

White paper

Thermodynamische Chancen und Grenzen bei der Entwicklung höchst energieeffizienter Kälte-, Wärmepumpen- und Klimaanlage

In der Kältetechnik sorgen Energieverbrauch und Energieeffizienz für ständigen Gesprächsstoff. In diesem Strategiepapier werden die theoretischen Grenzen des Carnot-Prozesses sowie der realitätsnahere theoretische Ansatz des Kompressionskältekreislaufs erörtert. Durch den Vergleich dieser theoretischen

Prozesse mit echten Kälteanlagen können wir Möglichkeiten zur Verbesserung der Energieeffizienz des Kompressionskältekreislaufs erkennen. Und durch Auswertung der Daten aus bestehenden Kälteanlagen lässt sich die Energieeffizienz der derzeit modernsten Systeme einschätzen.



Kälteprozesse

Der überall gegenwärtige Kompressions-Kältekreislauf verdient eine Neubewertung und steht deshalb im Fokus dieses Strategiepapiers. Der Kompressions-Kälteprozess ist energieeffizient und wirtschaftlich und findet deshalb breite Anwendung in Kälte-, Wärmepumpen- und Klimaanlage. Andere Energieumwandlungsprozesse (z. B. magnetische, Sorptions- und Joule-Prozesse) kommen dagegen nur in Nischen zum Tragen.

Das Prinzip des Kompressions-Kältekreislauf bleibt stets gleich. Dabei spielt es keine Rolle, ob er in

Kälteanlagen verwendet wird (um für eine Kühlung unterhalb der Umgebungstemperatur zu sorgen), in Wärmepumpen (um Wärme zu liefern, die über der Umgebungstemperatur liegt) oder in Klimaanlage (um für Kühlung zu sorgen, die geringfügig kälter als die Umgebungstemperatur ist). Da jedoch die Definition der Energieeffizienz von Anwendung zu Anwendung leicht variiert, wird – der Einheitlichkeit halber – in diesem Strategiepapier die Definition aus dem Bereich der Kälteanlagen verwendet.

Beurteilung der Energieeffizienz von Kältekreisläufen

Der Carnot-Kreisprozess

Die Leistungszahl (Coefficient of Performance, COP) wird verwendet, um die Energieeffizienz des Kompressions-Kältekreislaufs zu bewerten. In einer Kälteanlage drückt der COP das Verhältnis zwischen der Kälteleistung \dot{Q}_K (Nutzen) und der aufgewendeten Leistung P (Aufwand) aus, die erforderlich ist, um eine Kühlung zu erzielen.

$$COP = \frac{\dot{Q}_K}{P}$$

Der COP besitzt zwar keine Höchstgrenze, doch die Bewertung der Energieeffizienz einer bestimmten Kälteanlage erfordert einen theoretischen Grenzwert.

Nicholas L. S. Carnot hat diesen Grenzwert in dem Carnot-Kreisprozess ausgedrückt, den er Anfang des 19. Jahrhunderts entwickelt hat. Laut dem Carnot-Kreisprozess wird dem zu kühlenden Bereich die Wärmemenge \dot{Q}_K bei konstanter Temperatur T_K entzogen. Und die Wärmemenge \dot{Q}_W wird bei konstanter Temperatur T_W an die Umgebung abgegeben. Um dies zu bewerkstelligen, ist Arbeit (P) erforderlich. Die Energiebilanz wird folgendermaßen ausgedrückt:

$$P = \dot{Q}_W - \dot{Q}_K$$

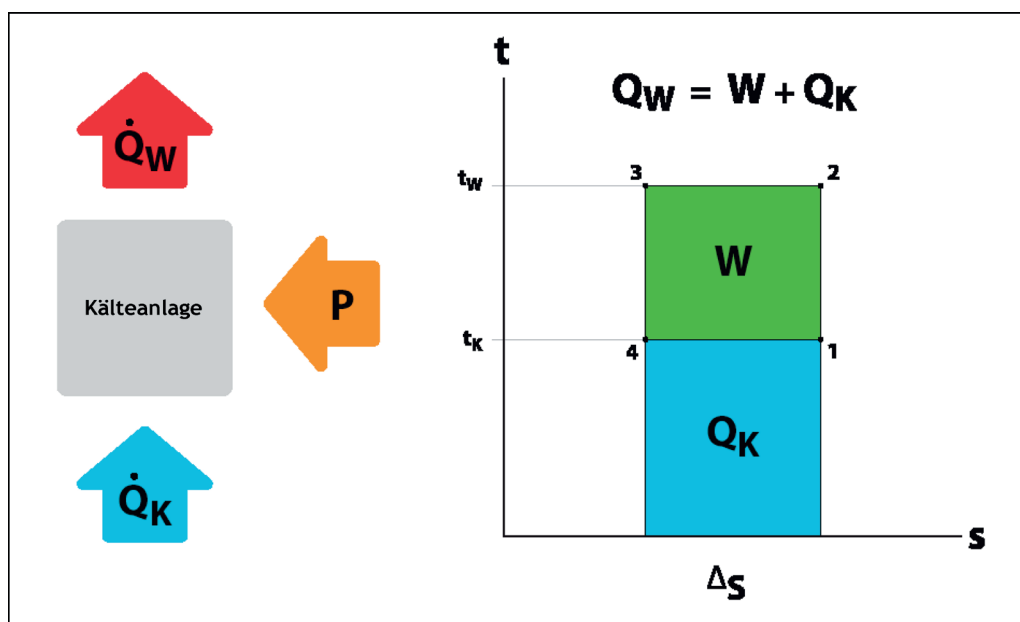


Abbildung 1: Der Carnot-Prozess

Der reversible Carnot-Kreisprozess stellt ein perfektes Modell für einen zwischen zwei festen Temperaturwerten betriebenen Kältekreislauf dar, weil er den maximal möglichen COP definiert. Der COP_{Carnot} des reversiblen Carnot-Kreisprozesses ist ausschließlich von den Temperaturen abhängig.

$$COP_{Carnot} = \frac{T_K}{T_W - T_K}$$

Die COP_{Carnot} -Werte sind für kleinere Temperaturdifferenzen zwischen T_W und T_K ziemlich hoch, wie Abbildung 2 zu entnehmen ist. Doch bei großen Temperaturdifferenzen und niedrigen Kühltemperaturen sinkt der COP_{Carnot} -Wert beträchtlich.

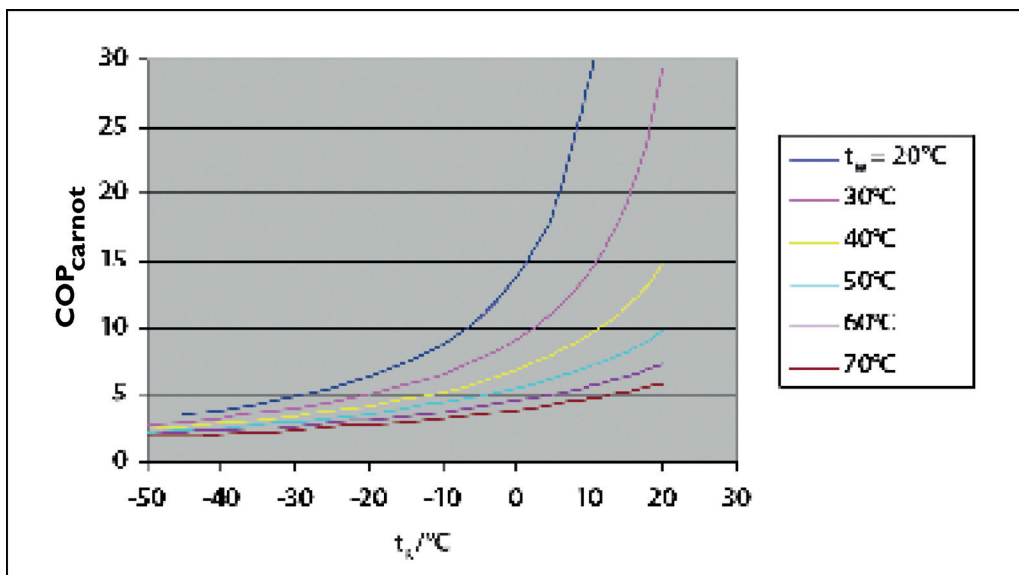


Abbildung 2: COP des Carnot-Prozesses

tatsächlich betriebene (reale) Kälteanlagen anwenden.

Da der reversible Carnot-Kreisprozess ideale Prozesse voraussetzt, lässt er sich nicht auf

Theoretischer Kältekreislauf

Abbildung 3 zeigt ein System nach dem Vorbild des idealen Carnot-Prozesses.

