



Schlussbericht vom 08. Dezember 2021

Reversible Wärmepumpe für effiziente Beheizung und Klimatisierung von modernisierten Grossgebäuden



Quelle: ©Frigo-Consulting 2021



MIGROS

Genossenschaft Migros Luzern



Datum: 08. Dezember 2021

Ort: Bern

Subventionsgeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Subventionsempfänger/innen:

Genossenschaft Migros Luzern
Industriestrasse 2
Postfach
CH-6036 Dierikon
www.migrosluzern.ch

Projektpartner/in:

Frigo-Consulting AG
Feldstrasse 30
Postfach 240
3073 Gümligen Bern
www.frigoconsulting.ch

Autor/in:

Marcel Bärtsch, Frigo-Consulting AG, m.baertsch@frigoconsulting.ch
Manuel Decasper, Frigo-Consulting AG, m.decasper@frigoconsulting.ch
Jonas Schönenberger, Frigo-Consulting AG, j.schoenenberger@frigoconsulting.ch

BFE-Projektbegleitung:

Men Wirz, Bundesamt für Energie, Men.Wirz@bfe.admin.ch
Stephan Renz, Bundesamt für Energie, renz.btr@swissonline.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/501836

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich. Die Autorenschaft bestätigt hiermit, dass die Ergebnisse und Schlussfolgerungen auf dargestelltem Kenntnisstand beruhen und nach anerkannten Regeln des Fachgebietes sowie nach bestem Wissen ermittelt wurden. Wird von dem Inhalt Gebrauch gemacht oder darauf basierende Entscheidungen getroffen, lehnt die Autorenschaft jede Haftung für direkte oder indirekte Schäden ab, die aus der Verwendung des Inhaltes entstehen.



Zusammenfassung

Basierend auf einer fundierten Konzeptevaluation wird im Sommer 2018 der Konzeptentscheid gefällt, die bestehende Öl-Heizung und Klimatisierung vom Einkaufszentrum Surseepark durch zwei reversible Luft/Wasser CO₂-Wärmepumpen mit einer Nenn-Heizleistung von insgesamt 1'100 kW und einer Klimaleistung von 1'260 kW zu ersetzen. Das von der Bauherrschaft gewählte Konzept, die reversible Luft/Wasser CO₂-Wärmepumpe, ist das nachhaltigste aller verglichenen Konzepte. Die Bauherrschaft nimmt höhere Investitions- und Lebenszykluskosten in Kauf, um nachhaltige und zukunftsweisende Technologien zu fördern und leistet einen relevanten Beitrag zur Energiestrategie 2050. Darüber hinaus beweist die Bauherrschaft Mut, auf Technologien zu setzen, welche keine Langzeiterfahrung vorzuweisen haben. In der Zwischenzeit wurden die reversiblen CO₂-Wärmepumpen 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, den Surseepark mit der geforderten Wärme und Kälte mittels reversiblen Luft/Wasser CO₂-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 einem Folgeprojekt ein. Erste Auswertungen deuten darauf hin, dass Anpassungen in der Systemauslegung und im Betrieb eine Steigerung vom COP gegenüber den Wärmepumpen von Surseepark im Heizbetrieb von rund +8 % bewirken. Eine direkte Gegenüberstellung der COP im Klima-Betrieb macht aufgrund höheren Kaltwasser-Temperaturen im Folgeprojekt keinen Sinn. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die eingeflossenen Erkenntnisse in derselben Grössenordnung zu einem höheren COP beitragen wie im Heizbetrieb.

Résumé

Suite à une évaluation de concept approfondie, une décision a été prise à l'été 2018 quant au choix du concept qui consiste à remplacer le chauffage au mazout et la climatisation existants du centre commercial Surseepark par deux pompes à chaleur réversibles air / eau au CO₂ d'une puissance de chauffage nominale totale de 1'100 kW et d'une puissance de climatisation de 1'260 kW. Le concept de pompe à chaleur réversible air / eau au CO₂ retenu par le maître d'ouvrage correspond au concept le plus durable parmi les concepts comparés. Le maître d'ouvrage accepte des coûts d'investissement et de cycle de vie plus élevés pour promouvoir des technologies de pointe et durables. Ainsi, il contribue de façon considérable à la stratégie énergétique 2050. De plus, le maître d'ouvrage fait preuve de courage en introduisant des technologies qui ne bénéficient pas d'une longue expérience. Dans l'intervalle, les pompes à chaleur réversibles au CO₂ ont été développées, fabriquées, installées sur site et mises en service à l'automne 2019. Pendant deux ans, le fonctionnement a été suivi et des optimisations et adaptations ont été effectuées en termes de technique de régulation. Une évaluation détaillée du fonctionnement a été réalisée à partir des données de mesure de l'automne 2020 à l'automne 2021. Un accent particulier a été mis sur l'efficacité énergétique.



Dans la période étudiée, un coefficient de performance annuel de 3.33 a pu être démontré en mode chauffage pour le régime de température de chauffage +30°C/+50°C. En mode climatisation, le coefficient de performance annuel est de 5.32 pour le régime de température d'eau froide +12°C /+7°C.

Dans le cadre de ce projet pilote et de démonstration, au-delà des aspects énergétiques, il a pu être démontré qu'il est possible d'approvisionner le Surseepark en chauffage et en froid à l'aide de pompes à chaleur réversibles air/eau au CO₂. En plus des exigences de base sur la garantie des besoins en chauffage et en froid, de précieuses expériences ont pu être accumulées en termes de pilotage et de stratégie de régulation, de comportement en charge partielle des pompes à chaleur et d'interactions entre éjecteurs et vanne d'étranglement.

Ces expériences sont déjà intégrées à un projet de suivi. Les premières évaluations indiquent que les adaptations dans la conception et le fonctionnement du système entraînent, en mode chauffage, une hausse du COP de 8% comparé aux pompes à chaleur du Surseepark. Une confrontation directe du COP en mode climatisation n'a pas de sens en raison des températures d'eau froide élevées dans le cadre du projet de suivi. On peut cependant supposer que les constats réalisés contribuent à un COP plus élevé dans le même ordre de grandeur qu'en mode chauffage.

Summary

Based on a well-founded concept evaluation, the concept decision was made in summer 2018 to replace the existing oil-fired heating and air-conditioning system of the Surseepark shopping centre with two reversible air/water CO₂ heat pumps with a total nominal heating capacity of 1,100 kW and an air-conditioning capacity of 1,260 kW. The concept chosen by the end user, the reversible air/water CO₂ heat pump, is the most sustainable of all the concepts compared. The end user accepts higher investment and life cycle costs in order to promote sustainable and forward-looking technologies and makes a relevant contribution to the Energy Strategy 2050. Furthermore, the end user demonstrates courage to rely on technologies that have no long-term experience. In the meantime, the reversible CO₂ heat pumps were developed, manufactured, installed on site, and commissioned in autumn 2019. From then on, the operation was monitored for around two years and operational optimisations and adjustments to the controls were carried out. Based on the measurement data from autumn 2020 to autumn 2021, a detailed evaluation of the operation was carried out, with a particular focus on energy efficiency.

In the mentioned period, an annual performance factor of 3.33 was measured during heating mode. The heating temperature regime is +30°C/+50°C. During air-conditioning mode, the annual performance factor of 5.32 was measured for cold water with a temperature regime of +12°C/+7°C.

In addition to the energy aspects, this pilot and demonstration project showed that it is possible to supply the Surseepark with the required heat and cooling energy by two reversible air-to-water CO₂ heat pumps. In addition to the basic requirements, i.e. ensuring the heating and cooling demand, valuable experience was gained in terms of control and regulation strategy, partial load behaviour of the heat pumps as well as the interaction of ejectors and throttle valves.

This experience has already been taken into account into a follow-up project. First evaluations indicate that light adjustments in the system design and in the controls result in an increase of the COP compared to the heat pumps of Surseepark in heating operation of about +8 %. A direct comparison of the COP in air-conditioning operation does not make sense due to higher cold-water temperatures in the follow-up project. However, it can be assumed that the knowledge gained contributes to higher COP-values in the same order of magnitude as in heating mode.



Take-home messages

- Eine Beurteilung der zu bevorzugenden Technologie, respektive des bevorzugten Kältemittels bedarf einer objektspezifischen, individuellen Betrachtung über den gesamten Lebenszyklus.
- Obschon der gemessene Coefficient of Performance die Zielwerte bislang knapp nicht erreichte, hat die Genossenschaft Migros Luzern bereits ein Folgeprojekt, basierend auf derselben CO₂-Technologie, mit Erfolg umgesetzt und höhere COP-Werte erreicht.
- Die gemessene Effizienz-Steigerung von 8% zwischen den reversiblen CO₂-Wärmepumpen im Surseepark und dem ersten Folgeprojekt unterstreichen, dass aus dem ersten Projekt relevante Schlussfolgerungen gezogen wurden und diese erfolgreich ins Folgeprojekt eingeflossen sind.
- 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.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Résumé	3
Summary	4
Take-home messages	5
Abkürzungsverzeichnis	7
1 Einleitung	8
1.1 Ausgangslage und Hintergrund	8
1.2 Motivation des Projektes	8
1.3 Projektziele	8
2 Anlagenbeschrieb	9
3 Vorgehen und Methode	12
3.1 Konzeptevaluation und -entscheid	12
3.2 Entwicklung.....	15
3.3 Umsetzung und Installation vor Ort	16
3.4 Inbetriebnahme.....	17
3.5 Betriebsoptimierung.....	17
3.6 Messdatenerfassung und Auswertung	17
4 Betriebsauswertung	19
4.1 Betriebsarten	19
4.2 Aufbereitete Heiz- und Klimaenergie, Surseepark	21
4.3 Heizung, Teillast	24
4.4 Klima, Teillast	25
4.5 COP Heizen, Betriebsart Heat pump	26
4.6 COP Klima, Betriebsart Chiller	27
5 Ergebnisse und Diskussion	27
5.1 Betriebs- und Regelstrategie	27
5.2 Zusammenspiel Verbraucher und Erzeuger.....	28
5.3 Teillastbetrieb	28
5.4 Heizbetrieb.....	31
5.5 Klimabetrieb.....	32
5.6 Ejektoren.....	33
6 Schlussfolgerungen und Fazit	34
7 Ausblick und zukünftige Umsetzung	36
8 Nationale und internationale Zusammenarbeit	37
9 Literaturverzeichnis	37



Abkürzungsverzeichnis

AC	Klimakältemaschine
C	Betriebsart «Heat pump»
CO ₂	CO ₂ als Kältemittel, auch bekannt als R744
COP	Coefficient of performance
COVID	Coronavirus
D	Betriebsart «Heat pump»
_{el}	Kürzel für elektrische Leistung oder Energie (z.B.: kW _{el})
F	Betriebsart «Heat pump»
FCKW	Fluorchlorkohlenwasserstoffe
G	Betriebsart «Gap»
GWK	Gewerbliche Kühlung Supermarkt, Gewerbekälte Supermarkt
H	Betriebsart «Heat pump»
HFO	Hydrofluorolefine
NH ₃	Ammoniak als Kältemittel, auch bekannt als R717
R290	Propan als Kältemittel
S	Betriebsart «Standby»
_{th}	Kürzel für thermische Leistung oder Energie (z.B.: kW _{th})
WP	Wärmepumpe



1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Hintergrund

Mitte des 19. Jahrhunderts taucht CO₂ erstmals als Kältemittel auf und gegen Ende desselben Jahrhunderts entwickelt Richard Mollier die erste Dampfzelle für das Kältemittel CO₂. In der ersten Hälfte des darauffolgenden 20. Jahrhunderts wurde CO₂ durch die sogenannten Sicherheitskältemittel vom Markt verdrängt. Als die FCKW-Ozon-Hypothese 1974 erstmals auftaucht, reagiert die Politik und verabschiedet 1987 das Montreal-Protokoll. Seither nehmen Vorschriften und Verbote für synthetische Kältemittel laufend zu. In der Zwischenzeit ist die Branche bei der vierten Generation synthetischer Kältemittel angelangt, den sogenannten HFO. Diese werden aktuell von der Chemie- und Kältemittelindustrie vermeintlich als Lösung propagiert, obschon sich deren Zersetzungsprodukte im Oberflächengewässer ansammeln können, dort nur schwer abbaubar sind und somit auch in das Trinkwasser gelangen können. Es ist zu erwarten, dass die HFO Kältemittel, wie deren drei vorhergehenden Generationen, keine langfristige Lösung darstellen und die einzigen zukunftssicheren Kältemittel die natürlichen sind. Namentlich sind dies insbesondere Kohlendioxid (CO₂), Ammoniak (NH₃) und die Gruppe der Kohlenwasserstoffe (Propan usw.) [1]. Diese Entwicklung verleiht der Erfindung und Publikation von Professor Gustav Lorentzen aus dem Jahre 1993, über die Hochdruckregelung für CO₂-Kälteanlagen, eine neue Tragweite. Diese ermöglichte erstmals, mit CO₂ als Kältemittel eine vergleichbare Kosten- und Energieeffizienz zu herkömmlichen Systemen zu erreichen. Damals schon erkannte Lorentzen das Potenzial von CO₂ und prophezeit dem Kältemittel eine blühende Zeit voraus. Spätestens seit Anfang des 21. Jahrhunderts, seit der Verjähmung der Patentschriften von Gustav Lorentzen, erlebt CO₂ als Kältemittel eine Renaissance [2].

1.2 Motivation des Projektes

Als Teil vom Nachhaltigkeitsprogramm «Generation M» gibt die Genossenschaft Migros Luzern das verbindliche Versprechen an die Generation von morgen, den Anteil an synthetischen, umweltschädlichen Kältemittel bis 2035 auf 5 % zu reduzieren. CO₂-Booster-Kälteanlagen gelten bei der Genossenschaft Migros Luzern für die Kühlung von Lebensmittel im Retail-Bereich als Stand der Technik. Diese Systeme wurden im Laufe der vergangenen Jahre stets weiterentwickelt und hinsichtlich Energieeffizienz getrimmt. Dank den positiven Erfahrungen mit dem Kältemittel CO₂ im Retail-Bereich, sowie den erheblichen Bemühungen in Punkto Nachhaltigkeit der Genossenschaft Migros Luzern, sind Bestrebungen naheliegend, CO₂ als Kältemittel auch für Wärmepumpen- und Klima-Anwendungen einzusetzen.

