

Ein Rechenmodell zur Bewertung von Kälteanlagen

## Simulation der energetischen Güte von Kälteanlagen

**Alle reden von Energieoptimierung, besser Ausnutzung der Ressourcen, Erhöhung der Wirkungsgrade und nachhaltiger Energiewirtschaft. Eine wichtige Rolle spielt da die Reduzierung des Energiebedarfes von Kälte- und Klimaanlage. Diese tragen mit etwa 14% zum gesamten Stromverbrauch in Deutschland bei. Hier wird versucht durch entsprechende Investitionen in neue Technologien die Güte der vorhandenen und der neuen Anlagen zu verbessern. Das Förderprogramm, welches vom Bafa in die Praxis umgesetzt wird, zielt in diese Richtung. Speziell das Förderprogramm für „gewerbliche Kälteanlagen“ ist für viele Betreiber eine gute Möglichkeit notwendige Investitionen zu erleichtern. Aber auch für dem Kälteanlagenbaubetrieb ergeben sich interessante Ansätze für neue Betätigungsfelder. Dabei muss natürlich immer bei der Frage der Energieeffizienz diese auch zahlenmäßig erfasst werden. Wie allen Probleme dieser Welt sucht man auch bei der Energieoptimierung nach einer einfachen Lösung. Speziell der Wahl des geeigneten Kältemittels scheint man wieder besondere Aufmerksamkeit zu widmen: Immer wieder liest oder hört man, dass ein Kältemittel einen besseren COP bzw. geringeren Energieverbrauch hat als ein anderes.**

### **Welches Kältemittel für geringeren Energieverbrauch**

In der Gewerbe- und Industriekälte werden seit einigen Jahren bevorzugt die beiden Kältemittel R 134a und R 404A/R507 eingesetzt. Immer wieder liest oder hört man Aussagen über die energetische Güte der beiden Kältemittel. R 134a soll demnach energetisch besser sein, dafür würde R404A/R507 geringere Investitionskosten liefern. Hauptsächlich wird über den COP argumentiert. Der COP, der **Coeffizient Of Performance**, ist definiert als eine Kennzahl, die angibt wie viel Nutzen durch welchen Aufwand entsteht. Früher wurde dieser COP gerne auch als Leistungsziffer bezeichnet, im Zeitalter der Globalisierung ist dieser Begriff schon fast verschwunden. Berechnen kann man diesen COP aus der nutzbaren Enthalpie des Verdampfer geteilt durch die Enthalpieerhöhung bei der Verdichtung, bedingt durch die Leistungsaufnahme des Verdichters. Diese Werte hängen von unterschiedlichen Faktoren ab: der Verdampfungs- und Verflüssigungstemperatur, der Unterkühlung vor dem Expansionsventil und der Erwärmung in der Saugleitung, um nur einige der Wichtigsten zu nennen. Der COP ist demnach eine Zahl, mit der man direkt, ohne die Leistung der Anlage kennen zu müssen, die energetische Güte beurteilt werden kann.

**CoolTool Technology GmbH**

D-47229 Duisburg

phone +49-2065-548 505

fax +49-2065-548 507



Je nachdem wie die entsprechenden Stoffdaten des Kältemittels, wie z.B. Dichte, die molekulare Masse der Moleküle und spezifische Wärmekapazität des Gases sind, ergeben sich für die unterschiedlichen Kältemittel andere Isentrope Wirkungsgrade. Grundsätzlich kann man sagen, das Kältemittel mit geringeren Druckanstieg, also flacher Dampfdruckkurve, weniger Antriebsenergie im Verdichter brauchen, um die gleiche Leistung zu erbringen. Also weniger Aufwand bei gleichem Nutzen, was zu besseren COP führt.

