2 Einflüsse von CO_2 auf Gesundheit, Anlagensicherheit und Umwelt

Gesundheit

Im Fall einer Leckage verdrängt CO_2 Luft. Anders als beispielsweise bei herkömmlichen HFKW und HFCKW tritt bei einer CO_2-Leckage kein direkter Sauerstoffmangel auf. Jedoch sind das Entweichen von CO_2 und die Konzentration in der direkten Umgebung von Personen eine Herausforderung.

Beim Stoffwechsel in menschlichen Zellen entsteht CO_2, das über die Lunge an die Umgebung abgegeben wird. Wenn die eingeatmete Luft eine höhere als die normale Konzentration von CO_2 in der Umgebung (etwa 400 ppm) hat, wird der CO_2-Gehalt des Bluts ansteigen und der pH-Wert des Bluts wird reduziert. Dies beeinflusst unter anderem die Atemfrequenz und Gehirnfunktion und kann schon bei niedrigen Konzentrationen tödlich sein, selbst wenn ausreichend Sauerstoff[2)] in der Luft vorhanden ist.

In der Literatur findet man viele Beschreibungen, welche Auswirkungen das Inhalieren von CO_2-haltiger Luft hat. Die Wirkung ist abhängig von der Konzentration, wie in Tabelle1 dargestellt.

CO_2 ist in niedrigen Konzentrationen nicht giftig, es ist lebensmittelrechtlich zugelassen und deklarationsfrei. Nach DIN EN 16798-3 kann man von einem guten Innenklima sprechen, wenn die CO_2-Konzentration der Raumluft unter 800 ppm ist. Wie in Tabelle 1 beschrieben, liegt der maximale Arbeitsplatzgrenzwert (8 h) bei 5.000 ppm (0,5 Vol-%). Als Spitzenbegrenzung ist dreimal pro Schicht eine Konzentration von 10.000 ppm (Momentanwert) für die Dauer von je 60 Minuten zulässig.

ppm	gesundheitliche Auswirkungen
432	durchschnittlicher Anteil in der Atmosphäre (Stand Mai 2026 - www.gml.noaa.gov/ccgg/trends/)
<800	DIN EN 16798-3: Gute Raumluftqualität
5000 (0.5 Vol-%)	Arbeitsplatzgrenzwert (AGW) Grenzwert 8 Stunden, gewichteter Durchschnitt
10,000	kurzzeitiger Belastungsgrenzwert (Deutschland) 60 min, 3 mal pro Schicht
20,000	50% höhere Atemfrequenz! kann die Leistungsfähigkeit der Atmung beeinflussen und Reizungen gefolgt von Störungen des zentralen Nervensystems verursachen
30,000	100 % höhere Atemfrequenz nach kurzzeitiger Belastung
50,000	sofortige Gefahr für Leben und Gesundheit (IDLH) Verlassen des Bereich nach einer Belastungszeit von 30 Minuten ohne irreperable Gesundheitsschäden
100,000	niedrigste Todeskonzentration, wenige Minuten verursachen Bewusstlosigkeit
200,000	Berichte von Todesfällen
300,000	führt schnell zu Bewusstlosigkeit und Krämpfen, Tod

Tabelle 1 Gesundheitliche Auswirkungen von unterschiedlichen CO_2-Konzentrationen

2) CO_2-Konzentrationen in der Atemluft über 10 % sind tödlich, siehe Tabelle 1.

Ab 50.000 ppm wird es lebensgefährlich, wenn Personen nicht innerhalb von 30 Minuten den Bereich verlassen können. Deshalb liegt die Grenze für die akute Gesundheitsgefährdung (IDLH)[3] bei 5 % (50.000 ppm).

In den kältetechnischen Normen und Standards wird CO_2 sicherheitstechnisch der Klasse A1[4] zugeordnet, d. h., CO_2 ist klassifiziert als nicht toxisch und nicht brennbar. Deshalb darf es überall vorschriftsmäßig (z. B. DIN EN 378) in entsprechend ausgelegten Anlagen verwendet werden. Aufgrund der Sicherheitsklassifizierung A1 eignet es sich besonders für Direkteinspritzungsanlagen, die sich in öffentlichen Bereichen befinden (Supermärkte, Transportwesen etc.) bzw. in Haushalten (Warmwasserwärmepumpen) und für Anlagen, die besonders große Mengen an wertvollen Waren (Käse, Fisch, Fleisch etc.) kühlen bzw. einfrieren und dementsprechend große Mengen Kältemittel benötigen.

