

Kurzfassung

Die Verwendung synthetischer Kältemittel ist weltweit stark eingeschränkt, um die negativen Umwelteffekte durch den Abbau der Ozonschicht (ODP) und die globale Erwärmung (GWP) zu bekämpfen. Kohlendioxid (CO_2), als natürliches Kältemittel, findet immer mehr Beachtung bei Anwendungen in Kälte- und Klimaanlage. Unter Bezugnahme auf einen transkritischen CO_2 -Kreislauf werden in dieser Forschungsarbeit die energetischen, exergetischen, ökologischen und ökonomischen Leistungen einer CO_2 -Klimaanlage für Mehrfamilienhäuser in gemäßigten und subtropischen Klimazonen bewertet. Darüber hinaus enthält die Studie einen umfassenden Vergleich der thermoökonomischen und ökologischen Leistungen der CO_2 -Klimaanlage im Vergleich zu Klimaanlagen mit fluorierten Kältemitteln auf der Grundlage eines Lebenszyklusansatzes. Zu diesem Zweck werden Mehrfamilienhäuser in drei europäischen Ländern (Deutschland, Italien und Spanien) mit einer identischen Kühlleistung von 19,4 kW im Auslegungspunkt, aber mit unterschiedlichen Kühlflächen und unterschiedlichem jährlichen Kühlbedarf, betrachtet. Das Klimatisierungssystem wird durch Simulation über den Zeitraum eines Jahres untersucht, wobei die entsprechenden Kühlprofile in Abhängigkeit von Zeit und Ort (München, Florenz und Málaga) berücksichtigt werden. Die Klimaanlagen und ihr Energieverbrauch werden mit Aspen Plus simuliert und das angewandte Auslegungsmodell wird anhand experimenteller Daten validiert. Die Ökobilanz wird mit der Software SimaPro erstellt und zusätzlich wird eine wirtschaftliche Analyse durchgeführt.

Die relative Abweichung zwischen den Simulations- und den experimentellen Ergebnissen hinsichtlich der Kälteleistung liegt unter 5,5 %. Für den Fall München zeigen die Ergebnisse der CO_2 -Klimaanlage für die Kühlfläche von 375 m² eine durchschnittliche jährliche Energy Efficiency Ratio (EER) von 6,82. Im Fall von Florenz und Málaga kann bei gleicher Anlagenleistung eine Wohnfläche von 322 m² bzw. 283 m² gekühlt werden. Aufgrund der unterschiedlichen klimatischen Randbedingungen ergibt sich eine geringere Jahresleistung mit einem EER von 6,07 für den Fall Florenz und 5,87 für den Fall Málaga. Was die Exergieverluste der einzelnen Komponenten betrifft, so zeigen die Ergebnisse der CO_2 -Klimaanlage, dass die höchsten Verluste für den Verdichter und den Gaskühler zu verzeichnen sind, während die geringsten Verluste auf den Rekuperator zurückzuführen sind.

Beim Vergleich der CO_2 -Klimaanlage mit den HFKW-410A- und HFKW-32-Klimaanlagen zeigen die Ergebnisse, dass die jährlich emittierten CO_2 -Äquivalente der CO_2 -Klimaanlage um bis zu 75 % niedriger sind als die von HFKW-410A und HFKW-32. Im Falle von CO_2 als Arbeitsmedium verringert sich jedoch die jährliche Energieeffizienz um 23,3 bis 31,4 %, während die Lebenszykluskosten im Vergleich zu den untersuchten HFKW-Klimaanlagen um bis zu 55,4 % steigen. Im Allgemeinen wird festgestellt, dass es für Länder in der gemäßigten Zone ein vielversprechender Weg ist, in naher Zukunft ein CO_2 -Klimasystem für die Raumkühlung mit Hilfe einer Strompreissubvention und einer CO_2 -Verdichter-Preisreduzierung zu adaptieren, während es für Länder in den Subtropen nicht geeignet ist.

1 Einleitung

Trotz der Fortschritte in der Kälte-, Klima- und Wärmepumpenindustrie haben die Bemühungen zur Energieeffizienz nicht ausgereicht, um den starken Anstieg des Energiebedarfs und der damit verbundenen Emissionen auszugleichen. Auf Gebäude und Bauwesen entfallen zusammen 36 % des weltweiten Energieverbrauchs und 39 % der energiebedingten CO₂-Emissionen [1]. In Europa ist der Heiz- und Kühlbedarf im Wohnbereich für etwa 40 % des gesamten Endenergieverbrauchs verantwortlich [2]. Von 1990 bis 2010 ist die Zahl der installierten Raumkühlgeräte in Europa um das 24-fache gestiegen [3]. Die Europäische Technologieplattform für erneuerbare Wärme- und Kälteerzeugung (RHC-Plattform) zieht verschiedene Trends beim Energieverbrauch in Europa bis 2050 in Erwägung. Schätzungen zufolge dürfte der Heizbedarf im Vergleich zu 2006 um 20 bis 30 % sinken, während der Kühlbedarf im gleichen Zeitraum um das Dreifache steigen dürfte [4]. Infolgedessen hat die Europäische Kommission (EK) 2016 die Strategie für Heizen und Kühlen vorgestellt. Diese Strategie weist darauf hin, dass die Raumkühlung der wichtigste Aspekt des thermischen Komforts in wärmeren Klimazonen ist und in ganz Europa erheblich zunimmt [5].