Dies lässt sich anschaulich vereinfacht darstellen: Der Verdichter muss weniger Druck aufbauen, braucht also weniger Antriebsenergie. Vergleicht man für einen Standard Prozess mit einer Verdampfungstemperatur von  $t_o = -10^{\circ}\text{C}$  und einer Verflüssigungstemperatur von  $t_c = +45^{\circ}\text{C}$  bei ansonsten gleichen Bedingungen wie z.B. Überhitzung und Unterkühlung die Daten der beiden Kältemittel, so ergibt sich folgendes Bild:

	R 134a	R 404A/R 507
$t_o / t_c$ / [ $^{\circ}\text{C}$ ]	-10/45	-10/45
Druck Verdampfung / [bar]	2	4,34
Druck Verflüssigung / [bar]	11,6	20,51
COP / [ - ]	2,61	2,48
W el /kWh/ a	157154	166776

Tabelle 1: COP Werte von R 134a und R 404A/R 507 im Auslegungspunkt

Damit lässt sich erkennen, dass R 134a hat in der Tat einen besseren COP hat: Ca. 5% weniger Energie benötigt der Verdichter bei den gewählten Verhältnissen. In Energiebedarf ausgedrückt, wird eine Anlage mit typischer Auslastung mit R 134a ca. 9622 kWh Energie weniger benötigen.

Damit ist eine einfache Lösung der Frage naheliegend: Die flächendeckende Verwendung von R 134a würde anscheinend 5% Energie einsparen. Die einfache Lösung scheint in greifbarer Nähe zu sein.

## Konstruktionsmerkmale und Regelverhalten

Aber die Verhältnisse sind leider nicht so einfach, wie es bislang dargestellt wurde. Kälteanlagen werden, wie fast alle technischen Bauteile, für einen bestimmten Betriebspunkt entworfen, den sogenannten Auslegungspunkt. Die meisten Anlagen laufen aber nur kurze Zeit unter diesen Betriebszuständen. Die jeweiligen Betriebszustände, die sich einstellen, hängen von der Konstruktion, den gewählten Komponenten, der Regelung und der jeweils angeforderten Leistung ab. All diese Einflussgrößen verändern den COP stetig, so dass keine klare Aussage aus dem Kenntnis des Auslegungs-COP über den tatsächlichen Jahres-COP gemacht werden kann.