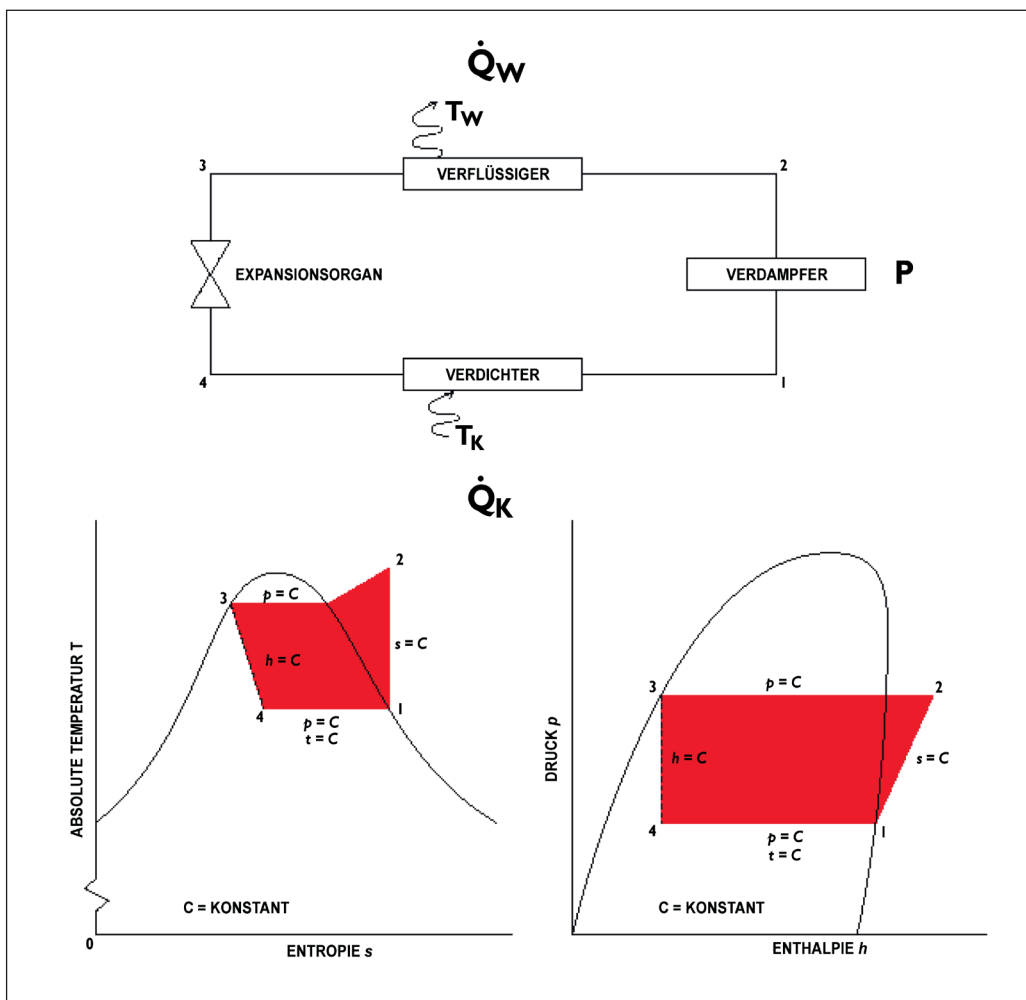


Abbildung 3: Theoretischer einstufiger Kompressions-Kältekreislauf

Um eine Wärmeaufnahme und -abgabe bei konstanten Temperaturen gemäß des Carnot-Kreisprozesses zu erzielen, findet der Prozess in dem zweiphasigen Bereich des Kältemittels statt. In diesem Bereich kann das Kältemittel während des Phasenwechsels eine konstante Temperatur beibehalten, indem ein konstanter Druck aufrechterhalten wird.

Dieses Modell weist im Vergleich zum reversiblen Carnot-Kreisprozess zwei wesentliche Unterschiede auf:

- Wegen der hohen Investitionskosten und des erhöhten Wartungsaufwands wird die Maschine für die isentrope Expansion des Kältemittels durch ein einfacheres Expansionsgerät ersetzt, das den Hochdruck des Kältemittels isenthalp in Niederdruck überführt. Durch die Verwendung eines einfacheren Expansionsgeräts (bspw. eines thermostatischen- oder eines elektronischen Expansionsventils bzw. eines Kapillarrohrs zur Drosselung des Kältemittels) wird Energie verschwendet, die mit einer komplizierteren Expansionsmaschine wiedergewonnen werden könnte. Derzeitige Expansionsmaschinen arbeiten nur in Großkälteanlagen wirtschaftlich.