1.3 Projektziele

Im Rahmen dieses Pilot- und Demonstrationsprojektes werden die 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 im Konzeptvergleich prognostizierten Coefficient of Performance und Jahresarbeitszahlen in dieser Feldanlage erreicht werden. Weiter soll aufgezeigt werden, dass es möglich ist, ein Gebäudepark und dessen Wärme- und Kältebedarf, mittels dem natürlichen Kältemittel CO₂ effizient abzudecken, ohne den Einsatz von synthetischen, umweltschädlichen Kältemittel. Insgesamt sollen Berührungspunkte mit CO₂ als Kältemittel im Komfortbereich abgebaut, deren Anwendung in der Praxis gefördert und gegebenenfalls weitere Anwendungen für die CO₂-Technologie aufgezeigt werden.



2 Anlagenbeschreibung

Nebst den zwei reversiblen Luft/Wasser CO₂-Wärmepumpen zur Beheizung und Klimatisierung der Gebäude, wurde eine CO₂-Booster-Kälteanlage mit Ejektoren für die Plus- und Minuskühlstellen der Supermarkt-Filiale Migros Sursee installiert. Das Bundesamt für Energie hat sich bereit erklärt, im Rahmen eines Demonstrationsprojektes zur Förderung von innovativen und nachhaltigen Technologien, sich an den Mehrkosten für die reversiblen Luft/Wasser CO₂-Wärmepumpen zu beteiligen.

Um eine möglichst hohe Effizienz zu erzielen, wurde ein Konzept mittels Ejektoren gewählt. Die Ejektoren vermögen Druckenergie in eine Vorverdichtung von Sauggas umzuwandeln und somit die Verdichter zu entlasten resp. deren elektrische Leistungsaufnahme zu reduzieren. Die Abbildung 1 zeigt das gewählte Prinzip, 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.

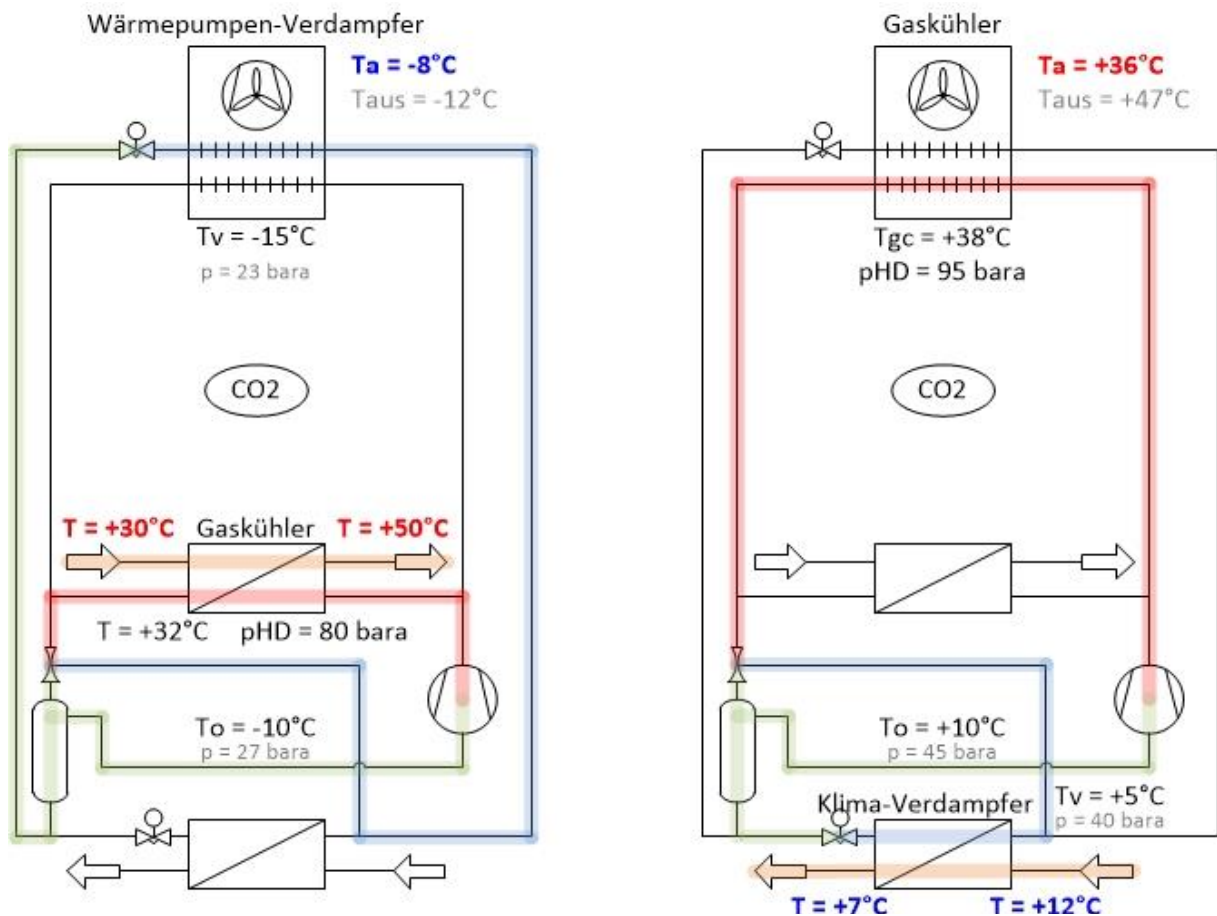


Abbildung 1: Prinzipschema der reversiblen Luft/Wasser CO₂-Wärmepumpen, links wird der Heizbetrieb und rechts der Klimabetrieb dargestellt.



Aufgrund begrenzter Erfahrung hinsichtlich des Verhaltens der Ejektoren während der Entwicklungsphase in der genannten Anwendung, wurden die reversiblen Wärmepumpen so konzipiert, dass jederzeit in einen herkömmlichen Überhitzungsbetrieb ohne Vorverdichtung durch die Ejektoren, gewechselt werden kann. Teils Komponenten wurden unter Berücksichtigung beider Betriebsarten selektioniert, was natürlich in der einen oder anderen Betriebsart einem Kompromiss entspricht. Darüber hinaus waren zum Teil Komponenten erforderlich, die nur in der einen oder anderen Betriebsart zum Einsatz kommen. Dies führt zwangsläufig zu zusätzlicher Komplexität und zusätzlichen Kosten.

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

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

	Heizbetrieb	Kühlbetrieb
Nennleistung pro Anlage (Heizen/Kühlen)	550 kW _{th}	630 kW _{th}
Ausstemperatur	-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 m ³ Wasser	

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.

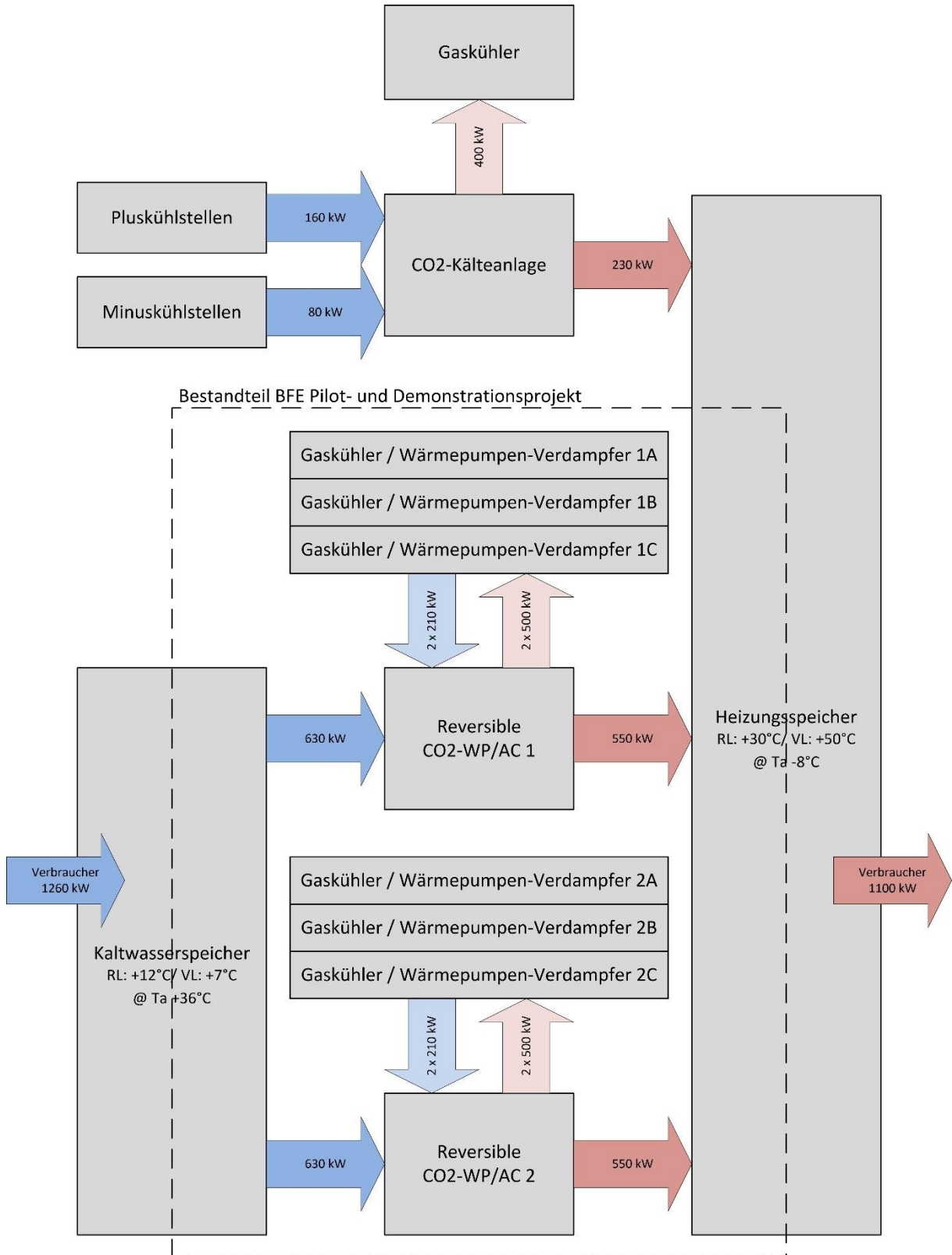


Abbildung 2: Übersicht der vor Ort installierten CO2-Booster-Kälteanlage und reversiblen CO2 Wärmepumpen.



3 Vorgehen und Methode

Das Einkaufszentrum Surseepark I und II wurden 2019/2020 umgebaut. Zu diesem Anlass wurde die bisherige Heizung und Klimatisierung auf den neusten Stand der Technik gebracht. Die bisherigen Heizungs- und Klimanetze in den Gebäuden, wie auch deren Temperatur-Regime blieben grösstenteils bestehen. Bei der Konzeptevaluation und dem Konzeptentscheid legte die Bauherrschaft grossen Wert auf eine vollumfängliche, ganzjährige Beurteilung unter der Berücksichtigung der speziellen Gegebenheiten durch den Umbau. Besonders im Fokus stand dabei die Nachhaltigkeit, namentlich die Treibhausgas-Emissionen, der Energieverbrauch sowie den Einsatz von natürlichen Kältemittel. Darüber hinaus bekundete die Bauherrschaft die Bereitschaft, auch auf Technologien zu setzen, die in diesem Anwendungsbereich damals noch nicht zum Stand der Technik zählten.

3.1 Konzeptevaluation und -entscheid

Die Bauherrschaft Genossenschaft Migros Luzern beauftragte in einer frühen Projektphase die Firma OLOS AG, eine Konzeptevaluation zu vollziehen. Die Ergebnisse dieser Konzeptevaluation werden in der Abbildung 3 zusammengefasst. In der Horizontalen sind die gegenübergestellten Kühlsysteme und in der Vertikalen die gegenübergestellten Heizsysteme dargestellt, woraus verschiedene mögliche Konzeptkombinationen resultieren. Die zwei rot umrahmten Konzeptkombinationen werden im weiteren Verlauf detailliert in Betracht gezogen.

Kühlen Heizen	Kaltwassersatz		Adsorption (indirekt/Pellet)		Adsorption (direkt/Gas)		Luft/Wasser WP (reversibel)			
	Rang	Wert	Rang	Wert	Rang	Wert	Rang	Wert		
Gasheizung		1'715'000	-	-		1'125'000	-	-	Investitionskosten	CHF
		111'414				158'056			Energiekosten pro Jahr	CHF/a
		23'000	-	-		18'000	-	-	Betriebskosten pro Jahr	CHF/a
	1	3'731'215	-	-	2	3'765'836	-	-	Lebenszykluskosten über 15 Jahre	CHF
	6	314			7	512			Treibhausgas-Emissionen	t _{CO2} /a
	6	225	-	-	7	310	-	-	Umweltbelastungspunkte	10 ⁶ UBP/a
Pelletheizung		2'240'000		1'820'000	-	-	-	-	Investitionskosten	CHF
		130'496		214'436					Energiekosten pro Jahr	CHF/a
		30'000		25'000	-	-	-	-	Betriebskosten pro Jahr	CHF/a
	4	4'647'444	7	5'411'538	-	-	-	-	Lebenszykluskosten über 15 Jahre	CHF
	2	51	3	73					Treibhausgas-Emissionen	t _{CO2} /a
	1	151	4	207	-	-	-	-	Umweltbelastungspunkte	10 ⁶ UBP/a
Pellet/Gas		2'305'000	-	-		1'715'000	-	-	Investitionskosten	CHF
		128'596				175'237			Energiekosten pro Jahr	CHF/a
		33'000	-	-		28'000	-	-	Betriebskosten pro Jahr	CHF/a
	5	4'728'935	-	-	6	4'763'555	-	-	Lebenszykluskosten über 15 Jahre	CHF
	4	77			5	99			Treibhausgas-Emissionen	t _{CO2} /a
	2	158	-	-	5	215	-	-	Umweltbelastungspunkte	10 ⁶ UBP/a
Luft/Wasser WP (reversibel)		-	-	-		-		2'250'000	Investitionskosten	CHF
		-	-	-		-		68'480	Energiekosten pro Jahr	CHF/a
		-	-	-		-		42'000	Betriebskosten pro Jahr	CHF/a
		-	-	-		-	3	3'907'202	Lebenszykluskosten über 15 Jahre	CHF
		-	-	-		-	1	47	Treibhausgas-Emissionen	t _{CO2} /a
		-	-	-		-	3	158	Umweltbelastungspunkte	10 ⁶ UBP/a

Abbildung 3: Zusammenfassung der Ergebnisse vom Konzeptvergleich, vollzogen von der Firma OLOS AG im Auftrag der Genossenschaft Migros Luzern.