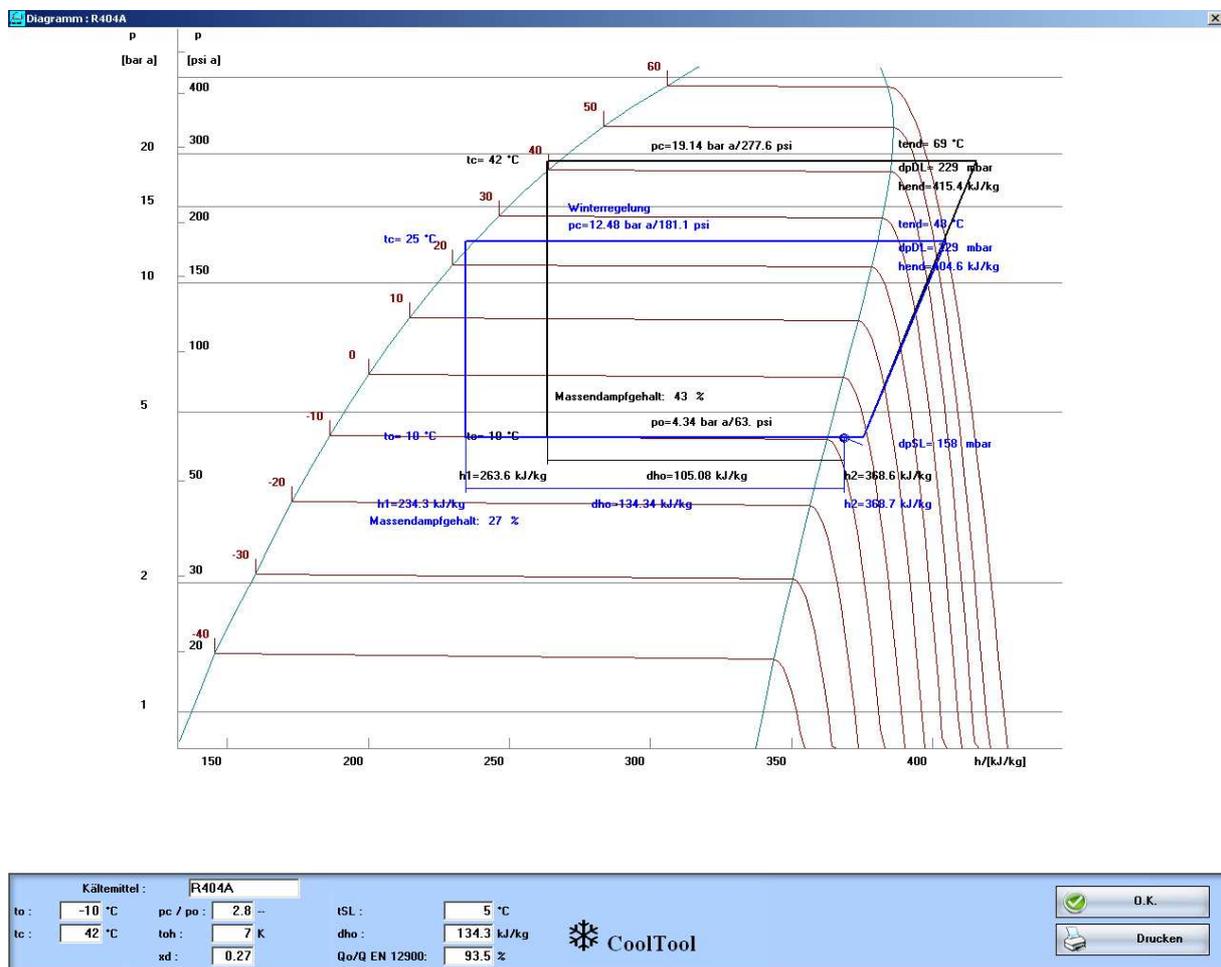


Bild 1: Darstellung der beiden Vergleichsprozesse maximale Leistung – 10/45 °C (schwarz) und minimale Verflüssigungstemperatur –10/25 °C (blau).

Je nach Konstruktion der Anlage werden sich zum Teil völlig unterschiedliche Zustände einstellen. So haben naturgemäß die Größe bzw. gewählte Leistung von Verdampfer und Verflüssiger großen Einfluss auf den Energiebedarf. Große Wärmetauscher führen zu höheren Verdampfungs- und geringeren Verflüssigungstemperaturen. Und damit auch zu anderen Drücken, die sich auf den aktuellen COP auswirken. Wünschenswert sind möglichst hohe Verdampfungs- und möglichst geringe Verflüssigungstemperaturen, da diese zu höheren COP Werten, und damit zu geringerem Energiebedarf führen. Die Wahl der korrekten Rohrdimension hat ebenfalls großen Einfluss. Zu kleine Rohrquerschnitte führen zu Leistungsminderung, da z.B. der Ansaugzustand am Verdichter durch zu kleine Querschnitte in der Saugleitung nach unten verschoben werden kann. Die Konsequenz ist ein schlechterer COP. Entscheidend aber sind die Einflüsse der Regelung. Wie weit lässt sich über die gewählten Komponenten und der gewählten Regelstrategie die Verdampfungstemperatur erhöhen und die Verflüssigungstemperatur reduzieren.