Umweltprobleme wie der Abbau der Ozonschicht und die globale Erwärmung waren eine der Hauptmotivationen für die jüngsten Forschungen im Bereich der Kälte- und Klimatechnik [6]. Schätzungen zufolge könnten in vielen Großanlagen jährlich mehr als 20 % der Kältemittelmenge in die Atmosphäre entweichen, was zum Abbau der Ozonschicht und zur globalen Erwärmung beiträgt [7]. Seit der Unterzeichnung des Montrealer Protokolls im Jahr 1989 sind die weit verbreiteten Kältemittel wie Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) vollständig verboten und die Herstellung und Verwendung von teilhalogenierten Fluorchlorkohlenwasserstoffen (H-FCKW) wird derzeit oder in Kürze eingestellt [8]. Infolgedessen werden HFKW aufgrund ihres vernachlässigbaren Ozonabbaupotenzials in großem Umfang als Ersatz für FCKW und HFCKW verwendet [9]. Allerdings neigen Stoffe wie HFKW, die ein hohes Treibhauspotenzial (GWP) haben, auch dazu, viel Infrarotstrahlung zu absorbieren und sie haben eine lange Lebensdauer in der Atmosphäre. Als Reaktion auf die Gefahren von HFKW wurde das Kigali-Amendment verabschiedet, das den Ausstieg aus der Verwendung von HFKW im Jahr 2016 vorsieht [10]. Daher haben die Umweltprobleme von HFKW mehr Aufmerksamkeit auf die Verwendung von Arbeitsmitteln gelenkt, die geringere Auswirkungen auf die Umwelt haben [11]. Natürliche Kältemittel wie Kohlendioxid (CO₂), Ammoniak (NH₃), Propan (R290) und Kohlenwasserstoffe (HCs) haben im Vergleich zu den HFKW eine deutlich geringere Klimarelevanz. Unter den natürlichen Kältemitteln erfüllt CO₂ fast alle geforderten Eigenschaften für den Einsatz als Kältemittel. CO₂ ist ein natürliches Kältemittel mit keinem ODP und dem niedrigsten effektiven GWP. Es ist schwerer als Luft, ungiftig, nicht entflammbar, in der Luft reichlich verfügbar und fällt als Nebenprodukt bei vielen industriellen Anwendungen an. Vor 1950 wurde es in der Schifffahrt verwendet und später wegen des geringeren Betriebsdrucks durch

synthetische Kältemittel ersetzt. CO_2 ist kostengünstig und weist eine geringe Flüssigkeitsdichte auf, was zu einer geringeren Systemgröße und Füllmenge führt. Die Anforderungen der modernen Kälte- und Klimatechnik erfordern Kältemittel mit niedrigstem Siedepunkt, hoher kritischer Temperatur und moderatem kritischen Druck [12]. Die transkritische Eigenschaft von CO_2 erfordert einen überkritischen Druck zur Wärmeabfuhr. In den meisten Kälte- und Wärmeanwendungen wird es im transkritischen Bereich eingesetzt. Der hohe Druck und die geringe molare Masse von CO_2 verringern den Volumenstrom und die Abmessungen der Systemkomponenten. Herstellung und Transport von CO_2 haben ein Kohlenstoffäquivalent von 1 kg CO_2eq pro kg, während NH_3 und HFKW ein Kohlenstoffäquivalent von 2 und 9 kg CO_2eq pro kg haben. Am Ende des letzten Jahrzehnts hat Gustav Lorentzen die Idee einer transkritischen CO_2 -Klimaanlage für Kraftfahrzeuge patentiert [13]. Seit Lorentzen die Wiederbelebung von CO_2 verkündete hat, haben zahlreiche Studien CO_2 in den letzten 30 Jahren unter verschiedenen Aspekten analysiert. Heutzutage wird CO_2 hauptsächlich in der transkritischen CO_2 -Boosterkühlung für Supermärkte, Fahrzeugklimatisierung, Wärmepumpen-Wassererhitzer, Verkaufsautomaten und Lebensmittelgeschäfte verwendet. Daher wird erwartet, dass R744 (CO_2) eines der Kältemittel der nächsten Generation für Autoklimaanlagen, Kühl- und Heizsysteme in Privathaushalten sowie für Großkälteanlagen sein wird [14].

