R744-Kälteanlagen und Wärmepumpen mit Ejektoren

Erfahrungsbericht aus der Praxis

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

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

* Korrespondenzautor

Kurzfassung

Im Jahre 2013 erfolgte die Inbetriebnahme der ersten CO2-Kälteanlage mit Ejektoren in einem Supermarkt in der Schweiz. Seither gewinnen CO2-Kälteanlagen und Wärmepumpen mit Ejektoren international zunehmend an Bedeutung. Die Einbindungsmöglichkeiten von Ejektoren in solchen Systemen sind vielfältig. Einzelne Einbindungsarten haben sich in der Praxis stärker etabliert als andere. Grundsätzlich ermöglichen die Ejektoren, bislang ungenutztes Potential (Drosselverluste) in eine Vorverdichtung oder Druckerhöhung umzuwandeln und dadurch die Gesamteffizienz des Systems zu steigern. Mit der alleinigen Einbindung von Ejektoren in CO2-Kälteanlagen oder Wärmepumpen ist es jedoch noch nicht getan. Die Erfahrung zeigt, dass bislang ungenutztes Potential auch nur dann in einen vollumfänglichen, energetischen Vorteil (Nutzen) umgewandelt werden kann, sofern die einzelnen Systemabschnitte aufeinander und deren Anwendung abgestimmt sind. Besonderen Fokus gilt dabei der Mess-, Steuer- und Regelungstechnik von CO2-Kälteanlagen oder Wärmepumpen mit Ejektoren. Es werden etablierte Einbindungsmöglichkeiten von Ejektoren erläutert und auf deren Besonderheiten, insbesondere in Punkto Mess-, Steuer- und Regelungstechnik im Zusammenhang mit den Ejektoren eingegangen.

Stichwörter:

CO2, R744, Kälteanlage, Wärmepumpe, Ejektor, Mess-, Steuer- und Regelungstechnik

1 Einleitung

Mitte des 19. Jahrhunderts taucht CO2 erstmals als Kältemittel auf und gegen Ende desselben Jahrhunderts entwickelt Richard Mollier die erste Dampftafel für das Kältemittel CO2. In der ersten Hälfte des darauffolgenden 20. Jahrhundert 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. Aktuell wird mit Spannung die zweite Überarbeitung der F-Gas-Verordnung erwartet. 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 Verjährung der Patentschriften von Gustav Lorentzen, erlebt CO2 als Kältemittel eine Renaissance [2].

Aufgrund der hohen Drucklage von R744 und den anfänglich dafür kaum verfügbaren Komponenten wie Verdichter, Wärmetauscher oder Regelventilen, wurde die R744-Technologie zu Beginn hauptsächlich in subkritischen Kaskadensystemen für die Minuskühlung im Retail-Bereich eingesetzt. Im Jahre 2006 folgten die ersten transkritischen R744-Kältenalagen im Retail-Bereich, welche auch die Pluskühlung abdeckten. Zu Beginn waren die zwei Temperaturniveau noch mittels Kaskadenwärmetauscher getrennt. Bald darauf folgte jedoch die erste R744-Booster-Kälteanlage, welche die zwei Temperaturniveaus vereinte. Seit der Etablierung der R744-Booster-Kälteanlage für den Retail-Bereich wird dieses System rege weiterentwickelt. Im Jahre 2009 folgten die ersten Systeme mit Parallelverdichtung und im Jahre 2013 folgte die erste R744-Booster-Kälteanlage mit Ejektoren. Die Kombination aus R744-Booster-Kälteanlage mit Ejektoren und Parallelverdichtung im Retail-Bereich gilt heute als Stand der Technik. Vermehrt kommen auch sogenannte Integral-Systeme zum Einsatz, welche im Falle einer Unterdeckung des Wärmebedarfs zusätzlich noch beispielsweise als Luft-Wasser-Wärmepumpe agieren. Nebst der rasanten Etablierung von R744 im Retail-Bereich, finden R744-Kälteanlagen auch vermehrt in der industriellen Kältetechnik Anwendung [3].

Im Jahre 2013 erfolgte die Inbetriebnahme der ersten CO2-Kälteanlage mit Ejektoren in einem Supermarkt in der Schweiz [4]. Seither gewinnen CO2-Kälteanlagen und Wärmepumpen mit Ejektoren zunehmend an Bedeutung. Heute sind die Ejektoren kaum mehr aus der CO2-Technologie wegzudenken, denn sie tragen massgeblich zu einem effizienten Betrieb der Gesamtsysteme bei. Grundsätzlich ermöglichen die Ejektoren, bislang ungenutztes Potential (Drosselverluste) in eine Vorverdichtung oder Druckerhöhung umzuwandeln und dadurch die Gesamteffizienz des Systems zu steigern. Die Erfahrung zeigt jedoch, dass bislang ungenutztes Potential auch nur dann in einen vollumfänglichen, energetischen Vorteil (Nutzen) umgewandelt werden kann, sofern die einzelnen Systemabschnitte aufeinander und deren Anwendung abgestimmt sind. Besonderen Fokus gilt dabei der Mess-, Steuer- und Regelungstechnik von CO2-Kälteanlagen oder Wärmepumpen mit Ejektoren.

2 Hochdruck-Regelung

Im Bild 1 sind die Dampfdruckkurven verschiedener Kältemittel im Druck-Temperatur-Diagramm dargestellt. Daraus geht hervor, dass der Kritische Punkt von R744 mitten im Temperatur-Bereich gängiger Kälte- und Wärmepumpen-Anwendungen (Wärmesenken) liegt. Unabhängig davon, ob das System mit oder ohne Ejektoren betrieben wird, bedarf es für eine effiziente Anwendung oberhalb vom kritischen Punkt (transkritischer Betrieb) eine Hochdruck-Regelung. Die Hochdruck-Regelung beeinflusst die Effizienz wie auch die Leistung des Systems massgeblich. In Systemen ohne Ejektoren wird die Hochdruck-Regelung von einem oder mehreren parallelen Hochdruck-Regelventilen bewerkstelligt. In Ejektor-Systemen wird die Hochdruck-Regelung teilweise oder vollumfänglich durch einen oder mehrere Ejektoren vorgenommen. Je nach verwendeten Ejektoren und Ejektor-System wird die Hochdruck-Regelung teilweise auch von einem zu den Ejektoren parallel eingebundenem Hochdruck-Regelventil ausgeführt. Je nach eingesetzten Ejektor-Art und je nach Ejektor-System kommen unterschiedliche Hochdruck-Regelalgorithmen zu Einsatz. Auf die einzelnen bevorzugen Algorithmen, je nach Ejektor-Art und Ejektor-System wird im Anschluss in den Kapitel 4 und Kapitel 5 eingegangen. [5]