Eine Person, die hohen CO_2-Konzentrationen ausgesetzt war, wird sich normalerweise schnell wieder erholen, wenn sie an die frische Luft kommt. Dennoch sollte immer darüber nachgedacht werden, ob nicht doch ein Arzt hinzugezogen werden sollte. In schweren Fällen muss unbedingt ein Arzt konsultiert werden. Vergiftungen mit CO_2 haben keine Langzeitauswirkungen.

CO_2 gilt als geruchlos. Ein stechender Geruch kann jedoch bei sehr hohen Konzentrationen wahrgenommen werden. Bei der Auslegung von CO_2-Anlagen muss die Notwendigkeit eines Gasalarms nach dem gleichen Muster wie bei HFCKW-/HFKW-Anlagen beurteilt werden:

- Es muss ermittelt werden, ob die Gaskonzentration eine definierte Grenze überschreiten kann (praktischer Grenzwert, siehe unten sowie Tabelle 1), wenn die gesamte Kältemittelfüllmenge in einen Raum entweicht. Wenn dies nicht der Fall ist, muss kein CO_2-Alarm eingebaut werden.
- Wenn der Grenzwert überschritten werden kann, müssen CO_2-Gasdetektoren bzw. eine Alarmanlage in Räumen angebracht werden, die als Aufenthaltsraum gelten, einschließlich Kühl- und Gefrierräume. Wenn die CO_2-Konzentration Werte aufweist, die eine Lebensgefahr darstellen, müssen Gasmelder und Alarm auch in Räumen installiert werden, die nicht als Aufenthaltsräume gelten.
- Wenn die Räume ständig belüftet sind, sollte dies bei der Beurteilung der Notwendigkeit eines Alarmmelders berücksichtigt werden.

In der europäischen Kältenorm (DIN EN 378) wird der *praktische Grenzwert* für CO_2 auf 10 Gramm pro m^3 Raumvolumen festgelegt, dies entspricht ca. 5,4 Vol-% oder 54.000 ppm bei 1 bar Atmosphärendruck und 20 °C.

Der Sollwert für den Gasdetektor muss in Bezug auf diesen Grenzwert der Norm mit einem ausreichend großen Sicherheitsabstand gewählt werden. Es wird empfohlen,

[3] IDLH – Immediate Danger for Life and Health. Tödlich, wenn eine Person nicht innerhalb von 30 min den Bereich der erhöhten Konzentrationen verlassen kann.

[4] ASHRAE Klassifizierung von Kältemitteln: www.ashrae.org

den maximalen Sollwert auf 50 % des praktischen Grenzwerts zu reduzieren. Niedrigere Sollwerte können verwendet werden, um ggf. Kältemittelverluste zu reduzieren. Jedoch sollte man die Sollwerte immer hoch genug einstellen, damit Fehlalarme vermieden werden. Als Basis wird hier ein niedriger Alarmpegel („Warnung“) bei 5.000 ppm (0,5%) und ein hoher Pegel („Alarm“) bei 10.000 ppm (1 %) empfohlen. Wenn das Alarmsystem nur eine Stufe hat, werden 5.000 ppm gewählt.

CO_2 ist schwerer als Luft, daher sollten die Detektoren in Räumen niedrig montiert und vor eventueller Beschädigung geschützt werden.

Gasdetektoren, die in Verbindung mit CO_2-Anlagen verwendet werden, müssen die CO_2-Konzentration direkt messen. Ein Sauerstoffdetektor, der aufgrund eines Sauerstoffmangels alarmieren soll, kann eine Alarmgrenze von beispielsweise 18 % Sauerstoff haben. Wenn der Sauerstoff durch CO_2 verdrängt wird, könnte die CO_2-Konzentration bei diesem Sauerstoffgehalt (etwa 15 %) tödlich sein.