Aus dem Konzeptvergleich geht hervor, dass das Konzept bestehend aus Gasheizung und Kaltwassersatz die tiefsten Lebenszykluskosten aller verglichenen Konzepte aufweist. Weiter geht aus dem Konzeptvergleich hervor, dass die reversible Luft/Wasser Wärmepumpe das nachhaltigste



Konzept aller verglichenen Konzepte ist. Basierend auf den Ergebnissen dieser Konzeptevaluation, entschied sich die Bauherrschaft die Beheizung und die Klimatisierung der Gebäude mit einer reversiblen Wärmepumpe zu realisieren, obschon weder die Investitions- noch Lebenszykluskosten dieses Konzeptes die tiefsten waren. Dafür schnitt die reversible Wärmepumpe in Punkto Treibhausgas-Emissionen am besten ab.

Für die Bauherrschaft war von Anfang an klar, dass für die reversible Wärmepumpe nur ein natürliches Kältemittel zum Einsatz kommt. Folglich wurden in einem nächsten Vergleich verschiedene reversible Wärmepumpen mit unterschiedlichen natürlichen Kältemittel, unter Berücksichtigung objektspezifischer Gegebenheiten, miteinander verglichen. Zur Auswahl standen Kohlendioxid (CO_2 , R744), Propan (R290) und Ammoniak (NH_3 , R717). Die Abbildung 4 zeigt den untersuchten Systemkatalog der drei reversiblen Wärmepumpen im Heizbetrieb im Nennbetriebspunkt bei einer Aussentemperatur von -8°C . Die Abbildung 5 zeigt den untersuchten Systemkatalog der drei reversiblen Wärmepumpen im Kühlbetrieb im Nennbetriebspunkt bei einer Aussentemperatur von $+35^\circ\text{C}$. Aus der Abbildung 4 und Abbildung 5 geht hervor, dass die Systeme mit Propan und Ammoniak mit einem Wärme- resp. Kälte-trägersystem und einem Rückkühler vorgehesehen waren. Eine Aussenaufstellung der Anlagen war nicht möglich. Eine Variante mit Direktverflüssigung resp. Verdampfung war aus sicherheitstechnischen Gründen keine Option. Im Konzeptvergleich wurde der Energieverbrauch der Verdichter, der Ventilatoren des Gaskühlers resp. der Rückkühler sowie die Pumpen vom Wärme- resp. Kälte-trägersystem berücksichtigt.

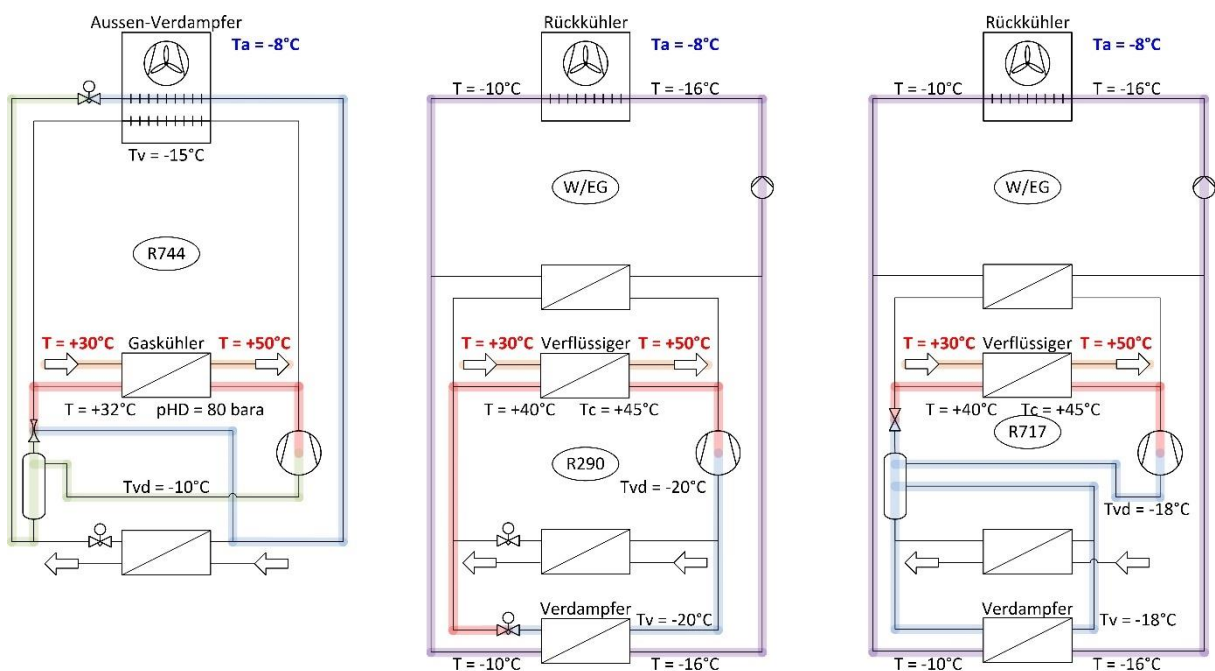


Abbildung 4: Systemkatalog reversibler Wärmepumpen mit natürlichen Kältemittel im Heizbetrieb (Nennbetriebspunkt).

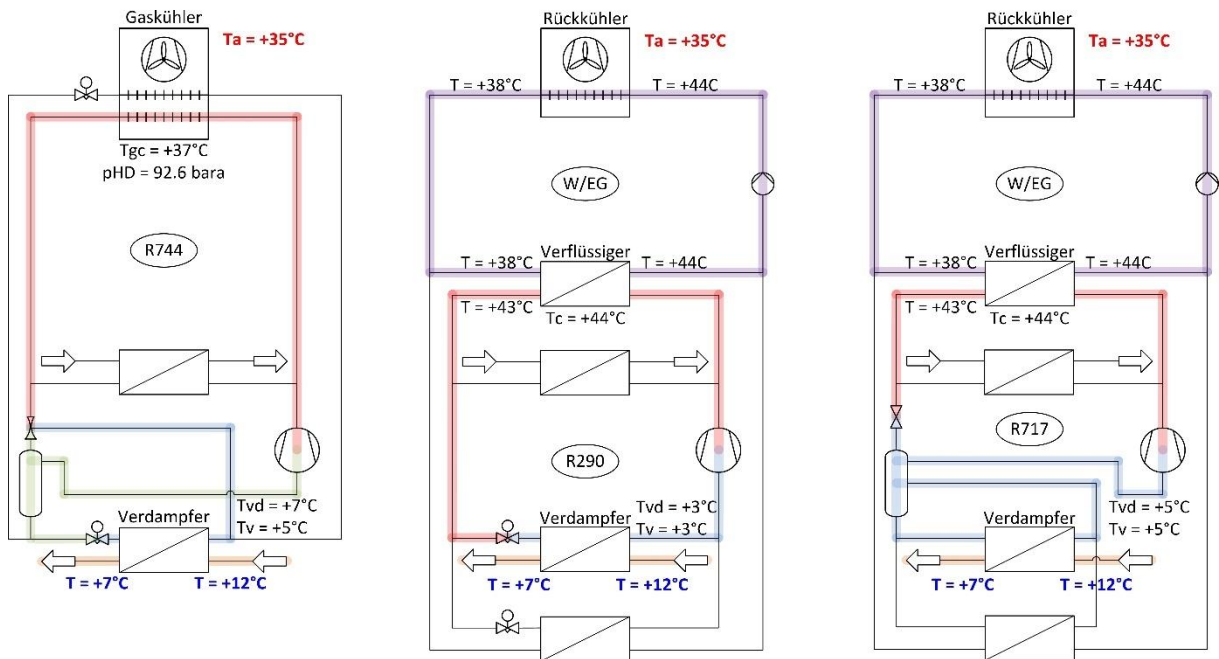


Abbildung 5: Systemkatalog reversibler Wärmepumpen mit natürlichen Kältemittel im Kühlbetrieb (Nennbetriebspunkt).

Die Ergebnisse vom Vergleich der verschiedenen reversiblen Wärmepumpen gemäss Abbildung 4 und Abbildung 5 werden in Abbildung 6 zusammengefasst. Als Referenz wurde ein weiteres System mit R134a, analog dem Einbindungskonzept vom Ammoniak berechnet. Die bestehenden Klimakälteanlagen im Surseepark wurden grösstenteils mit R134a betrieben.

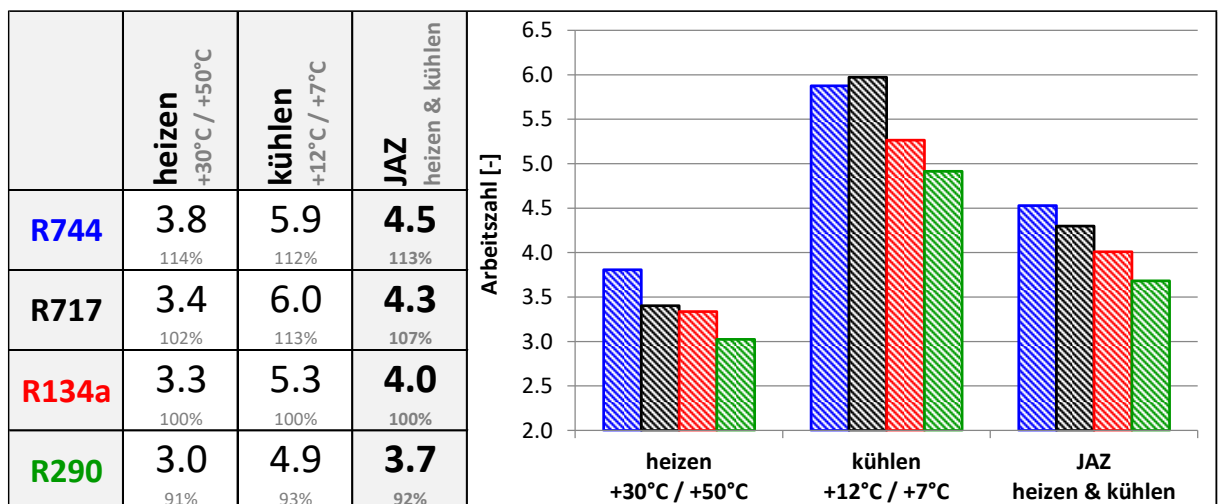


Abbildung 6: Ergebnisse vom Vergleich der verschiedenen reversiblen Wärmepumpen im Heizbetrieb, im Kühlbetrieb sowie in einer jährlichen Betrachtung.



Der Vergleich zeigte auf, dass in dieser Anwendung die Jahresarbeitszahl von Kohlendioxid 6% besser als das Ammoniak und 21% besser als das Propan abschneidet. Wesentliche, sich ergänzende Faktoren, weshalb die energetischen Vorteile zugunsten von CO₂ fallen, 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

Folglich fällte die Genossenschaft Migros Luzern den Konzeptentscheid, die Beheizung und Klimatisierung vom Einkaufszentrum Surseepark I und II mittels zweier reversiblen Luft/Wasser CO₂-Wärmepumpen zu realisieren.

3.2 Entwicklung

Nach dem Konzeptentscheid der Bauherrschaft im Sommer 2018 folgte die Entwicklung und Ausführungsplanung der reversiblen CO₂-Wärmepumpen. Dazu wurde das System in verschiedenen Betriebspunkten berechnet. Basierend auf diesen Ergebnissen wurden die einzelnen Komponenten unter Berücksichtigung der verschiedenen Betriebsarten und den Teillast-Betrieben ausgelegt und selektioniert. Die nennenswerten Herausforderungen dabei waren zum einen, die innert nützlicher Frist verfügbaren Standard-Komponenten, geeignet für die hohen Systemleistungen unter Berücksichtigung der Drucklage von CO₂ zu finden. Zum anderen wurde grossen Wert auf die verschiedenen Betriebsarten und deren Teillast-Betriebe und der damit einhergehenden Regelungstechnik gelegt. Weiter wurde ein detailliertes Messkonzept für die Auswertung und Betriebsuntersuchung der reversiblen CO₂-Wärmepumpen erstellt, welches im Kapitel 3.6 zusammenfassend beschrieben ist.



3.3 Umsetzung und Installation vor Ort

Nach der Detail-Auslegung des Systems folgte im Frühling 2019 der Bau der reversiblen CO₂-Wärmepumpen. Im Sommer 2019 folgte die Installation vor Ort. Die Schwerpunkte dieser Projektphase lagen auf der termingerechten Umsetzung und Installation vor Ort sowie der Einbringung und Platzierung der Wärmepumpen im Gebäude.



Abbildung 9: Reversible CO₂-Wärmepumpe.



Abbildung 10: Elektro- und Steuerungsschrank.