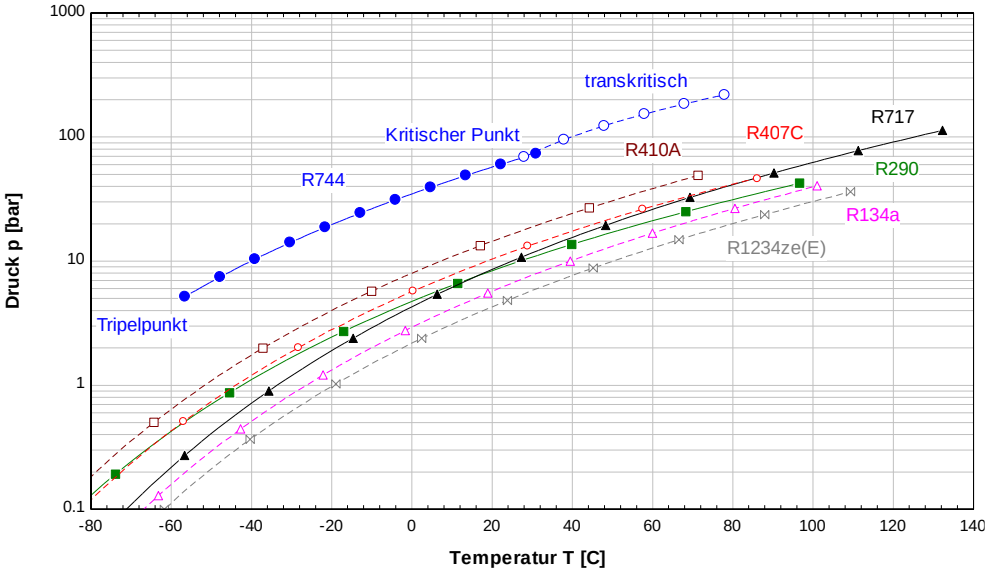

Bild 1: Dampfdruckkurven verschiedener Kältemittel dargestellt im logarithmischen Druck-Temperatur-Diagramm.

3 Ejektor-Funktionsprinzip

Der Treibmassenstrom (Hochdruck) wird in der Düse des Ejektors mittels Druckenergie (A) beschleunigt und in kinetische Energie umgewandelt. Durch die Beschleunigung in der Düse nimmt der Druck nach den Bernoulli'schen Gesetzmässigkeiten ab. Das CO2 strömt mit hoher Geschwindigkeit und tiefem Druck in die Mischkammer. Aufgrund des tiefen Druckes strömt CO2 vom Anschluss B nach (Saugmassenstrom), wird dem Treibmassenstrom beigemischt und ebenfalls beschleunigt. Im Diffusor wird die kinetische Energie wieder in potenzielle Energie umgewandelt, sprich die Strömungsgeschwindigkeit reduziert und den Druck erhöht (Gesamtmassenstrom). Der Saugmassenstrom erfährt dabei eine Druckerhöhung von Punkt B zu C.

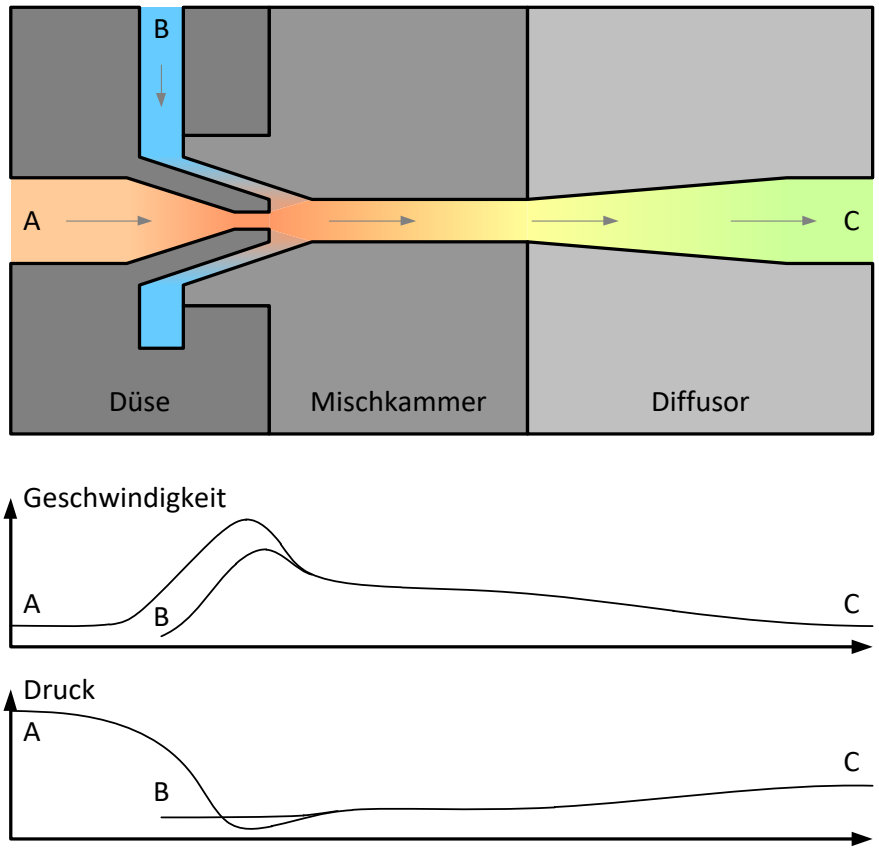

Bild 2: Schnittmodell eines Ejektors. Das CO2 wird von A nach C entspannt und saugt dabei CO2 von B an und mischt es dem Treibmassenstrom bei.