Da CO_2 als Kältemittel als umweltneutral[5] gilt, besteht in den Verordnungen kein Verbot, CO_2 direkt aus der Anlage an die Umgebung abzulassen. Jedoch sollte das Ablassen von Kältemittel nur im Freien bzw. ins Freie erfolgen. Überschreitet die Füllmenge den tatsächlichen Grenzwert, muss der Anlageninhalt immer ins Freie geleitet werden. Beim Ablassen von größeren Füllmengen muss kontrolliert werden, wohin das Gas von der Auslasstelle gelangen kann. Es muss sichergestellt sein, dass es nicht in Keller etc. abfließen oder sich in Senken im Gelände ansammeln kann. Das Ablassen muss so erfolgen, dass sich kein Trockeneis im Inneren der Anlage bildet und kein Trockeneis das Ausblasrohr bzw. den Ablassschlauch blockieren kann, vgl. Kapitel 9.2.

Nach dem Austritt von CO_2 in einem Raum muss dieser anschließend gut gelüftet werden. Außerdem muss die Konzentration vor dem Gewähren von freiem Zugang zum Raum gemessen werden. Der CO_2-Gehalt muss unter 5.000 ppm (Grenze der Langzeitexposition) und vorzugsweise unter 1.000 ppm liegen.

Umwelteinfluss

Kohlendioxid ist ein umweltfreundliches natürliches Kältemittel. Es hat keine negativen Auswirkungen auf die Ozonschicht[6]. Der als Kältemittel verwendete Anteil an CO_2 (R744) hat im Vergleich zu den globalen CO_2-Emissionen (Verkehr, Industrie, Kraftwerke etc.) einen unbedeutend geringen Einfluss auf die Erderwärmung. CO_2 wird als Referenzfluid für die Angabe des relativen Treibhauspotenzials von alternativen Stoffen verwendet ($GWP_{CO_2} = 1$)[7]. R744 wird größtenteils aus Industrieprozessen gewonnen, aus diesem Grund kann es als umweltneutral eingestuft werden. CO_2 ist stabil und zerfällt nicht in PFAS8)[8]. Die CO_2-Emissionen, um ein Kilogramm

[5] CO_2-Kältemittel wird hauptsächlich als Nebenprodukt aus industriellen Prozessen hergestellt.
[6] ODP – Ozone Depletion Potential = 0
[7] GWP – Global Warming Potential = Treibhauspotenzial
[8] PFAS - Per- und Polyfluoralkylsubstanzen = 0

R744 für den Gebrauch in der Kältetechnik bereitzustellen, liegen im Bereich von 1 kg CO_2.

CO_2 ist nicht brennbar und wird oft als Löschmittel verwendet. Ab einer Konzentration von 10 Vol.-% erstickt es Feuer.

Anlagensicherheit

Im Betrieb der Kälteanlagen können Arbeitsdrücke auf der Hochdruckseite von über 100 bar auftreten [2]. Dies erfordert, dass die geltenden Regeln und Standards bei der Auslegung, der Auswahl der Komponenten und im Betrieb eingehalten werden. Durch Überfüllen einer Anlage können im Stillstand bei erhöhten Umgebungstemperaturen Drücke erreicht werden, die das Auslösen der Sicherheitsventile bewirken.

Im Fall des Öffnens eines Sicherheitsventils bildet sich Trockeneis. Trockeneis hat eine Oberflächentemperatur von −78,9 °C (Sublimationspunkt bei 0,981 bar). Es entsteht, wenn flüssiges CO_2 auf einen Druck von unter 5,18 bar (Trippelpunkt bei −56,6 °C) entspannt wird. Trockeneis kann Ventile und Rohre blockieren und erfordert deshalb entsprechende Erfahrungen und Sachkenntnis bei der Befüllung und Wartung der CO_2-Anlagen. Unter Atmosphärendruck ist Trockeneis sehr kalt und es besteht ein Risiko, dass sich im Stahl der Rohre und Komponenten Sprödbrüche bilden. Bei Hautkontakt mit Trockeneis kann es zu Kälteverbrennungen kommen [3].

3.2 Bedeutung der relativ niedrigen kritischen Temperatur

3.2.1 Transkritischer Prozess

Anders als bei herkömmlichen Kältemitteln liegt die Temperatur des kritischen Punkts bei 31,1 °C, was ein üblicher Bereich der Verflüssigung darstellt, wenn die Wärme an Luft oder Wasser abgegeben wird. Dieser Unterschied ist wesentlich für die Auslegung und den Betrieb von R744-Anlagen, die in diesem Temperaturbereich (oder höher) auf der Hochdruckseite Wärme übertragen.