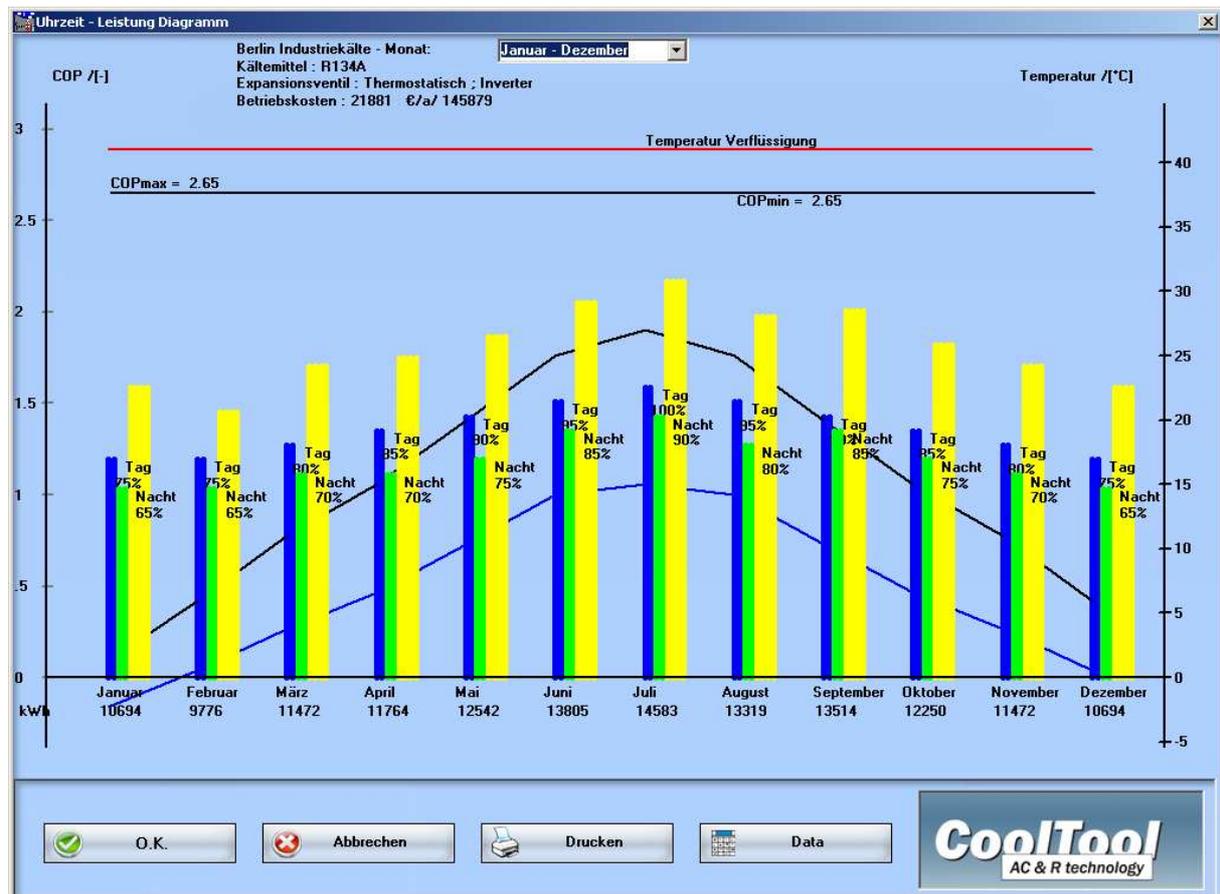


Bild 2: Verhalten einer Anlage R 134a im Jahresgang am Standort Berlin mit konstanter Verflüssigungstemperatur

## Regelung und Auslastung der Anlage

Die Regelung einer Kältemaschine optimal zu gestalten bedeutet, die komplexen Zusammenhänge im Zusammenspiel aller Komponenten zu verstehen. Die Regelung hängt zudem auch stark vom gewählten Kältemittel ab. Einer der wichtigsten Einflussgrößen ist das Betriebsverhalten des Expansionsventils. Je nach Bauart des Drosselorgans genötigt dieses eine gewisse treibende Druckdifferenz um den erforderlichen Massenstrom des Kältemittels regeln zu können. Bei thermostatischen Expansionsventilen liegt diese Druckdifferenz bei Werten, je nach Modell und Hersteller, im Allgemeinen bei Werten zwischen sechs und acht bar.