Es ist zu erahnen, dass die optimale Geometrie (z.B. Durchmesser der Düse und Mischkammer, Länge der Mischkammer sowie Winkel des Diffusors, Oberflächenbeschaffenheiten usw.) eines Ejektors stark von den Rand- und Betriebsbedingungen abhängen. Insbesondere beeinflussen die Drücke, Temperaturen und die Dichten des CO2 an den Anschlüssen A & B die die Geometrie des Ejektors. Nebst den nicht beeinflussbaren, übergeordneten Randbedingungen hat der Treibmassenstrom einen relevanten Einfluss auf die Geometrie. Je nach Ejektor-Bauart ist der treibseitige Strömungsquerschnitt und somit der Treibmassenstrom bei gegebenen Rand- und Betriebsbedingungen quasi konstant oder variabel.

4 Ejektor-Bauart

Grob gesagt wird bei der Ejektor-Bauart zwischen regelbaren Ejektoren und nicht regelbaren Ejektoren (statischer Ejektor) unterschieden. Bei den regelbaren Ejektoren ist der Treibmassenstrom (Hochdruck) kontinuierlich regelbar, vergleichbar mit einem herkömmlichen Hochdruck-Regelventil. Bei den nicht regelbaren Ejektoren wird der Treibmassenstrom mittels Magnetventil oder Motorventil ein/ausgeschaltet und mit mehreren Ejektoren parallel eine Art diskontinuierliche Stufenregelung erzielt.

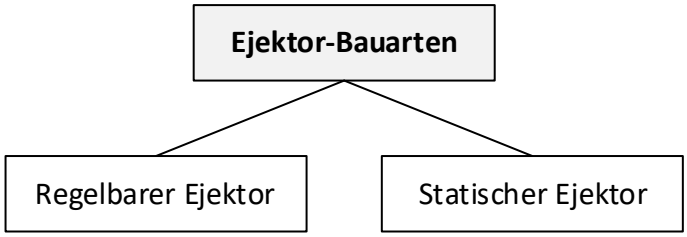

Bild 3: Ejektor-Bauarten unterteilt nach deren Regel-Charakteristik.

4.1 Regelbare Ejektoren

Regelbare Ejektoren zeichnen sich dadurch aus, dass sie der Funktion eines Hochdruck-Regelventils sehr ähnlich kommen. Ungeachtet der Saugwirkung des Ejektors kann der Treibmassenstrom von 0 bis 100% variiert werden. Dadurch kann die Hochdruck-Regelung relativ einfach, resp. gleich wie bei herkömmlichen Systemen ohne Ejektoren bewerkstelligt werden. Die Erfahrung zeigt, dass bei kleinen Treibmassenströmen, resp. bei kleinen Öffnungsgraden von regelbaren Ejektoren die Saugwirkung geringer ausfallen kann. Folge dessen macht es je nach Ejektor-System Sinn, die Ejektoren unter Berücksichtigung der Anwendung, der Verdichter sowie zu erwartenden Teillast auszulegen. Deshalb können je nach Anwendung mehrere regelbare Ejektoren parallel eingebunden werden, um die Teillast ohne nennenswerte Einbusse der Saugwirkung abdecken zu können. Werden mehrere regelbare Ejektoren parallel eingebunden, so gibt es diverse Regel-Algorithmen, um diese anzusteuern. Ein naheliegender Ansatz ist, sobald der erste Ejektor einen einstellbaren Öffnungsgrad erreicht, dass der nächste Ejektor zugeschaltet wird. Entweder teilen sich die in Betrieb befindenden Ejektoren die Regelaufgabe (alle Ejektoren haben den gleichen Öffnungsgrad) oder mindestens einer bleibt bei einem konstanten Öffnungsgrad stehen. Bei Systemen mit unterschiedlich grossen Ejektoren (KVs-Wert) kann die Steuerung auch eine Kombination aus einem oder mehreren Ejektoren wählen, so dass der Hochdruck geregelt und die Saugwirkung maximiert wird.

Bild 4: Beispiel eines stetig regulierbaren Ejektors mit Stellmotor (blau), welcher den Treibseitigen Strömungsquerschnitt je nach Bedarf einstellt. Bild Quelle: E-Jector AG.

4.2 Statische Ejektoren

Statische Ejektoren zeichnen sich dadurch aus, dass sie entweder ein- oder ausgeschaltet sind (On/Off). Das Ein- und Ausschalten von statischen Ejektoren erfolgt in der Regel mit einem treibseitigem Kugel- oder Magnetventil. In der Regel kommen statische Ejektoren in paralleler Kombination mit weiteren statischen Ejektoren und/oder regelbaren Ejektoren und/oder Regelventilen zum Einsatz. Die Hochdruck-Regelung wird aus einer Kombination der zu Verfügung stehenden Ejektoren bewerkstelligt. Dazu gibt es verschiedene Regel-Algorithmen, die sich in der Praxis bewährt haben. Ein einfacher Ansatz funktioniert wie folgt: Das zu den statischen Ejektoren parallel eingebundene Hochdruck-Regelventil oder regelbarer Ejektor regelt den Hochdruck herkömmlich. Beim Überschreiten eines definierbaren Öffnungsgrades (pro Ejektor) vom Hochdruck-Regelventil öffnet ein weiterer statischer Ejektor, resp. schliesst das Hochdruck-Regelventil vollständig, so schaltet ein statischer Ejektor wieder aus. Das Hochdruck-Regelventil reagiert entweder indirekt über den PID-Regler auf das Zu- resp. Wegschalten von statischen Ejektoren oder die Stellgrösse vom Hochdruck-Regelventil kann direkt beim Zu- und Wegschalten beeinflusst werden. Ein zu den statischen Ejektoren parallel arbeitendes Hochdruck-Regelventil oder regelbarer Ejektor hat sich bewährt. Dadurch kann der Hochdruck fein geregelt und ein häufiges Takten der statischen Ejektoren verhindert werden. Je nach Anordnung vom System, Betriebspunkt und Grösse von den statischen Ejektoren kann ein schlagartiges Ein- resp. vor allem Ausschalten zu Pulsationen auf dem System führen.