Im überkritischen Bereich findet keine Verflüssigung bei der Wärmeabgabe mehr statt. Daher können Kälteanlagen und Wärmepumpen mit CO_2 im konventionellen (unterkritischen) Prozess für keine höheren Verflüssigungstemperaturen als ≈30 °C ausgelegt werden. In der Praxis wird tatsächlich eine noch niedrigere Verflüssigungstemperatur von etwa 27 °C als oberste Grenze betrachtet, bei der es sinnvoll ist, die Anlage mit CO_2 unterkritisch zu betreiben.

Der Kälte- bzw. Wärmepumpenprozess kann jedoch auch dann aufrechterhalten werden, wenn die Wärmesenkentemperatur auf über 31 °C ansteigt. Dann erfolgt die Wärmeabgabe auf der Hochdruckseite der Anlage im überkritischen Bereich. Ein transkritischer Kreisprozess stellt sich ein, wie im Druck-Enthalpie-Diagramm in Abbildung 3 dargestellt. Anstelle von Verflüssigung wird im sogenannten Gaskühler nicht nur der übliche überhitzte Teil, sondern die gesamte Wärme bei gleitender Temperatur abgegeben. Die Wärmeaufnahme im Verdampfer erfolgt wie bei herkömmlichen Anlagen im Zweiphasengebiet. Bei effizienten Anlagen wird jedoch bewusst auf eine Überhitzung im Verdampfer verzichtet, da das Verhältnis $\Delta t_0/\Delta p_0$ nahezu 1 ist; d. h., um 1 K Unterschied in der Sättigungstemperatur im Verdampfer zu erreichen, muss der Sättigungsdruck um 1 bar geändert werden. Der transkritische Prozess wird in den Kapiteln 4 bis 6 näher beschrieben.

Wenn die äußeren Bedingungen es erlauben, ist in der Regel ein konventioneller unterkritischer Prozessverlauf die energieeffizienteste Variante. Wenn jedoch ein sehr großer Temperaturanstieg (Temperaturhub) auf der Wärmesenkenseite erwünscht ist, sind die gleitenden Temperaturen im Gaskühler des transkritischen Prozesses von Vorteil. Diese ermöglichen es, die Wärme effektiver als im herkömmlichen Verflüssiger zu übertragen. Aufgrund der Wärmeübertragung mit gleitenden Temperaturen im transkritischen Bereich besteht die Möglichkeit, Wasser (oder andere Fluide) in einem Wärmeübertrager von beispielsweise 10 °C auf relativ hohe Temperaturen (von max. 90 °C) zu erhitzen. Das macht u. a. die Wärmerückgewinnung mit R744-Kälteanlagen sehr lohnenswert und flexibel in Bezug auf die Anwendung der Abwärme.

Wenn das Temperaturniveau des Wärmesenkenmediums stark variiert, wie es beispielsweise bei Außenluft der Fall sein kann, wird der niedrigste Energiebedarf des

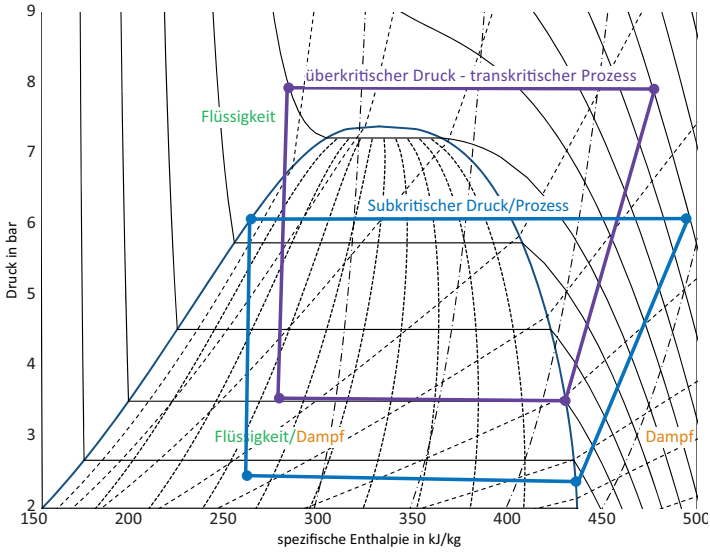


Abbildung 3
Prinzipielle Darstellung des transkritischen und subkritischen CO_2-Prozesses im Druck-Enthalpie-Diagramm (log p,h-Diagramm)

Kältemittelkreislaufs dadurch erreicht, dass die Anlagensteuerung den Hochdruck entsprechend der Wämesenkentemperatur aktiv einstellt, siehe Kapitel 4.5. Die Kälteanlage wechselt dann selbständig zwischen transkritischem und unterkritischem Betrieb. Im Fall einer aktiven Nutzung der Abwärme, wenn der Großteil der abgegebenen Wärme genutzt wird, können die R744-Anlagen permanent transkritisch betrieben werden.