In dieser Studie wurden energetische, ökologische und wirtschaftliche Modelle entwickelt, um die Kosten und den ökologischen Nutzen einer CO_2 -Klimaanlage für den Wohnbereich in gemäßigten und subtropischen Regionen Europas zu bewerten. Auf der Grundlage eines Lebenszykluskonzepts wird das vorgeschlagene CO_2 -System mit Klimaanlagen verglichen, die mit HFKW-410A und HFKW-32 arbeiten. Für die Bewertung wurden drei Städte (München, Florenz und Málaga) in verschiedenen Klimaregionen West- und Südeuropas als Szenarien herangezogen. Daher werden im Folgenden die thermodynamischen Eigenschaften von CO_2 , transkritische CO_2 -Systeme und eine Forschung über den neuartigen transkritischen CO_2 -Kreislauf beschrieben.

2 Transkritische CO₂-Klimatisierungsanlagen

Bei der Verwendung von CO₂ als Kältemittel für Klimaanlage müssen zwei Faktoren besonders beachtet werden: zum einen die niedrige kritische Temperatur, zum anderen der hohe Arbeitsdruck, der für die Verwendung von CO₂ unter typischen Klimatisierungsbedingungen erforderlich ist. Der kritische Punkt von CO₂ liegt bei 31,1 °C und 73,7 bar. In einem herkömmlichen (unterkritischen) Klimatisierungskreislauf ist die niedrige kritische Temperatur ein Nachteil, da sie den Betriebstemperaturbereich einschränkt. Außerdem ist die Verdampfungsenthalpie bei Temperaturen unterhalb, aber nahe der kritischen Temperatur reduziert. Dies führt zu einer Verringerung der Wärmekapazität und einer schlechten Leistung des Systems [15]. Daher sollte eine herkömmliche Klimaanlage nicht bei einer Wärmeabfuhrtemperatur nahe der kritischen Temperatur betrieben werden. In einem transkritischen Klimatisierungssystem sind die Verdichter-Auslassdrücke größer als der überkritische Druck und die Verdichter-Austrittstemperaturen werden nicht mehr durch die kritische Temperatur begrenzt. Die niedrige kritische Temperatur von CO₂ bietet die Möglichkeit, transkritisch zu arbeiten. Ein weiteres wichtiges Kriterium für CO₂-Klimaanlagen ist der hohe Arbeitsdruck. Sowohl unterkritische als auch transkritische Klimaanlagen mit CO₂ arbeiten mit höheren Drücken als die meisten anderen Kältemittel. Unterkritische CO₂-Klimaanlagen können mit einem Druck von 60 bis 70 bar arbeiten, während transkritische Systeme einen Druck von 80 bis 110 bar oder mehr aufweisen können. Der hohe Druck stellt eine Herausforderung für die Konstruktion in Bezug auf die Robustheit der Komponenten und die Leistungsfähigkeit der Kompressoren dar; die heutigen Fertigungsmöglichkeiten erlauben jedoch die Herstellung von Komponenten, die diese Anforderungen erfüllen. Allerdings sind die Kosten für CO₂-Kompressoren deutlich höher als für HFKW-Kompressoren. Darüber hinaus bietet der hohe Druck auch einige Vorteile: CO₂ hat eine relativ hohe Dampfdichte und dementsprechend eine hohe volumetrische Kühlkapazität. Dadurch kann ein kleineres CO₂-Volumen umgewälzt werden, um den gleichen Kühlbedarf zu erreichen, wodurch kleinere Komponenten und ein kompakteres System möglich sind [16,17].

2.1 Thermophysikalische Eigenschaften von CO₂

Eines der wichtigsten Merkmale von CO₂ in der Nähe des kritischen Punktes ist, dass sich seine Eigenschaften in einem isobaren Prozess schnell mit der Temperatur ändern. Bei Annäherung an den kritischen Punkt kommt es zu großen Veränderungen bei Enthalpie, Entropie, Dichte und Viskosität [18]. Im Vergleich zu herkömmlichen Kältemitteln hat CO₂ als Arbeitsmittel folgende Vorteile:

- ungiftig, nicht korrosiv, nicht brennbar und nicht explosionsgefährlich
- reiche Reserven und Kosteneffizienz
- gute Kompatibilität mit anderen Materialien und Schmiermitteln

- hohe Dichte im überkritischen Zustand, kleines Expandervolumen und kompakter Wärmeübertrager
- hohe Anpassungsfähigkeit von kritischer Temperatur und Druck an eine Vielzahl von externen Wärmequellen

Die thermophysikalischen, ökologischen und Sicherheitseigenschaften von CO₂ (R744) im Vergleich zu anderen Kältemitteln sind in Tabelle 2.1 aufgelistet [19-24].

