



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech

Zwischenbericht vom 26. Mai 2023

CO₂-Kälteanlage mit integriertem Energie- Transfer-System ETS



Quelle: Transgourmet Schweiz



Datum: 26.05.2023

Ort: Bern

Subventionsgeberin:

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

Subventionsempfänger/innen:

Frigo-Consulting AG
Feldstrasse 30, CH-3073 Gümligen
www.frigoconsulting.ch

Transgourmet Schweiz AG
Lochackerweg 5, 3302 Moosseedorf
www.transgourmet.ch

Autor/in:

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

BFE-Projektbegleitung:

Men Wirz, men.wirz@bfe.admin.ch
Stephan Renz, info@renzconsulting.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/502435-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.



Zusammenfassung

Das Energie-Transfer-System (ETS) wandelt die Hochtemperatur-Abwärme der CO₂-Kälteanlage mittels eines Rankine-Kreisprozesses in nützliche Kälte um und entlastet dabei wiederum die CO₂-Kälteanlage. Das Potential der Hochtemperatur-Abwärme wird genutzt und dabei die Exergieverluste der CO₂-Kälteanlage reduziert, wodurch der Stromverbrauch vom Gesamt-System reduziert wird. Das ETS wurde entwickelt, gebaut und vor Ort in die, im Rahmen einer Erneuerung, neu installierte CO₂-Kälteanlage integriert. Im Anschluss an die Installation wurde die CO₂-Kälteanlage zusammen mit dem ETS in Betrieb genommen. Seit der ersten Inbetriebnahme wurden bereits verschiedene Parameter angepasst und optimiert, um einen stabilen Betrieb zu gewährleisten. Seither läuft das ETS im Automatik-Betrieb, Betriebsdaten werden erfasst und der Betrieb wird laufend optimiert. Die Auswertung der ersten Betriebsdaten deuten darauf hin, dass die prognostizierte Effizienzsteigerung von ca. 8% realistisch ist und erreicht werden kann. Aufgrund der saisonbedingten, tiefen Lastzustände der Kälteanlage und den tiefen Aussentemperaturen im Winter, werden die besten Ergebnisse in der Übergangszeit erwartet. Die detaillierte Auswertung des Gesamt-Systems, über alle Jahreszeiten hinweg, erfolgt im laufenden Kalenderjahr 2023. Das Konzept vom ETS ist nicht zuletzt deshalb vielversprechend, da es auch losgelöst von CO₂-Kälteanlagen, Hochtemperatur-Abwärme aus beliebigen Prozessen in nützliche Kälte umwandeln vermag.

Résumé

Le système de transfert d'énergie (STE) transforme l'utilisation des déperditions de chaleur de l'installation de froid au CO₂ en énergie frigorifique utilisable à l'aide du cycle de Rankine, et décharge ainsi l'installation de froid au CO₂. Le potentiel d'utilisation des déperditions de chaleur est utilisé et, à cet effet, les pertes d'énergie de l'installation de froid au CO₂ sont réduites, ce qui veut dire que la consommation d'électricité du système global est réduite. Dans le cadre d'une rénovation, le STE a été développé pour être construit et intégré dans la nouvelle machine de froid au CO₂. Raccordés l'un à l'autre, l'installation de froid au CO₂ et le STE ont été mis en service ensemble. Depuis la première mise en service, plusieurs paramètres ont été adaptés et optimisés afin de garantir un fonctionnement optimal. Depuis, le STE fonctionne en mode automatique, des données de fonctionnement sont enregistrées et le fonctionnement est constamment optimisé. L'évaluation des premières données de fonctionnement indique que l'amélioration du rendement pronostiquée à env. 8% est réaliste et qu'elle peut être atteinte. En raison des faibles besoins frigorifiques et saisonniers et des températures extérieures basses en hiver, les meilleurs résultats sont obtenus en période de transition. L'évaluation détaillée du système global au fil des saisons suivra courant de l'année 2023. Le concept du STE est prometteur, notamment car il est capable, tout en étant séparé de l'installation de froid, de transformer des déperditions de chaleur de quelque processus que ce soit en énergie frigorifique utilisable.



Summary

The energy transfer system (ETS) converts the high-temperature waste heat of the CO₂ refrigeration system into useful cooling capacity by means of a rankine cycle and in turn relieves the CO₂ refrigeration system. The potential of the high-temperature waste heat is utilised and the exergy losses of the CO₂ refrigeration system are reduced, thus reducing the electrical power consumption of the entire system. The ETS was developed, built, and integrated into the newly installed CO₂ refrigeration system on site. Following the installation, the CO₂ refrigeration system was commissioned together with the ETS. Since the first commissioning, various parameters have already been adjusted and optimised to ensure stable operation. Since then, the ETS has been running in automatic mode, operating data are recorded, and operation is continuously optimised. The evaluation of the first operating data indicates that the forecast efficiency increase of approx. 8% is realistic and may be achieved. Due to the seasonal, low load conditions of the refrigeration system and the low outside temperatures in winter, the best results are expected in the transitional period. The detailed evaluation of the entire system, across all seasons, will take place in the current calendar year 2023. The concept of the ETS is promising not least because it is also able to convert high-temperature waste heat from any process into useful cooling, independently of CO₂ refrigeration systems.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	3
Résumé.....	3
Summary	4
Inhaltsverzeichnis	5
Abkürzungsverzeichnis und Begriffsdefinitionen	6
1 Einleitung	7
1.1 Ausgangslage, Hintergrund und Motivation des Projekts	7
1.2 Projektziele	8
1.3 Abgrenzung und Projektion auf andere Anwendungen.....	8
2 Anlagenbeschrieb	10
2.1 Anwendung.....	10
2.2 CO ₂ -Kälteanlage mit ETS	10
2.3 Aufbau Energie-Transfer-System (ETS)	12
2.4 Rankine-Kreisprozess	14
2.5 Mess-, Steuer- und Regelkonzept.....	19
3 Durchgeführte Arbeiten	21
3.1 Konzipierung.....	21
3.2 Planung.....	21
3.3 Bau und Lieferung	21
3.4 Inbetriebnahme.....	22
4 Bewertung der bisherigen Ergebnisse.....	22
4.1 Generelle Bedingungen im Winter	22
4.2 Druckdifferenz.....	23
4.3 Fazit	24
5 Weiteres Vorgehen	24
5.1 Übergangszeit und Sommer.....	24
5.2 Auswertung und Optimierung	25
5.3 Schlussbericht	25
6 Nationale und internationale Zusammenarbeit	25
6.1 EuroShop Düsseldorf 2023	25
6.2 Tagung des deutschen Kälte- und Klimatechnischen Vereins DKV	25
6.3 Artikel in Fachzeitschrift.....	25
7 Literaturverzeichnis	26



Abkürzungsverzeichnis und Begriffsdefinitionen

Abwärme	Überschüssige Wärme resultierend aus der Kühlung, welche zur gegebenen Zeit nicht anderweitig genutzt wird.
Abwärmenutzung	Abwärme resultierend aus der Kühlung, welche zur gegebenen Zeit genutzt wird. Gängige Nutzungen sind Aufbereitung von Warmwasser, Gebäudeheizung oder beliebige Wärmesenken (Drittverbraucher). In diesem Bericht schematisch meist nur mit einem Wärmetauscher dargestellt.
BFE	Bundesamt für Energie.
CO ₂	Kohlendioxid als Kältemittel, auch bekannt unter R744.
CO ₂ -Kälteanlage	Transkritische CO ₂ -Booster-Kälteanlage für Plus- und Minuskühlung, ausgestattet mit Ejektoren und Parallelverdichtung und Abwärmenutzung für die Gebäudeheizung.
DKV	Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein.
Ejektor(en)	Wenn nicht explizit anders erwähnt, dann bezieht sich der Begriff Ejektoren auf die Heissgas-Ejektoren vom ETS, nicht zu verwechseln mit den Ejektoren der CO ₂ -Kälteanlage.
ETS	Energie-Transfer-System.
Heissgas-Ejektor(en)	Ejektoren vom Energie-Transfer-System, nicht zu verwechseln mit den Ejektoren der CO ₂ -Kälteanlage.
Hochdruck	Hochdruck von CO ₂ - Kälteanlage (herkömmliche Bezeichnung).
Hydraulisch getrennt	Die Fluide können sich nicht vermischen.
Hydraulisch verbunden	Die Fluide können sich vermischen.
Kältemittel	Die Untersuchungen im Rahmen dieses Pilot- und Demonstarionsprojektes basieren auf dem Kältemittel CO ₂ (R744). Dies sowohl in der CO ₂ -Kälteanlage als auch im ETS. Gewisse zusammenhänge lassen sich auf andere Fluide übertragen.
LT	Low Temperature, Minuskühlung, Tiefkühlung.
Mitteldruck	Mitteldruck von CO ₂ -Kälteanlage (herkömmliche Bezeichnung).
MT	Medium Temperature, Pluskühlung, Normalkühlung.
Organic Rankine Cycle (ORC)	Kreisprozess mit einem (organischen) Fluid zur Umwandlung von Wärme in Strom. Im Durchlaufen des Kreisprozesses wird das Fluid verdampft und wieder verflüssigt.
PS	Maximal zulässiger Druck.
R744	Kohlendioxid als Kältemittel, auch bekannt unter CO ₂ .
Rankine-Kreisprozess	Kreisprozess mit einem Fluid zur Umwandlung von Wärme in Strom. Im Durchlaufen des Kreisprozesses wird das Fluid verdampft und wieder verflüssigt.