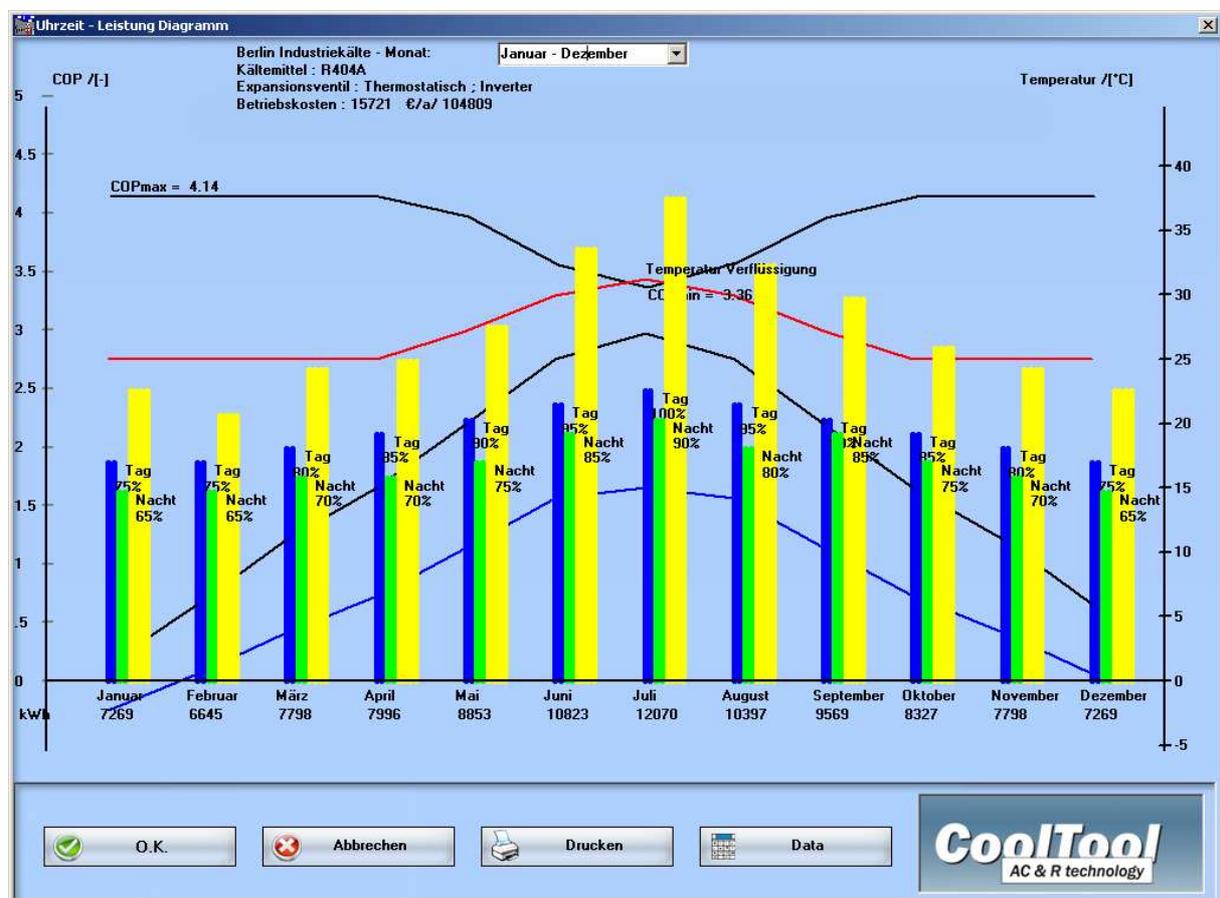


Bild 3: Verhalten einer Anlage R 404A/R 507 im Jahresgang am Standort Berlin: Die mittlere Verflüssigungstemperatur kann im Winterhalbjahr deutlich abgesenkt werden.

Elektronische Expansionsventile benötigen weniger Druckdifferenz, ca. zwei bis drei bar, da der Druck nicht zu eigentlichen Regelung benötigt wird, da hier Magnetspulen oder Schrittmotoren die benötigte Energie bereitstellen. Damit haben verschiedene Kältemittel ein unterschiedliches Potential, anhängig von der Druckdifferenz, genügend Vordruck am Expansionsventil bereitzustellen, wenn die Verflüssigungstemperatur abgesenkt wird. Diese Druckdifferenz gibt vor, auf welchen Wert die Winterregelung eingestellt werden kann.

