Reversible R-744-Wärmepumpe für Grossgebäude

Manuel Decasper[1*], Jonas Schönenberger[1], Marcel Bärtsch[1]

[1] Frigo Consulting AG, Feldstrasse 30, CH-3073 Gümligen, Schweiz
m.decasper@frigoconsulting.ch

* Korrespondenzautor

Kurzfassung

CO_2-Kälteanlagen gelten in Schweizer Supermärkten als Stand der Technik. Die Abwärme dieser Anlagen wird in der Regel zur Erwärmung des Brauchwarmwassers und für die Gebäudeheizung verwendet. Um Grossgebäude zuverlässig und fossilfrei mit Wärme zu versorgen, können separate Wärmepumpen eingesetzt werden, welche in einer reversiblen Ausführung auch gerade die Klimatisierung des Gebäudes sicherstellen. Im vorgestellten Projekt wurden die bestehenden Öl-Heizungen und die Klimatisierung eines Einkaufszentrums durch zwei reversible Luft/Wasser CO_2-Wärmepumpen mit einer Nenn-Heizleistung von insgesamt 1.1 MW und einer Klimaleistung von 1.3 MW ersetzt. Diese Anlage wurde im Jahr 2019 entwickelt, gefertigt, vor Ort installiert und im Herbst 2019 in Betrieb genommen. Fortan wurde der Betrieb während rund zwei Jahren begleitet und Betriebsoptimierungen und regelungstechnische Anpassungen durchgeführt. Basierend auf den Messdaten von Herbst 2020 bis Herbst 2021 erfolgte eine detaillierte Auswertung vom Betrieb, mit besonderem Fokus auf die Energieeffizienz.
Im untersuchten Zeitraum konnte eine Jahresarbeitszahl im Heizbetrieb für das Heizungs-Temperatur-Regime +30°C/+50°C von 3.33 nachgewiesen werden. Im Klimabetrieb liegt die Jahresarbeitszahl bei 5.32 für das Kaltwasser-Temperatur-Regime von +12°C/+7°C.
Nebst den energetischen Aspekten konnte im Rahmen dieses Pilot- und Demonstrationsprojektes aufgezeigt werden, dass es möglich ist, ein Einkaufszentrum mit der geforderten Wärme und Kälte mittels reversiblen Luft/Wasser CO_2-Wärmepumpen zu versorgen. Nebst den Basisanforderungen, dem Sicherstellen des Wärme- und Kältebedarfs, konnten wertvolle Erfahrungen in Punkto Steuerung und Regelstrategie, Teillastverhalten der Wärmepumpen sowie dem Zusammenspiel von Ejektoren und Drosselventil gesammelt werden. Diese Erfahrungen flossen bereits in ein Folgeprojekt ein. Erste Auswertungen deuten darauf hin, dass Anpassungen in der Systemauslegung und im Betrieb eine Steigerung vom COP im Heizbetrieb von rund +8 % bewirken.

Stichwörter:
Reversible CO_2-Wärmepumpe, Heizen und Kühlen, R744-Wärmepumpe, Effizienzsteigerung, Natürliche Kältemittel

1 Hintergrund

Im Rahmen dieses Projektes werden zwei reversiblen Luft/Wasser CO2-Wärmepumpen entwickelt, gefertigt, vor Ort installiert, in Betrieb genommen und im Anschluss detailliert untersucht. Es sollen wertvolle Erfahrungen im Betrieb der Wärmepumpen und deren verschiedenen Betriebsarten, sowie deren Steuerung- und Regelstrategie und deren Effizienz gesammelt werden. Es soll überprüft werden, ob die prognostizierten Coefficient of Performance und Jahresarbeitszahlen in dieser Feldanlage erreicht werden. Weiter soll aufgezeigt werden, dass es möglich ist, einen Gebäudepark und dessen Wärme- und Kältebedarf, mittels dem natürlichen Kältemittel CO2 effizient abzudecken, ohne den Einsatz von synthetischen, umweltschädlichen Kältemittel. Insgesamt sollen Berührungsängste mit CO2 als Kältemittel im Komfortbereich abgebaut, deren Anwendung in der Praxis gefördert und gegebenenfalls weitere Anwendungen für die CO2-Technologie aufgezeigt werden.

2 Anlagenbeschrieb

Nebst den zwei reversiblen Luft/Wasser CO2-Wärmpumpen zur Beheizung und Klimatisierung der Gebäude, wurde eine CO2-Booster-Kälteanlage mit Ejektoren für die Plus- und Minuskühlstellen installiert, deren Abwärme ebenfalls für die Gebäudeheizung genutzt wird. Um eine möglichst hohe Effizienz zu erzielen, wurde für die reversiblen Wärmepumpen ebenfalls ein Konzept mittels Ejektoren gewählt. Die Abbildung 1 zeigt das gewählte Prinzip der reversiblen Wärmepumpe, links den Heizbetrieb, rechts den Klimabetrieb. Daraus ist die Vorverdichtung der Ejektoren ersichtlich. Im Heizbetrieb (Abbildung 1, links) wird das CO2 von 23 bara auf 27 bara vorverdichtet. Dies entspricht einer Verdampfungstemperatur am Verdichter von -10°C, womit diese über der Luft-Austrittstemperatur von -12°C liegt. Im Klimabetrieb (Abbildung 1, rechts) wird das CO2 von 40 bara auf 45 bara vorverdichtet. Dies entspricht einer Verdampfungstemperatur am Verdichter von +10°C, womit diese über der Kaltwasser-Austrittstemperatur von +7°C liegt. Im sogenannten Dualbetrieb kann gleichzeitig Wärme und Kälte aufbereitet werden.