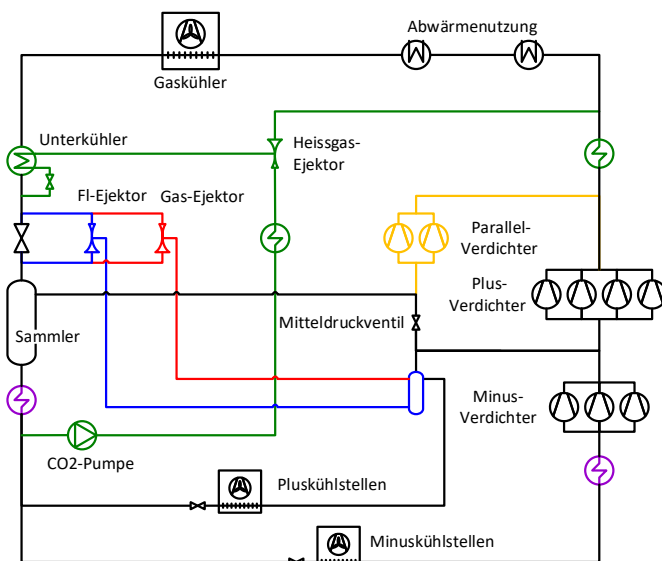
Saug- / Verdampfungsdruck	Saugdruck der Ejektoren vom ETS.
Treibdruck	Entspricht dem Hochdruck vom ETS. Nicht zu verwechseln mit dem Hochdruck der CO ₂ -Kälteanlage.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage, Hintergrund und Motivation des Projekts

Grosse Kälteanlagen sind in der Schweiz gemäss dem Bericht «Elektrizitätsbedarf fürs Kühlen in der Schweiz» des BFE aus dem Jahr 2012 für einen Strombedarf von ca. 1.3 TWh pro Jahr verantwortlich, was einem Anteil am Gesamtstrombedarf von ca. 2% entspricht. Zusätzlich dazu sind Kälteanlagen noch teilweise mit klimaschädlichen Kältemitteln befüllt. Im Gegensatz dazu ist für Kälteanlagen im Supermarktbereich in der Schweiz seit Jahren das natürliche Kältemittel CO₂ die standardmässige Wahl. CO₂ wird in der Schweiz seit ungefähr dem Jahr 2006 breit für diesen Zweck eingesetzt, beziehungsweise hat seit diesem Zeitpunkt eine Wiederbelebung von CO₂ als einem der ältesten Kältemittel stattgefunden. Während diesen 16 Jahren wurden die CO₂-Kältesysteme stets weiterentwickelt, wobei neben der Erhöhung der Zuverlässigkeit der Fokus insbesondere auf der Steigerung der Energieeffizienz lag. Die wesentlichen Meilensteine dieser energetischen Optimierung sind insbesondere die Parallelverdichtung und später deren Kombination mit Ejektoren sowie die Teilflutung von Kühlstellen. Die Abbildung 1 fasst die wichtigsten energetischen Entwicklungsschritte der CO₂-Technologie zwischen 2006 und 2022 in Retail- und Industriellen Anwendungen zusammen. Verschiedene Studien sowie Pilot- und Demonstrationsprojekte in Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Energie haben diesen Entwicklungen zusätzlich vorangetrieben. Diese Technologien ermöglichen eine Reduktion der Expansionsverluste, welche aufgrund der hohen Drucklage typisch sind für CO₂-Kälteanlagen. Trotz dieser Optimierungen verursachen Kälteanlagen für Supermärkte und Cash and Carry Märkte immer noch ein wesentlicher Anteil des Strombedarfs. Dies ist insbesondere aus dem Grund so, da die Kälteanlagen durchgehend in Betrieb sind und so im Prinzip eine Bandlast darstellen. Dadurch ist die weitere energetische Optimierung solcher Kälteanlagen unabdingbar. (1) (2)

Dieses Pilot- und Demonstrationsprojekt zielt darauf ab, die Exergieverluste bei der Abgabe der Wärme von CO₂-Kälteanlagen zu reduzieren. Mit Exergieverlusten ist in diesem Zusammenhang der Umstand gemeint, bei dem die Abwärme der Anlage durch die hohe Temperatur von bis zu über 100°C ein hohes Potential besitzt, welches nicht genutzt wird, da die Abwärme an die Aussenluft abgegeben wird, welche maximal eine Temperatur von ca. 36°C hat. Ein minimaler Exergieverlust wäre somit eine Abgabe der Abwärme mit einer Temperatur, welche nur knapp über der Aussentemperatur zu liegen kommt. Um diese Verluste zu reduzieren, wird eine neue Technologie verwendet, welche die hohen Temperaturen durch den Einsatz eines innovativen Heissgas-Ejektors nutzt und in Kälteleistung umwandelt. Diese erzeugte Kälteleistung wird dann wiederum genutzt, um die Kälteanlage intern zu Unterkühlen resp. Entlasten. Durch diesen Vorgang bleibt die Leistung und Menge der Abwärme in etwa gleich, jedoch befindet sich die Temperatur auf einem niedrigeren Niveau, was dann zu der beschriebenen Reduzierung des Exergieverlusts bei solchen Systemen führt. Das Projektteam hat sich in den letzten Jahren intensiv mit der Nutzung dieser hochwertigen Abwärme befasst und hat sich neues Wissen in diesem Bereich angeeignet. Dabei wurden verschiedene Möglichkeiten der Integration geprüft und berechnet. Die Integration der beschriebenen Technologie mit dem Namen «Energie-Transfer-System» (ETS) in eine Kälteanlage stellt eine vielversprechende Lösung für dieses Problem dar.



Größenordnung der Effizienzsteigerung im Vergleich zu Standard CO2-Booster:

Parallelverdichtung	5 %
Flüssigejektor	8 %
Gasejektor	7 %
Teilgeflutete Tiefkühlung	5 %
Energie-Transfer-System	8 %

Effizienzsteigerung Total 33 %

Abbildung 1: Energetische Entwicklungsschritte der CO₂-Technologie zwischen 2006 und 2022 in Retail- und Industriellen Anwendungen.

1.2 Projektziele

Das Projekt hat das Ziel, den Strombedarf einer Kälteanlage nach dem aktuellen Stand der Technik um 8% zu reduzieren, indem die genannten Exergieverluste reduziert werden. Durch das Projekt sollen mehrere Aspekte beantwortet werden. In erster Linie soll aufgezeigt werden, ob der Bau und Betrieb eines Energie-Transfer-Systems (ETS) in einer Kälteanlage möglich ist. In einem weiteren Schritt soll ermittelt werden, welche Regelparameter für einen effizienten Betrieb möglich und sinnvoll sind. Zusätzlich soll geprüft werden, welche Bedingungen gegeben sein müssen, damit eine Integration eines ETS betriebswirtschaftlich tragbar ist. Insbesondere soll ebenfalls die allfällige Stromreduktion auf Basis einer Feldanlage validiert werden.

1.3 Abgrenzung und Projektion auf andere Anwendungen

Dieses Pilot- und Demonstrationsprojekt, sprich auch dieser Bericht fokussiert auf die Kombination von einer CO₂-Kälteanlage mit einem ETS. Dies ist unter anderem auf die Tatsachen zurückzuführen, dass zum einen die Verbreitung von CO₂-Kälteanlagen zunimmt und zum anderen, diese wiederum verhältnismässig hohe Heissgas-Temperaturen (Exergieverluste) aufweisen. Die Überlegungen und Anwendungen in diesem Bericht in Bezug mit CO₂-Kälteanlagen und/oder ETS, lassen sich grösstenteils mit entsprechendem Anpassen der Begrifflichkeiten und/oder thermodynamischer Interpretation auf andere Kälteanlagen, Wärmepumpen oder vergleichbare Prozesse resp. ähnliche Anwendungen übertragen. Je nach System und Anwendung macht es gegebenenfalls Sinn, Begrifflichkeiten wie zum Beispiel «Abwärme» als «Wärme» zu betrachten resp. zu bezeichnen. Der Einfachheit und Übersichtlichkeit halber bezieht sich in diesem Bericht, wenn nicht lokal explizit anders erwähnt, die Formulierung auf die Anwendung resp. Sichtweise einer CO₂-Kälteanlage in Kombination mit einem ETS. Wohlwissend, dass es noch weitere Anwendungen gibt, welche somit nicht explizit erwähnt werden.



Die Temperatur- und Druck-Niveau in diesem Pilot- und Demonstrationsprojekt wie auch in diesem Bericht fokussiert auf die Anwendung in Kombination, mit der in diesem Bericht erläuterten, objektspezifischen CO₂-Kälteanlage (PS ≤ 130 bara). In einzelnen Passagen im Bericht oder dessen Abbildungen sind Drücke (resp. Druckdifferenzen) und/oder Temperaturen (resp. Temperaturdifferenzen) explizit erwähnt oder lassen sich daraus ungefähr herleiten oder interpretieren. Diese stellen in der Regel einen «energetisch relevanten» Betriebspunkt des Systems dar, wohlwissend dass das System sich auch in anderen Betriebspunkten befinden kann. Je nach Anwendung macht es Sinn die Druck- und Temperatur-Niveau auf die entsprechende Anwendung anzupassen. Darüber hinaus lassen sich Überlegungen, Funktionsprinzipien oder Erkenntnisse grösstenteils auf andere Anwendungen mit anderen Temperatur- und Druck-Niveaus übertragen.

Der Fokus dieses Pilot- und Demonstrationsprojekt sowie dieses Berichtes zielt auf den energetisch relevanten Betrieb ab. Allfällige Komponenten mit anderweitiger Funktion wie beispielsweise für die Betriebssicherheit, werden wenn nicht explizit anders erwähnt, in diesem Bericht nicht erwähnt und/oder nicht in Abbildungen dargestellt. Die im Rahmen dieses Pilot- und Demonstrationsprojekt effektive Implementation vom ETS in die CO₂-Kälteanlage erfolgte mit diversen zusätzlichen Komponenten, sodass beispielsweise im Fall einer Störung seitens ETS, die CO₂-Kälteanlage vollständig losgelöst vom ETS betrieben werden kann und letztere volle Leistungsfähigkeit erlangt. Mit zunehmend positiven Betriebserfahrungen dieser Kombination kann bei weiteren (Folge-) Projekten auf zusätzliche Komponenten verzichtet werden.