- Der Kompressionsprozess sollte außerhalb des zweiphasigen Bereichs erfolgen, damit eine große Zuverlässigkeit sichergestellt wird. Aus diesem Grund ist die Temperatur an Punkt 2 in Abbildung 3 für gewöhnlich höher als T_w . Ein Teil des Verflüssigers muss für die Enthitzung verwendet werden und der Wärmeabgabeprozess an Punkt 2 und 3 erfolgt nicht mehr bei konstanter Temperatur.

Wegen dieser beiden Änderungen ist der theoretische Kreislauf nicht mehr reversibel.

Da die Eckpunkte des theoretischen Kreislaufs von den Eigenschaften des Kältemittels abhängig sind, unterscheidet sich der COP_t je nach Kältemittel.

Der Carnot-Faktor des theoretischen Kreislaufs dient als Maß, wie nah der Kreislauf dem idealen reversiblen Carnot-Kreisprozess kommt.

$$\eta_t = \frac{COP_t}{COP_{Carnot}} = \frac{COP_t}{\frac{T_o}{T_c - T_o}}$$

Abbildung 4 stellt den Carnot-Faktor des theoretischen Kreislaufs für unterschiedliche Kältemittel dar.

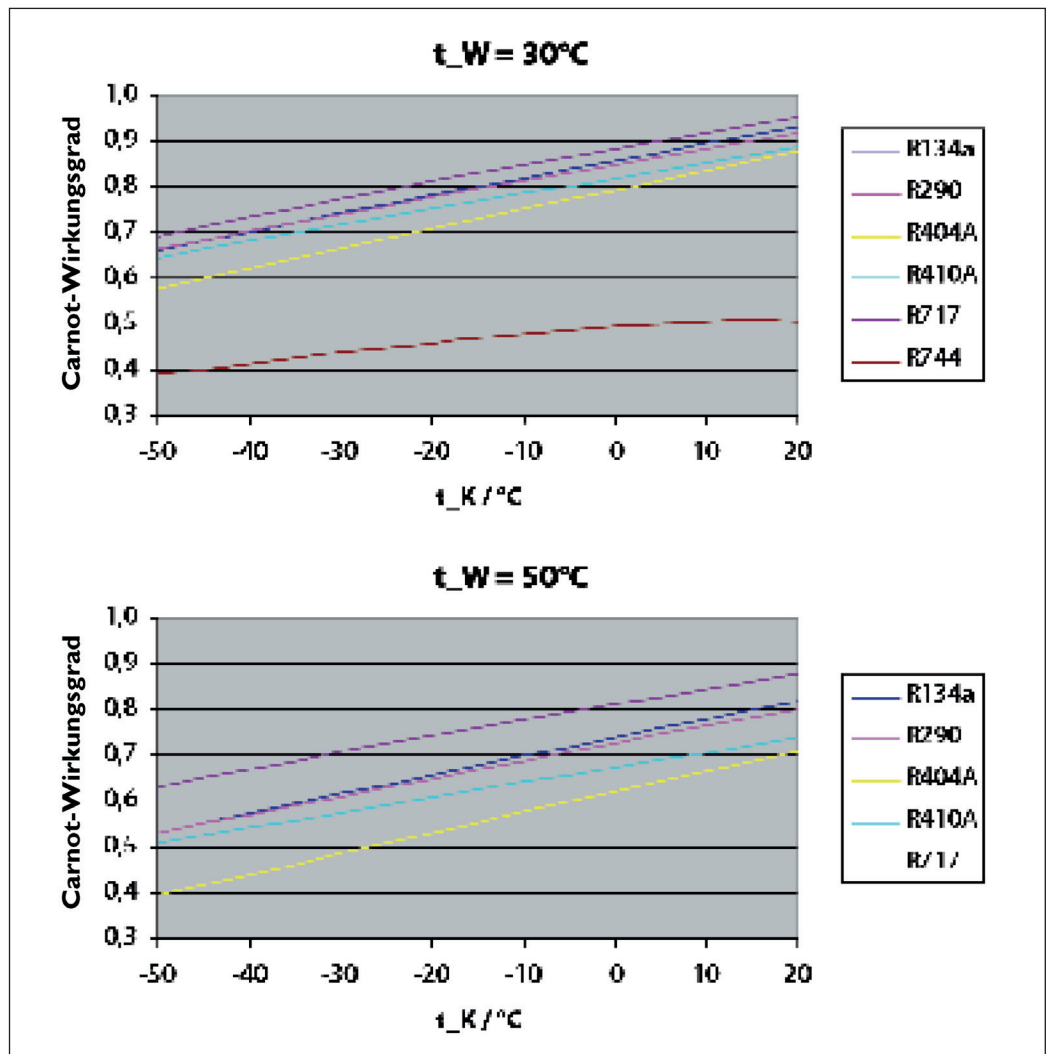


Abbildung 4: Carnot-Wirkungsgrad des theoretischen Kreislaufs mit unterschiedlichen Kältemitteln.

Der theoretische einstufige Kreislauf stellt das Optimum dar, das in realen (mit den in Abbildung 3 gezeigten vergleichbaren) Anlagen erreicht werden kann. Er ist kein Indikator dafür, wie effizient eine reale Anlage mit einem bestimmten Kältemittel sein wird oder welches Kältemittel verwendet werden sollte, um den höchsten Wirkungsgrad zu erzielen.

Realer Kältekreislauf

Tatsächlich betriebene (reale) Anlagen unterscheiden sich erheblich von dem im vorigen Abschnitt erörterten theoretischen Kreisprozess (Abbildung 5). Jede Abweichung von dem theoretischen Kreisprozess verursacht eine Irreversibilität innerhalb des Systems und jede Irreversibilität wiederum senkt den COP des Systems, indem sie zusätzlichen Energie-Input erfordert.

Um das Gesamtsystem energetisch optimieren zu können, sollte man verstehen, welche Teile des Gesamtsystems irreversibel sind und welche Komponenten ausgetauscht oder umgestaltet werden sollten, um die Leistung zu verbessern.