Eine niedrige kritische Temperatur kann auch in anderen Zusammenhängen eine praktische Bedeutung haben. Einige der folgenden Beispiele dienen zur Bestimmung des Drucks in einer Anlage, einem Anlagenteil oder in einer Komponente bei hohen Umgebungstemperaturen (oberhalb der kritischen Temperatur) und zur Berechnung der abgelassenen Kältemittelmenge im Fall eines Öffnens des Sicherheitsventils.

Im überkritischen Bereich und in der Nähe des kritischen Punkts ändert sich die spezifische Wärmekapazität von CO_2 bei Temperaturänderungen sehr stark. Zur Anschauung betrachte man im Druck-Enthalpie-Diagramm der Abbildung 2 den Abstand der Isothermen in diesem Bereich. Dieser Zusammenhang ist wichtig für die Auslegung und den Betrieb von Wärmeübertragern zur Wärmeabgabe in diesem Temperaturbereich, siehe auch Kapitel 4.

4 Transkritischer Kälte-/Wärmepumpenprozess

Als CO_2 in den späten 1980er-Jahren für Autoklimaanlagen „wiederentdeckt" wurde, war ein sogenannter transkritischer Prozessverlauf mit einem für diese Anwendung ungünstigen Temperaturverlauf bei der Wärmeabgabe nicht erwünscht. Er musste aber in Kauf genommen werden, wenn man die anderen günstigen Eigenschaften von CO_2 nutzen wollte.

In anderen Anwendungen kann der Temperaturgleit jedoch durchaus nützlich bzw. thermodynamisch von Vorteil sein, beispielsweise beim Erwärmen von Trinkwasser mit einem großen Temperaturhub. Dies führte in den späten 1980er-Jahren bei NTNU-SINTEF zur Entwicklung eines transkritischen Wärmepumpenprozesses, u. a. zur Erwärmung von Wasser. Dieser hat sich besonders in Japan zu einem kommerziell bedeutsamen Produkt entwickelt, wo bis 2024 mehr als acht Millionen „EcoCute" CO_2-Warmwasserwärmepumpen verkauft wurden. Die Anlage ist auch auf dem europäischen Markt verfügbar und hat eine Leistungszahl von 4 oder höher.

Die Weiterentwicklung des Prozesses hat gezeigt, dass Kälteanlagen und Wärmepumpen mit einem transkritischen CO_2-Prozess in vielen Bereichen wettbewerbsfähig sein können, insbesondere, wenn man den Temperaturgleit auf der warmen Seite ebenfalls nutzen kann. Aktuelle Anwendungen werden in Kapitel 10 näher erläutert.

4.1 Kreisprozess im Druck-Enthalpie-Diagramm

Abbildung 13 zeigt die prinzipielle Struktur eines transkritischen CO_2-Prozesses sowie den Prozess im log p,h-Diagramm.

Die Anlage besteht aus Verdichter, Gaskühler, Sauggaswärmeübertrager, Drossel (Hochdruckregelventil), Verdampfer und Niederdrucksammler (NDS). Der Niederdrucksammler wird verwendet, um Füllschwankungen in der Anlage auszugleichen, ähnlich wie in einer konventionellen Anlage. Dies ist besonders wichtig in Bezug auf die aktive Regelung des Hochdrucks in der Anlage. Der NDS nimmt Kältemittel auf, wenn der Anlagenhochdruck sinkt. Mithilfe des Hochdruckregelventils und Verdichters wird ggf. Kältemittel aus dem NDS auf die Hochdruckseite verlagert, wenn höhere Anlagendrücke erwünscht sind.

Der Sauggaswärmeübertrager, auch innerer Wärmeübertrager genannt, wird verwendet, um eine ausreichende Überhitzung vor dem Sauganschluss des Verdichters sicherzustellen und auch das restliche Kältemittel aus dem Öl-CO_2-Gemisch zu verdampfen, das den Niederdruckbehälter verlässt. Damit kann die Ölrückführung gewährleistet und gleichzeitig der Verdichter vor Flüssigkeitsschlägen geschützt werden.