Der Einfachheit und Übersichtlichkeit halber bezieht sich die gewählte Formulierung im Bericht sowie die darin dargestellten Abbildungen in der Regel auf die Einzahl (1) einzelner Komponenten, wohlwissend dass je nach Komponenten teilweise mehrere Komponenten parallel eingebunden und zum Einsatz kommen. Mehrere Komponenten parallel können beispielsweise vorgesehen werden, um sowohl die Nennleistung als auch eine bessere Teillast-Charakteristik oder höhere Betriebssicherheit zu erlangen.

Nebst der Betriebssicherheit wurden bei diesem Pilot- und Demonstrationsprojekt diverse zusätzliche Komponenten implementiert, um einerseits verschiedene Betriebsarten zu untersuchen und andererseits diese messtechnisch umfangreich und detailliert zu Erfassen. Diese werden im Bericht und dessen Abbildungen in der Regel nur dann erwähnt resp. abgebildet, wenn es an der jeweiligen Stelle, für den dargestellten Sachverhalt erforderlich oder hilfreich ist. Ansonsten wird zu Gunsten der der Einfachheit und Übersichtlichkeit nur die energetisch relevanten Komponenten dargestellt.



2 Anlagenbeschrieb

2.1 Anwendung

Die Transgourmet Schweiz AG betreibt in der Schweiz 31 Prodega Märkte (Cash und Carry). Der Prodega Markt Dietikon wurde im Jahr 1997 in einem Neubau eröffnet. Der Prodega Markt Dietikon war schon damals seiner Zeit voraus, denn es war der erste Markt mit einem begehbaren Kühlschrank. Im sogenannten Coolway werden Frischeprodukte wie Gemüse oder Salat der Kundschaft präsentiert und er dient als Zugang zu den Kühl- und Tiefkühlprodukten. Durch den «vorgekühlten» Coolway wird der Wärmeeintrag zu den Kühl- und Tiefkühlprodukten reduziert, was zu einer nennenswerten Energieeinsparung beiträgt. Das Konzept vom Coolway hat sich in den folgenden Jahren bewährt und wurde im Laufe der Zeit auch in den anderen Prodega Märkten umgesetzt.

Der heutige Prodega Markt Dietikon präsentiert der Kundschaft auf einer Verkaufsfläche von rund 4'800 m² die Waren. Wovon rund 800 m² als Coolway auf ca. +14°C gekühlt werden. Die Kühl- und Tiefkühlräume haben eine Fläche von rund 600 m² und werden auf ca. +1°C respektive -23°C gekühlt. Im Rahmen einer Erneuerung wurde 2022 das gesamte Kältesystem ersetzt. Das neue Kältesystem setzt dabei komplett auf das natürliche Kältemittel CO₂, welches sich als Standard im Lebensmittelbereich durchgesetzt hat. Darüber hinaus kommt im Prodega Markt Dietikon das erste Energie-Transfer-System zum Einsatz, womit Transgourmet Schweiz AG seiner Pionier-Rolle erneut gerecht wird und der Prodega Markt Dietikon einmal mehr seiner Zeit voraus ist. (3)

2.2 CO₂-Kälteanlage mit ETS

Die CO₂-Kälteanlage ist eine transkritische CO₂-Booster-Kälteanlage für Plus- und Minuskühlung, ausgestattet mit Ejektoren und Parallelverdichtung und Abwärmenutzung für die Gebäudeheizung. Das in den Minuskühlstellen verdampfte CO₂ gelangt über eine erste Verdichtung (Minus-Verdichter) in die Saugleitung der Pluskühlstellen. Von dort wird das CO₂, zusammen mit dem in den Pluskühlstellen verdampfte CO₂, mittels Plus-Verdichter auf Hochdruck verdichtet. Es folgt in erster Priorität die Abgabe der Wärme an die Gebäudeheizung (Abwärmenutzung) bevor der Rest der Wärme an die Aussenluft abgegeben wird. Im Ejektor wird das CO₂ von Hoch- auf Mitteldruck entspannt, wodurch eine Saugwirkung entsteht. Die Saugwirkung wird genutzt, um einen Teil vom Sauggas der Plus-Verdichter auf Mitteldruck zu verdichten, von wo es zusammen mit Flash-Gas von den Parallelverdichter auf Hochdruck verdichtet wird. Die Plus- und Minuskühlstellen werden mit einer geringen Überhitzung (Teilgeflutet) betrieben. Dieser Prozess entspricht jenem einer CO₂-Kälteanlage nach heutigem Stand der Technik. Die Abbildung 2 stellt ein vereinfachtes Prinzipschema einer CO₂-Kälteanlage dar. In dieser Darstellung wurde bewusst auf die separate Darstellung vom Parallelverdichter sowie der Saugleitung vom Ejektor verzichtet, da dies im Zusammenhang mit den darauf aufbauenden, folgenden Abbildungen betreffend ETS keine Relevanz hat. Wie die Parallelverdichter oder Ejektoren im System eingebunden werden können, kann der Abbildung 1 entnommen werden. Relevante Eckwerte zur CO₂-Kälteanlage betreffend bspw. Leistung oder Temperaturen können im weiteren Verlauf dieses Kapitels entnommen werden. (1) (2) (4)

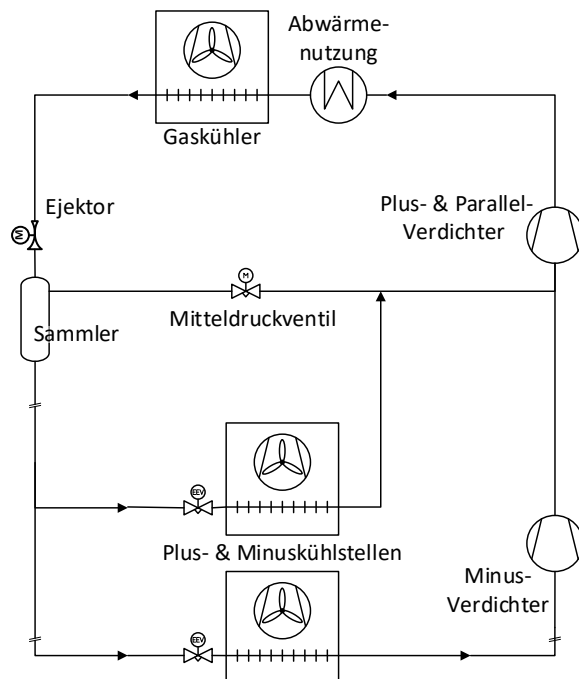


Abbildung 2: Vereinfachtes Schema einer CO₂-Kälteanlage, ohne detaillierter Darstellung von Parallelverdichter und Ejektor Saugleitung.

Die CO₂-Kälteanlage wird als Basissystem durch die folgenden Eigenschaften charakterisiert:

- Transkritische CO₂-Booster Kälteanlage für Plus- und Minuskühlung
- Abwärmenutzung für Gebäudeheizung
- Ejektoren in Kombination mit Parallelverdichtung
- Nennleistung Minuskühlung (LT): 62 kW @ To: -28°C
- Nennleistung Pluskühlung (MT): 128 kW @ To: -5°C, Ta: +36°C, Tgc: +38°C
- Nennleistung Abwärmenutzung: 142 kW @ TRL/TVL: +27°C/+42°C

Das ETS (siehe Abbildung 4) wurde so aufgebaut und implementiert, dass es als Zusatzeinheit zu der standardmässig ausgeführten CO₂-Kälteanlage (siehe Abbildung 3) hinzugefügt wird. Das ETS steht in einer Wechselwirkung mit der Kälteanlage, indem es hochgradige Abwärme von der Kälteanlage bezieht und Kühlleistung zurückgibt. Um diesen Austausch zu ermöglichen, hat das ETS verschiedene Schnittstellen mit der Kälteanlage. In der Abbildung 5 ist ein vereinfachtes Prinzipschema einer herkömmlichen CO₂-Kälteanlage in schwarz dargestellt. Darin farblich hervorgehoben ist der zusätzliche ETS-Teil, welcher vor Ort als separate Einheit installiert wurde. Zusammenfassend lässt sich sagen, das Basissystem (Referenz) entspricht dem neusten Stand der Technik resp. der neusten Generation von CO₂-Kälteanlagen wie sie in Retail- und Industrie-anwendungen zum Einsatz kommen. Rein technisch betrachtet wäre es denkbar, die im Rahmen dieses Projektes im Detail untersuchte Technologie (ETS) auch mit vorhergehenden Generationen von CO₂-Kälteanlagen zu kombinieren. Jedoch ist eine pauschale Empfehlung Stand heute nicht möglich und es wird eine objektspezifische Beurteilung möglicher Massnahmen zur Effizienzsteigerung empfohlen. Dazu sollen auch die vorhergehenden Entwicklungsschritte berücksichtigt werden. (1) (2) (4)



Abbildung 3: CO2-Booster Kälteanlage mit Abwärmenutzung, Ejektoren und Parallelverdichtung für Plus- und Minuskühlung nach dem neusten Stand der Technik.



Abbildung 4: Energie-Transfer-System (ETS), inklusiv zugehörige Steuerung, aufgebaut auf einem separaten Rahmen.