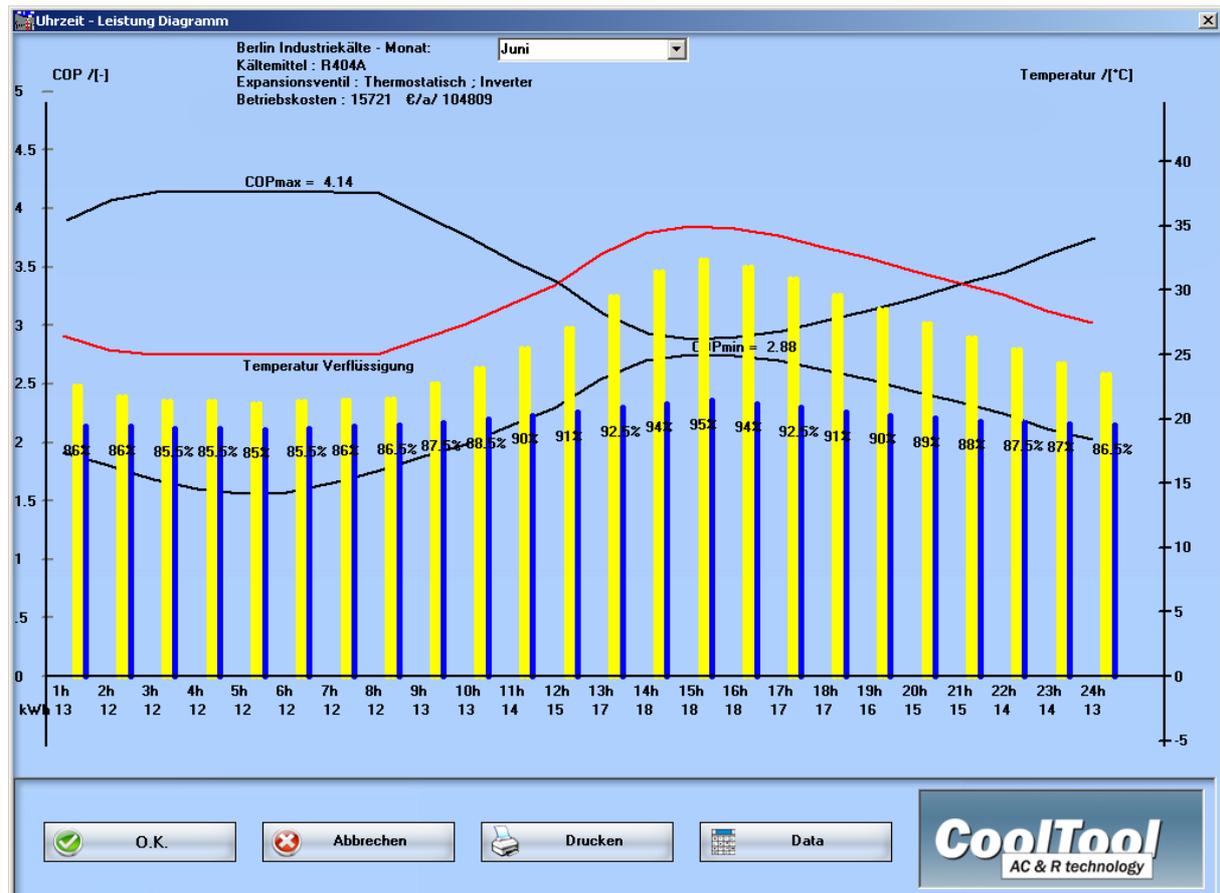


Bild 4: Verhalten einer Anlage R 404A/R 507 im Tagesgang: Die Verflüssigungstemperatur passt sich der Außentemperatur an

Die Anforderung der Kälte und die damit verbundene Verdichteransteuerung ist ebenfalls ein wichtiger Punkt. Systeme mit einfacher Ein/Aus Regelung der Verdichterneigen bei abgesenkter Verflüssigungstemperatur zu tieferen Verdampfungstemperaturen, da naturgemäß die Leistung des Verdichters steigt. Damit wird ein Teil des besseren COP wieder zunichte gemacht.

Außerdem kann dies zu stärkerer Reifbildung am Verdampfer führen, was die Abtauintervalle verkürzt und damit höheren Energiebedarf zur Folge hat. Bei Anlagen mit möglichst genauer Teillastregelung tritt dieser Effekt nicht auf, da die Verdampfungstemperatur konstant gehalten wird.