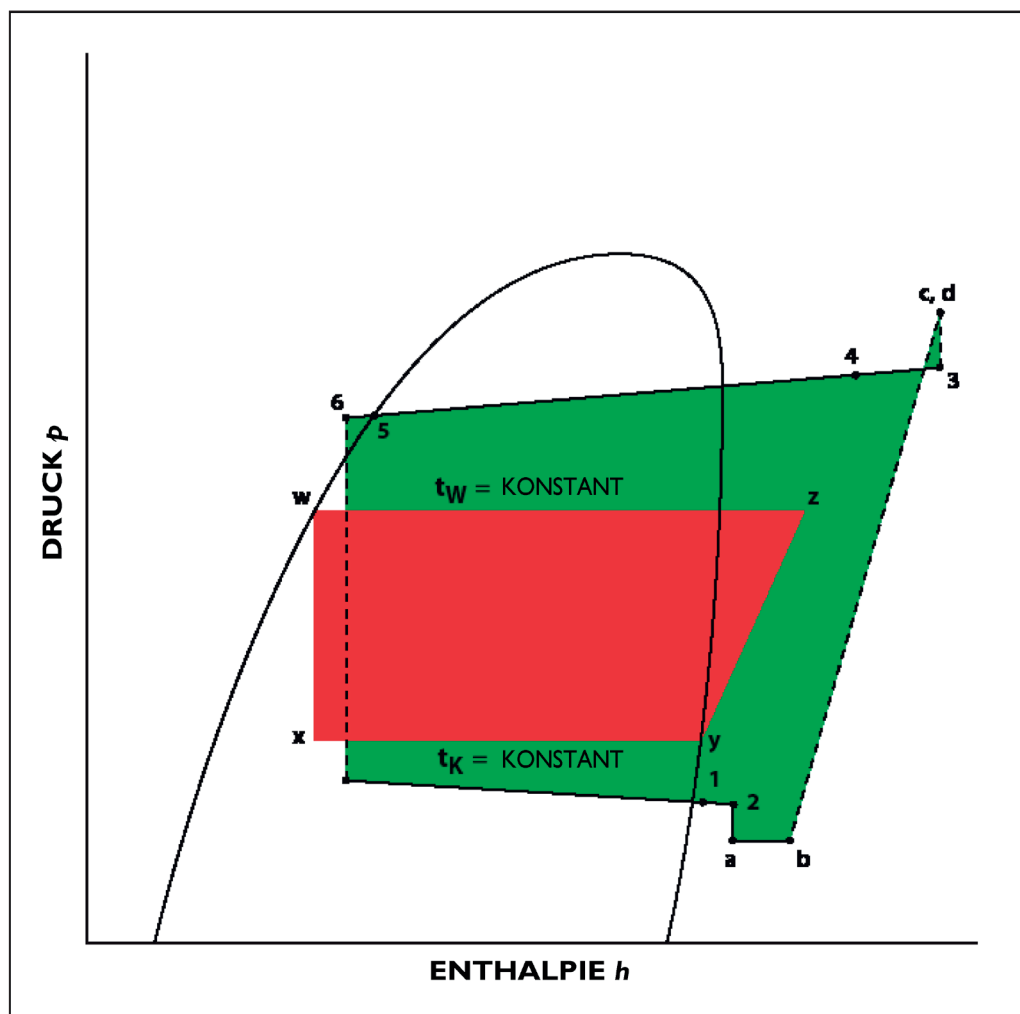


Abbildung 5: Druck-Enthalpie des tatsächlichen Systems und des theoretischen Systems bei Betrieb zwischen den Temperaturen T_K und T_W

Im Vergleich zum Carnot-Kreisprozess kommt es im realen Kältekreislauf zu folgenden Verlusten:

a. Verdichtung

Meistens treten am Verdichter die größten Verluste auf. Diese Verluste sind auf die Ineffizienz des Motors, auf Reibungsverluste sowie auf Irreversibilitäten zurückzuführen, die durch Druckabfälle, das Mischen und die Wärmeübertragung zwischen dem Verdichter und der Umgebung verursacht werden.

Der Wirkungsgrad des realen Verdichtungsprozesses im Vergleich zum idealen Prozess wird mit dem isentropen Verdichtewirkungsgrad η_{is} angegeben. Der typische Wert für kleinere vollhermetische Verdichter beträgt 0,5, für größere semi-hermetische Modelle 0,6 und für große Schrauben- oder Zentrifugalverdichter (Turboverdichter) 0,7. Die Höchstwerte können höher sein als die hier angegebenen Werte, weil die Verdichter nicht immer unter optimalen Bedingungen betrieben werden.

Die Bemühungen zur Steigerung des isentropen Wirkungsgrads konzentrieren sich darauf, den Wirkungsgrad des Elektromotors zu verbessern. Dies zielt nicht nur auf den Wirkungsgrad am Nennleistungspunkt ab, sondern auch auf den Wirkungsgrad im gesamten Betriebsbereich des Motors. Weitere Verbesserungen lassen sich bspw. durch Minimierung des Druckverlusts am Saug- und Druckventil bzw. durch Reduzierung der mechanischen Verluste im Antriebsmechanismus des Verdichters verwirklichen.