Bild 5: Beispiel eines statischen Ejektors, dessen Betrieb meist mit einem treibseitig vorgeschalteten Kugel- oder Magnetventil ein- oder ausgeschaltet wird. Bild Quelle: E-Jector AG.

5 Ejektor-Anwendung

Ejektoren können für verschiedene Anwendungen im System verwendet werden. Das folgende Bild 6 zeigt gängige Anwendung von Ejektoren in CO2-Systemen, unterteilt nach deren Funktion. Nebst der klassischen Anwendung von Ejektoren zur Vorverdichtung von Gas (Gas-Ejektor) resp. zum Pumpen von Flüssigkeit (Flüssig-Ejektor), können Ejektoren als Einspritzventil, zur Unterkühlung oder zur Öl-Rückführung eingesetzt werden. Die Möglichkeiten Ejektoren einzusetzen sind vielfältig und die hier dargestellten Anwendungen natürlich nicht abschliessend.

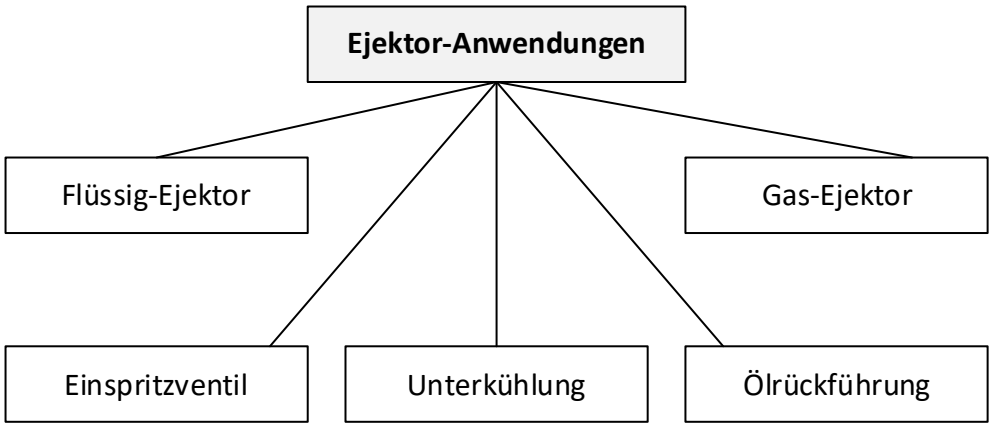

Bild 6: Gängige Ejektor-Anwendungen in CO2-Kälteanlagen oder -Wärmepumpen, unterteilt nach deren Funktion im System.

5.1 Flüssig-Ejektor

Der Flüssig-Ejektor wird so ins System eingebunden, dass er allfällige Flüssigkeitsanteile in der Saugleitung zu den Verdichtern, zurück in den Mitteldruck-Sammler befördert. Der energetische Nutzen durch den Flüssig-Ejektor beruht darauf, dass die Verdampfer mit einer kleineren Überhitzung und mit einer höheren Verdampfungstemperatur betrieben werden können. Allfällige Flüssigkeitsanteile im Sauggas zu den Verdichtern werden im Saugakku ausgeschieden und durch die Flüssig-Ejektoren zurück in den Sammler befördert. Ein Beispiel einer möglichen Einbindung ist im Kapitel 6.2 High-Pressure-Lift-System dargestellt. Der energetische Nutzen durch teilgeflutete Verdampfer kann auch bei einem Low-Pressure-Lift-System ausgespielt werden, wobei dort in der Regel eine Unterteilung in Flüssig- und Gas-Ejektor unüblich ist. Ein Beispiel eines Low-Pressure-Lift-Systems mit Ejektoren die allfällige Flüssigkeit im Sauggas befördern können, ist im Kapitel 6.1 Low-Pressure-Lift-System dargestellt. [4]

5.2 Gas-Ejektor

Der Gas-Ejektor wird so ins System eingebunden, dass er vorwiegend Gas in der Saugleitung der Plus-Verdichter in den Mitteldruck-Sammler befördert, von wo das vorverdichtete Gas dann mittels Parallel-Verdichter auf Hochdruck verdichtet wird. Der energetische Nutzen durch den Gas-Ejektor beruht auf der Vorverdichtung von Gas durch den Gas-Ejektor vom Niveau der Plus-Verdichter zum Niveau der Parallel-Verdichter. Ein Beispiel einer möglichen Einbindung ist im Kapitel 6.2 High-Pressure-Lift-System dargestellt. Der energetische Nutzen durch die Vorverdichtung von Gas zwischen den Verdampfer und den Verdichtern kann auch bei einem Low-Pressure-Lift-System ausgespielt werden, wobei dort in der Regel eine Unterteilung in Flüssig- und Gas-Ejektor unüblich ist. Ein Beispiel eines Low-Pressure-Lift-Systems mit Ejektoren welche unter anderem Gas vorverdichten, ist im Kapitel 6.1 Low-Pressure-Lift-System dargestellt. [4]

5.3 Einspritzventil

In gewissen Anwendungen kann es Sinn machen, einen Ejektor als Einspritzventil am Verdampfer einzusetzen. Dies erlaubt es, mit einem Treibdruck (Hochdruck) zusätzliche Flüssigkeit zu befördern und dem Verdampfer beizuführen. Dieses Prinzip kann sowohl mit herkömmlichen CO2-Kälteanlagen und -Wärmepumpen als auch mit Ejektor-Systemen (siehe Kapitel 6) angewendet werden. Das Funktionsprinzip eines Low-Pressure-Lift-Systems wird in Kapitel 6.1 Low-Pressure-Lift-System erläutert. Basierend auf diesem Funktionsprinzip stellt das Bild 7 zwei mögliche Anwendungen von Ejektoren als Einspritzventile dar.