2.3 Aufbau Energie-Transfer-System (ETS)

Das ETS ist gemäss Abbildung 5 eingebunden. Flüssiges Kältemittel wird nach dem Sammler der CO₂-Kälteanlage entnommen (gelber Leitungsabschnitt) und mithilfe einer CO₂-Pumpe auf einen Druck befördert, welcher über dem Hochdruck der CO₂-Kälteanlage liegt (roter Leitungsabschnitt). Um Verwechslungen mit dem Hochdruck der CO₂-Kälteanlage zu vermeiden, wird wenn nicht explizit anders erläutert, der Druck am Austritt der CO₂-Pumpe als Treibdruck bezeichnet. Das flüssige CO₂



auf Treibdruck wird dann zuerst im Wärmetauscher «Vorwärmer» mit der Abwärme der Minusverdichter vorgewärmt und danach im Wärmetauscher «Überhitzer» mit der Abwärme der Plus- & Parallelverdichter weiter erwärmt resp. überhitzt. Durch das Zuführen der Wärme wird das flüssige Kältemittel in einen gasförmigen Zustand gebracht, wodurch es ein erhöhtes Expansionspotential hat. Dieses Potential wird genutzt, indem das gasförmige Kältemittel im Heissgas-Ejektor wieder auf Hochdruck der CO₂-Kälteanlage expandiert wird. Diese Expansion erfolgt im Heissgas-Ejektor - nicht zu verwechseln mit dem herkömmlichen Ejektor der CO₂-Kälteanlage - wodurch mittels Expansionsenergie eine Saugwirkung entsteht. Der Druck der Saugleitung vom Heissgas-Ejektor liegt unterhalb vom Hochdruck der CO₂-Kälteanlage (grüner Leitungsabschnitt). Diese Saugwirkung wird genutzt, um Kältemittel anzusaugen und einen Kühleffekt zu generieren. Dieser Kühleffekt wird wiederum genutzt die CO₂-Kälteanlage mittels des Wärmetauschers «Unterkühler» zu unterkühlen, wodurch das Gesamtsystem effizienter wird. Diese interne Unterkühlung ist so eingebunden, dass der Verdampfungsdruck ca. 5-10 bar unter dem Hochdruck der Anlage liegt. Das verdampfte Kältemittel im internen Unterkühler wird mithilfe des Heissgas-Ejektors auf den Hochdruck der CO₂-Kälteanlage verdichtet. Weitere Details zu diesem ETS-Prozess werden im Kapitel 2.4 beschrieben.

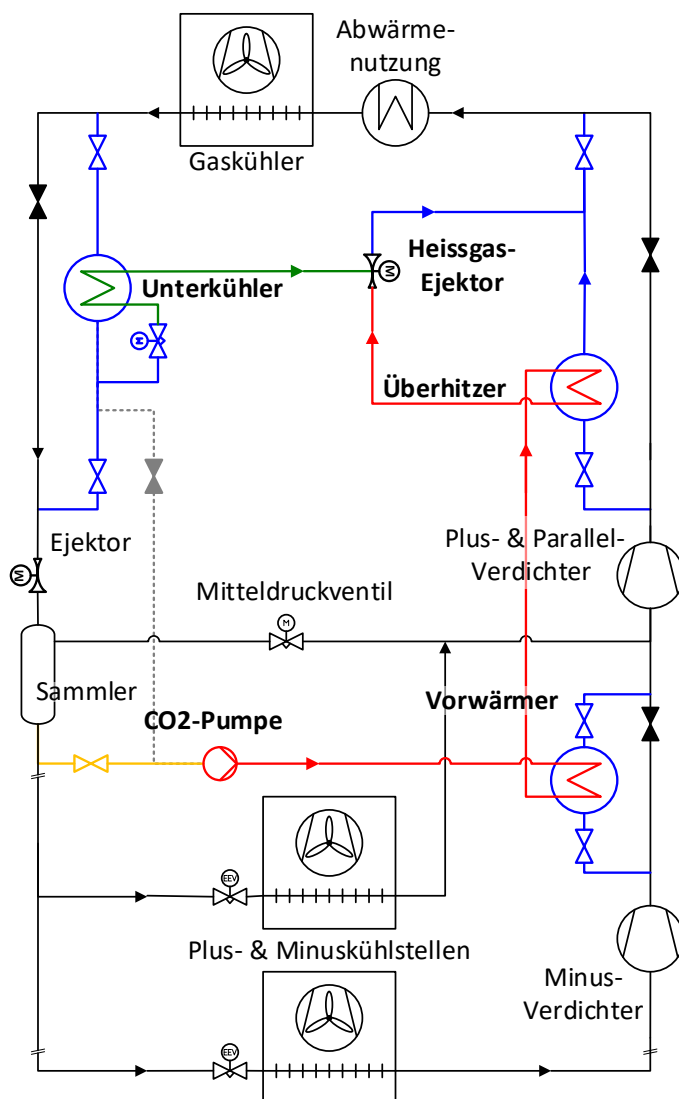


Abbildung 5: Vereinfachtes Schema einer CO₂-Kälteanlage mit integriertem ETS (einzelne Leitungsabschnitte farblich hervorgehoben).



2.4 Rankine-Kreisprozess

Der in Kapitel 2.3 beschriebene Kreislauf vom ETS entspricht einem sogenannten Rankine-Kreisprozess, welcher einem Dampfprozess entspricht, so wie er in thermischen Kraftwerken zu finden ist. In der Abbildung 6 ist ein solcher Kreisprozess vereinfacht dargestellt. Im Wesentlichen besteht der Zweck dieser Anordnung, welcher einem sogenannten rechtslaufenden Kreisprozess entspricht, darin, eine Temperaturdifferenz in Arbeit umzuwandeln. Diese Arbeit kann in verschiedenen Formen vorliegen. Bei thermischen Kraftwerken ist es in der Regel das Ziel, die Arbeit über kinetische Energie in elektrische Energie umzuwandeln. Beim ETS hingegen wird im Gegensatz dazu eine Saugwirkung erzeugt, welche wiederum einen Kältekreis antreibt.

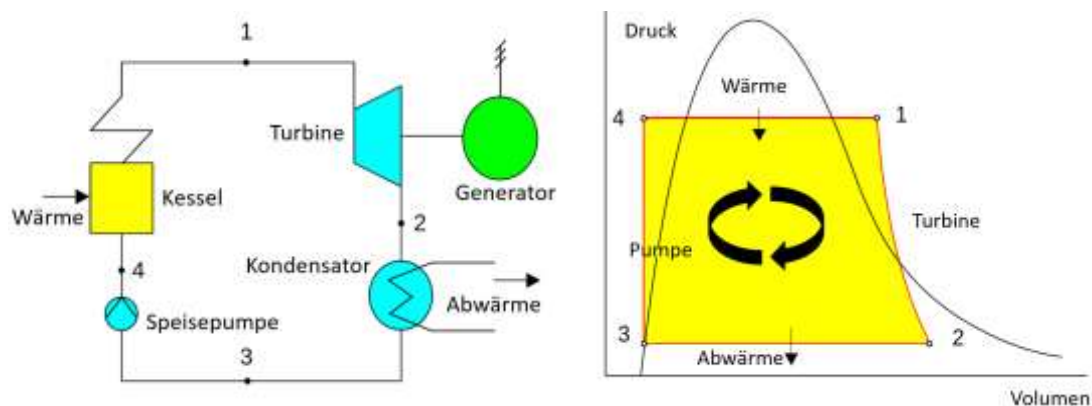


Abbildung 6: Vereinfachte Darstellung eines Rankine Kreisprozesses (Quelle: Inspiriert von wikipedia.org)

Auf der linken Seite der Abbildung 6 sind die wesentlichen Komponenten von einem Rankine-Kreisprozess dargestellt und der «rechtslaufende» Kreislauf mit Kompression durch Pumpe, Erwärmung, Expansion und Wärmeabgabe ist erkennbar. Auf der rechten Seite der Abbildung 6 ist erkennbar, wie der Kreislauf in einem Druck-Volumen-Diagramm aussieht. Der Nutzen entsteht durch den Umstand, dass die Kompression von Flüssigkeit in der Pumpe deutlich weniger Energie benötigt als die Expansion derselben Menge an heissem Gas in der Turbine freisetzt. Der Energieeintrag als Wärme von Punkt 4 zu Punkt 1 wird abzüglich der entzogenen Energie der Turbine in der gleichen Menge bei Punkt 2 bis Punkt 3 wieder abgegeben. Der Unterschied liegt jedoch darin, dass das Temperaturniveau bei der Wärmeabgabe deutlich tiefer liegt. Nun ist das ETS im Prinzip nichts anderes als der hier gezeigte Rankine-Kreisprozess, der statt mit Wasser und Wasserdampf mit flüssigem und gasförmigem CO₂ betrieben wird. Die in Abbildung 6 dargestellte Speisepumpe entspricht der CO₂-Pumpe, der Kessel den beiden Wärmetauschern «Vorwärmer» und «Überhitzer», statt einer Turbine wird ein Heissgas-Ejektor eingesetzt und der Kondensator entspricht dem Gaskühler, welche als einzige Komponente bereits im Kältesystem vorhanden ist und somit vom ETS und der Kälteanlage «geteilt» wird.

Da es sich im Gegensatz zum ETS bei der Kälteanlage um einen sogenannten linkslaufenden Kreisprozess handelt und das ETS auch wieder einen linkslaufenden Unterkühlungskreisprozess antreibt, ist es im Prinzip so, dass in dieser Anlage drei Kreisprozesse ineinandergreifen und sich antreiben. Der äussere, linkslaufende Kreisprozess der Kälteanlage wird von den extern gespiesenen Verdichtern angetrieben. Durch die hochwertige Abwärme von diesem Prozess kann der innenliegende, rechtslaufende Rankine-Kreisprozess angetrieben werden, welcher Abwärme in Arbeit umwandelt. Diese Arbeit liegt dann wiederum in Form von Verdichtungsenergie vor, welche mit der internen Unterkühlung einen weiteren linkslaufenden Kreisprozess antreibt. In der Abbildung 7, welche den Prozess in einem Druck-Enthalpie Diagramm darstellt, sind diese drei Kreisprozesse erkennbar.



Mit Links- und rechtslaufend ist hierbei jeweils gegen und mit dem Uhrzeigersinn gemeint. Der blaue Teil beschreibt vereinfacht die CO₂-Kälteanlage als linkslaufenden Prozess. Der rote, rechtslaufende Kreisprozess, welcher von der CO₂-Pumpe angetrieben wird entspricht dem Rankine-Kreisprozess und der gelbe, wiederum linkslaufende Kreisprozess ist die durch den Rankine-Kreisprozess angetriebene Unterkühlung.