Bei Verbundanlagen mit fein abgestufter Verdichterregelung und Anlagen mit Inverter geregelten Verdichtern findet nicht nur keine Absenkung der Verdampfungstemperatur statt. Außerdem verringert sich die Temperaturspreizung im Verflüssiger im Teillastbetrieb und die Verflüssigungstemperatur und der Verflüssigungsdruck sinken. Diese beiden Effekte sind verantwortlich für bessere COP Werte von Anlagen mit geregelten Verdichtern. Ein weiterer Punkt, der zu beachten ist, ist bei zu tiefer Verflüssigungstemperatur der minimal notwendige Massendampfanteil, auch Flashgasanteil genannt, im Verdampfer eintritt. Zu geringe Werte führen zu mangelhaften Wärmeübergängen und schlechten Regelverhalten des Expansionsventils.

### **Komplexe Berechnung des Jahres COPs**

Alle diese, und noch zahlreiche weitere Information werden benötigt, um den tatsächlichen COP einer Anlage zu bestimmen. Bei dem gewählten Beispiel von R 134a und R 404A/ R507 ergeben sich unterschiedliche Werte für die minimal mögliche Verflüssigungstemperatur. Unter der Voraussetzung, das bei beiden Kältemitteln ein thermostatisches Expansionsventil mit einer benötigten Druckdifferenz von sechs bar zu Einsatz kommt, und das bei beiden Varianten die Druckverluste im Verdampfer und im Verflüssiger mit jeweils 1 bar Sicherheit betrachtet werden, lässt sich der Verflüssigungsdruck auf einen Wert vom 8 bar über den Verdampfungsdruck absenken. Bei R 134a ergibt sich damit ein Wert von 10 bar, was 41°C entspricht, auf den die Winterregelung eingestellt werden muss. Bei R 404A/ R 507 kann der Druck vor dem Expansionsventil auf 12,34 bar gesenkt werden, was einer Temperatur zur Winterregelung von 25° entspricht. Interessant sind die COP Werte in diesem Betriebspunkten, R 134a verbessert sich auf 2,91, R 404A / R 507 auf beachtliche 4,83.

Der sich tatsächlich einstellende aktuelle COP wird je nach angeforderter Leistung und nach herrschender Außentemperatur zwischen diesen Werten und den Werten der Auslegung einstellen. In Bild 1 ist dies in h,log p Diagramm anhand der Prozesse von R 404A/R 507 dargestellt. Hier erkennt man auch den Massendampfanteil in Verdampfer von 27%, was durchaus noch akzeptabel ist.

	R 134a	R 404A/R 507
to / tc / [°C]	-10/41	-10/25
Druck Verdampfung / [bar]	2	4,34
Druck Verflüssigung / [bar]	10	12,34
COP / [ - ]	2,91	4,83

Tabelle 2: Die COP Werte bei minimal möglicher Einstellung der Winterregelung

### Gesamt Simulation aller Einflussgrößen mit CoolTool

Um all diese, und noch weitere Einflussgrößen, mit vertretbarem Aufwand erfassen bzw. verarbeiten zu können, ist die CoolTool EnerSim Software entwickelt worden. In der Professional Version können Kälteanforderungsprofile, z.B. Gewerbekälte, Industriekälte oder Klimaanlage hinterlegt werden. Dabei wird je nach Jahres- und Tageszeit die zu erwartende Kälteleistung relativ zur Gesamtleistung angenommen. Zusammen mit den hinterlegten weltweiten Klimadaten lassen sich so die Betriebszustände einfach simulieren. Ferner werden konstruktionsbedingte Anlagendetails berücksichtigt werden. So fließen auch Regelung der Verdichter und Ventilatoren, Inverter, Ein/Aus etc, in die Berechnung ein. Bauteilspezifische Unterschiede bei Verdichter, Hubkolben, Schraube, offen, halbhermetisch, etc. werden ebenso berücksichtigt wie Economizerbetrieb und das Potential, dass die Wärmerückgewinnung hat. Bild 2 zeigt im Jahresgang das Ergebnis solch einer Simulation des Betriebes einer Anlage mit R 134a. Deutlich zu erkennen die über das Jahr konstante Verflüssigungstemperatur. Der Energiebedarf beträgt aufgrund der etwas geringeren Verflüssigungstemperatur 145879 kWh/Jahr.