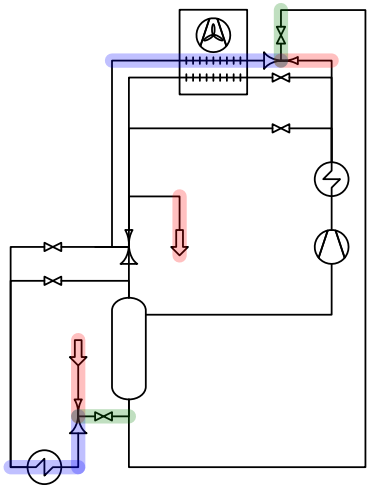

Bild 7: Low-Pressure-Lift-System mit zwei farblich hervorgehobenen Beispielen für die Verwendung von Ejektoren als Einspritzventile. Treibdruck: rot, Saugdruck: grün, Verdampfungsdruck Verdampfer: blau

Die Regelung und möglichen Regelgrössen von einem oder mehreren Regelkreisen, von einem oder mehreren Ejektoren als Einspritzventil, sind analog einem herkömmlichen Einspritzventil bspw. die Überhitzung am Austritt des Verdampfers, der Gas-Anteil am Austritt des Verdampfer oder Flüssigkeits- oder Öl-Niveau in einem Behälter oder Abscheider, einen absoluten Verdampfungsdruck, eine relative Druckdifferenz über das eigentliche Ventil oder sonst wo im System, oder das Entrainment-Ratio von einem oder mehreren Ejektoren im System. Darüber hinaus kann bei einem Ejektor als Einspritzventil ein Gasanteil am Austritt vom eigentlichen Ejektor als Regelgrösse dienen. Gegebenenfalls macht es Sinn, den Regelkreis von einem oder mehreren Ejektoren als Einspritzventil, wie bei herkömmlichen Einspritzventilen, mit einem konstanten Öffnungsgrad oder quasi konstant (getakteten) Öffnungsgrad zu betreiben oder dessen Regelbereich durch minimal und/oder maximale Öffnungsgrade einzuschränken. Je nach Anwendung können Regelgrössen und/oder Regelbereiche und/oder Öffnungsgrade konstant gehalten oder anhand von einem oder mehreren anderen Messgrössen im System geschoben resp. beeinflusst werden.

5.4 Unterkühlung

Ejektoren können dazu genutzt werden, um beispielsweise die Flüssigkeitsleitung oder eine von mehreren Flüssigkeitsleitungen ab dem Mitteldruck-Sammler zu einem oder mehreren Verdampfern zu unterkühlen. Dieses Prinzip kann sowohl mit herkömmlichen CO2-Kälteanlagen und -Wärmepumpen als auch in Kombination mit Low- und High-Pressure-Lift-Systemen angewendet werden. Darüber hinaus ist auch eine Kombination mit der im Kapitel 5.3 Einspritzventil erläuterten Anwendung denkbar. Die Regelung des Einspritzventils kann analog dessen in Kapitel 5.3 Einspritzventil erfolgen. Die Funktionsprinzipien von Low- und High-Pressure-Lift-Systemen werden im Kapitel 6 Ejektor-System erläutert. Basierend auf diesen Funktionsprinzipien stellt das Bild 8 eine mögliche Anwendung von Ejektoren zur Unterkühlung dar.

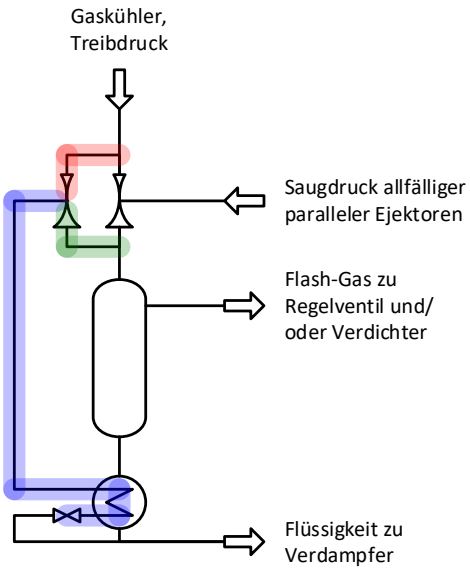

Bild 8: Beispiel einer möglichen Unterkühlung der Flüssigkeitsleitung eines beliebigen CO2-Systems. Treibdruck: rot, Saugdruck: blau, Mitteldruck Sammler: grün

Nebst der Unterkühlung von Flüssigkeitsleitungen können Ejektoren dazu genutzt werden, das CO2 nach dem Gaskühler, vor der Entspannung im Hochdruck-Regelventil oder allfälligen Ejektoren, zu Unterkühlen und die Bildung von Flash-Gas zu reduzieren. Auf diese Anwendung wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit nicht weiter eingegangen.

5.5 Ejektor zur Ölrückführung

Mittels Ejektoren kann nebst flüssigem oder gasförmigem Kältemittel auch Öl im System befördert werden. Ejektoren können dazu eingesetzt werden, um Öl von einem Punkt A zu einem anderen Punkt B im System zu befördern. Die Punkte A und B können sowohl auf demselben statischen Niveau als auch auf unterschiedlichen statischen Niveaus liegen. Darüber hinaus können die Punkte A und B sowohl auf demselben Druck-Niveau als auch auf unterschiedlichen Druck-Niveau im System befinden. Unter anderem bei Systemen bei welchen zusätzlich die Gravitation zu Nutze gemacht wird, kann mittels Ejektor, Öl von einem tieferen Punkt A zurück auf ein höheren Punkt B gefördert werden. Ein weiteres Anwendungsbeispiel ist das Zurückführen von Öl an einem beliebigen Punkt A im System in den Ölsammler (Punkt B) durch zunutze machen der Entspannung zwischen Ölabscheider (Hochdruck) und Ölsammler. Die Kombinationen in solchen Anwendungen sind vielfältig. Sie dienen in der Regel nicht der energetischen Optimierung des Systems, sondern der Sicherstellung der geforderten Betriebsbedingungen. Die Funktionsprinzipien von Low- und High-Pressure-Lift-Systemen werden im Kapitel 6 Ejektor-System erläutert. Basierend auf diesen Funktionsprinzipien stellt das Bild 9 eine mögliche Anwendung von Ejektoren zur Öl-Rückführung dar. Die Regelung der Öl-Rückführung kann analog der in Kapitel 5.3 Einspritzventil beschriebenen Regelkreisen und Messgrössen erfolgen. Auf diese Anwendung wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit nicht weiter eingegangen.