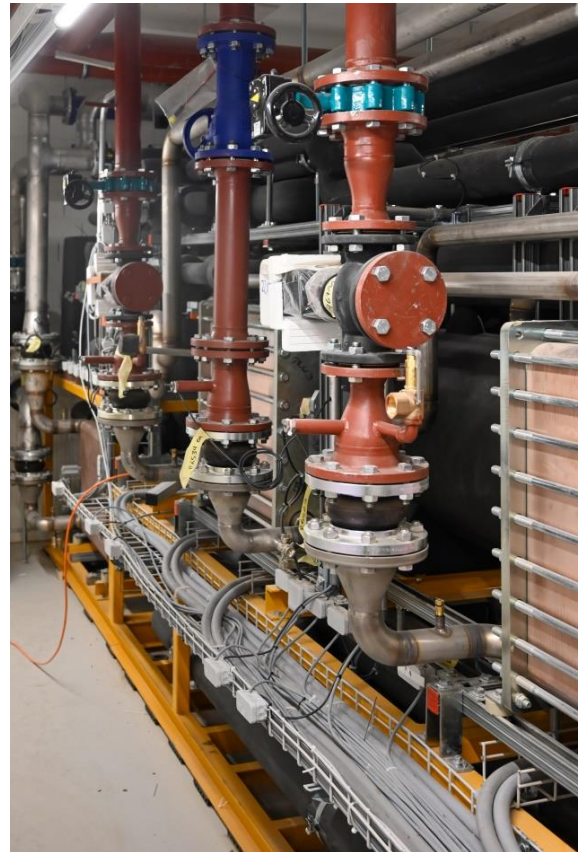


Abbildung 11: Anschluss Heizungsnetz.



Abbildung 8: Gaskühler mit Wärmepumpen-Verdampfer.



Abbildung 7: Anschluss Gaskühler und Wärmepumpen-Verdampfer.



3.4 Inbetriebnahme

Ende August 2019 wurde mit der Inbetriebnahme bzw. dem Steuerungscheck begonnen. Die einzelnen Systemabschnitte und dessen Logik wurden schrittweise geprüft und in Betrieb genommen. Anfang September 2019 wurde das Kältemittel eingefüllt und die Anlagen in Betrieb genommen. Die eigentliche Inbetriebnahme wurde Mitte Oktober abgeschlossen.

3.5 Betriebsoptimierung

Im Anschluss an die Inbetriebnahme folgten die Einregulierung und die Betriebsoptimierung. Im Rahmen der Einregulierung und der Betriebsoptimierung wurden hauptsächlich die Regelparameter optimiert und gegebenenfalls die Regelstrategie und/oder Logik der Steuerung so angepasst, dass der gebäudeseitige Wärme- und Kältebedarf möglichst effizient und ohne Schwankungen aufbereitet werden kann. Der Fokus der Betriebsoptimierung lag dabei auf folgenden Steuer- und Regelkreisen vom Gesamtsystem:

- Optimieren vom Betriebsstunden-Ausgleich zwischen WP I und WP II unter Berücksichtigung der maximal möglichen Effizienz
- Reduzieren von Schaltzyklen zwischen den zwei Wärmepumpen, sowie jeweils zwischen deren Verdichter
- Regelung eines konstanten Hochdruckes mittels der Ejektoren mit gleichzeitiger Maximierung deren Vorverdichtung
- Regelung der Einspritzventile an den Wärmepumpen- wie auch Klima-Verdampfer unter Berücksichtigung einer maximal möglichen Vorverdichtung der Ejektoren
- Regelung von konstanten Vorlauftemperaturen (Heizen und Kühlen) unter Berücksichtigung von gleichzeitigem (parallelem) Betrieb von der AWN GWK sowie der WP I und WP II
- Optimieren der bedarfsgerechten Abtauung, sodass insgesamt weniger Abtauzyklen erforderlich sind und die Betriebsart deFrost weniger zum Einsatz kommt.

Aus der ersten Betriebsphase wurde weiteres Verbesserungspotential in Punkto der Betriebsarten, insbesondere dem gleichzeitigen Heizen und Kühlen erkannt. Dieses Verbesserungspotential wurde im Rahmen der noch andauernden Betriebsoptimierung steuerungstechnisch eingepflegt und weiter optimiert, mit dem Ziel, die Anzahl Schaltzyklen der zwei Wärmepumpen und deren einzelnen Verdichter auf ein Minimum zu reduzieren.

Verbraucherseitig erfolgten im Sommer 2020 noch Anpassungen auf dem Heizungs- und Klima-Netz, worauf aufgrund der gegenseitigen Abhängigkeit vom gebäudeseitigen Wärme- und Kältebedarf sowie dem Betriebsverhalten der Wärmepumpen weitere Anpassungen auf der Erzeugerseite erfolgten. Grundlegende Anpassungen wurden im September 2020 abgeschlossen.

3.6 Messdatenerfassung und Auswertung

Seit der Inbetriebnahme im Herbst 2019 werden Messdaten erfasst, ausgewertet und für die Optimierung vom Betrieb herangezogen. Es werden sämtliche für den Betrieb erforderlichen Betriebs- und Messdaten, inklusive den zusätzlichen Wärme- und Energiezähler, erfasst. Die Betriebs- und Messdaten werden je nach Signal mit einem Abtastintervall zwischen 1 Minute und 15 Minuten erfasst und alle 15 Minuten als gemittelten Wert auf einen Ringspeicher geschrieben. Von dort werden die Daten täglich mittels der Datenfernüberwachung auf einen lokalen fortlaufenden Speicher kopiert, bevor sie auf dem Ringspeicher wieder überschrieben werden. Die eigentliche Auswertung erfolgt



grösstenteils in Excel. Dazu wird eine, für die Auswertung relevante Auswahl an Betriebs- und Messdaten ins Excel exportiert. Die Abbildung 12 zeigt eine Übersicht vom Messkonzept inklusive der Aufschlüsselung und Zuordnung der Nebenverbraucher, sowie der Systemgrenze für die Bestimmung vom COP B. Im weiteren Verlauf, wenn nicht explizit anders erwähnt, wurden die Messdaten nach dem dargestellten Messkonzept bearbeitet, sowie beziehen sich Angaben in Punkto COP auf den COP B. Die wichtigsten Erkenntnisse und Anpassungen für die reversible Wärmepumpe werden im folgenden Kapitel 4 Betriebsauswertung erläutert.

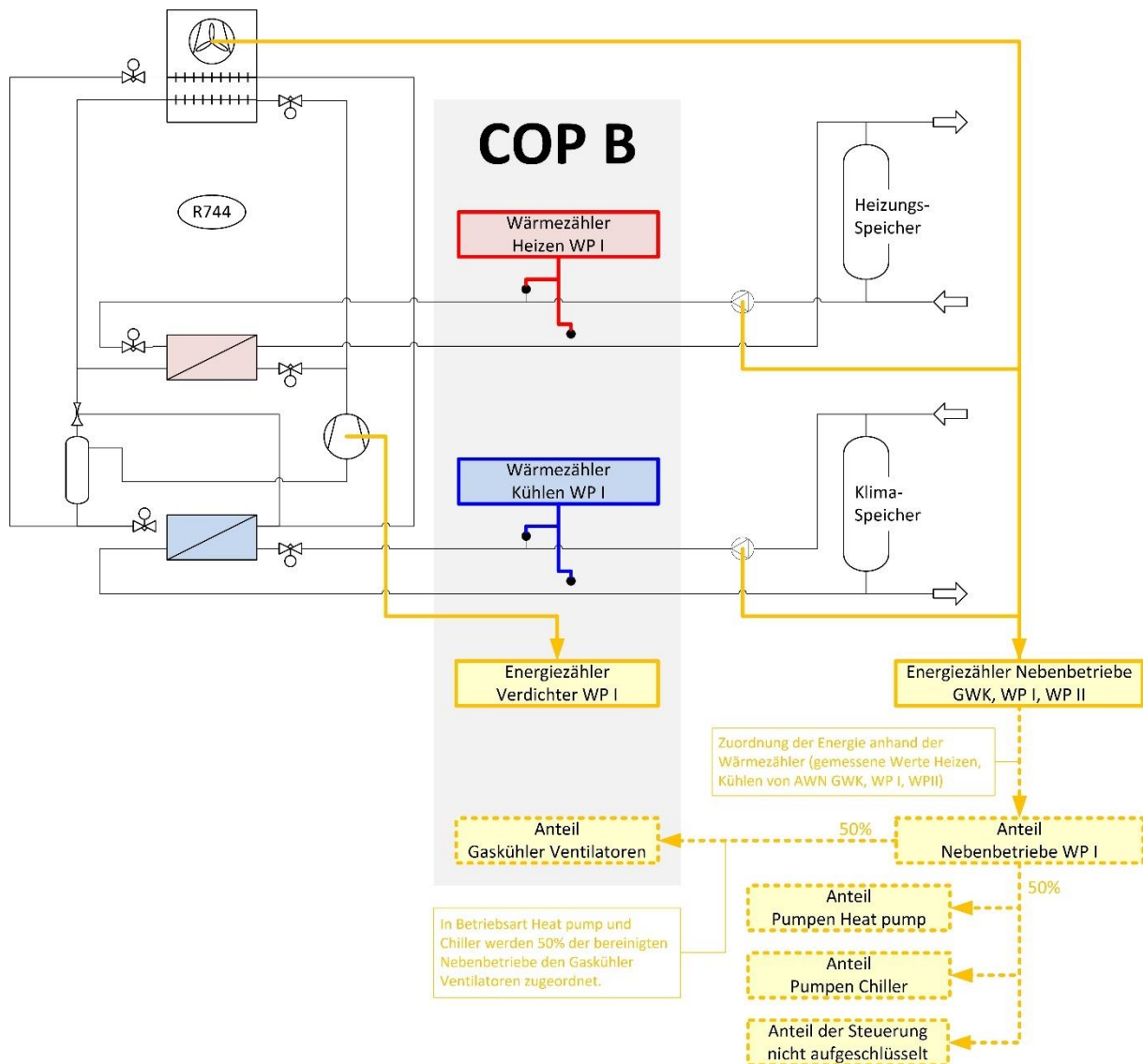


Abbildung 12: Übersicht vom Messkonzept inklusive der Aufschlüsselung und Zuordnung der Nebenverbraucher sowie der Systemgrenze für die Bestimmung vom COP B.



4 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 [3], [4] 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.

4.1 Betriebsarten

Jedem Zeitinkrement von jeder Wärmepumpe wurde separat eine eindeutige Betriebsart gemäss Abbildung 13 zugeordnet. Der Farbcode resp. die Abkürzung wird, wenn immer sinnvoll im weiteren Verlauf der Betriebsauswertung beibehalten. Wenn mindestens ein (1) Wert pro Zeitinkrement fehlt, wird das Zeitinkrement der Betriebsart Gap zugeordnet und in der Auswertung nicht weiter berücksichtigt. Bei Stillstand einer Wärmepumpe wird jenes Zeitinkrement der Betriebsart Standby zugeordnet. Bei den aktiven Betriebsarten wird unterschieden zwischen Chiller, Dual, Heat pump und deFrost. Für die Auswertung und vor allem für die Vergleichbarkeit mit anderen Systemen sind insbesondere die Betriebsarten Heat pump und Chiller von Interesse. Die Betriebsart Dual sowie deFrost hängt sehr stark von weiteren Parametern ab, sodass ein Vergleich zu anderen Systemen schwierig ist resp. weitere Interpretation erfordert.

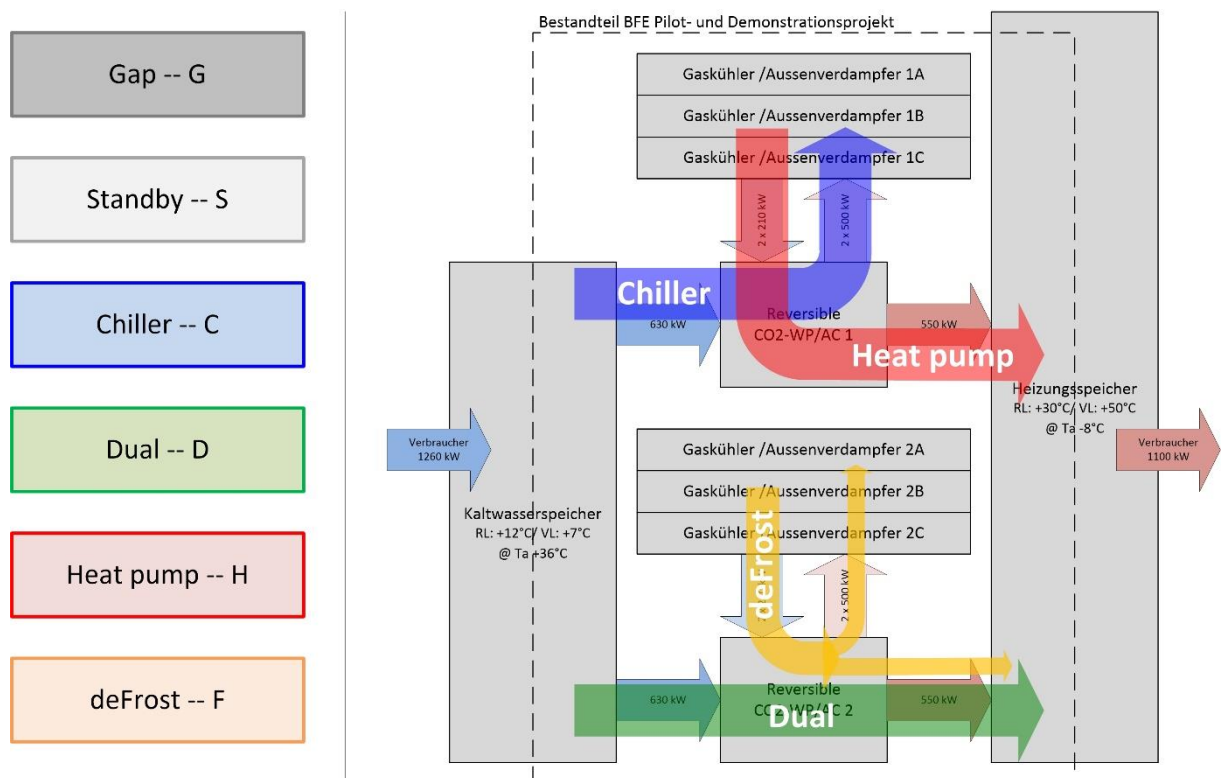


Abbildung 13: Links: Betriebsarten und deren farbliche Zuordnung. Rechts: Energieflüsse der Betriebsarten Chiller, Heat pump, Dual und deFrost dargestellt in einem Ausschnitt der Abbildung 2.