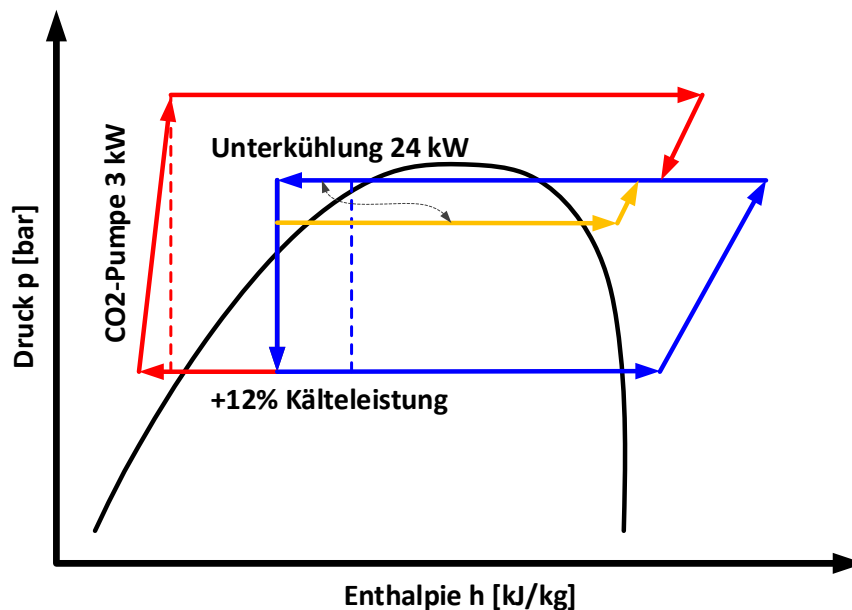


Abbildung 7: Schematische und vereinfachte Darstellung der ineinandergreifenden Kreisprozesse im log p h Diagramm, bei einer Einbindung der CO₂-Pumpe ab Mitteldruck (Sammler).

Während der Entwicklung des Energie-Transfer-Systems hat man verschiedene Ausführungsvarianten untersucht. Besonderen Fokus galt dabei der Implementation der CO₂-Pumpe sowie die Abnahme der Abwärme der CO₂-Kälteanlage.

Bei der Implementation der CO₂-Pumpe wurden zwei Möglichkeiten in Betracht gezogen. Dies betrifft die Zuleitung der CO₂-Pumpe resp. von welchem Druckniveau/Ort in der CO₂-Kälteanlage die Flüssigkeit auf den Treibdruck befördert wird. Beide Varianten wurden in der Demonstrationsanlage umgesetzt. Mittels manuellem Absperrventil kann zwischen den zwei Zuflüssen umgeschaltet werden. Die Varianten der Zuflüsse zur CO₂-Pumpe sind in der Abbildung 9 dargestellt. Zum einen kann die Flüssigkeit ab dem Mitteldruck (Sammler) der CO₂-Kälteanlage, zum anderen direkt ab Hochdruck, nach der Unterkühlung der CO₂-Pumpe zugeführt werden. Letztere Variante ist gestrichelt dargestellt. Die Vorteile der letzteren Variante an Hochdruck liegen auf der Hand. Es ist davon auszugehen, dass der elektrische Energieverbrauch der CO₂-Pumpe geringer ausfällt und somit das Gesamtsystem noch effizienter betrieben werden kann. Die Nachteile der letzteren Variante sind weniger offensichtlich. Die Auswahl an verfügbaren, preiswerten CO₂-Pumpe am Markt, welche für die geforderten Betriebsbedingungen freigegeben sind, ist aktuell klein. Hinweise zu möglichen Herstellern/Fabrikaten sind natürlich wünschenswert.

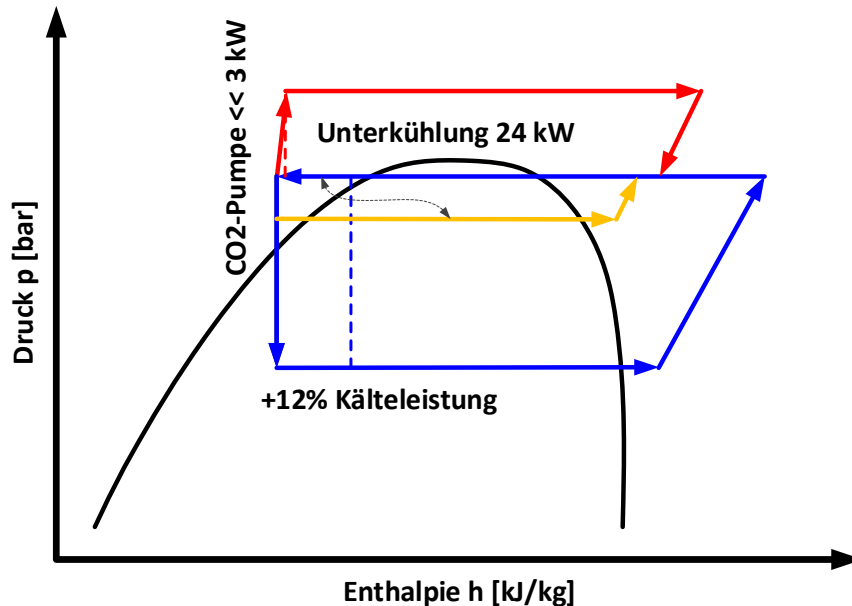


Abbildung 8: Schematische und vereinfachte Darstellung der ineinandergreifenden Kreisprozesse im log p h Diagramm, bei einer Einbindung der CO2-Pumpe direkt ab Hochdruck.

In der Abbildung 9 werden verschiedene Varianten (A bis E) für die Einbindung der Wärmetauscher (Wärmquellen) dargestellt. Die Durchströmung der Wärmetauscher erfolgt in der Reihenfolge der Nummern (z.B. bei der Variante E: E1, E2, E3, E4). Die Variante A besteht beispielsweise nur aus einem Wärmetauscher A1. Aus rein technischer Sicht ist es sinnvoll, möglichst viele Wärmequellen zu nutzen, geordnet gemäss zunehmender Temperatur. Dies ganz im Sinne der Reduktion von Exergieverluste, welche grosse Temperaturdifferenzen über Wärmetauscher möglichst vermeiden möchte. In der untenstehenden Abbildung 9 wäre dies die Option E. Da jedoch der energetische Grenznutzen von jedem weiteren Tauscher abnimmt, die Kosten jedoch zunehmen, kann es sinnvoll sein eine reduzierte Anzahl an Wärmetauscher einzusetzen. Wie in der Abbildung 2 erkennbar ist, hat man sich bei dieser ersten Pilotanlage für die Option B mit zwei Tauscher (B1 und B2) entschieden, was einem Kompromiss zwischen energetischem Optimum und Kosteneffizienz entspricht.