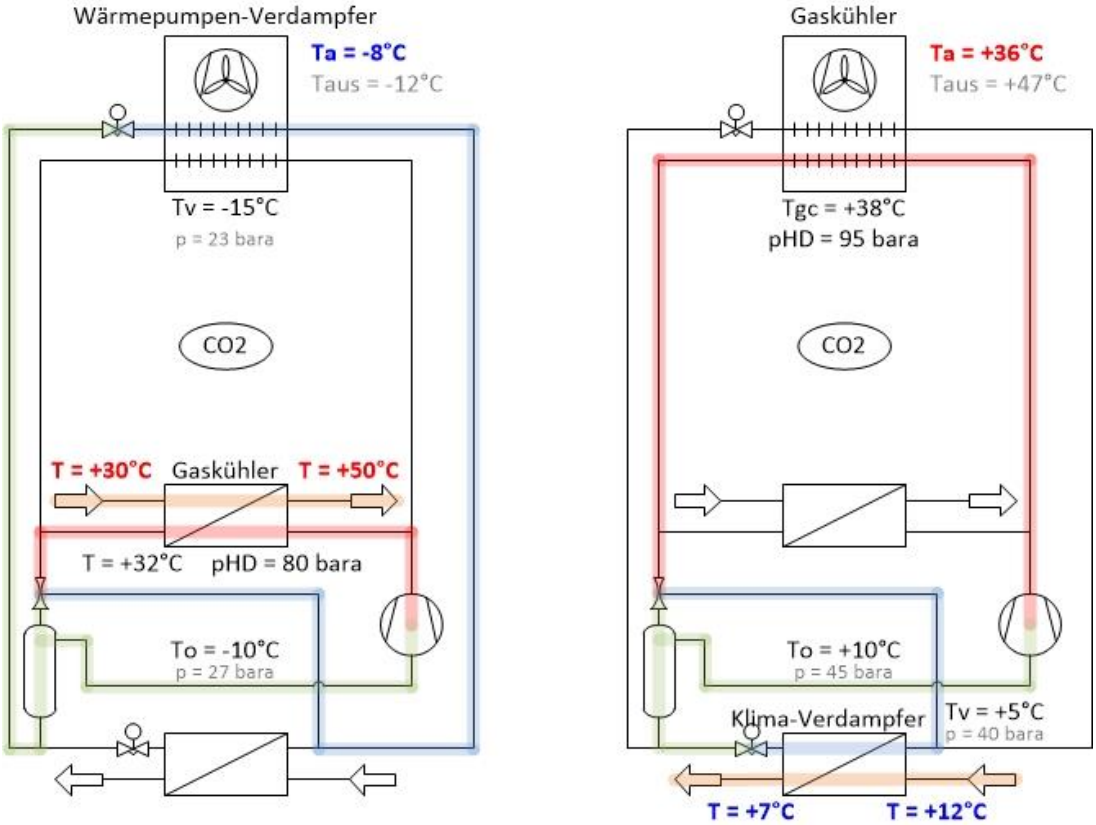

Abbildung 1: Prinzipschema der reversiblen Luft/Wasser CO2-Wärmepumpen, links wird der Heizbetrieb und rechts der Klimabetrieb dargestellt.

Die Tabelle 1 zeigt die wichtigsten Kennzahlen der reversiblen Luft/Wasser CO2-Wärmepumpen gegenübergestellt.

	Heizbetrieb	Kühlbetrieb
Nennleistung pro Anlage (Heizen/Kühlen)	550 kW_{th}	630 kW_{th}
Aussentemperatur	-8°C	+36°C
Warm-/Kaltwasser	+30°C/+50°C	+12°C/+7°C
Gaskühler Austrittstemperatur	+32°C	+38°C
Hochdruck	80 bara	95 bara
Verdampfungsdruck Verdampfer	-15°C	+5°C
Verdampfungsdruck Verdichter	-10°C	+10°C
Verdampfer (Heizen, Kühlen)	3 x 125 kW_{th} (Luft)	2 x 315 kW_{th} (Wasser)
Gaskühler (Heizen, Kühlen)	2 x 275 kW_{th} (Wasser)	3 x 285 kW_{th} (Luft)
Verdichter	6 Stück, 1 Frequenzumformer (30 bis 60 Hz)	
Ejektoren	5 Stück, variabel, parallel eingebunden	
Leitungslängen (zwischen)	Verbund – Gaskühler, einfach: 75 m Verbund - Wärme-/Kältespeicher einfach: 150 m	
Wärme-/Kältespeicher	Je 10 m3 Wasser	

Tabelle 1: Kennzahlen der reversiblen Luft/Wasser CO2-Wärmepumpen.

Die reversiblen Wärmepumpen bewirtschaften einen Wärme- und Kältespeicher. Dazu werden die Verdichter ein- und ausgeschaltet. Der Hochdruck wird mittels den Ejektoren nach dem optimalen Hochdrucksollwert, basierend auf der Gaskühler Austrittstemperatur, geregelt. Die Einspritzventile regeln die Überhitzung der Verdampfer. Der Verdampfungsdruck (Verdampfer), der Mitteldruck (Verdampfungsdruck Verdichter) und der daraus resultierende Druckhub der Ejektoren stellt sich von selbst ein, sprich wird nicht geregelt. Die Vorlauf-Temperaturen zum Heizen und Klimatisieren werden wasserseitig mittels Regelventilen auf den Sollwert geregelt. Die Abbildung *2* zeigt den Projektumfang der installierten Anlagen vor Ort.