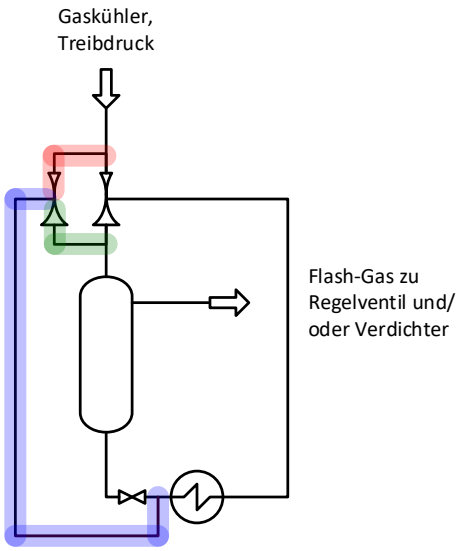

Bild 9: Beispiel einer möglichen Öl-Rückführung aus einem Verdampfer eines beliebigen CO2-Systems. Treibdruck: rot, Saugdruck (Öl): blau, Mitteldruck Sammler: grün

6 Ejektor-System

Die Kapitel 4 und 5 lassen erahnen, dass die Möglichkeiten wie Ejektoren in einem System eingebunden werden, vielfältig sind. Zwei unterschiedliche Systeme, welche in der Praxis vorwiegend zur energetischen Optimierung zur Anwendung kommen, sind sogenannte Low-Pressure-Lift- und High-Pressure-Lift-Systeme. Wie deren Bezeichnung erahnen lässt, erfolgt die Unterteilung anhand deren Druckhub, den die Ejektoren im Betrieb erzielen. Dabei gilt nicht ein absoluter Differenzdruck oder Hebedruck als Entscheidungskriterium, ob es ein Low- oder High-Pressure-Lift-System ist. Vielmehr ist es die Prozessführung an sich, welche die Unterschiede dieser zwei Systeme definiert. Beim Low-Pressure-Lift-System wird der ganze Verdampfer-Massenstrom vom Ejektor gefördert. Ein grosser Massenstrom erfährt dabei einen geringen Druckhub (Low-Pressure-Lift). Dem gegenüber wird beim High-Pressure-Lift-System nur ein variabler Anteil vom Verdampfer-Massenstrom vom Ejektor befördert. Der Rest vom Verdampfer-Massenstrom wird von den Plus-Verdichter befördert. Einen Anteil vom Massenstrom erfährt einen höheren Druckhub (High-Pressure-Lift). Die in diesem Kapitel diskutierte und in Bild 10 dargestellte Übersicht ist nicht abschliessend. Teilweise lassen sich die Systeme, Anwendungen und Einbindungen kombinieren und die Vielfalt ist entsprechend gross. Die zwei Low- und High-Pressure-Lift-Systeme decken jedoch einen relevanten Anteil der heute gängigen Anwendungen ab.

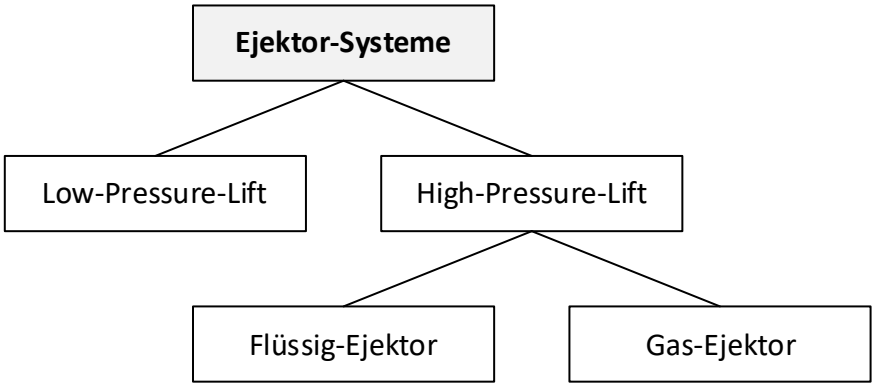

Bild 10: Ejektor-Systeme unterteilt nach Low-Pressure-Lift und High-Pressure-Lift-Systeme.

6.1 Low-Pressure-Lift-System

Das Low-Pressure-Lift-System bewährt sich insbesondere für reversible Wärmepumpen und Chiller. Die Druckdifferenz zwischen Kältemittel-Sammler und Verdampfer wird durch den Hebedruck der Ejektoren bestimmt. Bei einem Betrieb bei tiefem Hochdruck (Treibdruck) kann der Einsatz einer Pumpe erforderlich sein, um die Flüssigkeit zu dem Verdampfer zu führen. Alternativ oder ergänzend kann ein Ejektor als Einspritzventil gemäss Kapitel 5.3 eingesetzt werden, um die Flüssigkeit anzusaugen. Die Vorzüge des Low-Pressure-Lift-Systems gegenüber den High-Pressure-Lift-System sind sicherlich, dass lediglich eine Verdichter-Stufe erforderlich ist. Im Gegenzug ist der Betrieb von der Saugwirkung und Druckhub von den Ejektoren abhängig oder es bedarf eine Pumpe. [3]

Nebst der bereits thematisierten Hochdruck-Regelung kommt dem Einspritzventil am Wärmepumpen- und Klima-Verdampfer eine entscheidende Rolle zu. Die Regelung dieses Ventils beeinflusst den energetischen Nutzen der Ejektoren massgeblich. Ist das Ventil vollständig geöffnet so fördern die Ejektoren einen hohen Massenstrom, der Druckhub entspricht dem Druckverlust auf dem Teilabschnitt und die Verdichter werden quasi auf demselben Verdampfungsruck betrieben wie die Verdampfer. Sprich es resultiert kein energetischer Nutzen aus der Vorverdichtung. Umgekehrt, ist das Einspritzventil stark gedrosselt resp. nahezu geschlossen, so wird der Druckhub gross und der Massenstrom beliebig klein. Die Verdichter laufen zwar auf einer höheren Verdampfungstemperatur, der Massenstrom resp. die Kälteleistung bleibt im Extremfall sogar aus.