b. Wärmeübertrager

In Wärmeübertragern ist eine Temperaturdifferenz erforderlich, um Wärme in den Verdampfer

und aus dem Verflüssiger zu übertragen. Somit wird die Verdampfungstemperatur T_o unter den Idealwert T_k gesenkt und die Verflüssigungstemperatur T_c wird über den Mindestwert T_w gesteigert, wodurch der COP des realen Kreislaufs reduziert wird. Die Temperaturdifferenz auf beiden Seiten lässt sich mit einem größeren oder effizienteren Wärmeübertrager reduzieren, vorausgesetzt dieser ist energieeffizient.

Doch selbst mit einem optimalen Verdampfer ist eine bestimmte Temperaturdifferenz erforderlich, denn am Verdampferaustritt wird eine gewisse Kältemittelüberhitzung benötigt. Bei manchen Anwendungen (zum Beispiel in den Klimaanlage oder Wärmepumpen in Wohnhäusern) begrenzt die Überhitzung die Verdampfungstemperatur. Die Überhitzung sollte deshalb möglichst klein und stabil gehalten werden.

c. Druckverluste

Wenn ein Fluid durch ein Rohr fließt, verliert es Druck, was durch einen Verdichter kompensiert werden muss. Größere Rohre würden den Druckverlust reduzieren, könnten dabei aber auch den Ölrücklauf im System reduzieren. Um das Idealmaß zu finden, müssen wiederum energetische und wirtschaftliche Faktoren sowie die Probleme mit dem Ölrücklauf berücksichtigt werden.

Neben der Minimierung der oben genannten Verluste kann auch der Kältemitteltyp beträchtlichen Einfluss auf den COP der Anlage ausüben.