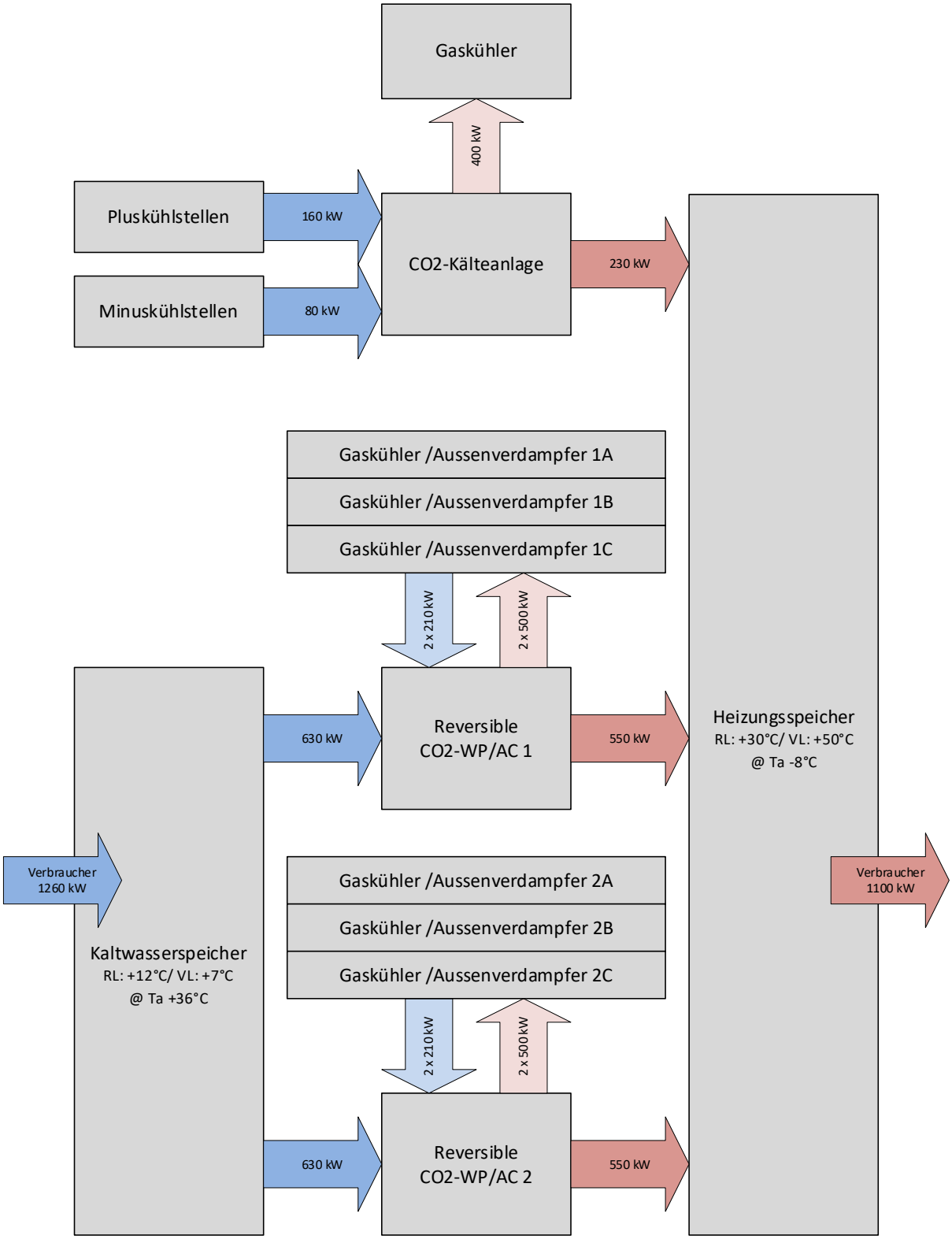

Abbildung 2: Übersicht der vor Ort installierten CO2-Booster-Kälteanlage und reversiblen CO2 Wärmepumpen.

3 Betriebsauswertung

Die folgende Messdatenauswertung basiert, wenn nicht explizit anders erwähnt, auf Messdaten aus dem Zeitraum Oktober 2020 bis und mit September 2021. Seit dem Oktober 2020 wurden keine grundlegenden Anpassungen am System vollzogen und weitere Optimierung beruht grösstenteils lediglich auf Optimieren von Regelparameter. Gemäss Meteo Schweiz waren der Winter 2020/21 sowie der Sommer 2021 gemäss den Klimabulletin [1], [2] geprägt von überdurchschnittlichen Niederschlagsmengen. Deren mittlere Temperatur lag über dem langjährigen Mittel. Extreme, andauernde Kälte blieb im Winter 2020/2021 wie auch extreme andauernde Hitze im Sommer 2021 aus. Aufgrund der hohen Niederschlagsmengen war jedoch die Feuchtigkeit in der Umgebung teilweise deutlich höher.

3.1. Aufbereitete Heiz- und Klimaenergie

Das Diagramm 1 zeigt die wöchentlich aufbereitete Nettoenergie beider Wärmepumpen. Werte der Betriebsarten Dual (gleichzeitiges Klimatisieren und Heizen) und deFrost (Abtauvorgang), sowie die Abwärme der gewerblichen Kühlung sind nicht in dieser Grafik enthalten. Die Daten sind nicht chronologisch, sondern sortiert nach Aussentemperatur dargestellt. Positive Werte bedeuten, dass wöchentlich mehr Wärme als Kälte aufbereitet wurde und umgekehrt negative Werte bedeuten, dass wöchentlich mehr Kälte als Wärme aufbereitet wurde.
Die lineare Abhängigkeit zwischen Heiz- und Kühlenergie und der Aussentemperatur scheint plausibel und deckt sich mit Erfahrungswerten aus der gängigen Praxis. Die Strich-Punkt-Line repräsentiert ungefähr die Basis des Konzeptvergleiches. Es ist ersichtlich, dass man in der Konzeptphase von deutlich höherem Energieverbrauch ausging. Dies gilt sowohl für die Heiz- wie auch Klimaenergie. Der Wendepunkt zwischen Heizen und Kühlen liegt beim effektiven Betrieb wie auch dem Modell aus der Konzeptphase bei rund +13°C.