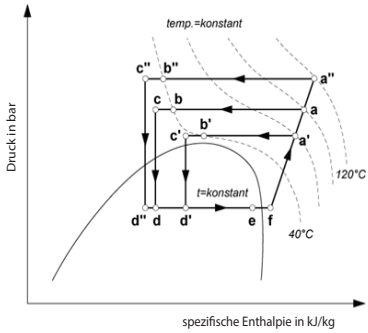
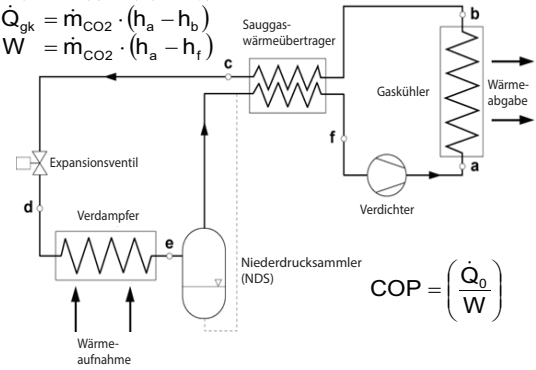


Abbildung 13
Prinzipieller Aufbau einer transkritischen CO_2-Anlage und Darstellung des Prozesses im Druck-Enthalpie-Diagramm

$$\dot{Q}_0 = \dot{m}_{CO2} \cdot (h_e - h_d)$$
$$\dot{Q}_{gk} = \dot{m}_{CO2} \cdot (h_a - h_b)$$
$$W = \dot{m}_{CO2} \cdot (h_a - h_f)$$



$$COP = \left(\frac{\dot{Q}_0}{W} \right)$$

Im Druck-Enthalpie-Diagramm sind drei Prozesse mit unterschiedlichen Gaskühlerdrücken dargestellt, jedoch mit gleicher Austrittstemperatur des Kältemittels aus dem Gaskühler (40-Grad-Isotherme). Die gestrichelten Linien zeigen Isothermen, 120 °C ganz rechts und 40 °C ganz links. In der Anlagenskizze werden Buchstaben verwendet, die entsprechend im Diagramm verwendet werden. Die Gaskühler- und Verdampfungszustandsänderung sind jeweils die Linien **a-b** und **d-e**. Die Zustandsänderung des inneren Wärmeübertragers ist **b-c** (auf der Hochdruckseite) und **e-f** (auf der Niederdruckseite). Aus dem Diagramm ergibt sich:

- Temperaturgleit im Gaskühler, d. h., die Abkühlung des CO_2-Gases kann unter Umständen sehr groß sein.
- Kälteleistung ($\dot{Q}_0$) und Wärmeleistung ($\dot{Q}_{gk}$) steigen mit zunehmendem Gaskühlerdruck.
- Wenn der Austrittszustand aus dem Gaskühler (Punkt b) nahe dem kritischen Punkt liegt, wird der Prozess mit einer geringen Kälteleistung und einer geringen Kälteleistungszahl weniger effizient.

Die praktische Bedeutung dieser Erkenntnisse wird in den folgenden Kapiteln diskutiert.

5 Technische Lösungen mit CO_2

5.1 CO_2 als verdampfender Kälteträger

Indirekte Kältesysteme[11)] sind eine gute Alternative, wenn die Füllmenge an umweltschädlichen Kältemitteln reduziert werden soll. Dies gilt auch für Sicherheitsaspekte in Bezug auf Prozessanlagen, Produkte und Personal beim Einsatz von Ammoniak, Kohlenwasserstoffen und anderen brennbaren Kältemitteln. Bei Kälteanlagen mit nicht ungefährlichen Kältemitteln wird die gesamte Anlage in der Regel in einen Maschinenraum oder ins Freie ausgelagert, um sicherzustellen, dass nur befugte Personen in direkten Kontakt mit den Anlagen kommen. Bei großen Industrieanlagen kann die Füllmenge um bis zu einem Faktor 50 reduziert werden, wenn der klassische Kreislauf (in der Regel mit Ammoniak) durch ein indirektes Kühlsystem (siehe Beispiele in Kapitel 10) ersetzt wird.