Das Diagramm 1 und das Diagramm 2 stellen die prozentualen Anteile der Betriebsarten der Wärmepumpen 1 und 2 im Surseepark dar. Die ersten zwei Ziffern auf der Abszisse stehen für das Kalenderjahr und die letzten zwei für den Monat im Jahr. Es ist ersichtlich, dass die Wärmepumpe 2 deutlich mehr Betriebsstunden im Heizbetrieb aufweist als die Wärmepumpe 1. Dies ist auf die Logik der Prioritätenschaltung der zwei Wärmepumpen zurückzuführen, bei welcher die Wärmepumpe 2 hauptsächlich für den Heizbetrieb zuständig waren. In der Zwischenzeit wurde die Logik angepasst und es ist davon auszugehen, dass der Heizbetrieb inskünftig gleichmässig auf die Wärmepumpe 1 und 2 verteilt wird. Der Anteil der Betriebsart Chiller ist bei der Wärmepumpe 1 und 2 in etwa ausgeglichen. Die Zuordnung der Betriebsarten scheint plausibel zu sein. Im Winter wird hauptsächlich geheizt. Im Sommer hauptsächlich gekühlt. Der Dual-Betrieb hat seinen grössten Anteil in der Übergangszeit und der deFrost-Betrieb in den kalten, feuchten Monaten.

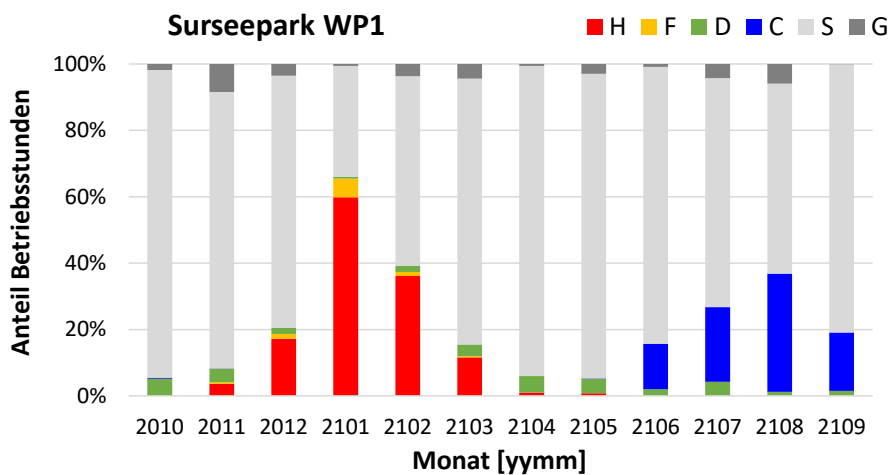


Diagramm 1: Prozentuale Anteile der Betriebsarten der Wärmepumpe 1 im Surseepark.

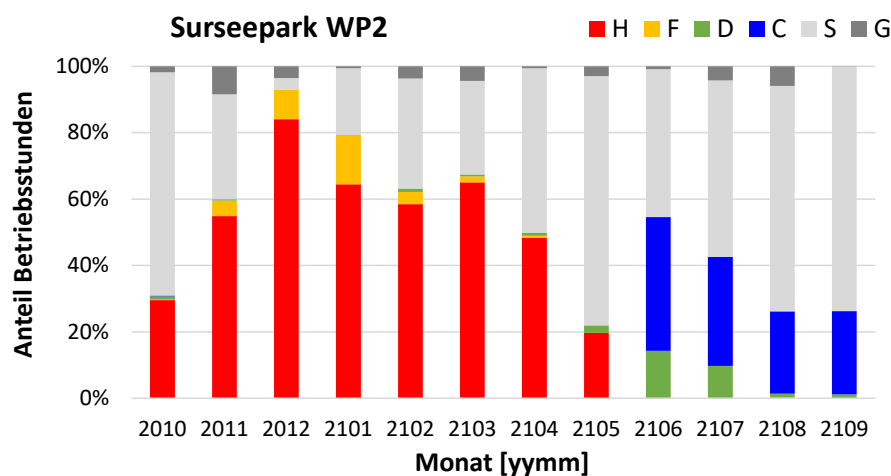


Diagramm 2: Prozentuale Anteile der Betriebsarten der Wärmepumpe 2 im Surseepark.



4.2 Aufbereitete Heiz- und Klimaenergie, Surseepark

Das Diagramm 3 zeigt die wöchentlich aufbereitete Heiz- und Klimaenergie beider Wärmepumpen sowie die Aussentemperatur vom Surseepark. Es werden nur Werte in der Betriebsart Heat pump oder Chiller berücksichtigt. Werte der Betriebsarten Dual und deFrost sowie die Abwärme der gewerblichen Kühlung ist nicht in dieser Grafik enthalten. Die Betriebsauswertung fokussiert auf Daten aus den Betriebsarten Heat pump und Chiller, sodass die Ergebnisse einfacher mit anderen Systemen verglichen werden können. Der Zusammenhang zwischen Aussentemperatur und aufbereiteter Energie scheint plausibel.

Die derart klare Trennung zwischen Heiz- und Kühlbetrieb ist darauf zurückzuführen, dass weder der Dual-Betrieb noch die Abwärme der gewerblichen Kühlung im Diagramm 3 enthalten ist. Dennoch, trotz des grossen Areals sowie der unterschiedlichen Nutzung der Räumlichkeiten, hatte die gleichzeitige Aufbereitung von Heiz- und Klimaenergie im untersuchten Zeitraum eine vernachlässigbare Relevanz. Dies ist aus den übereinander angeordneten und gleichzeitig betrachteten Diagramm 5 und Diagramm 4 ersichtlich. Die Diagramme zeigen auf, dass zwischen Oktober 2020 und Mai 2021 die aufbereitete Heizenergie dominierte sowie vor dem Oktober 2020 und ab Juni 2021 die aufbereitete Klimaenergie überwog. In dem Diagramm 5 und dem Diagramm 4 ist sämtliche aufbereitete Energie enthalten.

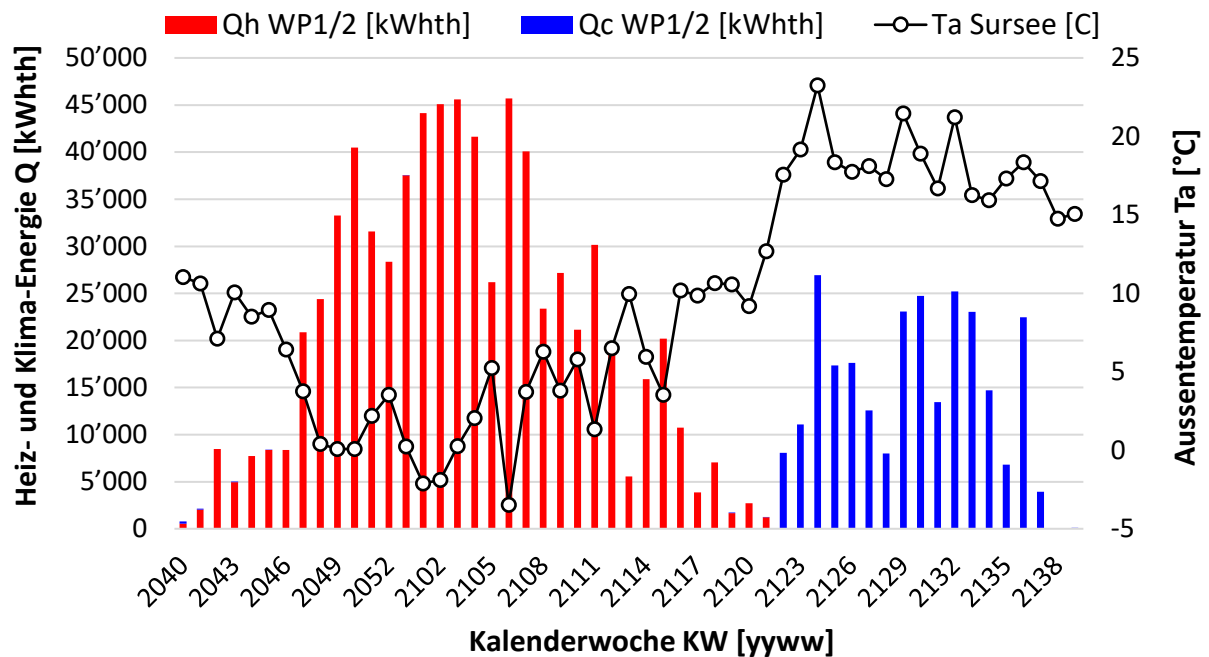


Diagramm 3: Wöchentlich aufbereitete Heiz- und Klimaenergie sowie Aussentemperatur im Surseepark.

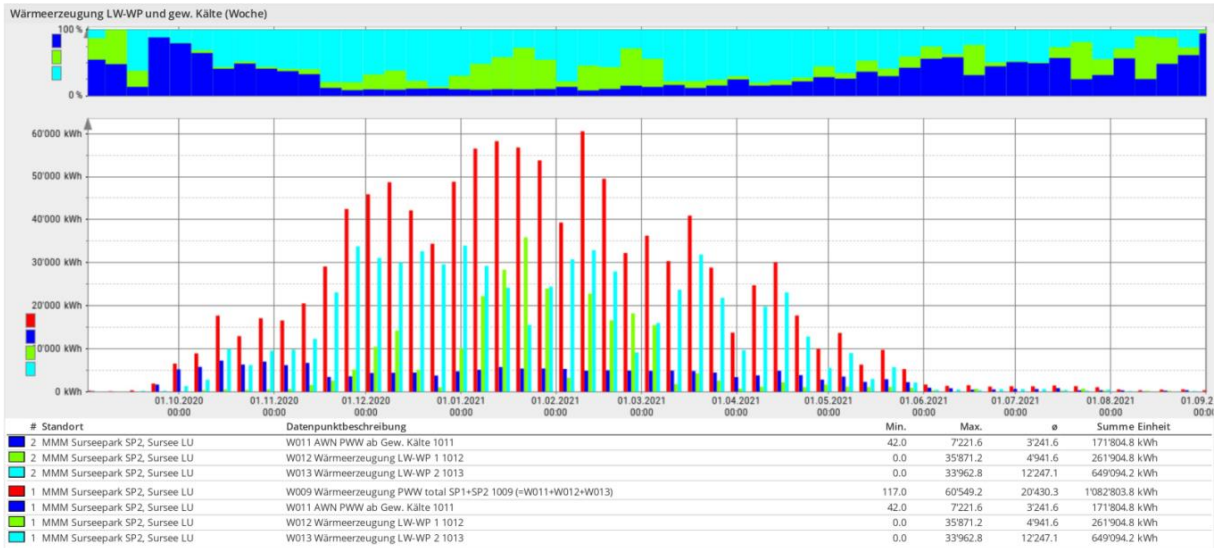


Diagramm 5: Wöchentliche Wärmeerzeugung beider Wärmepumpen und Abwärme der gewerblichen Kühlung im Surseepark. Auszug aus monatlichem Rapport: Surseepark SP2 - Energiekennzahlen LW-WP, Genossenschaft Migros Luzern.

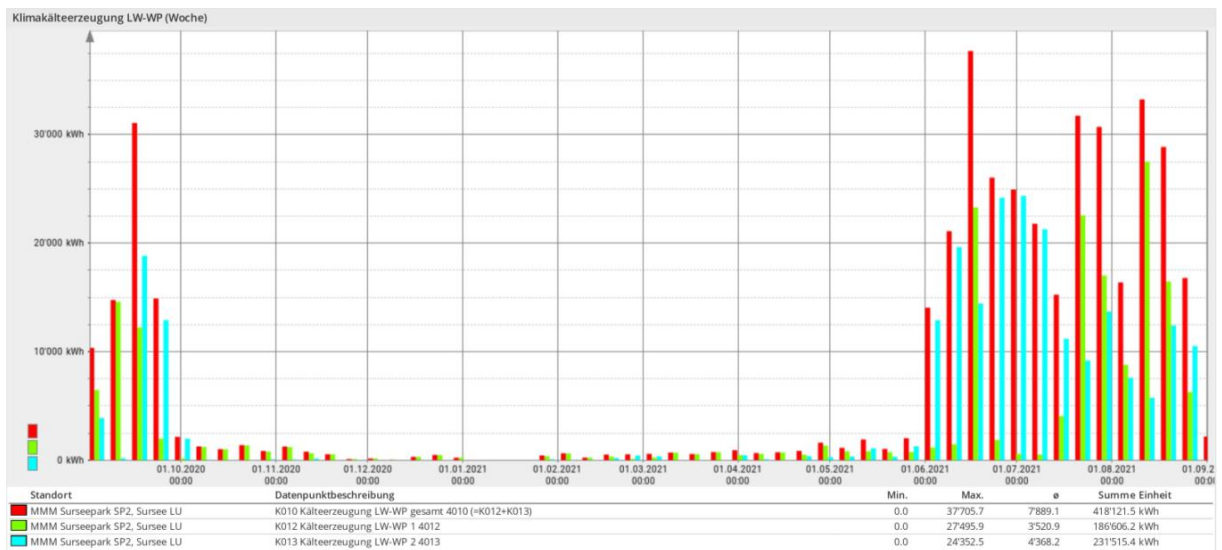


Diagramm 4: Wöchentliche Kälteerzeugung beider Wärmepumpen im Surseepark. Auszug aus monatlichem Rapport: Surseepark SP2 - Energiekennzahlen LW-WP, Genossenschaft Migros Luzern.