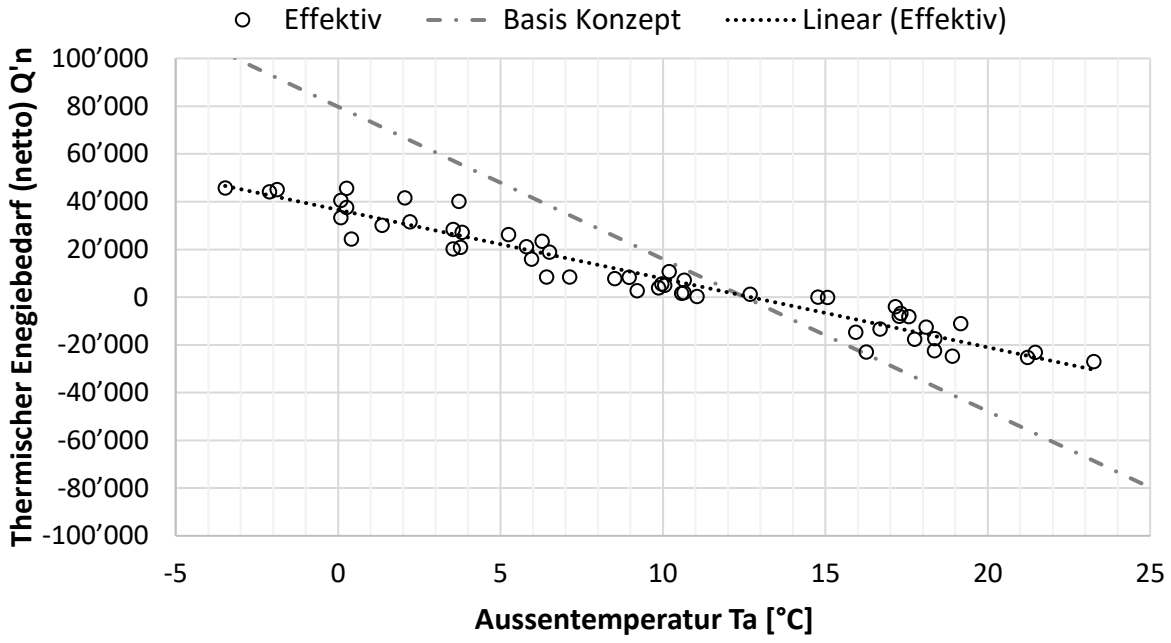

Diagramm 1: Wöchentlich aufbereitete thermische Energie (netto) sortiert nach Aussentemperatur

3.2. Teillastbetrieb

Aus den im Kapitel 3.1 dargestellten Zusammenhänge geht hervor, dass die Wärmepumpen 1 und 2 im untersuchten Zeitraum weniger Heiz- und Klimaenergie aufbereiten als in der Konzeptphase seinerzeit angenommen wurde. Die Gründe für diese Tatsache können vielfältig sein und es ist davon auszugehen, dass es eine Summe aus verschiedenen Faktoren ist, wie bspw.:

- Anderes thermisches Verhalten des Gebäudes aufgrund von energetischen Sanierungen
- Unterschiedliche Belegung und Verwendung der Fremdmietflächen
- Anderes Benutzer- resp. Betriebsverhalten, z.B. aufgrund von COVID
- Vorhergesehene Reserveleistungen des Systems

Es ist davon auszugehen, dass mit abnehmender Teillast, auch die Effizienz der reversiblen Luft/Wasser CO2-Wärmepumpen insgesamt abnimmt, obschon im Teillastbetrieb die Druckverluste in den Leitungen und Wärmetauscher abnehmen.

Zum einen nimmt im Teillastbetrieb das Takten der Wärmepumpen deutlich zu, denn bei Aussentemperaturen über dem Auslegungspunkt nimmt die geforderte Leistung tendenziell ab und die die minimale Teillast tendenziell zu. Das Diagramm 2 verdeutlicht diesen Effekt bei einer Wärmepumpe mit insgesamt 6 Verdichter wovon einer drehzahlgeregelt ist. Bei einer Aussentemperatur von -8°C entspricht die Heizleistung 100%. Die minimale Teillast bei einer Aussentemperatur von +12°C entspricht 12%. Liegt der effektive Heizbedarf vom Gebäude im Auslegungspunkt bspw. gerade mal bei 50% so bleibt die minimale Heizleistung von 12% dennoch bestehen. Was dann aber wiederum auf den Auslegungspunkt einem minimalen Teillast von 25% entspricht.
Aufgrund der zur Verfügung stehenden Abwärme von der Gewerbekühlung, wird die Tendenz der Teillast aus Sicht der Wärmepumpen zusätzlich verstärkt. Die Abwärme der Gewerbekühlung wird in erster Priorität genutzt, bevor die Wärmepumpen zum Heizen dazu gezogen werden. Es ist davon auszugehen, dass Wärmepumpen von Objekten ohne zur Verfügung stehender Abwärme eine höhere mittlere Teillast aufweisen.

Bei Einschalten einer der beiden Wärmepumpen dauert es rund 15 bis 30 Minuten bis sich stabile Betriebsverhältnisse (Drücke, Temperaturen) einstellen und einen effizienten Betrieb ermöglichen. Aufgrund des langen Leitungsnetzes zwischen der Wärme-/Kälte-Erzeugung und deren Speicherung dauert die Totzeit je nach Last bis zu 15 Minuten. Bei einem Start aus dem Stillstand (kein anderes System bereits in gleicher Betriebsart in Betrieb) kann dies dazu führen, dass während dieser Zeit kaltes Wasser oben in den Heizungsspeicher oder warmes Wasser unten in den Klimaspeicher gefördert wird.

