

# THERMODYNAMISCHE ANALYSE VON HOCHTEMPERATUR- WÄRMEPUMPEN MIT HFO UND HCFO KÄLTEMITTELN

Kevin DIEWALD<sup>\*1</sup>, Cordin ARPAGAU<sup>S2</sup>, Babette HEBENSTREIT<sup>3</sup>

## Inhalt

Hochtemperatur-Wärmepumpen (HTWP) werden vor allem mit industriellen Anwendungen zur Prozesswärmeerzeugung in Verbindung gebracht. Dort können sie Abwärme nutzen, die auf einem für industrielle Prozesse nicht mehr nutzbaren Temperaturniveau ist, um Prozesswärme zu erzeugen. Die heutige Prozesswärmebereitstellung in industriellen Prozessen erfolgt größtenteils fossil, wobei sich durch einen Umstieg auf HTWP die Energie- und Ressourceneffizienz steigern und die CO<sub>2</sub>-Emissionen reduzieren ließe [1]. Nellissen und Wolf [2] untersuchten in einer europaweiten Studie das Potenzial von Wärmepumpen für den industriellen Einsatz. Dabei kamen sie zu dem Ergebnis, dass Wärmepumpen bis zu einer Senktemperatur von 150 °C ein jährliches Potenzial von 626 PJ aufweisen [2]. Durch die F-Gase Verordnung müssen Kältemittel, die zukünftig in HTWP für den gewerblichen Einsatz vorgesehen werden einen GWP < 150 aufweisen [3]. Diese gesetzliche Anforderung schränkt die Auswahl deutlich ein, da heutzutage hauptsächlich teilfluorierte Kohlenwasserstoffe (HFKW) wie R245fa (GWP = 858) eingesetzt werden. Aus diesem Grund sind in den letzten Jahren vermehrt neue Kältemittel für HTWP entwickelt worden, dabei handelt es sich vor allem um Hydrofluorolefine (HFO) und Hydrochlorfluorolefine (HCFO). Diese Kältemittel weisen ein sehr geringes Treibhauspotenzial (GWP < 10) und hervorragende thermophysikalische Eigenschaften für die Anwendung in HTWP auf [4]. Das Ziel dieser Studie ist die theoretische Analyse der Effizienz geeigneter HFO- und HCFO-Kältemittel und die Betrachtung geeigneter Kältekreisläufe für HTWP-Anwendungen.

## Methodik

Für die Anwendung in HTWP werden die HFO Kältemittel R1336mzz(Z), R1234ze(Z) und R514A, sowie die HCFO Kältemittel R1233zd(E) und R1224yd(Z) untersucht. Diese Kältemittel weisen kritische Temperaturen über 150 °C und kritische Drücke bis 35 bar auf, dies ermöglicht eine unterkritische Anwendung bis zu Senktemperaturen von mindestens 150 °C bei technisch sinnvollen Drücken. Die GWPs der Kältemittel liegen ≤ 2. Die Kältemittel sind in der Sicherheitskassen A1 bzw. A2L eingeteilt, wodurch sie teilweise geringeren Restriktionen unterliegen als R245fa (B1). Eine weitere Eigenschaft der HFO und HCFO ist die oftmals positive Steigung der Sattdampflinie ( $dT/dS \geq 0$ ). Dadurch ist eine erhöhte Überhitzung des Sauggases erforderlich, um eine trockene Verdichtung zu gewährleisten [4]. Der Einsatz eines internen Wärmeübertragers (IHX) im Kältekreislauf zur Sauggasüberhitzung ist eine praktische Lösung.

Abbildung 1 zeigt die drei betrachteten Kältekreislaufkonfigurationen. Die Kältekreislaufkonfiguration mit einem IHX ist für Senktemperaturen bis 130 °C vielversprechend, da diese aufgrund der Komponentenanzahl am günstigsten und ein Temperaturhub (zwischen Quelle und Senke) von 40 K möglich ist [4]. Für höhere Temperaturhübe und auch Temperaturspreizungen sind aufwendigere Kreislaufkonfigurationen erforderlich. Der nach Helminger et al. [5] betrachtete „zweikreisig parallele“-Kreislauf verwendet zwei parallel angeordnete IHX-Kreisläufe (2KP). Der „two-stage extraction“-Kreislauf (2SE) nach Fukuda et al. [6] besitzt zwei in Reihe geschaltete Verdichter um das Verdichtungsverhältnis aufzuteilen. Diese beiden Kreislaufkonfigurationen versprechen höhere Senktemperaturen und sind aufgrund ihrer Komponentenanzahl und Komplexität vertretbar.