Tabelle 2.1: Die wichtigsten Eigenschaften von R744 im Vergleich zu R410A, R32 & R22

Eigenschaften	R-744	R-410A	R-32	R-22
Chemische Formel	CO ₂	CH ₂ F ₂ +CHF ₂ CF ₃	CH ₂ F ₂	CHClF ₂
GWP (100 Jahre)	1	2088	677	1760
ODP	0	0	0	0,05
Entflammbarkeit und Toxizität	A1	A1	A2L	A1
Molekulare Masse (kg/kmol)	44,0	72,6	52,02	86,5
Kritischer Druck (MPa)	7,38	4,902	5,782	4,990
Kritische Temperatur (°C)	31,1	71,3	78,4	96,0
Siedetemperatur (°C)	-78,4	-51,40	-51,65	-41,09
T-Glide (K)	-	0,05	-	-
Volumetrische Kälteleistung (kJ/m ³)	22545	6763	5929	4356
Flüssigkeitsdichte ^a (kg/m ³)	927,43	1170,6	1055,8	1282,0
Dampfdichte ^a (kg/m ³)	97,65	30,43	21,98	21,13
Cp-flüssig ^a (kJ/kg K)	2,54	1,52	1,74	1,17
Cp-Dampf ^a (kJ/kg K)	1,86	1,13	1,25	0,74
Flüssige Viskosität ^a (μPa s)	100,40	161,79	150,74	216,33
Dampfviskosität ^a (μPa s)	14,56	12,22	11,50	11,36
Wärmeleitfähigkeit-flüssig ^a (mW/m K)	109,15	103,18	145,37	94,81
Wärmeleitfähigkeit-Dampf ^a (mW/m K)	20,40	12,12	11,72	9,40
Latente Verdampfungswärme ^a (kJ/kg)	230,89	221,49	315,53	205,17

^a bei 0 °C

Kim et al. [18] geben einen Überblick über die grundlegenden Merkmale transkritischer CO₂-Kreisläufe: Von den Flüssigkeitseigenschaften bis zu den Herausforderungen der Anwendung. Die Studie ergab, dass die volumetrische Wärmekapazität von CO₂ 3- bis 10-mal größer ist als die von Fluorchlorkohlenwasserstoffen (FCKW), teilhalogenierten Fluorchlorkohlenwasserstoffen (H-FCKW), HFKW oder KW-Kältemitteln. Eine besondere Herausforderung bei der

Modellierung transkritischer CO₂-Systeme ist die Charakterisierung der thermophysikalischen Eigenschaften des Fluids in der Nähe des kritischen Punktes. In dem Bemühen, die Wärmeübertragung in der Nähe des kritischen Punktes zu charakterisieren, untersuchten Ma et al. [25] experimentell die Auswirkungen des CO₂-seitigen Drucks, der Temperatur und des Massenflusses zusätzlich zum wasserseitigen Massenfluss auf die Wärmeübertragungseigenschaften von CO₂. Während die daraus resultierende aktualisierte Nusselt-Korrelation eine Genauigkeit von $\pm 30\%$ aufwies, zeigten die Tests der Wärmeübergangskoeffizienten für verschiedene Parameter konsistente Trends mit dem gemeinsamen Auftreten des Maximums etwas oberhalb der kritischen Temperatur. Die Autoren stellten auch eine starke Korrelation zwischen dem CO₂-Auftrieb und den Wärmeübergangskoeffizienten in der Nähe des kritischen Punktes fest, was einen Einblick in die Quelle der bemerkenswerten Eigenschaftsschwankungen in diesem Bereich bietet. Diese Eigenschaftsschwankungen stellen eine Herausforderung für die genaue Modellierung von Wärmeübertragern (HX) bei Phasenübergängen in der Nähe des kritischen Punktes dar. Um eine rechnerisch effiziente Lösung für diese Herausforderung zu bieten, haben Barta et al. [26] ein Gaskühlermodell mit beweglicher Grenze entwickelt und validiert, das in der Lage war, die Wärmeabgaberraten innerhalb eines mittleren Fehlers von $\pm 4,7\%$ und die Auslasstemperatur des Gaskühlers innerhalb von 3 K über einen breiten Bereich von Bedingungen vorherzusagen. Dies wurde durch die Trennung der Eigenschaften nahe und oberhalb des kritischen Punktes in überkritische Flüssigkeit und überkritischen Dampf mit Hilfe der thermophysikalischen Eigenschaftsbibliothek CoolProp [27] erreicht.