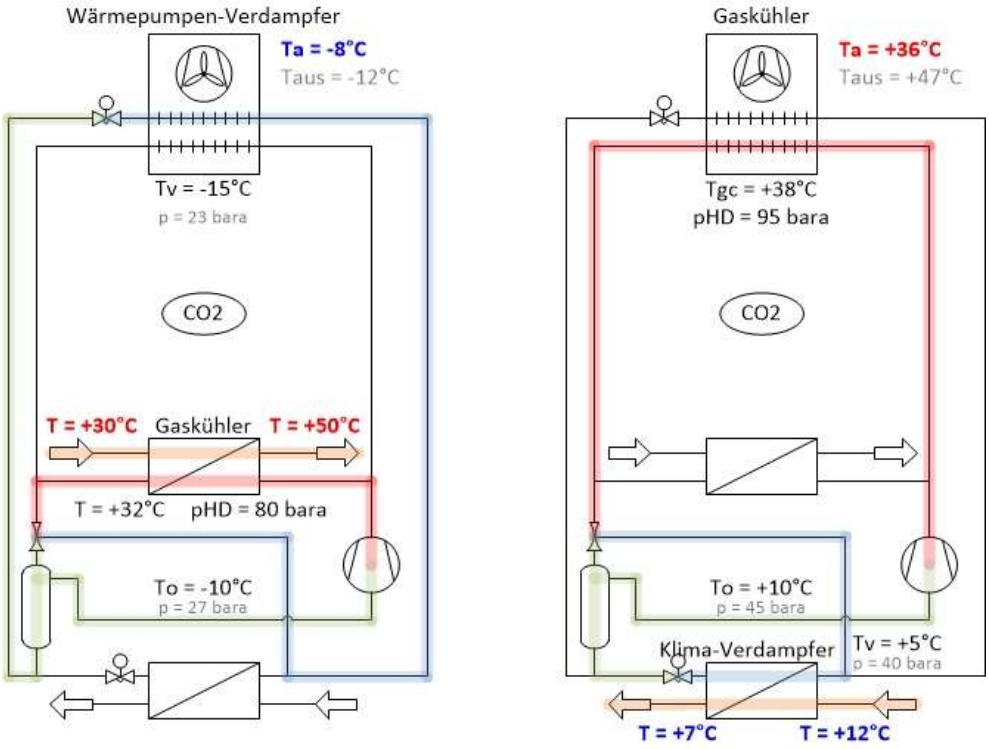

Bild 11: Prinzipschema einer reversiblen Luft/Wasser CO2-Wärmepumpen als Low-Pressure-Lift-System, links werden der Heizbetrieb und rechts der Klimabetrieb dargestellt [3].

In der Vergangenheit wurden verschiedene Regel-Algorithmen für die Ansteuerung des Einspritzventils ausprobiert (unter anderem Regelung gemäss Kapitel 5.3). Ein naheliegender Ansatz ist die Regelung der Überhitzung am Austritt des Verdampfers. Teilweise wird diese in Kombination mit einer Schiebung vom Überhitzungs-Sollwert in Abhängigkeit von bspw. dem Hochdruck (Treibdruck) oder Treibtemperatur. Ein ähnlicher Ansatz ist die Regelung einer Druckdifferenz. Diese kann auch in Abhängigkeit von bspw. dem Hochdruck (Treibdruck) oder Treibtemperatur geschoben werden. Beide Schiebungen tragen der Tatsache Rechnung, dass bei tieferen Treibdrücken und oder -temperaturen auch ein tieferer Druckhub durch die Ejektoren erzielt werden kann. Unter der Annahme, dass es möglich wäre, das Entrainment-Ratio kostengünstig und dennoch mit der nötigen Genauigkeit während laufendem Betrieb zu messen, könnte folgender Regel-Algorithmus zielführend sein. Basierend auf den

Bedingungen (Druck und/oder Temperatur) vor der Expansion (Hochdruck, Treibseitig) sowie den Bedingungen im Sammler nach der Expansion (Druck und/oder Temperatur) wird ein theoretischer Gasanteil nach der Expansion bestimmt. Eins (1) abzüglich dieses Gasanteils entspricht gerade wieder dem Entrainment-Ratio welches die Ejektoren fördern sollen resp. dass Einspritzveltil der Verdampfer regeln soll. Dieses Prinzip der Regelung kann auch auf andere CO2-Systeme, unter anderem auf High-Pressure-Lift-Systeme übertragen werden.

6.2 High-Pressure-Lift-System

Das in Bild 12 dargestellte High-Pressure-Lift-System oder ähnliche Varianten davon, kommen häufig in Supermärkten zum Einsatz. Die Kombination aus Plus-Verdichter und Parallel-Verdichter (Mitteldruck-Regelventil) gewähren konstante Betriebsbedingungen, insbesondere eine konstante Druckdifferenz an den Einspritzventilen, unabhängig davon, was die Ejektoren bei den gegebenen Betriebsbedingungen zu fördern vermögen. Dies macht es relativ einfach, einen stabilen Betrieb zu fahren, bringt jedoch den Nachteil mit sich, dass es schwierig ist zu beurteilen, wieviel die Ejektoren effektiv fördern und Kältemittel vorverdichten. Während laufendem Betrieb ist es schwierig und zeitaufwendig zu beurteilen, ob die Ejektoren ordnungsgemäss funktionieren.