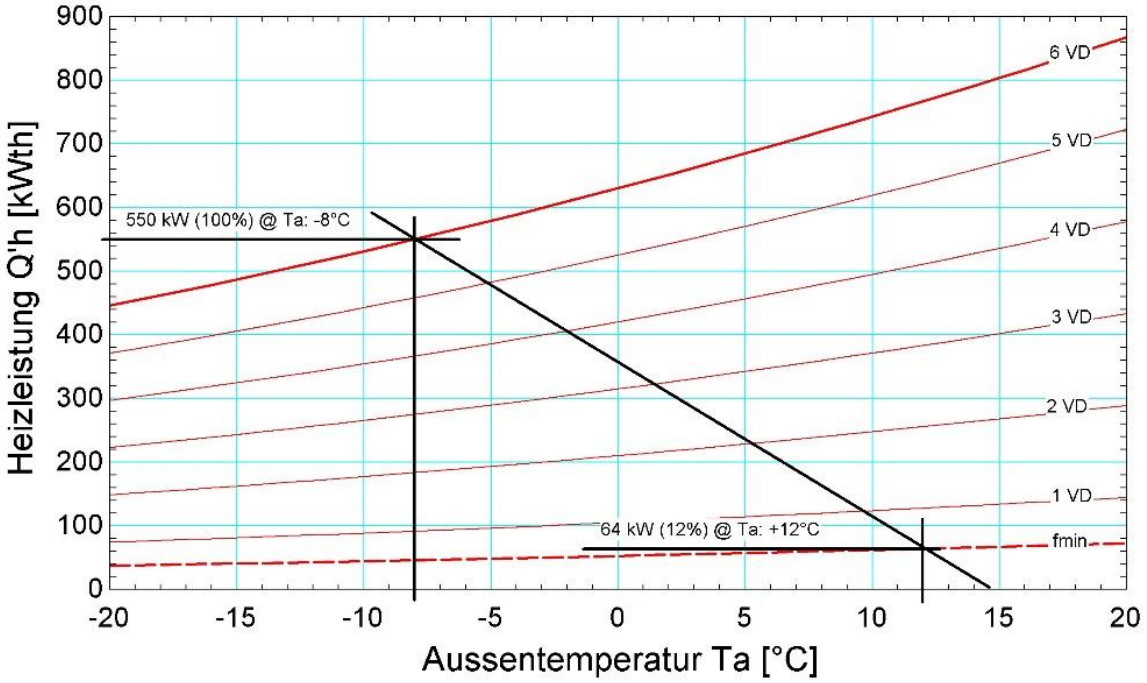

Diagramm 2: Heizleistungsbereich einer Wärmepumpe mit 6 Verdichter wovon einer drehzahlgeregelt ist.

3.3. COP Heizen

Das Diagramm 3 stellt den mittleren gemessenen Coefficient of Performance im Heizbetrieb, den prognostizierten Coefficient of Performance, sowie die gesamte aufbereitete Heizenergie beider Wärmepumpen 1 und 2 dar. Die roten Punkte (dicke Linie) entsprechen den gemessenen gemittelten Werten, die dünne rote Linie stellt den prognostizierten COP (Modell: Betrieb) dar. Gewichtet nach der erzeugten Heizenergie, liegt der gemessene COP über den gesamten Temperaturbereich -1.0% unter dem prognostizierten COP. Die Jahresarbeitszahl vom reinen Heizbetrieb JAZ h beläuft sich auf 3.33, ohne Berücksichtigung vom Dual-Betrieb (gleichzeitiges Heizen und Klimatisieren). Im unteren Temperatur-Bereich liegt der gemessene COP höher als der prognostizierte. Im oberen Temperatur-Bereich liegt der gemessene COP unter dem prognostizierten COP.

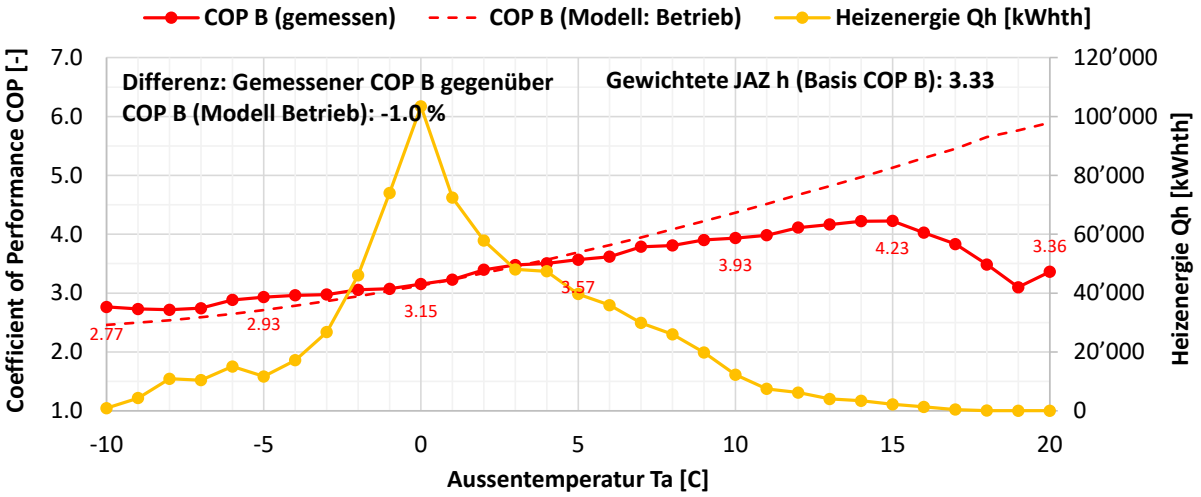

Diagramm 3: Mittlerer Coefficient of Performance (Heizbetrieb) und gesamte Heizenergie in Abhängigkeit der Aussentemperatur beider Wärmepumpen.