Abbildung 2.1 zeigt die Änderungen von Enthalpie und Entropie in Abhängigkeit von der Temperatur bei konstantem Drücken [18]. Im überkritischen Bereich ändern sich Enthalpie und Entropie schnell mit der Temperatur in der Nähe des kritischen Punktes. Die Auswirkung der Druckänderung auf die Enthalpie und Entropie ist oberhalb der kritischen Temperatur größer als unterhalb der kritischen Temperatur.

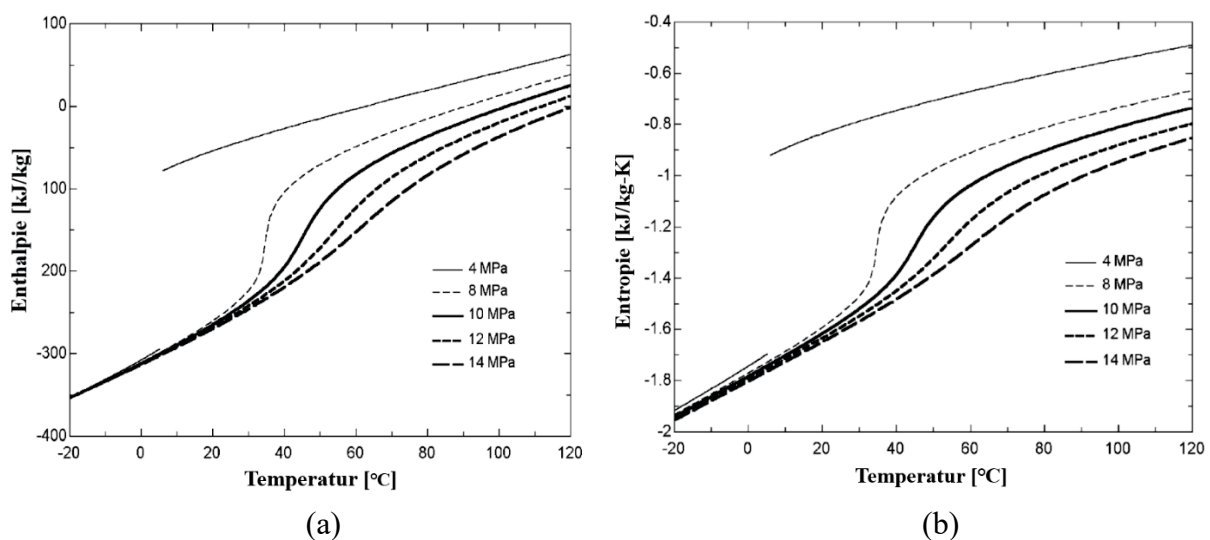


Abbildung 2.1: Enthalpie- und Entropieänderung von CO₂ im Gaskühlprozess [18]

Andererseits zeigt Abbildung 2.2 (a) die spezifische Wärmekapazität als Funktion der Temperatur. Die spezifische Wärmekapazität erreicht bei einem isobaren Prozess einen Höchstwert in der Nähe des pseudokritischen Punktes. Abbildung 2.2 (b) verdeutlicht die Dichte von CO₂ als Funktion der Temperatur. In der Nähe des kritischen Punktes ändert sich die Dichte von CO₂ schnell mit der Temperatur.

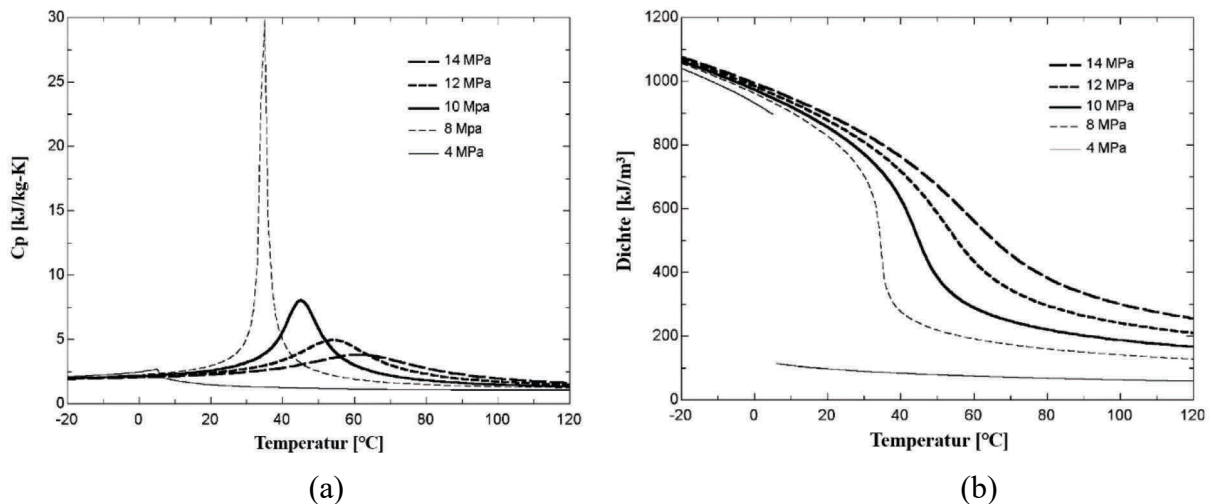


Abbildung 2.2: Spezifische Wärme und Dichte von Kohlendioxid in Abhängigkeit von der Temperatur [18]