Typischerweise werden dabei Flüssigkeiten verwendet, d. h. Kälteträgermedien mit einem niedrigen Gefrierpunkt. Typische Beispiele sind Salzlösungen, eine Mischung aus Wasser und Glykol oder Wasser und Alkohol. Die Wärme wird in Form von sensibler Wärme aufgenommen und abgegeben, was zu dem damit verbundenen Temperaturanstieg bzw. -abfall führt.

Ein Nachteil indirekter Systeme ist ein höherer Energiebedarf aufgrund der niedrigeren Verdampfungstemperatur der Kälteanlage und dem Betrieb der Kälteträgerpumpe. Dieser Nachteil kann durch Verwendung eines verdampfenden bzw. kondensierenden Kältemittels als Kälteträger stark reduziert werden, d. h., die latente Wärme kann vorteilhaft genutzt werden. CO_2 ist für eine solche Anwendung geeignet.

Abbildung 24 zeigt eine Prinzipschaltung einer indirekten Kälteanlage mit CO_2 als verdampfender Kälteträger.

In industriellen und großen kommerziellen Anlagen wird der Sekundärkreislauf in der Regel für einen Arbeits-/Sättigungsdruck weit unter dem CO_2-Stillstandsdruck bei Umgebungstemperatur ausgelegt. Um den Kältemittelverlust bei (längeren) Stillstandszeiten zu vermeiden, ist das System

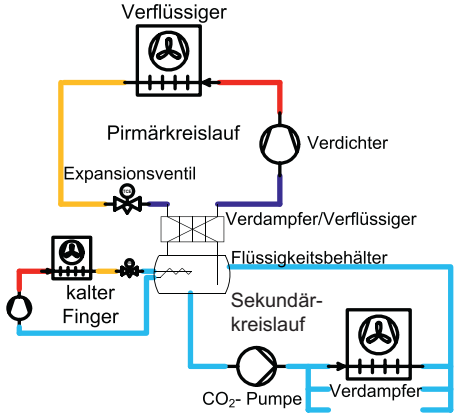


Abbildung 24 Prinzipskizze einer indirekten Kälteanlage mit CO_2 als verdampfender Kälteträger

[11)] Anlagen mit Zirkulation eines Kälteträgers zwischen Verdampfer und dem zu kühlenden/einzufrierenden Medium

normalerweise mit einer kleinen Kälteanlage, einem sogenannten „Kalten Finger" ausgestattet, der durch den Wärmeeintrag verdampfendes CO_2 wieder verflüssigt und somit den Druck im Sekundärkreislauf begrenzt. Bei kleineren Systemen kann es ebenfalls sinnvoll sein, den Kälteträgerkreislauf so druckfest zu dimensionieren, dass er auch den Temperaturen an den wärmsten Tagen standhält.

Flüssiges CO_2 benetzt Flächen aufgrund der niedrigen Viskosität sehr gut, was sich günstig auf den Wärmetransport in den Wärmeübertragern auswirkt. Eine niedrige Viskosität trägt ebenfalls zu einem niedrigen Druckabfall und einer entsprechend geringen Pumpenarbeit bei. Tabelle 3 zeigt einen Vergleich der kinematischen Viskosität für flüssiges CO_2 und andere übliche Kälteträger bei –40 °C.

Tabelle 3 Kinematische Viskosität für flüssiges CO_2 und andere Kälteträger bei –40 °C

Medium	Ethylen-glykol	Ethanol	Calcium-chlorid	Kalium	CO_2
Viskosität mm^2/s	109	86	23	15	0,15

Des Weiteren ist die Wärmeübertragung bei einem Phasenübergang sehr viel effektiver (latente Wärme) als die mit einer Flüssigkeit (sensible Wärme). Dadurch kann auch die notwendige Temperaturdifferenz sowohl im Sekundärmedienkühler (Verdampfer) als auch an der Kühlstelle reduziert werden.

Die Wärmeabsorption pro zirkulierendem Liter vom Sekundärmedium CO_2 ist durch die Verdampfung um ein Vielfaches höher als für die anderer Kälteträger. Dadurch kann die Füllmenge auf einen Bruchteil reduziert werden. So absorbiert beispielsweise 1 l verdampfendes CO_2 in etwa 13-mal so viel Wärme wie die Erwärmung von Ethylenglykol/Wasser-Mischungen um 5 K. Selbst bei einer Überflutung des Verdampfers um den Faktor 2–3 ist die Pumpenarbeit bei CO_2 90–95 % geringer als bei herkömmlichen indirekten Lösungen. Für die gesamte Anlage kann der Energiebedarf um mehr als 20 % gesenkt werden. Diese Anlagen können in vielen Fällen, unter dem Aspekt des Energiebedarfs, mit den direkten Systemen konkurrieren.