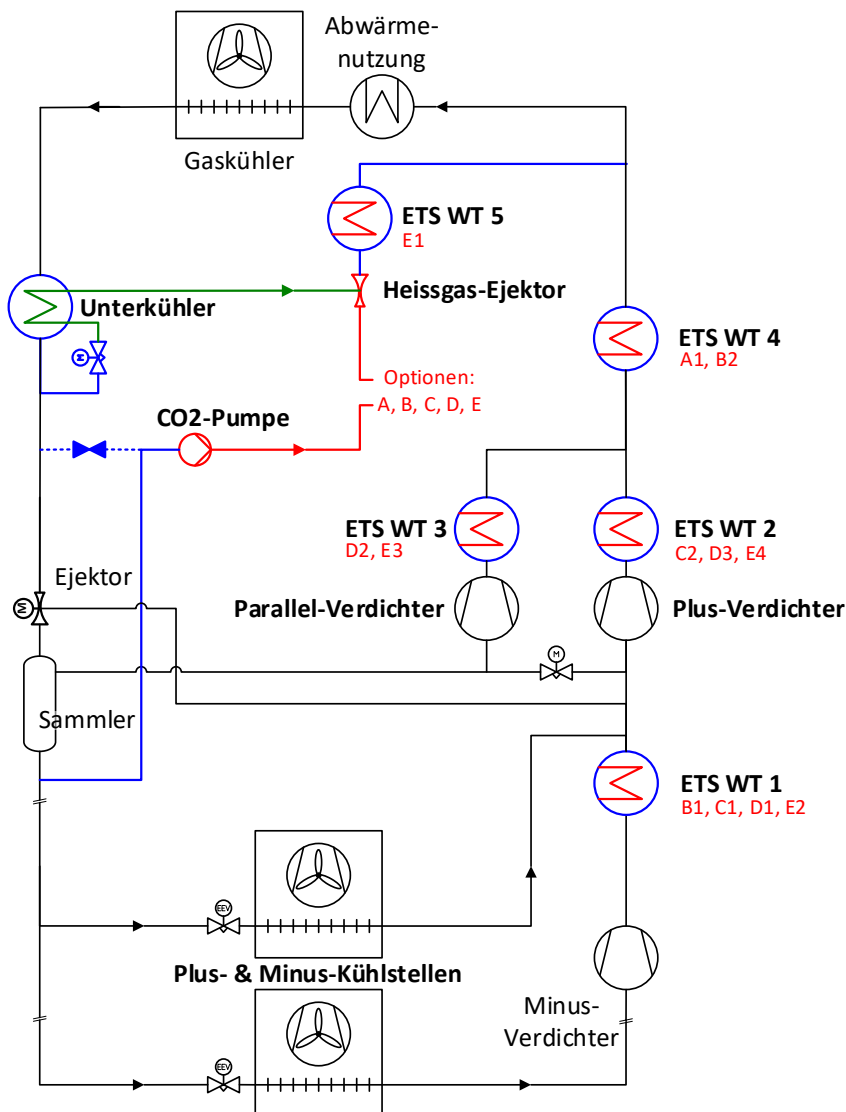


Abbildung 9: Verschiedene Einbindungsarten des ETS A bis E

Bei dieser ersten Pilotanlage wurde das ETS in die CO2-Kälteanlage implementiert und hydraulisch miteinander verbunden. Das ein und selbe Kältemittel kann sowohl durch die CO2-Kälteanlage wie auch durch das ETS zirkulieren. Die CO2-Kälteanlage und das ETS stellen einen grossen hydraulischen Kreislauf dar und sind miteinander hydraulisch verbunden. Erwähnenswert an dieser Stelle ist die Tatsache, dass das ETS jedoch auch als getrenntes resp. eigenständiges System eingesetzt werden kann. Zum einen kann das ETS hydraulisch vollständig getrennt in die CO2-Kälteanlage eingebunden werden, wie beispielsweise in der Abbildung 10 dargestellt. Dazu können Wärmetauscher zur Abwärmee-nutzung wie auch der Gaskühler in den ETS-Prozess integriert werden. Darüber hinaus kann das ETS auch losgelöst von einer CO2-Kälteanlage, mit beliebiger, möglichst Hochtemperatur-Abwärmee betrieben werden und diese in nützliche Kälte umwandeln. Die Abbildung 11 stellt das Grundprinzip eines solchen Prozesses dar. Je nach Anwendung und verfügbarere Abwärmee macht es natürlich Sinn, die Anzahl Wärmetauscher entsprechend anzupassen resp. die Art der Wärmetauscher dem Prozess anzupassen. Die Varianten aufgeführt in Abbildung 9 lassen sich auf die in Abbildung 10 und Abbildung 11 dargestellten Prozesse grösstenteils übertragen.

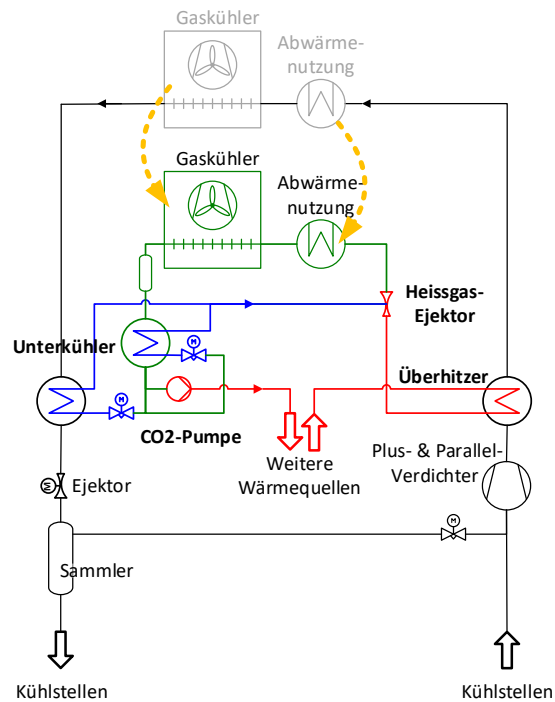


Abbildung 10: Das ETS als hydraulisch getrennter Kreisprozess, implementiert in eine CO₂-Kälteanlage.

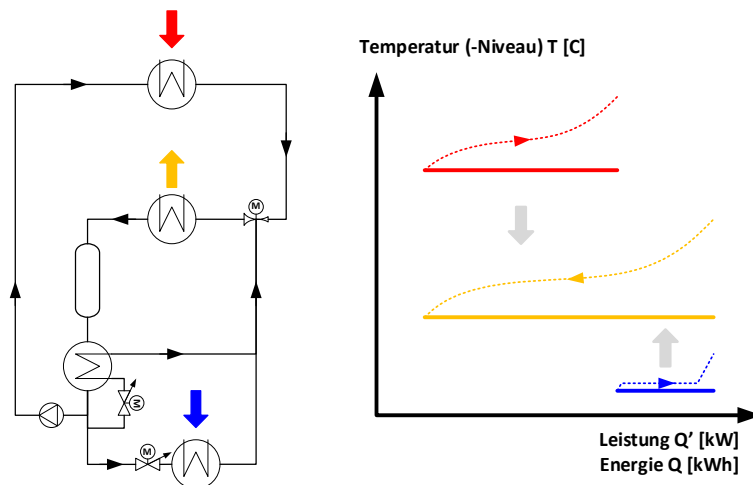


Abbildung 11: Das ETS als eigenständiger Kreisprozess, mit welchem mittels beliebiger (Hochtemperatur-) Abwärme nützliche Kälte aufbereitet werden kann (links). Das Diagramm rechts stellt schematisch die jeweiligen Temperatur-Niveau der Wärmequellen und -senken dar.

Ersetzt man den Heissgas-Ejektor im ETS durch eine beliebige Expansionsmaschine und treibt damit einen Generator an, so landet man im Prinzip wieder bei einem herkömmlichen Rankine -Kreisprozess zur Stromproduktion basierend auf CO₂. Weiterentwickelt auf spezifische Anwendungen, basierend auf spezifischen Fluiden ist der Prozess auch bekannt als Organic-Rankine-Cycle (ORC). Die Umwandlung von Hochtemperatur-Abwärme in Strom ist nicht der Fokus dieses Pilot- und Demonstrationsprojektes und wird im Rahmen dessen nicht untersucht.



2.5 Mess-, Steuer- und Regelkonzept

Die folgende Zusammenfassung vom Mess-, Steuer- und Regelkonzept beschränkt sich auf den Systemabschnitt vom ETS. Wenn nicht explizit anders erwähnt, wird die CO₂-Kälteanlage nach herkömmlichen, allgemein bekannten Mess-, Steuer- und Regelkonzepten betrieben.

Das ETS verfügt über drei Betriebszustände. Diese sind «Aus», «Anfahren» und «Ein». Der Betriebszustand «Aus» ist selbsterklärend. Dieser stellt sich ein, wenn mindestens ein Kriterium von diversen nicht erfüllt ist, um einen sicheren Betrieb zu gewährleisten. Der Betriebszustand «Anfahren» dauert ca. 3 Minuten und dient dazu, das ETS in Betriebsbereitschaft zu bringen. Vorausgesetzt sämtliche Kriterien sind nach wie vor erfüllt, so folgt im Anschluss an den Betriebszustand «Anfahren» der Betriebszustand «Ein». Dieser wird möglichst lange aufrechterhalten, bis mindestens ein Kriterium nicht mehr erfüllt wird. Im weiteren Verlauf dieses Berichtes wird der Fokus, wenn nicht explizit anders erwähnt, auf energetisch relevanten Betriebszustand «Ein» gelegt. Darüber hinaus wird im Folgenden nur auf die thermodynamisch relevanten Funktionen vom erwähnten Betriebszustand «Ein» eingegangen. Auf betriebs- und sicherheitsrelevante Funktionen, welche energetisch und thermodynamisch jedoch nicht von Interesse sind, wird im Folgenden nicht eingegangen.

Durch die vorhergehende Abgrenzung beschränken sich die thermodynamisch und energetisch relevanten Komponenten im Betriebszustand «Ein» auf die CO₂-Pumpe, die Heissgas-Ejektoren sowie das elektronische Expansionsventil (EEV) vor dem Wärmetauscher Unterkühler. Diese sind in der Abbildung 12 ersichtlich, beschriftet mit roter Farbe.

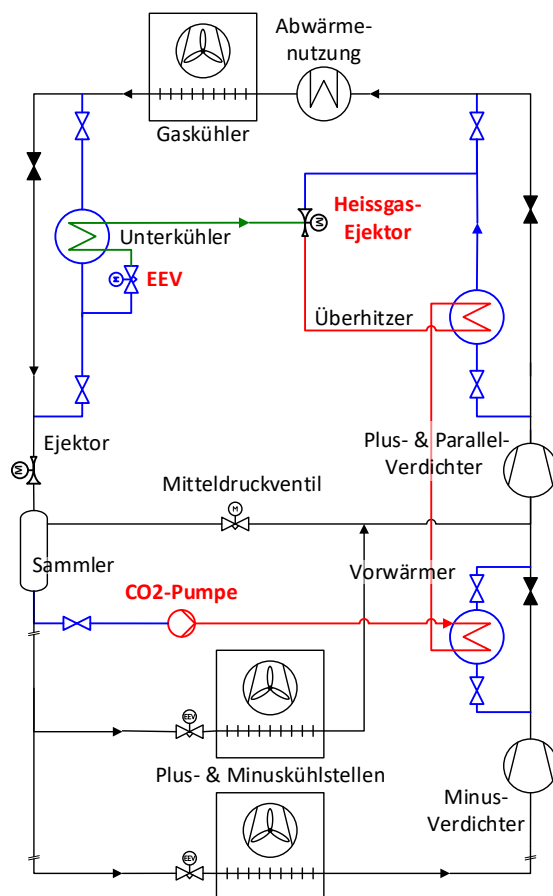


Abbildung 12: ETS integriert in die CO₂-Kälteanlage mit den energetisch relevanten Komponenten, beschriftet mit roter Farbe.



Mit den drei Komponenten (CO₂-Pumpe, Heissgas-Ejektor und EEV) und deren Zusammenspiel können drei energetisch relevante Betriebsparameter (Haupt-Regelgrößen) geregelt werden. Diese sind die Treibtemperatur sowie der Treibdruck am Eintritt in den Heissgas-Ejektor und zum anderen der Hebedruck vom Heissgas-Ejektor resp. das Druckniveau im Unterkühler sowie die Saugtemperatur auf der Ejektor-Saugseite.