Die Eigenschaften von CO₂ unterscheiden sich deutlich von den Eigenschaften der herkömmlichen Kältemittel. Im Vergleich zu FCKW, HFCKW und HFKW hat CO₂ einen viel höheren Dampfdruck und seine volumetrische Kapazität (22.545 kJ/m bei 0 $^{\circ}\text{C}$) ist 3- bis 10-mal größer.

2.2 Transkritische CO₂-Systeme

Der kritische Punkt ist definiert als ein Zustand, in dem oberhalb des kritischen Drucks keine Verflüssigung stattfindet und oberhalb der kritischen Temperatur kein Gas gebildet wird. Das Fluid befindet sich im überkritischen Bereich, wenn sowohl Druck als auch Temperatur den kritischen Punkt überschreiten. Der Gasabkühlungsprozess des transkritischen Zyklus findet statt, wenn sich das Fluid im überkritischen Bereich befindet [28]. Der Begriff „transkritisch“ leitet sich von der Eigenschaft dieses Zyklus ab. Die Wärmeaufnahme erfolgt bei konstanter Temperatur unterhalb der kritischen Temperatur (subkritisch), während die Wärmeabgabe bei einem Druck oberhalb des kritischen Drucks (überkritisch) erfolgt. Der Grund, warum CO₂ in diesem Prozessführung betrieben werden sollte, ist die sehr niedrige kritische Temperatur von CO₂, nämlich 31 $^{\circ}\text{C}$. Zudem liegt die Außenlufttemperatur von den meisten Klimaanlage, die in heißem Klima betrieben werden, größtenteils um oder über diesem Wert. Selbst wenn die Klimaanlage unterhalb des kritischen Punktes betrieben werden kann, ist die Kühlleistung sehr gering [29].

Ausgehend von den strukturellen Merkmalen und der Zirkulationsweise einer typischen transkritischen CO₂-Anlage lassen sich ihre grundlegenden Eigenschaften wie folgt zusammenfassen:

- Während der sensiblen Wärmeübertragung auf der Hochdruckseite findet kein Phasenwechsel statt, so dass die Temperatur der CO₂-Flüssigkeit kontinuierlich abnimmt, weshalb das Heizmedium kontinuierlich auf eine sehr hohe Temperatur erhitzt werden kann.
- Der Auslassdruck des Verdichters ist höher als 7,377 MPa [30] und der Betriebsdruck des Systems ist deutlich höher als bei Systemen mit herkömmlichen Kältemitteln.
- Der Druckunterschied zwischen Hoch- und Niederdruckseite in einem transkritischen CO₂-Kreislauf ist viel größer, jedoch ist das Druckverhältnis kleiner als bei herkömmlichen Kältemitteln.

2.3 Vergleich von transkritischen und konventionellen Kompressionszyklen

In einer herkömmlichen Klimaanlage findet der gesamte Zyklus unterhalb des kritischen Punktes des verwendeten Kältemittels statt. Die Wärmeaufnahme erfolgt durch Verdampfung des Kältemittels bei niedrigem Druck und die Wärmeabgabe durch Kondensation des Kältemittels bei hohem Druck. In einem transkritischen Kreislauf dient ein Verdampfer immer noch der Wärmeaufnahme, aber die Wärmeabfuhr erfolgt nicht durch Kondensation. Der Kältemittel-Druck wird in den überkritischen Bereich erhöht, und die Wärmeabfuhr erfolgt durch einphasige sensible Kühlung (Gaskühlung). Abbildung 2.3 zeigt die Unterscheidung zwischen einem unterkritischen und einem transkritischen Kreislauf in separaten P-h-Diagrammen.