Obwohl dieser Artikel nur den Einfluss des thermodynamischen Kreislaufs auf Kälteanlagen untersucht, können sich auch andere Bauteile wie Lüfter, Pumpen und Abtauheizungen auf den Gesamtenergieverbrauch auswirken.

Wirkungsgrad vorhandener Anlagen

Um den Wirkungsgrad der auf dem Markt vorhandenen Anlagen zu dokumentieren, wurden repräsentative Daten zur vier Anwendungen (Tabelle 1) erfasst. Beachten Sie bitte, dass sowohl effizientere als auch weniger effiziente Anlagen erhältlich sind. Die COP-Werte werden mit dem COP-Wert des idealen Carnot-Kreisprozesses sowie mit dem COP-Wert des theoretischen Kreislaufs verglichen. Die

Daten beziehen sich immer auf den Betrieb bei einem Nennleistungspunkt. Tatsächlich können jedoch andere Betriebsbedingungen herrschen.

Tabelle 1: COP und Carnot-Faktor des idealen Carnot-Prozesses, des theoretischen Kreislaufs und der für verschiedene Anwendungsbereiche verfügbaren Kälteanlagen.

Anwendung	Kältemittel	t_K	t_W	COP_{Carnot}	COP_{theor}	η_{theor}	COP_{real}	η_{real}
Luf/Wasser-Wärmepumpe(1)	R290	2.0	35.0	9.34	7.61	0.81	3.2	0.34
Wohnhausklimaanlage	R410A	26.7	35.0	35.98	31.58	0.88	3.01	0.08
Kühlraumkälteanlage	R134a	5.0	32.0	10.30	8.91	0.87	1.85	0.18
Kühlraumgefriermaschine	R404A	-18.0	32.0	5.10	3.58	0.70	1.12	0.22

(1) Für die Wärmepumpe werden die COP-Definitionen für Heizungsanlagen verwendet:

$$COP = \dot{Q}_c / P \text{ und } COP_{Carnot} = \frac{T_w}{T_w - T_k} = \frac{T_k}{T_w - T_k} + 1$$

Die Daten in Tabelle 1 zeigen, dass der COP des theoretischen Kreislaufs noch ziemlich nah am COP des Carnot-Kreisprozesses liegt. Mit steigender Temperaturdifferenz zwischen der kalten und der warmen Seite infolge der oben erörterten Verluste sinkt der COP jedoch rapide. In manchen Anwendungsbereichen liegt der Carnot-Faktor η_{real} der realen Anlagen deutlich unter dem oberen Grenzwert des theoretischen Kreislaufs η_{theor} . Der hohe Carnot-Faktor η_{real} der Wärmepumpe bedeutet, dass diese Anwendung erheblich verbessert wurde, um einen höheren Wirkungsgrad der Heizung zu erzielen. Um die Angaben fair bewerten zu können, sollten Sie beachten, dass die Werte der realen Anlagen den Energieverbrauch

der Zusatzgeräte (insbesondere der Lüfter) einschließen. Darüber hinaus sind in der Praxis oft nur niedrigere Vorlauftemperaturen erforderlich, als in der Tabelle angegeben sind.

Für den Vergleich unterschiedlicher Anlagen eignet sich die einfache Beurteilung, die im VDMA Einheitsblatt 24247 [1] vorgeschlagen wird. Die Beurteilung zieht vier Effizienzfaktoren heran, um dem Planer/Konstrukteur die Bewertung des Gesamtwirkungsgrads der Anlage und die Auswahl der Komponenten zu erleichtern.

Jahresarbeitszahl

Die oben beschriebenen Überlegungen zum Wirkungsgrad einer Kälteanlage basieren auf dem Prozess, den Komponenten und dem Kältemittel bei stationärem Betrieb unter festen Bedingungen. Derzeit werden die meisten Kälteanlagen anhand von Nennbetriebsbedingungen ausgewählt und verglichen. Diese Auslegungsbedingungen entsprechen dem Spitzenbedarf, obwohl die meisten Anlagen in der Praxis unter geringerer Last betrieben werden. Der Ein/Aus-Betrieb stellt das herkömmliche Verfahren zur Handhabung variierender Kältebelastungen dar, obwohl es ineffizient ist. Anlagen mit variabler Leistung dank stetiger oder Stufenregelung können den schwankenden Lasten viel besser entsprechen und den Anlagenwirkungsgrad verbessern.