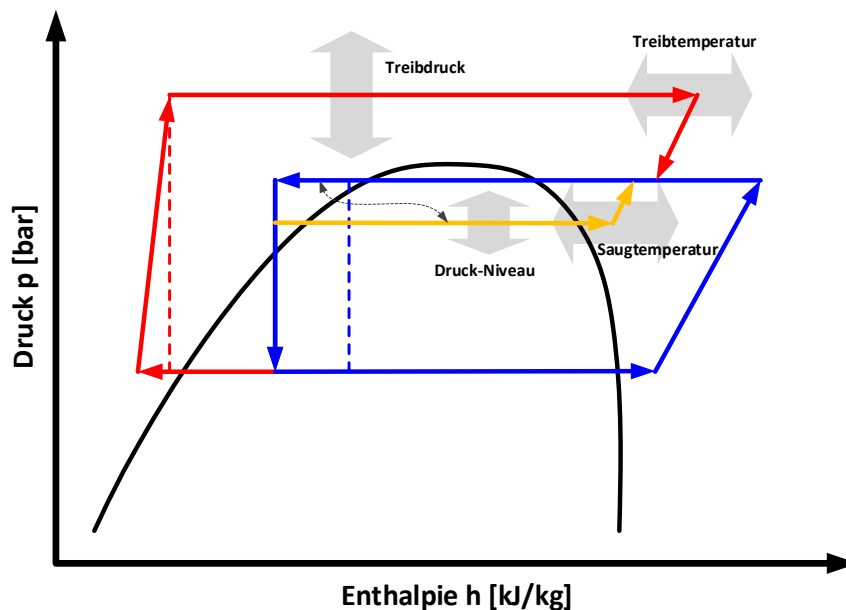


Abbildung 13: Schematische und vereinfachte Darstellung im log p h Diagramm, mit den energetisch relevanten Haupt-Regelgrößen.

Die Drehzahl der CO₂-Pumpe resp. der von der CO₂-Pumpe beförderte Massenstrom kann so gewählt werden, dass die Treibtemperatur, gemessen an einem oder mehreren Punkten zwischen der CO₂-Pumpe und dem Eintritt in den Heissgas-Ejektor, einem Sollwert entspricht (stetige Regulierung) oder in einem Sollwert-Bereich zu liegen kommt (stufenweise Regulierung). Alternativ dazu kann die Drehzahl in Abhängigkeit der Last der CO₂-Kälteanlage hoch und runter gefahren werden oder aus einer beliebigen Kombination genannter Abhängigkeiten erfolgen. Der Treibdruck (sub- oder transkritisch) kann massgeblich durch den Öffnungsgrad vom Heissgas-Ejektor resp. der Drehzahl der CO₂-Pumpe beeinflusst werden, sodass der Treibdruck einem Sollwert entspricht (stetige Regulierung) oder in einem Sollwert-Bereich zu liegen kommt (stufenweise Regulierung). Alternativ dazu kann der Öffnungsgrad vom Heissgas-Ejektor in Abhängigkeit der Last der CO₂-Kälteanlage hoch und runter gefahren werden oder aus einer beliebigen Kombination genannter Abhängigkeiten erfolgen. Die Saugwirkung vom Heissgas-Ejektor wird massgeblich von den Betriebsbedingungen der CO₂-Kälteanlage, der Treibtemperatur und dem Treibdruck bestimmt. Das effektive Druck-Niveau im Unterkühler (sub- oder transkritisch) wird massgeblich durch die vorhergehenden Einflussgrößen sowie dem Öffnungsgrad vom EEV bestimmt. Mit dem Öffnungsgrad vom EEV kann die Hebedruckdifferenz, den vom Ejektor gesaugten Massenstrom sowie die Saugtemperatur beeinflusst werden, sodass eine dieser Regelgrößen einem Sollwert entspricht (stetige Regulierung) oder in einem Sollwert-Bereich zu liegen kommt (stufenweise Regulierung). Diese Regulierung erfolgt entweder über eine klassische Überhitzungsregelung zwischen EEV und Heissgas-Ejektor oder aber über eine Differenzdruckmessung oder Absolutdruckmessung. Die Steuerung dieser ersten Pilot- und Demonstrationsanlage ist mit den oben erwähnten Mess-, Steuer- und Regelkreisen ausgerüstet und es können nahezu beliebige Kombinationen ausgewählt und untersucht werden.



3 Durchgeführte Arbeiten

3.1 Konzipierung

In einem ersten Schritt wurde mit der Auslegung der Kälteanlage die Basis gelegt, um das ETS entsprechend zu dimensionieren. Der Grund dafür liegt darin, dass das ETS in einem angemessenen Verhältnis zur Grösse der CO₂-Kälteanlage stehen muss, da die Abwärmeleistung der Kälteanlage in diesem Projekt den thermischen Antrieb des ETS darstellt. Nachdem die Kälteanlage ausgelegt wurde, konnten die Komponenten des ETS, wie Wärmetauscher, Ventile und Leitungen dimensioniert werden. Eine besondere Herausforderung war die Suche nach einem geeigneten Hersteller für die CO₂-Pumpe, welche die gegebenen Anforderungen und Betriebsbereiche erfüllte und in der entsprechenden Grösse verfügbar war. Eine weitere Schlüssel-Komponente stellt der Heissgas-Ejektor dar. Dieser wurde entwickelt und zugeschnitten auf die häufig zu erwartenden Betriebsbedingungen, um über einen Grossteil der Betriebsstunden eine möglichst hohe Saugwirkung zu erzielen. Ein weiterer wichtiger Schritt in der Konzipierung war die Erstellung des Regelkonzepts, welche die Funktion des ETS sicherstellt. Dazugehörig mussten die entsprechenden Sensoren wie Temperatur- und Drucksensoren eingeplant werden, welche für den Betrieb und die Sicherheit der Anlage unerlässlich sind. Das Regelkonzept hält im Detail fest, wie die verschiedenen Sensoren zusammenspielen und das ETS regeln. Zusätzlich zum Regelkonzept wurde ein Messkonzept erstellt, welches das Vorgehen für die Auswertung des ETS enthält. Darin sind die verschiedenen Bezugsgrössen und die dazugehörigen, allenfalls zusätzlich benötigter Sensoren festgehalten. Dazu gehören auch Strommessungsgeräte, welche den Strombedarf einzelner Komponenten ermitteln können.

3.2 Planung

Bei der Planung bestand insbesondere die Herausforderung, die Entwicklung des ETS mit der ohnehin im gleichen Zeitraum neu installierten CO₂-Kälteanlage in Einklang zu bringen. Dies betraf zum einen die terminliche Abstimmung. Zum anderen aber auch die technische Abstimmung und prüfen der Voraussetzungen und Schnittstellen der CO₂-Kälteanlage und vom ETS. Durch ein gezieltes Projektmanagement konnten die zeitlichen Abläufe eingehalten und die Qualität gewährleistet werden.

3.3 Bau und Lieferung

Der Bau der CO₂-Kälteanlage wie auch das ETS erfolgte durch den einen und selben Kälteanlagenbauer. Der Bau des Systems wurde durch Frigo-Consulting eng begleitet. Herausforderungen bestanden insbesondere in der begrenzten Verfügbarkeit von Komponenten, welche durch die globalen Verzögerungen in den Lieferketten und dem knappen Angebot im Allgemeinen verursacht wurden. Die terminkritische Lieferung und Inbetriebnahme der CO₂-Kälteanlage konnte sichergestellt werden, da in erster Priorität die CO₂-Kälteanlage gebaut und geliefert und erst in einem zweiten Schritt das ETS geliefert wurde.



Abbildung 14: Einbringung des ETS in den Maschinenraum, an den endgültigen Standort.

3.4 Inbetriebnahme

Nach der Einbringung des ETS wurde das ETS mit der sich bereits in Betrieb befindenden CO₂-Kälteanlage verbunden und isoliert. Die Inbetriebnahme erfolgte nach einer eingehenden Prüfung aller Komponenten auf deren Steuerungstechnischen Funktion. Insbesondere wurde hier auf die korrekte Ansteuerung aller Komponenten geachtet. In einem weiteren Schritt konnte die Anlage langsam hochgefahren werden, mit dem Ziel, einen stabilen Betrieb zu ermöglichen. Gleichzeitig konnten dabei die verschiedenen Parameter optimiert werden.

4 Bewertung der bisherigen Ergebnisse

4.1 Generelle Bedingungen im Winter

Das ETS wird durch die Abwärme der CO₂-Kälteanlage angetrieben. Je mehr Abwärme anfällt und je höher die Temperatur dieser Abwärme ist, desto grösser ist das vorhandene Einsparpotential durch das ETS. Diese Bedingungen ergeben sich insbesondere dann, wenn die Kälteanlage auf einem hohen Druckniveau und mit einer grossen Kältelast arbeitet. Ein hohes Druckniveau ist im Wesentlichen wiederum an zwei Betriebsfälle geknüpft. Zum einen ist dies der Sommerbetrieb bei hohen Aussentemperaturen und zum anderen der Abwärmenutzungsbetrieb im Winter. Eine hohe Kältelast als zweiter relevanter Faktor ergibt sich insbesondere im Sommer, da dann der Wärmeeintrag in das Gebäude erhöht ist und somit mehr Wärme und Feuchtigkeit in die Kühlräume und Kühlmöbel eindringt. Im Gegensatz dazu ist im Winter die Kältelast in der Regel gering und trägt somit wenig zur Potentialerhöhung und zu einem optimalen Betrieb des ETS bei. Wenn dann noch zusätzlich ein reduzierter Abwärmenutzungsbetrieb gefahren wird, dann herrschen nicht optimale Bedingungen für das ETS im Winter. Die folgenden Ergebnisse sind in einer solchen Phase im Winter entstanden und dienen somit im Prinzip als Minimalergebnisse. Es wird davon ausgegangen, dass in



der Übergangssaison und insbesondere im Sommerhalbjahr deutlich bessere Bedingungen für den Betrieb des ETS vorhanden sind und somit auch wesentlich aussagekräftigere Ergebnisse zu erwarten sind. Nichtsdestotrotz konnten bereits zum jetzigen Zeitpunkt die hier präsentierten Ergebnisse erzielt und ausgewertet werden.