Die Daten im Diagramm 5 und im Diagramm 4 basieren zwar auf denselben Messfühler, wie beispielsweise das Diagramm 3. Deren Datenaufzeichnung und -verarbeitung basiert aber auf unterschiedlichen Tools und Methoden. Die direkte Gegenüberstellung dient unter anderem zur Plausibilisierung der Datensätze und daraus abgeleiteten Ergebnisse.



Das Diagramm 6 zeigt die wöchentlich aufbereitete Nettoenergie beider Wärmepumpen. Werte der Betriebsarten Dual und deFrost, sowie die Abwärme der gewerblichen Kühlung sind nicht in dieser Grafik enthalten. Das Diagramm 6 basiert auf denselben Daten wie das Diagramm 3. Die Daten werden jedoch 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-Linie 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 $+13^{\circ}\text{C}$.

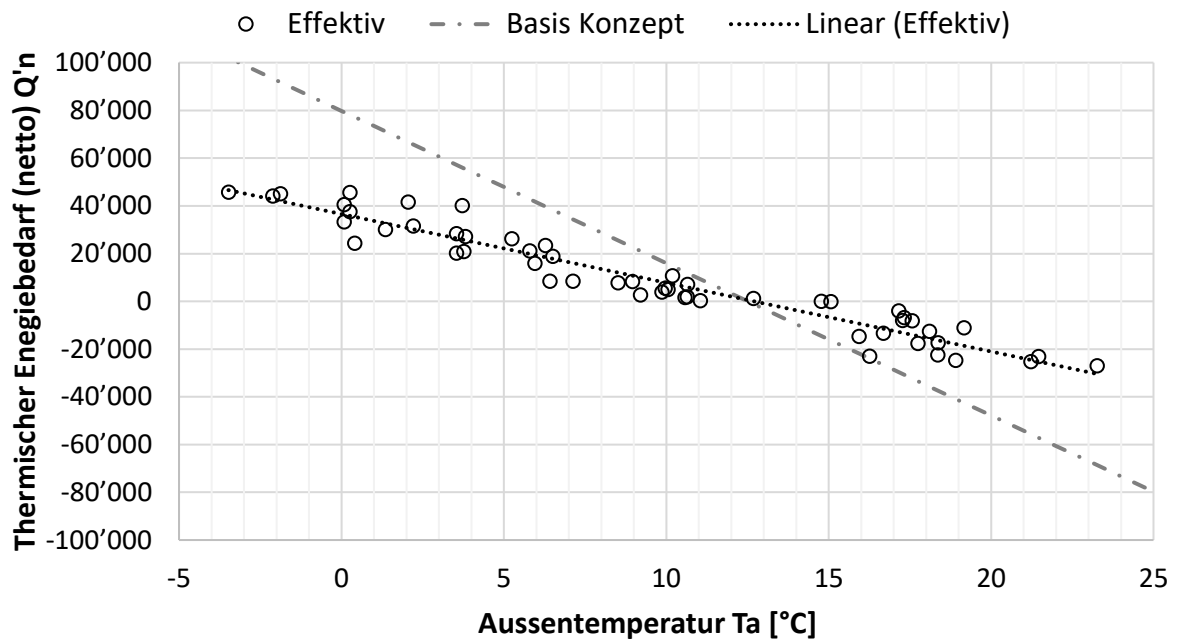


Diagramm 6: Wöchentlich aufbereitete thermische Energie (netto) sortiert nach Aussentemperatur im Surseepark.



4.3 Heizung, Teillast

Das Diagramm 7 und das Diagramm 8 stellen die mittleren aufbereiteten Heizleistungen der Wärmepumpen 1 und 2 in Abhängigkeit der Aussentemperatur dar. Die roten Punkte entsprechen dem Mittelwert sämtlicher Heizleistungen in der Betriebsart Heat pump bei einer Aussentemperatur. Die gelben und blauen Punkte entsprechen den mittleren Heizleistungen in der Betriebsart Heat pump bei einer Aussentemperatur sortiert nach Tag und Nacht. Die schwarzen Punkte entsprechen der maximal gemessenen Heizleistung in der Betriebsart Heat pump bei einer Aussentemperatur. Die Kurve der maximalen Heizleistung entspricht der mittleren maximalen Leistung während einer Stunde. Dazu wurde der grösste Mittelwert von vier aneinanderhängenden Heizleistungen bei einer bestimmten Aussentemperatur ermittelt. Bei Aussentemperaturen, bei welchen im untersuchten Zeitraum nie eine Stunde am Stück die Betriebsart Heat pump aktiv war, entspricht der Wert null. Dies kann an beiden Rändern vom Diagramm 7 und vom Diagramm 8 zum Tragen kommen, denn jeweils am linken Rand ist die Häufigkeit der Aussentemperatur gering und jeweils am rechten Rand ist der Heizbedarf gering.

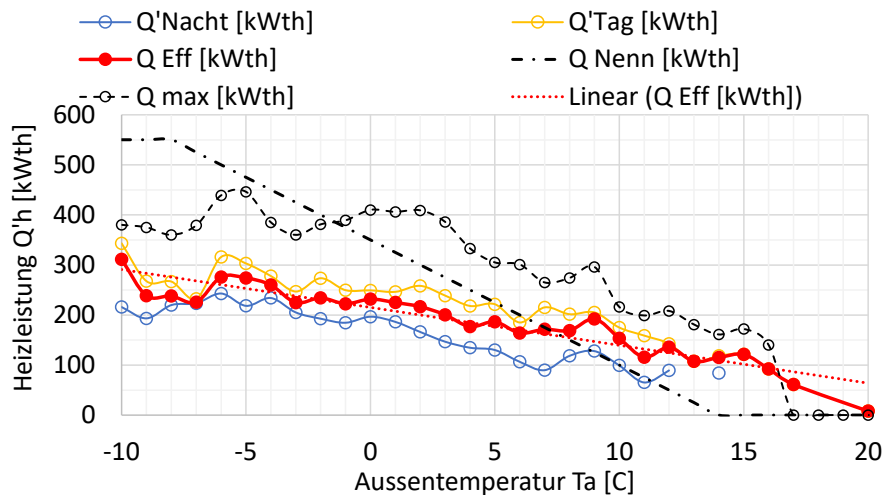


Diagramm 7: Mittlere Heizleistung in Abhängigkeit der Aussentemperatur der Wärmepumpe 1 im Surseepark.

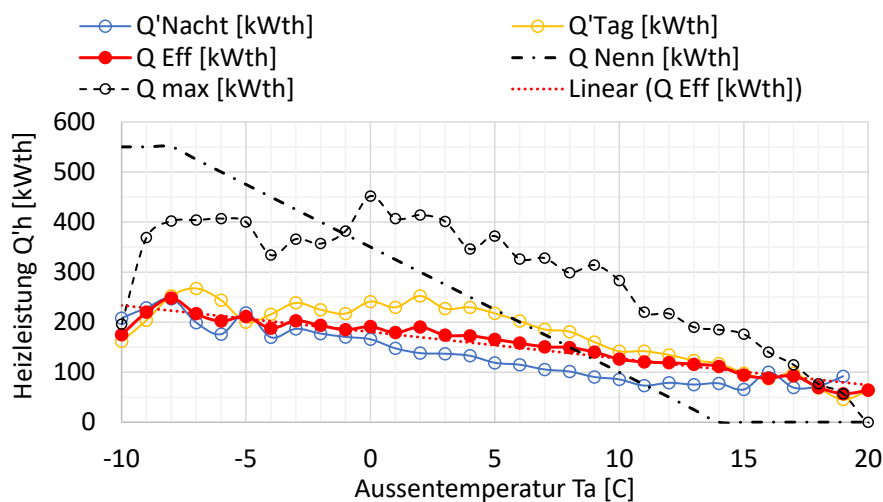


Diagramm 8: Mittlere Heizleistung in Abhängigkeit der Aussentemperatur der Wärmepumpe 2 im Surseepark.



4.5 COP Heizen, Betriebsart Heat pump

Das Diagramm 11 stellt den mittleren gemessenen Coefficient of Performance im Heizbetrieb (Heat pump), den prognostizierten Coefficient of Performance, sowie die gesamte aufbereitete Heizenergie beider Wärmepumpen 1 und 2 vom Surseepark 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. Im unteren Temperatur-Bereich liegt der gemessene COP höher als der prognostizierte. Dies ist auf eine tiefere Rücklauftemperatur zurückzuführen. Im oberen Temperatur-Bereich liegt der gemessene COP unter dem prognostizierten COP. Dies ist auf eine höhere Rücklauftemperatur sowie kurze Laufzeiten und häufiges Takten des Systems zurückzuführen.

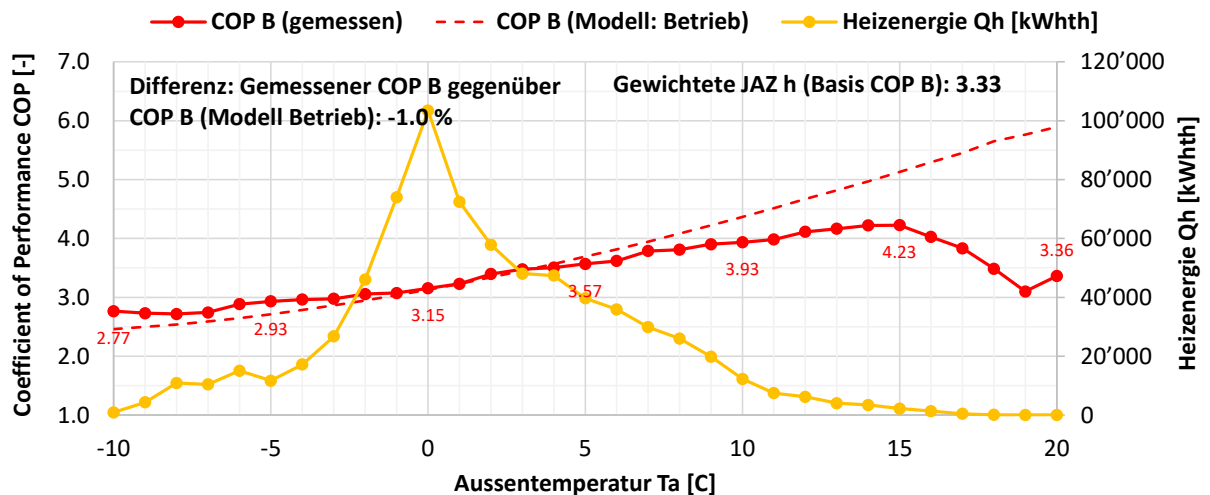


Diagramm 11: Mittlerer Coefficient of Performance (Heat pump) und gesamte Heizenergie in Abhängigkeit der Aussentemperatur beider Wärmepumpen im Surseepark.



4.6 COP Klima, Betriebsart Chiller

Das Diagramm 12 stellt den mittleren gemessenen Coefficient of Performance im Klimabetrieb (Chiller), 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.

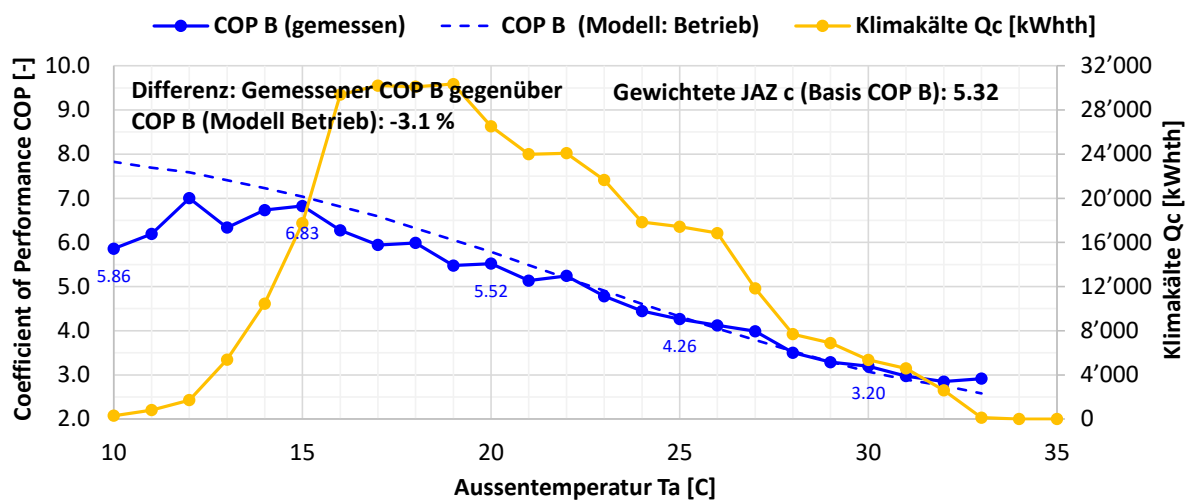


Diagramm 12: Mittlerer Coefficient of Performance (Chiller) und gesamte Heizenergie in Abhängigkeit der Aussentemperatur beider Wärmepumpen im Surseepark.

5 Ergebnisse und Diskussion

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die reversiblen Luft/Wasser CO₂-Wärmepumpen erfolgreich entwickelt, gefertigt und im Sommer 2019 vor Ort installiert wurden. Die Steuerung und die Schnittstellen der Wärmepumpen wurden getestet und die Wärmepumpen im Herbst 2019 Schritt für Schritt in Betrieb genommen. Seither versorgen die reversiblen Luft/Wasser CO₂-Wärmepumpen die Gebäude I und II vom Surseepark mit Wärme und Kälte. Die Einregulierung und Betriebsoptimierung wurden bis im Herbst 2020 abgeschlossen und seither werden repräsentative Messwerte erfasst und ausgewertet.