Bei R 404A/R 507 stellt sich im Jahresgang, wie in Bild 3 zu erkennen ist, je nach Außentemperatur und Kälteanforderung eine Verflüssigungstemperatur zwischen 25°C und 45°C ein. Damit kann die Anlage, insbesondere im Winterhalbjahr, mit höherem, besserem COP betrieben werden. Auch im Sommerhalbjahr, wie im Bild 4 die Simulation eines typischen Tages im Juni zeigt, lässt sich die Verflüssigungstemperatur in der Nacht, am Morgen und in den späten Abendstunden deutlich absenken.

Nach der ausführlichen Darstellung der Problematik überrascht jetzt nicht mehr, das eine Anlage mit R 404A/R 507 mit 104809 kWh/Jahr einen um 41070 kWh geringeren Energiebedarf haben dürfte als die mit R 134a betriebene.

	R 134a	R 404A/R 507
to / tc Auslegung / [°C]	-10/45	-10/45
tc Winterregelung / [°C]	41	25
Jahres - COP / [ - ]	2,65	3,82
W el /kWh/ a	145879	104809

Tabelle 3: Jahres - COP Werte der optimierten R 134a und R 404A/R 507 Anlagen nach Simulation

Fazit: Einfach nur den COP im Auslegungspunkt als Auswahlkriterium für Energiesparende Anlagen zu nehmen reicht nicht aus. Man muss zahlreiche Einflussgrößen berücksichtigen, um eine Aussage über den zu erwartenden Energiebedarf einer Anlage treffen zu können. Diese können individuell stark unterschiedlich ausfallen. In behandelten Beispiel führt eine optimierte R 404A/R 507 Anlage zu besseren Werten als mit R 134a. Dies liegt am Ganzjahresbetrieb am Standort Berlin, wo im Winter tiefe Außentemperaturen zu erwarten sind. Plant man einen Chiller einzusetzen, der nur im Sommer, bei hohen Außentemperaturen, betrieben wird, können sich die Verhältnisse umkehren. Auch die Verwendung von elektronischen Expansionsventilen wird die Verhältnisse verändern. Hier kann, R 134a, auch gegenüber R 407C oder R 410A besser abschneiden. Eine individuelle Nachrechnung mit Hilfe von Simulationssoftware wie CoolTool EnerSim Professional gibt Anlagenbauern wie Anlagenbetreibern Entscheidungssicherheit.

Auch für das Potential der energetischen Sanierung und Optimierung von bestehenden Anlagen ist eine vorherige Untersuchung von Vorteil. Es gibt bei vielen Bestandsanlagen ein riesiges Potential an Energieeinsparung, auch unter Berücksichtigung der Möglichkeiten der Wärmerückgewinnung. Diese Option ist für viele Betreiber von zunehmendem Interesse, insbesondere vor dem Hintergrund der in den letzten Jahren stetig gestiegenen Betriebskosten.

Weitere Information erhalten Sie unter [www.cooltool-software.com](http://www.cooltool-software.com).

Hintergrund: An der BFS - Bundesfachschule in Maintal und am IKKE -Informationszentrum für Kälte- , Klima- und Energietechnik, werden zu diesen Inhalten Seminare veranstaltet. Dort wird die Erfassung aller relevanten Daten zur Ermittlung des Energiebedarfes behandelt. Die in den Veranstaltungen behandelten Inhalte sind hinreichend zur Erstellung des Statuscheck, einer energetischen Beurteilung von Kälteanlagen, welcher den Förderanträgen „gewerbliche Kälteanlagen“- an das Bafa beizulegen sind. Nähere Informationen und aktuelle Termine erfahren Sie unter [www.bfs-kaelte-klima.de](http://www.bfs-kaelte-klima.de) und [www.i-k-k-e.de](http://www.i-k-k-e.de)