Der abflachende und allmählich abfallende COP im Heizbetrieb im oberen Temperatur-Bereich ist mit heutigem Kenntnisstand auf den Teillastbetrieb zurückzuführen. Dieser fällt im Heizbetrieb stark ins Gewicht, zumal sich mehrere Effekte kumulieren. Deren Herleitung ist im Kapitel 3.2 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**beschrieben. Über das Jahr betrachtet (Jahresarbeitszahl JAZ h) hält sich dieser Effekt jedoch in Grenzen, zumal der Energiebedarf in diesem Bereich auch stark abnimmt.
Im unteren Temperatur-Bereich ist der gemessene COP im Heizbetrieb höher als der prognostizierte. Dies ist mit heutigem Kenntnisstand auf die im Betrieb tieferen Rücklauftemperaturen der Gebäudeheizung zurückzuführen. Dieser Effekt kann relativ einfach modelliert werden und kann in zukünftigen Berechnungen berücksichtigt werden. Darüber hinaus bestätigt dies einmal mehr das erforderliche Umdenken für eine effiziente Anwendung von CO2-Wärmepumpen gegenüber herkömmlichen Wärmepumpen. Im Unterschied zu herkömmlichen Wärmepumpen bestimmt bei CO2-Wärmepumen nicht die Vorlauf-Temperatur, sondern die Rücklauf-Temperatur und deren Temperatur-Spreizung zwischen Vor- und Rücklauf-Temperatur die Effizienz massgeblich [3].

3.4. COP Klimatisierung

Das **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** stellt den mittleren gemessenen Coefficient of Performance im Klimabetreib, den prognostizierten Coefficient of Performance, sowie die gesamte aufbereitete Klimaenergie beider Wärmepumpen 1 und 2 dar. Die blauen Punkte (dicke Linie) entsprechen den gemessenen gemittelten Werten, die dünne blaue Linie stellt den prognostizierten COP (Modell: Betrieb) dar. Gewichtet nach der erzeugten Klimaenergie, liegt der gemessenen COP über den gesamten Temperaturbereich -3.1% unter dem prognostizierten COP. Die Jahresarbeitszahl JAZ c im reinen Kühlbetrieb beläuft sich auf 5.32 ohne Berücksichtigung vom Dual-Betrieb.

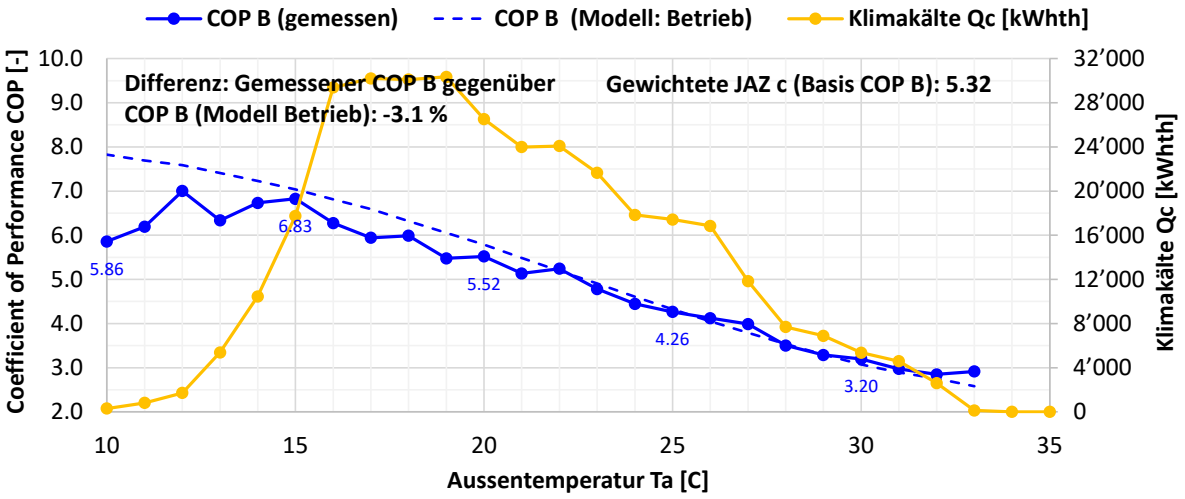

Diagramm 4: Mittlerer Coefficient of Performance (Chiller) und gesamte Heizenergie in Abhängigkeit der Aussentemperatur beider Wärmepumpen.

Der tiefere COP im Klimabetrieb bei tieferen Aussentemperaturen ist mit heutigem Kenntnisstand grösstenteils auf den Teillastbetrieb und vermehrtem Takten der Wärmepumpen zurückzuführen. Der Teillastbetrieb fällt im Klimabetrieb hin zu tieferen Aussen-Temperaturen wie im Heizbetrieb zu höheren Aussen-Temperaturen zunehmend ins Gewicht. Darüber hinaus nimmt mit abnehmender Aussen-Temperatur der Hochdruck resp. der Treibdruck der Ejektoren ab und entsprechend nimmt auch die Saugwirkung der Ejektoren ab, was wiederum eine stabile Prozessführung merklich erschwert. Über das Jahr betrachtet (Jahresarbeitszahl JAZ c) liegen die gemessenen COP-Werte 3.1% unter den prognostizierten Werten. Im Unterschied zum Heizbetrieb, fallen diese Punkte über das Jahr betrachtet stärker ins Gewicht, da die gemessenen Werte in einem relevanten Temperatur-Bereich tiefer sind als die Prognose.

