z) und R514A besitzt. Für hohe Temperaturhübe und -spreizungen eignet sich der 2SE-Kreislauf, da er das Verdichtungsverhältnis auf zwei Verdichterstufen verteilt. Der 2CP-Kreislauf besitzt ein breites Einsatzgebiet mit den höchsten COPs, ist jedoch aufgrund der höheren Verdichtungsverhältnisse in der HS-Stufe bei hohen Senktemperaturen limitiert. In weiteren Untersuchungen gilt es die Ergebnisse (u.a. COP und VHC) in eine Kostenfunktion zu transformieren, um die Kältemittel und Kreisläufe hinsichtlich ihrer Investitions- und Betriebskosten beurteilen zu

können. Zudem kann der Verdichter besser modelliert werden, um ein detaillierteres Ergebnis zu erhalten.

Nomenklatur

Formelzeichen

<i>COP</i>	Coefficient of Performance (–)	<i>HS</i>	High Stage (Obere Stufe) (–)
<i>m</i>	Massenstrom (kg/s)	<i>LS</i>	Low Stage (Untere Stufe) (–)
<i>h</i>	Enthalpie (kJ/kg)	<i>IHX</i>	Internal Heat Exchanger
Δh	Enthalpiedifferenz (kJ/kg)	<i>2SE</i>	Two-Stage Extraction
<i>T</i>	Temperatur (K)	<i>2KP</i>	Zweikreisig Parallel
ΔT	Temperaturdifferenz (K)	Indizes	
<i>GWP</i>	Global Warming Potential (–)	<i>Verd</i>	Verdichter
<i>ODP</i>	Ozone Depletion Potential (–)	<i>Cond</i>	Kondensator
<i>p</i>	Druck (bar)	<i>Heißgas</i>	Heißgas
<i>VHC</i>	Volumetric Heating Capacity (kJ/m ³)	<i>ratio</i>	Verhältnis
<i>s</i>	Enthalpie (kJ/kgK)	<i>Sink, out</i>	Senkenaustrittstemperatur (°C)

Literaturverzeichnis

- [1] C. Arpagaus, Literaturstudie zum Stand der Technik, der Forschung, des Anwendungspotenzials und der Kältemittel, NTB - Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs, Buchs, 2017.
- [2] C. Arpagaus, Hochtemperatur-Wärmepumpen: Marktübersicht, Stand der Technik und Anwendungspotenziale, VDE Verlag GmbH, Berlin Offenbach, 2019.
- [3] I.M.P. Nellissen, M.S. Wolf, Heat pumps in non-domestic applications in Europe: Potential for an energy revolution, (2015).
- [4] C. Arpagaus, M. Prinzing, R. Kuster, M. Uhlmann, J. Schiffmann, High temperature heat pumps – Theoretical study on low GWP HFO and HCFO refrigerants, in: IIR Int. Congr. Refrig., Montreal, 2019: p. 8. <https://doi.org/10.18462/iir.icr.2019.259>.
- [5] Statistik Austria, Energieeinsatz der Haushalte, (2019). https://www.statistik.at/web_de/statistiken/energie_und_umwelt_innovation_mobilitaet/energie_und_umwelt/energie/energieeinsatz_der_haushalte/index.html (accessed September 20, 2019).
- [6] K. Diewald, Thermodynamische Analyse von Hochtemperaturwärmepumpen unter Verwendung von HFO und HCFO Kältemitteln, FH Vorarlberg, Dornbirn, 2019.
- [7] Verordnung (EU) Nr. 517/2014 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. April 2014 über fluorierte Treibhausgase und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 842/2006, 2014.
- [8] C. Arpagaus, R. Kuster, M. Prinzing, M. Uhlmann, E. Büchel, S. Frei, S.S. Bertsch, High temperature heat pump using HFO and HCFO refrigerants – system design and experimental results, in: IIR Int. Congr. Refrig., Montreal, 2019: p. 8. <https://doi.org/10.18462/iir.icr.2019.242>.
- [9] C. Mateu-Royo, J. Navarro-Esbrí, A. Mota-Babiloni, M. Amat-Albuixech, F. Molés, Thermodynamic analysis of low GWP alternatives to HFC-245fa in high-temperature heat pumps: HCFO-1224yd(Z), HCFO-1233zd(E) and HFO-1336mzz(Z), Appl. Therm. Eng. 152 (2019) 762–777. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.02.047>.
- [10] F. Helminger, D.M. Lauer mann, A. Baumhake l, D.G. Drexler, Konfigurations- und Leistungsvergleich von Hochtemperaturwärmepumpen zur Biogas-Aufbereitung, in: DKV-Tag. Aachen, DKV, Aachen, 2018: p. 12.

- [11] J. JUHASZ, K. KONTOMARIS K., A non-flammable low GWP refrigerant for centrifugal chillers and high temperature heat pumps: R1336mzz(Z)., IIR Int. Conf. Appl. HFO Refrig. (2018) 7. <https://doi.org/10.18462/iir.hfo.2018.1135>.
- [12] S. KUJAK, K. SCHULTZ, E. SORENSON, Experiences with next generation low GWP refrigerants in centrifugal chillers., IIR Int. Conf. Appl. HFO Refrig. (2018) 8. <https://doi.org/10.18462/iir.hfo.2018.1110>.
- [13] SR 814.81 Verordnung vom 18. Mai 2005 zur Reduktion von Risiken beim Umgang mit bestimmten besonders gefährlichen Stoffen, Zubereitungen und Gegenständen (Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung, ChemRRV), 2019. <https://www.admin.ch/opc/de/classified-compilation/20021520/index.html#app31ahref4> (accessed July 15, 2019).
- [14] C. Kondou, S. Koyama, Thermodynamic Assessment of High-Temperature Heat Pumps for Heat Recovery, in: Int. Refrig. Air Cond. Conf., International Refrigeration and Air Conditioning Conference, Purdue, 2014: p. 10.
- [15] C. Kondou, S. Koyama, Thermodynamic assessment of high-temperature heat pumps using Low-GWP HFO refrigerants for heat recovery, Int. J. Refrig. 53 (2015) 126–141. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2014.09.018>.
- [16] S. Fukuda, C. Kondou, N. Takata, S. Koyama, Thermodynamic Analysis on High Temperature Heat Pump cycles using Low-GWP refrigerants for Heat recovery, in: IEA Heat Pump Conf., IEA, Rotterdam, 2017: p. 7.
- [17] Engineering Equation Solver, F-Chart Software, Madison, WI 53744, 2019. <http://fchartsoftware.com/ees/index.php/> (accessed July 12, 2019).
- [18] R. Suemitsu, Performance of centrifugal chiller and development of heat pump using a low-GWP refrigerant, HTP Magazine. (2018) 4.
- [19] F. Reißner, Development of a Novel High Temperature Heat Pump System, Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität, 2015.
- [20] O. Dumont, Investigation of a heat pump reversible in an organic Rankine cycle and its application in the building sector, Dissertation, UNIVERSITY OF LIÈGE, 2017.