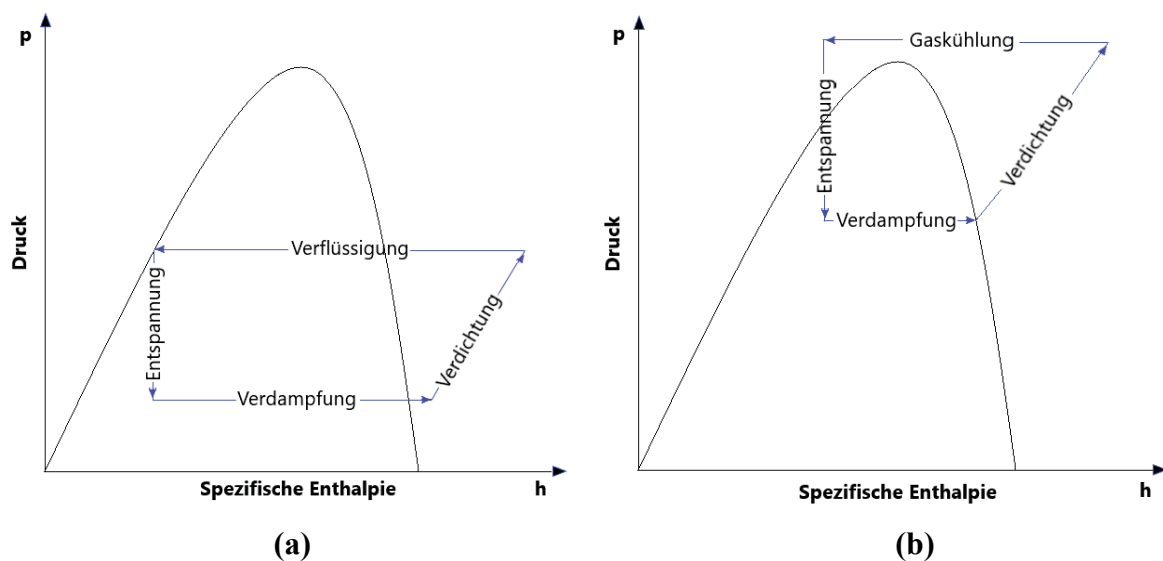


Abbildung 2.3: P-h-Diagramm von a) unterkritischem System b) überkritischem System

Die Wärmeabfuhr erfolgt über den Gaskühler und nicht über einen Verflüssiger. Um den transkritischen Kreislauf effektiv nutzen zu können, müssen der große Druckunterschied und die Besonderheit des Gaskühlprozesses berücksichtigt werden. Die Optimierung des transkritischen Kreislaufs hängt von den Komponenten und verschiedenen Betriebsparametern ab, die sich von denen des herkömmlichen Kreislaufs unterscheiden. Bestimmte Wärmeanwendungen profitieren von den Eigenschaften des transkritischen Kreislaufs. Der Druckunterschied zwischen dem Wärmeabgabedruck (Gaskühlerdruck) und dem Wärmeaufnahmedruck (Verdampferdruck) ist in einem transkritischen CO₂-System viel größer als in einem typischen unterkritischen System. Dies führt zu großen thermodynamischen Verlusten während des Expansionsprozesses. Daher zeigte das transkritische CO₂-Kühlsystem aufgrund der großen Drosselverluste und der hohen Irreversibilität während des Gaskühlprozesses eine geringere Leistung als herkömmliche Klimaanlage. Im Allgemeinen ist die Leistung des CO₂-Systems empfindlicher gegenüber dem Druck des Gaskühlers und der Außentemperatur als die von konventionellen Kältemittelsystemen.

Der große Druckunterschied macht es jedoch auch möglich, eine Vorrichtung zur Rückgewinnung von Expansionsarbeit in das System zu integrieren. Die Rückgewinnung der Expansionsarbeit könnte die großen Drosselverluste transkritischer CO₂-Klimaanlagen teilweise ausgleichen [31]. Es sollte auch beachtet werden, dass das Druckverhältnis des transkritischen Systems tatsächlich niedriger ist als das vieler konventioneller Systeme. Transkritische CO₂-Systeme arbeiten in der Regel mit einem Druckverhältnis von drei oder vier, während ein R134a-System mit einem Druckverhältnis von bis zu acht arbeiten kann [32]. Das niedrigere Druckverhältnis ermöglicht es dem Kompressor des transkritischen Systems, mit größerer Effizienz zu arbeiten.

2.4 Forschung zum neuartigen transkritischen CO₂-Kreislauf

2.4.1 BCTC mit internem Wärmeübertrager

In der Forschung über den neuartigen transkritischen CO₂-Kreislauf hat der interne Wärmeübertrager viel Aufmerksamkeit auf sich gezogen. Der interne Wärmeübertrager bringt den Austrittsdampf des Gaskühlers in thermischen Austausch mit dem Austrittsdampf des Verdampfers, wie in Abbildung 2.4 zu sehen ist. Abbildung 2.5 zeigt außerdem das entsprechende *P-h*-Diagramm. Der Einsatz dieses Wärmeübertragers hat zwei gegenläufige Effekte: Eine Erhöhung der Kälteleistung aufgrund der Unterkühlung (4'-4'') und eine Erhöhung der Verdichtungsarbeit aufgrund der höheren Ansaugtemperatur (8'-8''). Die Auswirkungen auf den Gesamtwirkungsgrad des Systems hängen von den Betriebsbedingungen und den Arbeitsmedien ab. Bei CO₂ sind die Vorteile jedoch erheblich. Der optimale Druck ist niedriger, wenn ein interner Wärmeübertrager (IHX) vorhanden ist, und die Drosselverluste sind im Vergleich zu einem System ohne IHX geringer. Es wurde jedoch ein Anstieg der Verdichter-Austrittstemperatur um 10 °C bei einer Verdampfungstemperatur von -15,0 °C festgestellt, was den Betrieb der Anlage bei niedrigen Verdampfungswerten einschränkt [33]. Tatsächlich ändert sich der