3.5. Ejektoren

Das Diagramm 5 zeigt die Aussentemperatur (gelb), die mittlere Gaskühler-Austritts-Temperatur (rot), die Kaltwasser-Rücklauf-Temperatur (schwarz), die Kaltwasser-Vorlauf-Temperatur (blau) und die Verdampfungstemperatur (Saugdruck, grün) der Verdichter in Abhängigkeit der Aussentemperatur. Die Messdaten wurden am 18.06.2021 während 24 Stunden mit einem Abtastinkrement von 3 Sekunden mit dem Tool für Datenfernüberwachung aufgezeichnet.
Sicherlich vorneweg nennenswert ist die hervorragende Temperaturannäherung im Gaskühler im transkritischen Betrieb an die Aussentemperatur. Dies illustriert einen relevanten Unterschied zu herkömmlichen reversiblen Wärmepumpen. Weiter zeigt das Diagramm 5 auf, dass es dank der verbesserten Abstimmung zwischen Ejektoren und Regelventil ab Aussentemperaturen von ca. 20°C möglich ist, die Verdichter auf gleichem oder sogar einem höheren Verdampfungsdruck zu betrieben als die aufbereitete Kaltwasser-Temperatur. Interne Druckverluste im Verdampfer, Saugleitung und Sauggasüberhitzer sind bereits enthalten.

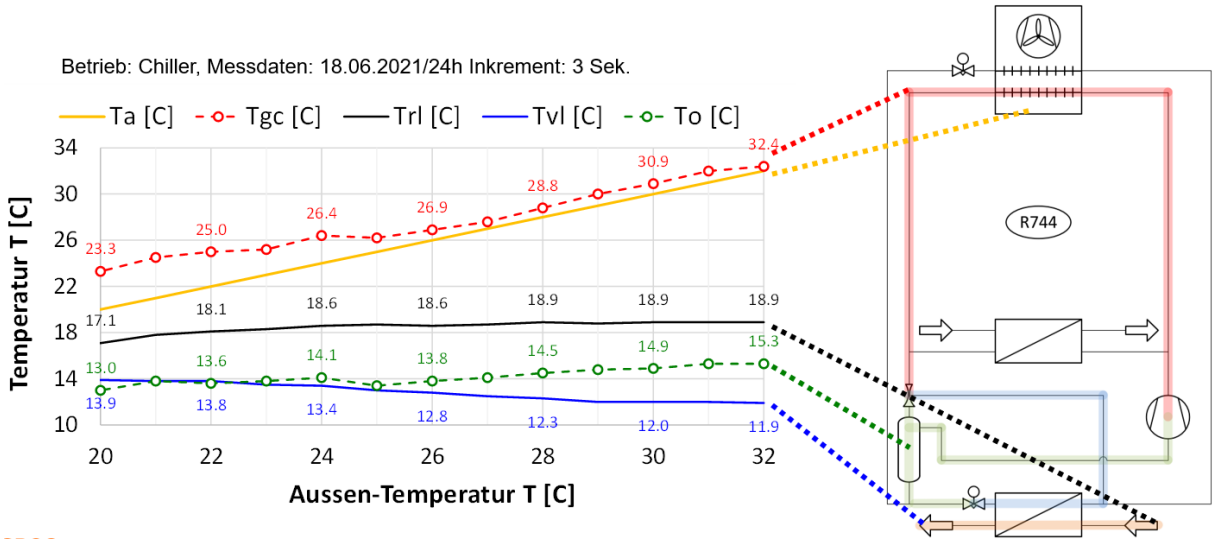

Diagramm 5: Ejektor-Saugwirkung einer reversiblen Luft/Wasser CO2-Wärmepumpe.

4 Schlussfolgerungen und Fazit

Insgesamt sind die gewonnenen Erkenntnisse sehr wertvoll und wurden grösstenteils bereits in einem Folgeprojekt umgesetzt und deren Wirkung geprüft. Der Coefficient of Performance im Heizbetrieb konnte von -1.0% auf +6.6% gegenüber dem Modell gesteigert werden. Die Jahresarbeitszahl im reinen Heizbetrieb vom Folgeprojekt liegt bei 3.68 gegenüber der Jahresarbeitszahl von 3.33 im Pilotprojekt. Dies jeweils ohne Berücksichtigung vom Dual-Betrieb.