---

<sup>1</sup> FH Vorarlberg, Hochschulstraße 1, 6850 Dornbirn, +43 677 61725192, kevin.diewald@outlook.de, www.fhv.at

<sup>2</sup> NTB Buchs, Werdenbergstrasse 4, 9471 Buchs (Schweiz), +41 81 755 34 94, cordin.arpagaus@ntb.ch, www.ntb.ch

<sup>3</sup> FH Vorarlberg, Hochschulstraße 1, 6850 Dornbirn, +43 5572 792 5702, babette.hebenstreit@fhv.at, www.fhv.at

Die Kältekreis konfigurierungen wurden im Software-Programm Engineering Equation Solver (EES, Version 10.268) entwickelt und simuliert. Im 2KP Kreislauf wurden alle Kältemittelkombinationen untersucht und die effizientesten Kombinationen ausgewählt.

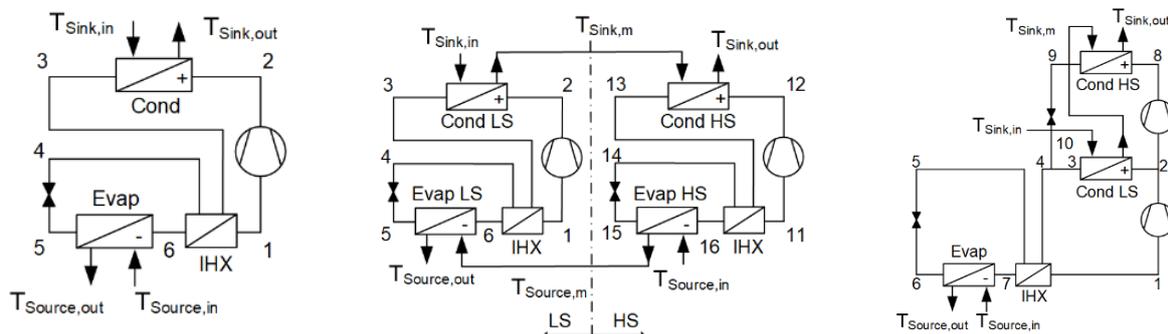


Abbildung 1: Betrachtete Kältekreis konfigurierungen. Links: IHX-Kreislauf, Mitte: Kreislauf mit zwei parallel angeordneten IHX-Kreisläufen (2KP), Rechts: „two-stage extraction“-Kreislauf (2SE), LS: low-stage, HS: high-stage.

## Ergebnisse

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass R1336mzz(Z) im Senkentemperaturbereich von 130 °C bis 160 °C im IHX und 2SE Kreislauf die höchsten Leistungszahl aller betrachteten Kältemittel besitzt. Im 2KP Kreislauf sind die COPs der Kältemittelkombination HS:R1336mzz(Z)/LS:R514A (HS: high-stage, LS: low-stage) am höchsten. Jedoch muss ein Kompromiss aus COP und VHC (volumetrische Heizleistung) gefunden werden, da R1336mzz(Z) die geringste VHC der betrachteten Kältemittel aufweist. Im IHX Kreislauf bis 130 °C kann R1224yd(Z) aufgrund der identischen COP und vergleichbaren VHC als Ersatz für R245fa betrachtet werden. R1233zd(E) besitzt ein weites Einsatzgebiet, da es vergleichbare COPs hat, Senkentemperaturen von 160 °C erreichen kann, und eine höhere VHC als R1336mzz(Z) und R514A besitzt. R514A eignet sich hingegen auch für Senkentemperaturen > 160 °C. Für hohe Temperaturhübe und -spreizungen eignet sich der 2SE Kreislauf, da er das Verdichtungsverhältnis gleichermaßen auf zwei Verdichter verteilt. Der 2KP Kreislauf besitzt ein breites Einsatzgebiet mit den höchsten COP Werten, ist jedoch aufgrund der höheren Verdichtungsverhältnisse bei hohen Senkentemperaturen 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.

## Danksagung

Diese Arbeit entstand im Zuge der Masterarbeit von Kevin Diewald unter Kooperation des NTB Buchs in Person von Cordin Arpagaus und der FH Vorarlberg in Person von Babette Hebenstreit. Aus diesem Grund gilt der Dank den beiden BetreuerInnen und den weiteren Personen, die diese Arbeit ermöglicht haben.

## Referenzen

- [1] C. Arpagaus, Hochtemperatur-Wärmepumpen: Marktübersicht, Stand der Technik und Anwendungspotenziale, VDE Verlag GmbH, Berlin Offenbach, 2019.
- [2] I.M.P. Nellissen, M.S. Wolf, Heat pumps in non-domestic applications in Europe: Potential for an energy revolution, (2015).
- [3] 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.
- [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] F. Helminger, D.M. Lauermaun, A. Baumhake, D.G. Drexler, Konfigurations- und Leistungsvergleich von Hochtemperaturwärmepumpen zur Biogas-Aufbereitung, in: DKV-Tag. Aachen, DKV, Aachen, 2018: p. 12.
- [6] 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.