Die geringe erforderliche Menge an zirkulierendem CO_2 und der geringe Einfluss des Druckverlusts im zweiphasigen Massenstrom bedeutet auch, dass die Abmessungen von Rohren, Ventilen usw. sehr stark reduziert werden können – in einigen Fällen um über 50 %. Das vereinfacht die Verrohrung und ist platzsparend. Deshalb haben sich Anlagen mit CO_2 als verdampfendem Kälteträger im Vergleich zu herkömmlichen indirekten Systemen, insbesondere im industriellen Bereich, als kosteneffektiv erwiesen.

Nach der „Wiederentdeckung" von CO_2 als Kältemittel Ende der 1980er-Jahre wurden erste industrielle Kälteanlagen mit CO_2 als verdampfender Kälteträger eingesetzt. Seither wurden viele Systeme für eine Vielzahl von Anwendungen gefertigt,

darunter Supermärkte, Industrieanwendungen und Eishallen. Die meisten Installationen findet man im Bereich der (Tief-)Kühlung bis zu –50 °C. Für Gefrieranwendungen und andere Niedertemperaturanwendungen sind Kaskadenanlagen mit CO_2 in der unteren Stufe besonders relevant wie auch (transkritische) Standard-CO_2-Anlagen.

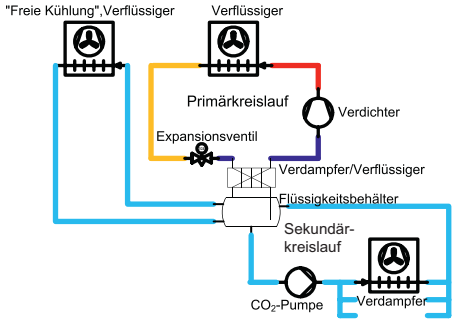


Abbildung 25 Indirektes System mit verdampfendem CO_2 als Kälteträger. Gefrieranwendung

Da das CO_2 als verdampfender Kälteträger im Sekundärkreislauf ohne Verdichtereinheit und nur mit entsprechenden Pumpen zirkuliert, ist das Kältemittel frei von Öl. Probleme mit der Ölrückführung, negative Auswirkungen in den Wärmeübertragern und ein erhöhter Druckverlust aufgrund des Öls werden damit vermieden. Es kann jedoch trotzdem ratsam sein, etwas Öl in den Kreislauf einzubringen, um ggf. die automatischen Ventile zu schmieren.

Im Allgemeinen werden die Kühlstellen elektrisch abgetaut. Es ist jedoch auch ein separater Wärmezyklus für die Enteisung denkbar, indem beispielsweise ein warmes Glykol-Gemisch zirkuliert, welches die Wärmeübertrager abtaut. Eine Warmgasabtauung ist ebenfalls denkbar, bei der Flüssigkeit auf einen entsprechend hohen Druck gepumpt und danach mit der gespeicherten Abwärme verdampft wird, um anschließend die Wärmeübertrager abzutauen. Um einen ausreichend hohen Druck zu erreichen, der einer Sättigungstemperatur von 10 °C entspricht, muss die Pumpe einen Druck von 45 bar erzeugen. Dafür muss der CO_2-Kreislauf für 53 bar ausgelegt werden.

Indirekte Systeme mit verdampfendem CO_2 können leicht mit Gefrierkühlung kombiniert werden, wie in Abbildung 25 schematisch dargestellt ist. Für eine solche Anwendung ist die Druckdimensionierung nach dem Stillstandsdruck (maximale Umgebungstemperatur) am besten geeignet. Bei ausreichend niedrigen Umgebungstemperaturen ermöglicht der freikühlende Verflüssiger den Betrieb des Kühlsystems ohne den Primärkreislauf.

5.2 CO_2 im konventionellen Kälteprozess – Kaskadenanlage

Kann die Verflüssigungstemperatur unter 27 °C gehalten werden und besteht kein zusätzlicher Bedarf an Abwärmenutzung, wird die CO_2-Anlage normalerweise unterkritisch betrieben. Grundsätzlich unterscheidet sich dabei der Betrieb von