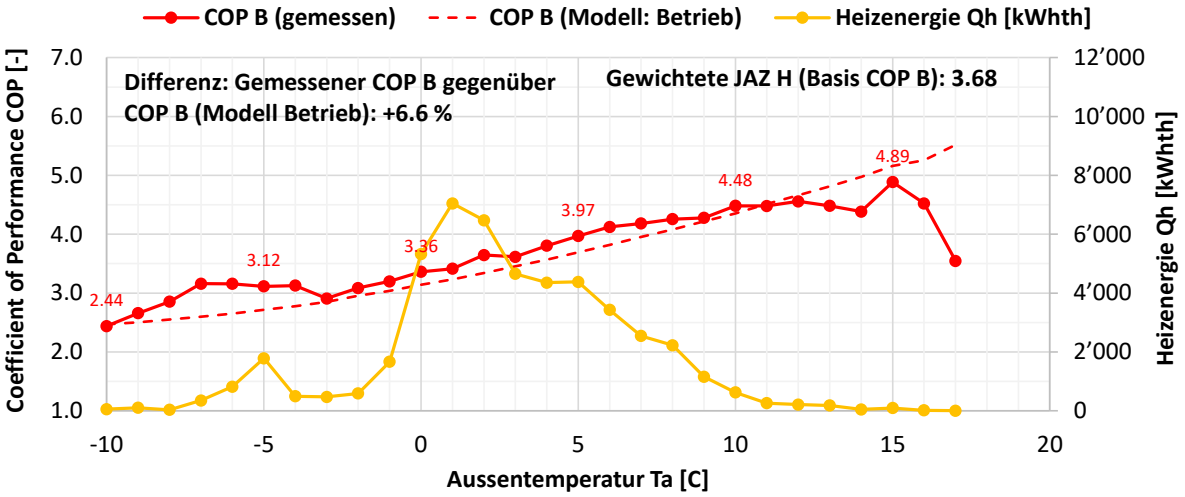

Diagramm 6: Mittlerer Coefficient of Performance (Heat pump) und gesamte Heizenergie in Abhängigkeit der Aussentemperatur der Wärmepumpe in einem Folgeprojekt.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die reversiblen Luft/Wasser CO2-Wärmepumpen seit Herbst 2019 erfolgreich in Betrieb sind. Es konnten wertvolle Erkenntnisse über deren Betriebsverhalten und die einzelnen Betriebsarten gewonnen werden. Obschon der gemessene Coefficient of Performance die Zielwerte bislang knapp nicht erreichte, wurde bereits ein Folgeprojekt, basierend auf derselben CO2-Technologie, mit Erfolg umgesetzt. Die gemessene Effizienz-Steigerung zwischen dem ersten Pilotprojekt und dem ersten Folgeprojekt

unterstreichen, dass aus dem ersten Projekt relevante Schlussfolgerungen gezogen wurden und diese erfolgreich ins Folgeprojekt eingeflossen sind. Insgesamt konnten Berührungsängste mit CO2 als Kältemittel im Komfortbereich abgebaut und deren Anwendung in der Praxis gefördert werden.

5 Ausblick

Der Ausblick zum erwähnten Folgeprojekt lässt erahnen, dass geringfügige Anpassungen in der Systemauslegung und im Betrieb eine Steigerung vom COP gegenüber dem Modell von rund +8 % bewirken. Es ist davon auszugehen, dass bei weiteren Folgeprojekten nochmals eine Effizienz-Steigerung erzielt werden kann. Nebst den energetischen Optimierungen konnte beim Folgeprojekt auf redundante Betriebsarten verzichtet werden. Dies bringt eine Reduktion der Komplexität, sowie der Investitions- und Betriebskosten. Weiteres Potential die Investitions- und Betriebskosten zu reduzieren, resultiert erfahrungsgemäss aus weiteren Folgeprojekten. Dank zunehmender Erfahrung mit der Technologie, können die Systeme weiter optimiert werden. Unter Berücksichtigung der ökologischen Bedenken mit synthetischen Kältemittel, wie auch der Tatsache, dass CO2 im Vergleich zu Ammoniak und Propan weder toxisch noch brennbar ist und zu guter Letzt, der erzielte Fortschritt in Punkto Effizienz im ersten Folgeprojekt, stimmt die Autorenschaft zuversichtlich, dass reversible Luft/Wasser CO2 Wärmepumpen in Zukunft eine relevante Rolle bei der Beheizung und Klimatisierung von modernisierten Grossgebäuden spielen werden.

Entscheidend für energieeffiziente, nachhaltige Lösungen der Zukunft ist sicherlich auch, dass es gelingt, sich vom Irrglauben zu lösen, dass der bevorzugte Einsatz einer Technologie oder eines Kältemittels anhand einzelner Kriterien beurteilt werden kann. Erfahrungsgemäss sind die Zusammenhänge komplex und eine Beurteilung bedarf einer objektspezifischen, individuellen Betrachtung über den Lebenszyklus, womöglich bereits in einer frühen Konzeptphase. Relevante Kriterien, nebst der Sicherheitsanforderung resultierend aus Toxizität und Brennbarkeit, weshalb die energetischen Vorteile zugunsten von CO2 fallen können, sind:

- Geforderte Heizungs-Vorlauftemperatur von +50°C
- Hohe Temperatur-Spreizung der Heizungs-Vor- und –Rücklauf-Temperatur von 20 K
- Geflutete Verdampfer und Vorverdichtung von Gas durch den Einsatz von Ejektoren
- Direkte Wärmeabgabe im Gaskühler ohne Wärmeträger und zusätzlichem Wärmeübergang

Der effiziente Einsatz von CO2 als Kältemittel erfordert in der Regel erhöhte Bemühungen an die Prozessführung, was meist mit höheren Investitionskosten einhergeht. Im untersten Leistungsbereich fallen die höheren Investitionskosten ökonomisch stärker ins Gewicht und es ist Stand heute schwierig, mit Alternativen mitzuhalten. Mit zunehmender Systemleistung nimmt in der Regel die Kältemittel Füllmenge und die damit einhergehenden Anforderungen an die Sicherheit, insbesondere der toxischen und brennbaren Kältemittel zu. Mit zunehmender Leistung kompensieren die Vorteile in Punkto Sicherheitsanforderungen die höheren Investitionskosten aufgrund der Prozessführung und es kann ab einer gewissen Leistung sogar ein ökonomischer Vorteil zugunsten von CO2 resultieren.

Obschon die Entwicklungen der Komponenten-Hersteller hin zu grösseren Leistungen mit CO2 in den letzten Jahren stark forciert wurde, limitieren die heute verfügbaren Komponenten für CO2 den oberen Leistungsbereich nach wie vor. Für Leistungen im Megawatt-Bereich kann je nach Komponente nur auf einen Hersteller zurückgegriffen werden oder es macht sogar Sinn, mehrere Komponenten parallel einzusetzen. Dies ist in der Regel mit finanziellen Nachteilen für CO2 verbunden. Wie bereits erwähnt, laufen die Entwicklungen auf Hochtouren und es ist davon auszugehen, dass in den nächsten 2 bis 3 Jahren, die durch die verfügbaren Komponenten für CO2 limitierte Leistung, verdoppelt werden kann.

6 Literaturverzeichnis

[1] Klimabulletin Winter 2020/2021, Meteo Schweiz

[2] Klimabulletin Sommer 2021, Meteo Schweiz

[3] Referat und Tagungsband: CO2 -Wärmepumpe für Warmwasser und Gebäudeheizung: Übersicht und Konzept, J. Schönenberger, Wärmepumpentagung 2019.