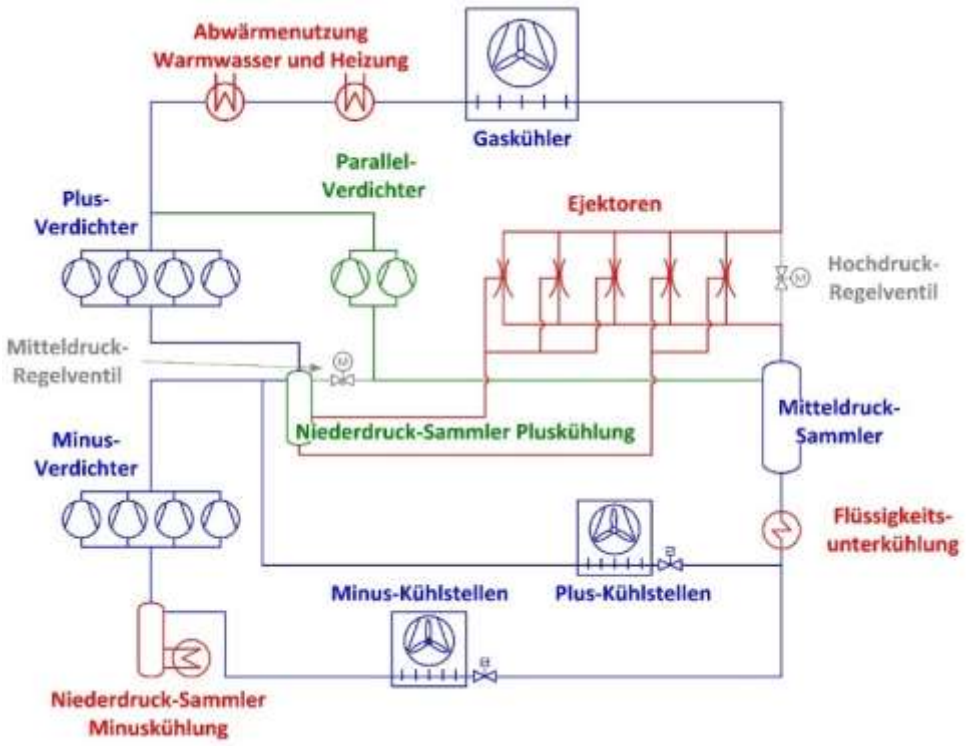

Bild 12: Prinzipschema einer transkritischen R744 Kälteanlage mit Parallelverdichtung und statischen Ejektoren nach dem High-Pressure-Lift-System [5].

Unter der Annahme, dass es möglich wäre, das Entrainment-Ratio kostengünstig und dennoch mit der nötigen Genauigkeit während laufendem Betrieb zu messen, könnte die Wirkung der Ejektoren während laufendem Betrieb überprüft resp. überwacht werden. Nebst der naheliegenden Möglichkeit, das Entrainment-Ratio über zwei der drei Massenströme (Treib-, Saug, Gesamtmassenstrom) zu messen, besteht die Möglichkeit dies über eine Messung vom Gas-Anteil am Ejektor-Austritt zu machen. Der Gas-Anteil am Ejektor-Austritt gibt Aufschluss darüber, wieviel zusätzliches Gas von den Ejektoren angesaugt und dem ohnehin schon vorhandenen Flash-Gas beigemischt wurde. Dieses Prinzip der Ejektor-Betriebsüberwachung kann auch auf andere CO2-Systeme, unter anderem auf Low-Pressure-Lift-Systeme übertragen werden.

7 Schlussfolgerungen

Es wurden die gängigen Ejektor-Bauarten wie statische sowie regelbare Ejektoren erläutert und auf regeltechnische Aspekte eingegangen. Darüber hinaus wurden verschiedene Ejektor-Anwendungen wie Flüssig- und Gas-Ejektoren sowie die Unterkühlung mittels Ejektoren oder Ejektoren als Einspritzventile oder zur Öl-Rückführung erläutert. Im Anschluss wurden zwei gängige Ejektor-Systeme zur energetischen Optimierung von CO2-Systemen aufgezeigt. Die sogenannten Low- und High-Pressure-Lift-Systeme decken einen relevanten Anteil der Anwendungen in der Praxis ab. Die Vielfalt der (Kombinations-)Möglichkeiten aus Ejektor-Bauart, Ejektor-Anwendungen und Ejektor-Systemen ist gross. Die Begrifflichkeiten sind nicht immer eindeutig, resp. es stossen laufend neue, passende Begriffe dazu.

Das Low-Pressure-Lift-System eignet sich insbesondere für reversible Wärmepumpen/Chiller. In dieser Anwendung kann der Ejektor in der Regel durchgehend einen ausreichenden Druckhub erzielen und es bedarf keiner zusätzlichen Pumpe. Darüber hinaus kann auf eine zweite Verdichter-Stufe verzichtet werden, was einen Kosten-Vorteil darstellt. Das High-Pressure-Lift-System eignet sich insbesondere für Anwendungen im Retail-Bereich. Dieser zeichnet sich dadurch aus, dass diverse Verdampfer parallel betrieben werden und konstante Betriebsbedingungen einen Vorteil darstellen. Je nach geforderter Nennkälte-Leistung, kann das High-Pressure-Lift-System nur mit Flüssig-Ejektoren, oder zusätzlich mit Gas-Ejektoren in Kombination mit Parallelverdichter ausgestattet werden.

Insgesamt lässt sich sagen, dass das eine Ejektor-System nicht per se gleich ist wie ein anderes. Es ist von entscheidender Bedeutung, die einzelnen Systeme in Detail zu verstehen, sodass diese in Rücksicht mit der Anwendung und diverser Rand- und Betriebsbedingungen sinnvoll eingesetzt werden. Darüber hinaus ist es von hoher Wichtigkeit, dass die Mess-, Steuer- und Regelungstechnik auf das jeweilige System und die Anwendung zugeschnitten ist. Nur so kann das energetische Potential von Ejektor-Systemen möglichst vollständig ausgeschöpft werden. In Anbetracht der steigenden Nachfrage nach effizienten Systemen basierend auf natürlichen Kältemitteln, kann davon ausgegangen werden, dass die Anwendung und Weiterentwicklung von Ejektor-Systeme in Zukunft eine Vielzahl gut ausgebildeter Fachkräfte erfordert.

8 Literaturverzeichnis

[1] Kauffeld M., Dudita M., Grund S., Umwelt-Auswirkungen neuer HFO-Kältemittel, 2021
[2] Lorentzen G., Revival of carbon dioxide as a refrigerant, NTH, Trondheim, 1993
[3] Bärtsch M., Decasper M., Schönenberger J., Reversible Wärmepumpe für effiziente Beheizung und Klimatisierung von modernisierten Grossgebäuden, Schlussbericht BFE, 2021
[4] Schönenberger J., Hafner A., Banasiak K., Girotto S., Effiziente Kälteerzeugung im Supermarkt mittels CO2-Booster-Kälteanlage und Ejektor, DKV-Tagung 2013, Hannover
[5] Müller K., Schönenberger J., CO2-Wärmepumpe für Warmwasser und Gebäudeheizung, Schlussbericht BFE, 2019