5.1 Betriebs- und Regelstrategie

Aus der ersten Betriebsphase lässt sich herleiten, dass die Betriebs- und Regelstrategie der CO₂-Wärmepumpen grundsätzlich funktioniert. Fortlaufend laufen Bemühungen, die Regelparameter einzelner Regelkreise weiter zu optimieren. Die Herausforderung dabei ist, diese Parameter so zu wählen, dass das gesamte System flink genug ist, um auf Lastschwankungen zu reagieren, ohne jedoch ins Schwingen zu geraten.



5.2 Zusammenspiel Verbraucher und Erzeuger

Der Wärme- und Kältebezug der Gebäude im Surseepark erfolgte in der Anfangsphase mit starken Leistungsschwankungen und die Temperaturspreizung zwischen der Vor- und Rücklauftemperatur variierte stark. Die dynamischen Betriebsbedingungen stellen eine Herausforderung für die Wärmepumpen dar, dennoch eine konstante Vorlauf-Temperatur zur Verfügung zu stellen und der geforderten Leistung zu folgen. Die Hauptursache für die Schwankungen war die eingeschränkte Leistungsregelung auf der Verbraucherseite sowie die damals noch andauernde gebäudeseitige Einregulierung der Verbraucher. Im Sommer 2020 wurde die Leistungsregelung auf der Verbraucherseite mittels geregelten Pumpen deutlich verbessert. Seit der Wieder-Inbetriebnahme takteten die CO₂-Wärmepumpen deutlich weniger. Es ist davon auszugehen, dass dies einen positiven Effekt auf die Effizienz hat.

5.3 Teillastbetrieb

Aus den im Kapitel 4.2 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 in den Kapiteln 4.3 und 4.4 dargestellten mittleren Leistungen unterstreichen die geringe Last der Wärmepumpen 1 und 2 im untersuchten Zeitraum. 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 14 verdeutlicht diesen Effekt bei einer Wärmepumpe mit insgesamt 6 Verdichter wovon einer drehzahl geregelt 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 Klimaspesicher gefördert wird.

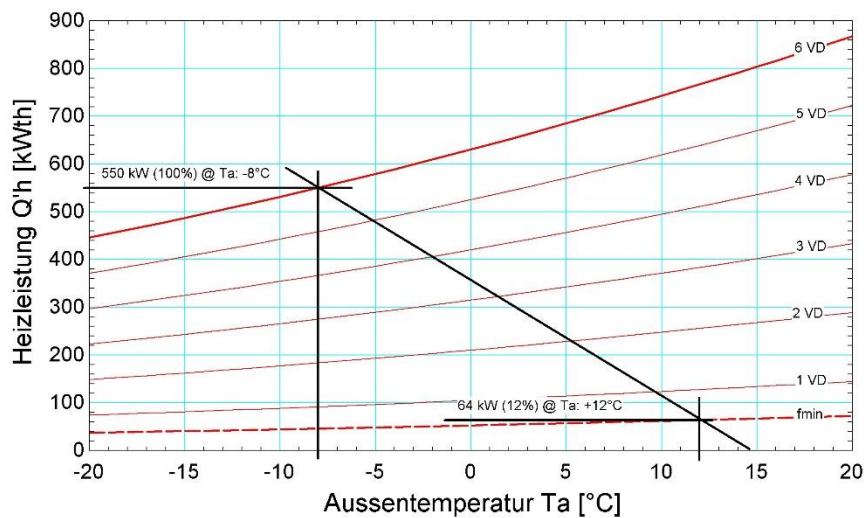
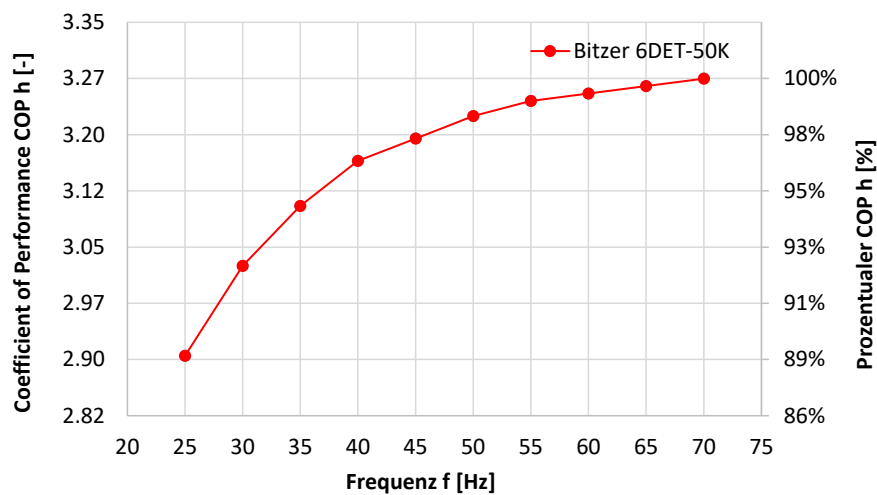


Diagramm 14: Heizleistungsbereich einer Wärmepumpe mit 6 Verdichter wovon einer drehzahleregelt ist.

Zum anderen nimmt die Effizienz der Verdichter bei tiefen Drehzahlen (Frequenz) ab. Das Diagramm 13 stellt den Coefficient of Performance und die Effizienz in Abhängigkeit der Drehzahl (Frequenz) der eingesetzten Bitzer-Verdichter dar. Die im Diagramm 13 dargestellten Daten stammen aus der Verdichter Auslegungssoftware [5]. Die Abbildung 14 zeigt die Eingabemaske und die gewählten Eingabeparameter.



(Frequenz). Datenquelle [5].



The screenshot displays the Bitzer software interface for configuring a compressor. The left sidebar contains various configuration options, and the right side shows a technical diagram and a data table.

Configuration Parameters:

- Modus: Kälte- und Klimaanlage
- Kältemittel: R744 (CO2)
- Bezugstemperatur: Taupunkt
- Verdichterart: Transkritisch
- Baureihe: Standard
- Betriebsart: Transkritisch
- Motorversion: alle
- Verdichtervahl: 6DTE-50K
- Verdichtertyp: 6DTE-50K
- Betriebspunkt: Verdampfung: -10 °C, Verflüssigungsdruck: 80 bar(a)
- Betriebsbedingungen: Gaskühleraustritt: 30 °C, Sauggasüberhitzung: 10 K
- Leistungsregelung: Externer FU: 70 Hz
- Netzversorgung: Netzfrequenz: 50Hz, Netzspannung: Standard (400V)

Technical Data Table:

Vorläufige Werte. Leistungsaufnahme am Verdichtereingang	
Verdichter	6DTE-50K-40P
Verdichterfrequenz	70.0 Hz
Kälteleistung	107.8 kW
Verdampferleist.	107.8 kW
Leistungsaufnahme	47.4 kW
Strom (400V)	92.5 A
Gaskühlerleistung	155.3 kW
Leistungszahl	2.27
Massenstrom	2352 kg/h
min. Kälteleistung	33.1 kW (25 Hz)
max. Kälteleistung	107.8 kW (70 Hz)
Druckgastemp. ungekühlt	101.3 °C
Opt. Hochdruck	75.0 bar(a)

Abbildung 14: Bitzer Verdichter Auslegungssoftware, Eingabemaske [5].

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass mit zunehmender Aussentemperatur:

- die Heiz-Last abnimmt und die Abwärme (Gewerbekühlung) sowie die Heiz-Leistung der Verdichter zunimmt, folglich
- die Anzahl Verdichter im Heizbetrieb abnehmen, und
- der negative Einfluss der Drehzahlregelung an Relevanz gewinnt, darüber hinaus
- die mittlere Drehzahl abnimmt und den negativen Einfluss der Drehzahlregelung erhöht, und
- die Wärmepumpe insgesamt vermehrt taktet.

Im Klimabetrieb entschärft sich die Problematik insofern, da die Ejektoren bei hohen Aussentemperaturen (und hohen Drücken) die Verdichter stärker entlasten und dem Wegfall der Klimaleistung entgegenwirken, was mit der Tendenz von höherem Klimabedarf bei höheren Aussentemperaturen einhergeht. Darüber hinaus wird im Klimabetrieb, nicht wie im Heizbetrieb einen Teil der Wärme mittels Abwärme, sondern die volle Klimaleistung mit den reversiblen Wärmepumpen aufbereitet. Der Kälteeintrag verursacht durch die Gewerbekühlung tritt lokal auf und ist daher insgesamt auf die Gebäude Surseepark I und II zu vernachlässigen.



5.4 Heizbetrieb

Der Heizbetrieb wurde basierend auf Messdaten zwischen Oktober 2020 und Mai 2021 detailliert untersucht. Aus der Aufteilung der Betriebsarten geht hervor, dass während dieser Zeitspanne nebst dem Standby-Betrieb der Heizbetrieb dominiert (siehe Diagramm 1 und Diagramm 2). Weiter wurde der Zusammenhang zwischen der mittleren Aussentemperatur und erzeugter Heizenergie dargestellt und geprüft (siehe Diagramm 3 und Diagramm 6). Die aufbereitete Heizenergie liegt bei rund 50% der in der Konzeptphase herangezogenen Energie. Die mittlere Heizleistung der zwei Wärmepumpen beläuft sich auf 50% gegenüber der Heizkurve, welche bei der Konzeptphase herangezogen wurde (siehe Diagramm 7 und Diagramm 8). Die Tendenz zur mittleren Leistung deckt sich mit dem hohen Anteil an Standby-Betrieb der Wärmepumpen. Weiter wurde der Coefficient of Performance (COP) der Wärmepumpen untersucht (siehe Diagramm 15). Im mittleren Temperatur-Bereich passen die gemessenen COP-Werte zu den prognostizierten COP-Werten. Im unteren und oberen Temperatur-Bereich lässt sich Verbesserungspotential zukünftiger Wärmepumpen und deren Modellierung erkennen.

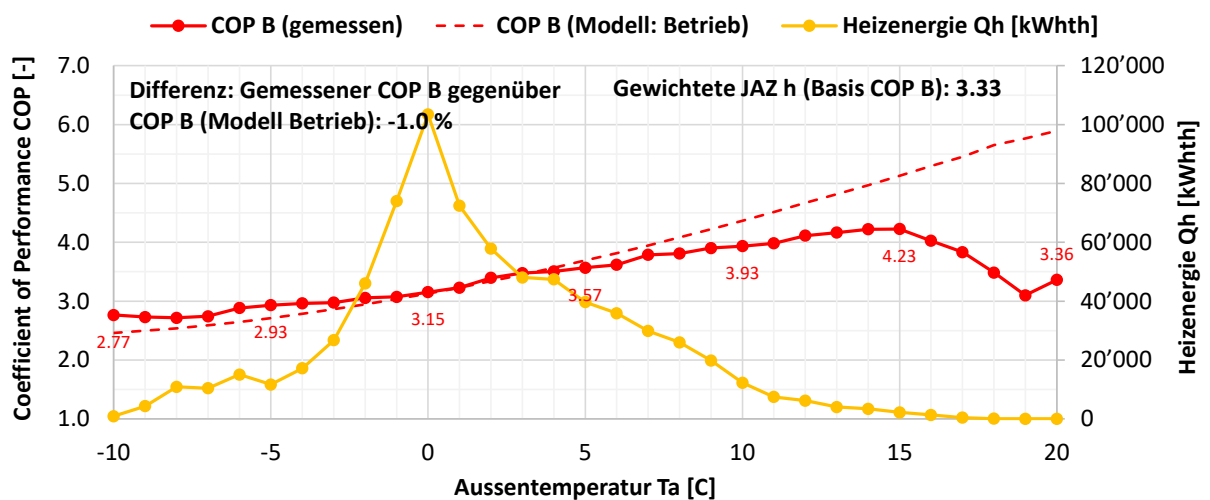


Diagramm 15: Mittlerer Coefficient of Performance (Heat pump) und gesamte Heizenergie in Abhängigkeit der Aussentemperatur beider Wärmepumpen im Surseepark.

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 5.3 Teillastbetrieb detailliert 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 in 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-Wärmepumpen nicht die Vorlauf-Temperatur, sondern die Rücklauf-Temperatur und deren Temperatur-Spreizung zwischen Vor- und Rücklauf-Temperatur die Effizienz massgeblich [6].



5.5 Klimabetrieb

Der Klimabetrieb wurde basierend auf Messdaten zwischen Juni 2021 und September 2021 detailliert untersucht. Aus der Aufteilung der Betriebsarten geht hervor, dass während dieser Zeitspanne nebst dem Standby-Betrieb der Klimabetrieb dominierte (siehe Diagramm 1 und Diagramm 2). Weiter wurde der Zusammenhang zwischen der mittleren Aussentemperatur und erzeugter Klimakälte dargestellt und geprüft (siehe Diagramm 3 und Diagramm 6). Die aufbereitete Klimakälte liegt rund bei 50% der in der Konzeptphase herangezogenen Energie. Die mittlere Klimaleistung der zwei Wärmepumpen beläuft sich auf rund 50% gegenüber der Klimakurve, welche bei der Konzeptphase herangezogen wurde (siehe Diagramm 7 und Diagramm 8). Die Tendenz zur mittleren Klimaleistung deckt sich mit dem hohen Anteil an Standby-Betrieb der Wärmepumpen. Weiter wurde der Coefficient of Performance (COP) der Wärmepumpen im Klimabetrieb untersucht (siehe Diagramm 16). Im oberen Temperatur-Bereich passen die gemessenen COP-Werte zu den prognostizierten COP-Werten. Im unteren Temperatur-Bereich liegt der gemessene COP tendenziell unter dem prognostizierten COP.