Schwankende Betriebsbedingungen während eines bestimmten Zeitraums (zum Beispiel eines Jahres) lassen sich durch den Vergleich von Anlagen bei reduzierter Leistung und durch Bestimmung der Jahresarbeitszahl leichter beurteilen. Bei einer Kälteanlage kann dies zu einer Auslegung führen, bei der der höchste Wirkungsgrad in einem bestimmten Teillastbereich erreicht werden muss, während der Wirkungsgrad bei Volllast als weniger wichtig angesehen werden kann, weil die Anlage nur sehr selten unter Volllast betrieben wird.

Wegen der großen Zahl äußerer Einflüsse kann sich die Einschätzung der Jahresarbeitszahl bereits installierter Kälte-, Wärmepumpen- oder Klimaanlage als sehr komplexes Unterfangen erweisen. Bei Wärmepumpen in Wohngebäuden sind z. B. die Verdampfungsbedingungen und die gewünschte Heizleistung von der Umgebungstemperatur abhängig, was sich wiederum auf die Verflüssigungstemperatur auswirkt. Und je nach geografischer Lage und Jahreszeit arbeitet die Wärmepumpe zu unterschiedlichen Zeiten bei höheren, mittleren oder niedrigeren Umgebungstemperaturen.

Um den Wirkungsgrad von Anlagen vergleichen zu können, wurden Standards entwickelt, die den Betriebsbedingungen im Jahresverlauf unterschiedlicher Klimazonen entsprechen. Der Standard AHRI 210/240 [2] definiert bspw. die Kennzahlen Seasonal Energy Efficiency Ratio (SEER) und Heating Seasonal Performance Factor (HSPF) für einheitliche Klima- und Wärmepumpenanlagen. Sowohl SEER als auch HSPF basieren auf den Wirkungsgraden und den Leistungskennzahlen, die in bis zu fünf Prüfzuständen gemessen wurden und bei denen jeweils ein typisches Lastprofil zugrunde gelegt wurde.

Ein weiteres Beispiel sind die Kennzahl SEER für Kältsysteme sowie die Kennzahl Seasonal Coefficient of Performance (SCOP) für Heizungen, die in der Norm prEN14825 [3] für Klimaanlage, Kaltwassersätze und Wärmepumpen definiert sind. Beide Berechnungen basieren auf vier Wirkungsgraden bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen. Diese Wirkungsgrade werden gegen vier Faktoren abgewogen, die einem durchschnittlichen europäischen Klimaprofil und einer mittleren Gebäudelast entsprechen.

Literaturhinweise

- [1] VDMA Einheitsblatt 24247-2: Energieeffizienz von Kälteanlagen. Teil 2: Anforderungen an das Anlagenkonzept und die Komponenten (Entwurf). Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau, Frankfurt, Juli (2010)
- [2] AHRI Standard 210/240: 2008 Standard for Performance Rating of Unitary Air-Conditioning & Air Source Heat Pump Equipment. Air-Conditioning, Heating, and Refrigeration Institute, Arlington, USA (2008)
- [3] prEN 14825:2010: Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps, with electrically driven compressors, for space heating and cooling - Testing and rating at part load conditions (2010)

Die Danfoss-Produktpalette für die Kälte- und Klimatechnik

Danfoss Refrigeration & Air Conditioning ist ein weltweit führender Hersteller Kältekomponenten für die Gewerbekälte, Industriekälte und Supermärktanwendungen sowie Anbieter für Lösungen im Bereich Klimatechnik.

Unser Hauptaugenmerk liegt auf der Herstellung qualitativ hochwertiger Produkten, Bauteilen und Systemen zur Leistungsoptimierung und zur Reduzierung von Betriebskosten von Kälte-, Klimaanlage und Wärmepumpen.



Komponenten für die Gewerbekälte



Komponenten für die Industriekälte



Elektronische Regler



Industrieprogrammierung



Verdichter für die Kleinkälte



Verdichter für gewerbliche Anwendungen



Verflüssigungssätze



Thermostate



Plattenwärmeübertrager

Wir bieten Ihnen eines der weltweit umfassendsten Portfolios an innovativen Bauteilen und Systemen für Kälte- und Klimaanlage, alles aus einer Hand. Wir kombinieren unsere Spitzenstellung in Technik und Qualität mit einer starken Logistik und einer moderaten Preisgestaltung. Damit sind wir für Sie der ideale Partner zum Erreichen Ihrer Geschäftsziele.