Einfluss des IHX in Abhängigkeit von den Betriebsbedingungen. Der interne Wärmeübertrager wirkt sich negativ aus, wenn im Kohlendioxidkreislauf das Drosselventil durch den Expander ersetzt wird.

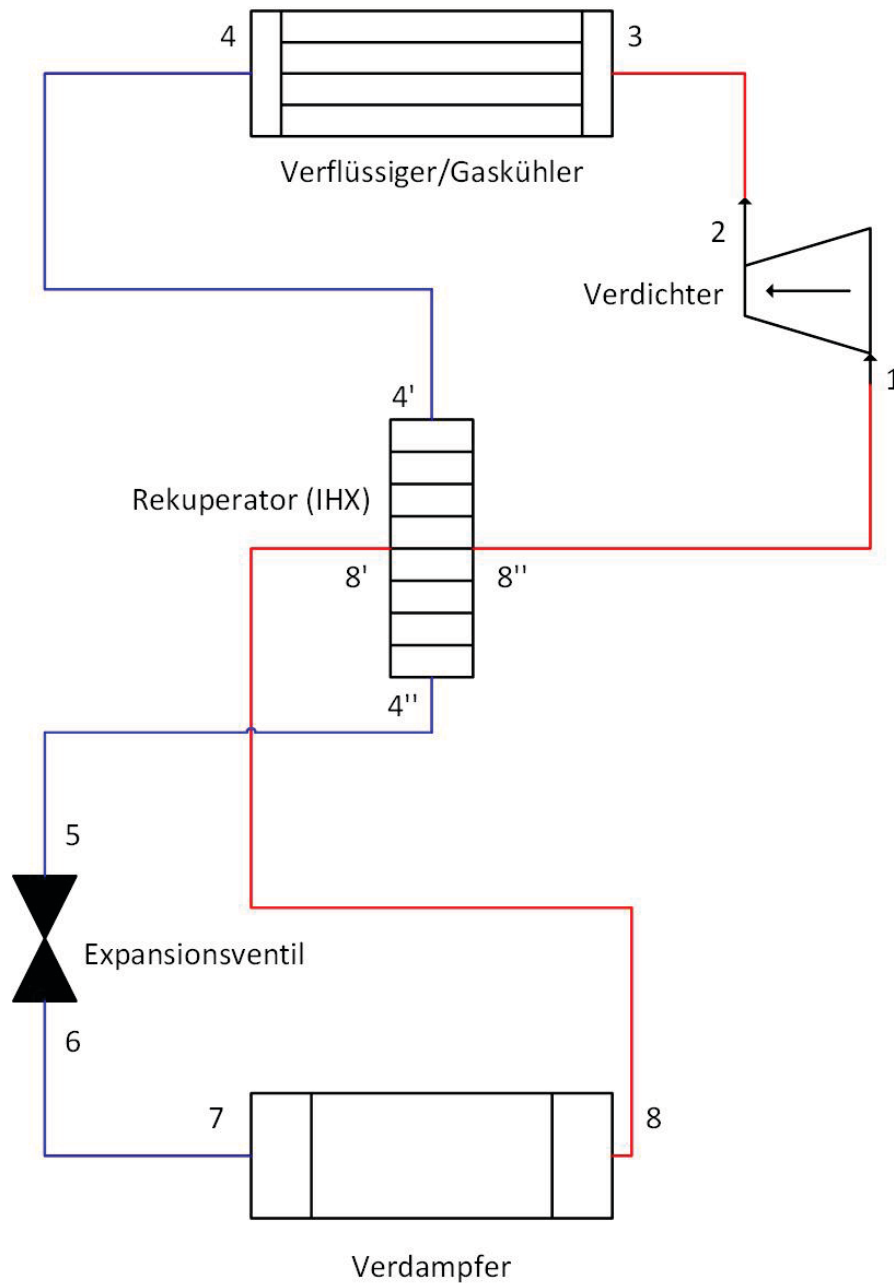


Abbildung 2.4: Transkritischer Kreislauf mit internem Wärmeübertragerschema