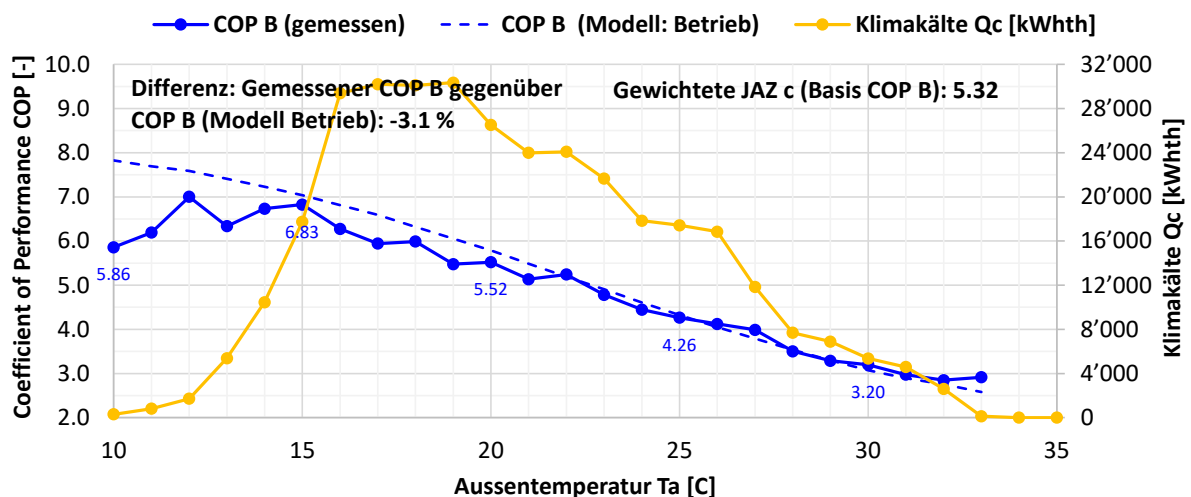


Diagramm 16: Mittlerer Coefficient of Performance (Chiller) und gesamte Heizenergie in Abhängigkeit der Aussentemperatur beider Wärmepumpen im Surseepark.

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.



5.6 Ejektoren

Erfahrungsgemäss haben die Ejektoren viele Abhängigkeiten, was deren Saugwirkung beeinflusst. Sicherlich von grosser Relevanz ist Treibdruck und die Treibtemperatur. Auch der Öffnungsgrad der Treibdüse (Hochdruck-Regelung) hat einen nennenswerten Einfluss auf die Saugwirkung. Unter Saugwirkung wird das Zusammenspiel von Massenstrom und Druckhub verstanden. Bei konstanten Bedingungen kann bei geringem Druckhub ein grosser Massenstrom und umgekehrt bei grossem Druckhub ein geringer Massenstrom gefördert werden.

Eine der wesentlichen Erkenntnisse aus den zwei Wärmepumpen in Sursee ist, dass nicht nur die Ejektoren dieses Zusammenspiel massgeblich beeinflussen, sondern auch das Drosselventil vor dem Verdampfer massgeblich am Verhalten beteiligt ist. Für einen stabilen und möglichst effizienten Betrieb bedarf es einem Drosselventil mit ausgezeichneten Regeleigenschaften.

Zum Zeitpunkt der Konzeptphase waren entsprechende Ventile mit dem erforderlichen Kv-Wert, für die entsprechende Drucklage nicht erhältlich. Folglich kamen sogenannte V-Port-Ventile zum Einsatz, deren Aufbau auf einem Kugel-Ventil basiert und eine verbesserte Regelcharakteristik aufweisen als herkömmliche Kugel-Ventile, aber dennoch nicht an herkömmliche Regelventile herankommen.

Seit der Inbetriebnahme hat sich herauskristallisiert, dass mit den implementierten V-Port-Ventilen, zwar erhebliche Druckhübe gemessen werden können, sprich die Ejektoren funktionieren. Jedoch ist es mit den gegebenen Ventilen nur bedingt möglich, den maximal möglichen Druckhub konstant über längere Zeit zu erzielen. Dies insbesondere bei tieferen Saugwirkungen, bspw. im Klimabetrieb bei tiefen Aussen-Temperaturen. In anderen Worten, mit den gegebenen V-Port-Ventilen ist es kaum möglich, die maximal mögliche Effizienz zu erzielen. Diese Erkenntnisse flossen direkt in ein Folgeprojekt von Surseepark, bei welchem ebenfalls eine reversible Luft/Wasser CO₂-Wärmepumpe nach gleichem Prinzip zum Einsatz kommt.

Das Diagramm 17 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 17 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 betreiben als die aufbereitete Kaltwasser-Temperatur. Interne Druckverluste im Verdampfer, Saugleitung und Sauggasüberhitzer sind bereits enthalten.

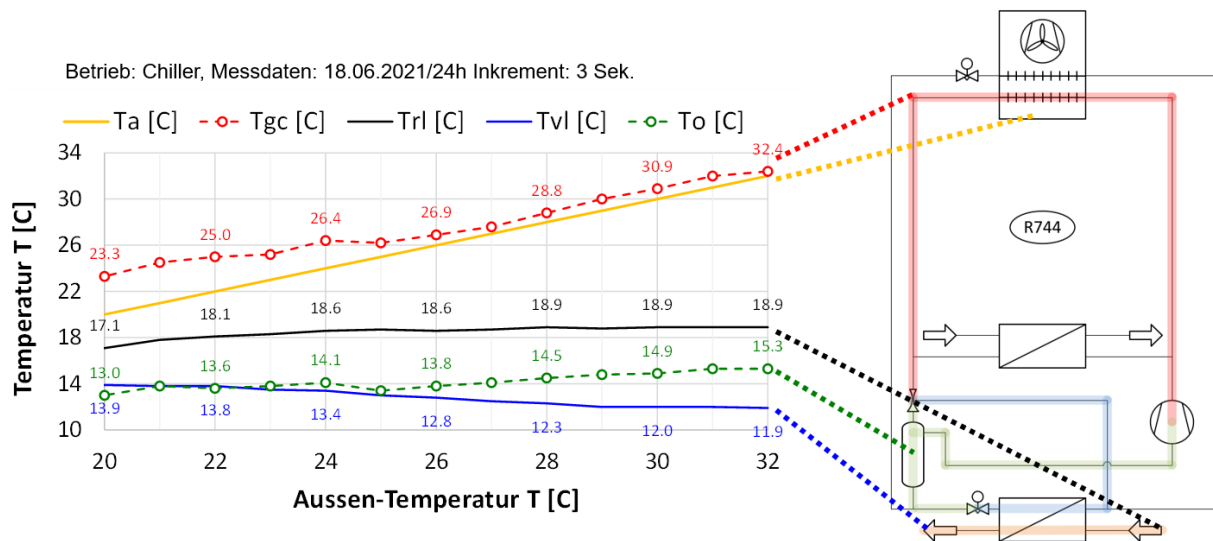


Diagramm 17: Ejektor-Saugwirkung einer reversiblen Luft/Wasser CO₂-Wärmepumpe (Folgeprojekt Surseeperk).

6 Schlussfolgerungen und Fazit

Im Rahmen dieses Pilot- und Demonstrationsprojektes wurden die reversiblen Luft/Wasser CO₂-Wärmepumpen entwickelt, gefertigt, vor Ort installiert, in Betrieb genommen und im Anschluss während zwei Jahren intensiv begleitet und untersucht. Es konnte aufgezeigt werden, dass es möglich ist, ein Gebäudepark mit der geforderten Wärme und Kälte mittels reversiblen Luft/Wasser CO₂-Wärmepumpen zu versorgen. Die Versorgungssicherheit war stets gewährleistet, es kam zu keinen Ausfällen, welche Gebäudeseitig bemerkbar waren.

Nebst dem Abdecken des Wärme- und Kältebedarfs, konnten wertvolle Erfahrungen in Punkto Steuerung- und Regelstrategie, Teillastverhalten der Wärmepumpen sowie dem Zusammenspiel von Ejektoren und Drosselventil gesammelt werden. Die Beweggründe und Ursachen für Leistungsreserven können, wie im Kapitel 5.3 dargestellt, vielfältig sein. Mittels der Betriebsauswertung konnten die energetischen Nachteile aufgezeigt werden, welche unter anderem auf Leistungsreserven und tiefe Teillast zurückzuführen sind. Weiter bestätigen die Ergebnisse in Kapitel 5.4, wie bereits in einer früheren Studie erläutert [6], dass im Unterschied zu herkömmlichen Wärmepumpen, bei CO₂-Wärmepumpen nicht die Vorlauf-Temperatur, sondern die Rücklauf-Temperatur und deren Temperatur-Spreizung zwischen Vor- und Rücklauf-Temperatur die Effizienz massgeblich beeinflussen. Und der Einsatz von CO₂-Wärmepumpen insbesondere dann energetisch Sinn macht, wenn möglichst tiefe Rücklauf-Temperaturen gegeben und hohe Vorlauf-Temperaturen gefordert sind.

Aufgrund einer eher konservativen Kostenschätzung in der Konzeptphase, fielen die effektiven Investitionskosten für die Wärmepumpen in der Ausführung tiefer aus. Im Gegenzug war der zeitliche Aufwand, die Steuerung anzupassen und die Betriebsoptimierung durchzuführen, mit deutlich mehr Aufwand verbunden als seinerzeit geschätzt. Folgeprojekte profitieren von der erlangten Erfahrung in Punkto Regel- und Steuerungsstrategie sowie in der Betriebsoptimierung. Es ist davon auszugehen, dass bei Folgeprojekten, der Aufwand nicht mehr ins Gewicht fällt, als es bei herkömmlichen Projekten der Fall ist.



Insgesamt sind diese grundlegenden 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 Surseepark von 3.33. Dies jeweils ohne Berücksichtigung vom Dual-Betrieb.

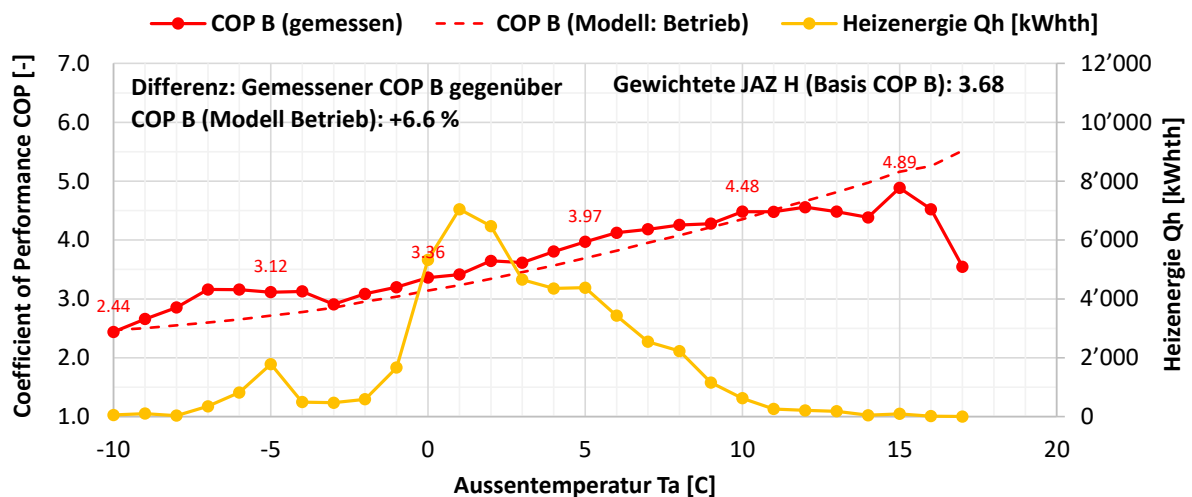


Diagramm 18: Mittlerer Coefficient of Performance (Heat pump) und gesamte Heizenergie in Abhängigkeit der Aussentemperatur der Wärmepumpe in einem Folgeprojekt von Surseepark.

Zusammenfassend lässt sich festhalten: 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, hat die Genossenschaft Migros Luzern bereits ein Folgeprojekt, basierend auf derselben CO₂-Technologie, mit Erfolg umgesetzt. Die gemessene Effizienz-Steigerung zwischen den reversiblen CO₂-Wärmepumpen im Surseepark und dem ersten Folgeprojekt unterstreichen, dass aus dem ersten Projekt relevante Schlussfolgerungen gezogen wurden und diese erfolgreich ins Folgeprojekt eingeflossen sind. Dank der langfristigen Sichtweise, sowie dem nachhaltigen Engagement der Genossenschaft Migros Luzern betreffend natürlicher Kältemittel, kann eine Technologie Schritt für Schritt optimiert und hinsichtlich Energieeffizienz getrimmt werden. Insgesamt konnten Berührungsängste mit CO₂ als Kältemittel im Komfortbereich abgebaut und deren Anwendung in der Praxis gefördert werden.



7 Ausblick und zukünftige Umsetzung

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 Effizienzsteigerung erzielt werden kann. Nebst den energetischen Optimierungen konnte beim Folgeprojekt auf redundante Betriebsarten, wie in Kapitel 2 erläutert, 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 einleitend erwähnten, 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.



8 Nationale und internationale Zusammenarbeit

Die Bestrebungen hin zu natürlichen Kältemittel ist nicht nur in der Schweiz, sondern dank der F-Gas-Verordnung auch auf europäischer Ebene ein Thema. Die in diesem Projekt gewonnen Erkenntnisse und Erfahrungen sind national wie international von Bedeutung.

9 Literaturverzeichnis

- [1] Umwelt-Auswirkungen neuer HFO-Kältemittel, Michael Kauffeld, Mihaela Dudita, Sebastian Gund, 2021
- [2] Revival of carbon dioxide as a refrigerant, Gustav Lorentzen, NTH, Trondheim, 1993
- [3] Klimabulletin Winter 2020/2021, Meteo Schweiz
- [4] Klimabulletin Sommer 2021, Meteo Schweiz
- [5] Bitzer Verdichter Selektionssoftware Version: v6.17.3 rev2611
- [6] Referat und Tagungsband: CO₂ -Wärmepumpe für Warmwasser und Gebäudeheizung: Übersicht und Konzept, J. Schönenberger, Wärmepumpentagung 2019.