4.2 Druckdifferenz

Eine Grösse, welche einfach gemessen werden kann, ist die Erzeugung einer Druckdifferenz des spezialanfertigten Heissgas-Ejektors im ETS. Der erzeugte Differenzdruck bezieht sich auf den Unterschied zwischen Saugdruck und Austrittsdruck und umschreibt im Prinzip das Verdichtungspotential des Ejektors.



Abbildung 15: Links eine vereinfachte Darstellung des Heissgas-Ejektors und rechts als Original.

Um die erzeugte Druckdifferenz zu ermitteln, wurde während dem Betrieb des ETS die erzeugte Druckdifferenz zwischen der Saugseite des Ejektors und der Austrittsseite des Ejektors gemessen und über dem Druckniveau der Triebdruckseite des Ejektors aufgetragen. Die Funktionsweise eines Ejektors soll hier noch der Vollständigkeit halber erklärt werden: Im Prinzip regelt der Heissgas-Ejektor den Triebdruck des ETS, in dem er den Massenstrom drosselt. Der Austrittsdruck liegt naturgemäss tiefer und entspricht in diesem Fall gerade dem Hochdruck der Kälteanlage. Beim Weg durch den Ejektor erfährt das gedrosselte Medium nun eine sehr hohe Geschwindigkeit. Um hier nicht dem Energieerhaltungsgesetz zu widersprechen, wonach ein Massenstrom nicht ohne Energiezufuhr beschleunigt werden kann, stellt sich die Frage, wo die Energie für diese Beschleunigung herkommt. Tatsächlich stammt die Beschleunigungsenergie aus einer Druckabsenkung an der Stelle mit der höchsten Geschwindigkeit. Nach dem Gesetz von Bernoulli entsteht so ein Unterdruck an dieser Stelle, welcher unter dem Austrittsdruck liegen kann. Somit kann ein Medium von der Saugdruckseite auf das Niveau des Austrittsdruck verdichtet werden. Aus diesem Grund ist eine Darstellung der erzeugten Druckdifferenz ein relevanter Indikator für das vorhandene Verdichtungspotential, welches durch den Heissgas-Ejektor erzeugt wird.

Im Diagramm 1 ist ersichtlich, dass die erzeugte Druckdifferenz grösstenteils ungefähr im Bereich zwischen 4 und 6 bar liegt. Einigermassen erstaunlich ist der Umstand, dass dies, zumindest im geprüften Bereich, unabhängig vom Triebdruck des Ejektors ist. Offensichtlich kann bei den vorliegenden Bedingungen das Potential des Heissgasejektors nicht durch eine Steigerung des Triebdruckes erhöht werden. Es ist jedoch grundsätzlich selbst bei nicht optimalen Bedingungen im Winter ein deutliches Potential in Form einer Druckdifferenz vorhanden.

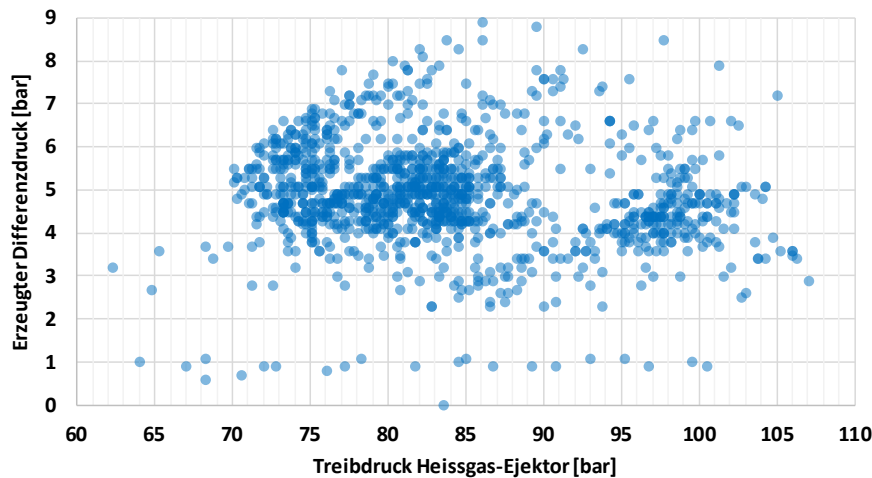


Diagramm 1: Erzeugte Druckdifferenz nach Treibdruck des Heissgas-Ejektors.

4.3 Fazit

Die bisherigen Ergebnisse des Pilot- und Demonstrationsprojektes sind ermutigend. Die Anlage konnte gebaut, installiert und in Betrieb genommen werden. Der Betrieb des Systems bestehend aus CO₂-Kälteanlage und Energie-Transfer-System (ETS) läuft stabil und es gab bislang keine nennenswerte Probleme. Das ETS funktioniert, wie geplant und die gewünschte Wirkung kann gemessen werden. Es ist jedoch noch nicht möglich, die Unterkühlung, die durch das ETS erreicht werden soll, in dem gewünschten Ausmass zu erzielen. Dies ist hauptsächlich auf die momentanen, niedrigen Aussentemperaturen und die geringe Last der Kälteanlage im Winter zurückzuführen. Es wird erwartet, dass in der Übergangszeit und im Sommer, wenn die Aussentemperaturen und die Kältelast ansteigen, die Unterkühlung im prognostizierten Ausmass erreicht werden kann. Insgesamt sind die Entwickler und Autorenschaft mit den bisherigen Ergebnissen zufrieden und sehen ein großes Potenzial dieser Technologie.

5 Weiteres Vorgehen

5.1 Übergangszeit und Sommer

Die Anlage wird nun über die nächsten Monate weiterhin eng verfolgt, wobei der Fokus dabei besonders auf der Übergangszeit und dem Sommer liegt. In der Übergangszeit werden im Gegensatz zum bisherigen Winterbetrieb Aussentemperaturen erwartet, welche in einem Bereich liegen, in dem eine Unterkühlung möglich ist, während gleichzeitig der Hochdruck der Kälteanlage noch in einem Bereich befindet, der nicht allzu weit vom subkritischen Bereich von unter ca. 73 bar entfernt liegt. Der Grund von dieser Bedingung liegt darin, dass bei einem angenommenen Druckhub des Ejektors von 10-15 bar im Sommer die Unterkühlung noch als Verdampfung im subkritischen Bereich stattfinden kann. Ausserdem kann davon ausgegangen werden, dass aufgrund der höheren Aussentemperaturen eine höhere Kältelast anfällt und dadurch auch mehr Abwärme zum Betrieb des ETS zur Verfügung steht.



5.2 Auswertung und Optimierung

Vor dem Hintergrund der besser geeigneten Rahmenbedingungen für das System in der Übergangszeit und im Sommer, kann das System ausgewertet und für eine höhere Kältelast optimiert werden. Es ist zu erwarten, dass durch die dann optimalen Betriebsbedingungen weitere wichtige Erkenntnisse gewonnen werden können.

5.3 Schlussbericht

Nach der Hauptauswertungszeit während dem Sommer 2023 können die gewonnenen Erkenntnisse im darauffolgenden Herbst und Winter in den Schlussbericht integriert werden, dessen Abschluss im Frühling 2024 vorgesehen ist.

6 Nationale und internationale Zusammenarbeit

6.1 EuroShop Düsseldorf 2023

Das Konzept des ETS wurde Ende Februar anlässlich der Messe «EuroShop» 2023 der Öffentlichkeit präsentiert. Die EuroShop ist eine Messe für Investitionsgüter des Handels und finden alle 3 Jahre in Düsseldorf statt. Im Rahmen einer Vorstellung des Projekts wurden erste Messergebnisse präsentiert und die technische Funktionsweise der Anlage erläutert. Der Fokus lag dabei weniger auf der detaillierten Technik des Systems als auf dem effektiv generierten Nutzen für den Kunden.

6.2 Tagung des deutschen Kälte- und Klimatechnischen Vereins DKV

Die jährliche Tagung des DKV ist eine führende Tagung für Kälte- und Klimatechnik in Europa. Dabei werden Beiträge und Initiativen von Universitäten, Fachhochschulen, aber auch von privaten Unternehmen präsentiert, welche jeweils den neusten Stand der Technik der Branche repräsentiert. Diese Tagung ist eine ideale Gelegenheit, um das ETS einem breiten Fachpublikum zu präsentieren. In diesem Rahmen liegt der Fokus der Präsentation auf den technischen Details des Systems. Neben der Präsentation werden diese Details in einem Fachbeitrag festgehalten und veröffentlicht.

6.3 Artikel in Fachzeitschrift

Im Nachgang einer Tagungs-Präsentation wird im Normalfall auf eine Anfrage eines Fachmagazins aus einer gekürzten Version des Fachbeitrags ein Artikel erstellt, welcher einige Monate später veröffentlicht wird. Hier wird mit einem grösseren Feld von branchennahen Fachleuten ein weiteres Zielpublikum erreicht.



7 Literaturverzeichnis

1. **www.aramis.admin.ch.** Prozessoptimierung einer CO₂-Kälteanlage mittels Ejektoren und Liquid-Overfeed. [Online] [Zitat vom: 26. 5 2023.]
<https://www.aramis.admin.ch/Grunddaten/?ProjectID=35841>.
2. —. Effizienzsteigerung einer transkritischen CO₂-Kälteanlage mittels Ejektor. [Online] [Zitat vom: 26. 05 2023.] <https://www.aramis.admin.ch/Grunddaten/?ProjectID=33448>.
3. **Transgourmet Schweiz AG.** www.transgourmet.ch. [Online] [Zitat vom: 26. 5 2023.]
www.transgourmet.ch.
4. **www.aramis.admin.ch.** CO₂ – WP Technischer Stand und Effizienz Luft/Wasser und Sole/Wasser CO₂-Wärmepumpen. [Online] [Zitat vom: 26. 5 2023.]
<https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=43119>.