

Entscheidungskriterien

Auswahl von Kompressionskältesystemen für Klimaanlage

Horst Jacobowsky, Mannheim

zum Autor

Dipl.-Ing. Horst Jacobowsky, Produktbereichsleiter in der Firma York International GmbH, Mannheim



Die Wirtschaftlichkeit von Kompressionskälteanlagen wird in den letzten Jahren ständig verbessert. Alle Konstruktionselemente sind auf die physikalischen Eigenschaften der alternativen Kältemittel abgestimmt. Ziel ist die Steigerung der Leistungsziffer, die Reduzierung von Leckagen, die Optimierung der Investitionskosten. Die Marktentwicklung zeigt eine deutliche Tendenz zu den Ersatzkältemitteln R 134a, R 407C und NH₃.

Durch moderne Schraubenverdichter und den Einbau von Economizern in den Kältekreislauf werden die Leistungszahlen erheblich verbessert. Durch den Einsatz von elektronischen Berechnungsprogrammen kann unter Beachtung aller Energietarife und der örtlichen Einbaubedingungen schnell die optimale Kälteanlage gefunden werden.

Die üblichsten Kompressionskälteanlagen für die Klimatechnik sind im Bild 1 dargestellt. Die Energietarife bestimmen, welches Antriebsaggregat für den jeweiligen Anwendungsfall am günstigsten ist. Neben Elektromotoren werden vor allem in den USA auch Gasmotoren gewählt.

Dampf- oder Dieselmotoren sind noch selten. In den letzten Jahren ist eindeutig eine Abkehr vom Kolbenkompressor festzustellen. Sogar in kleineren Leistungsgrößen werden immer häufiger Schraubenkompressoren bevorzugt. Einerseits sind die Investitionskosten durch höhere

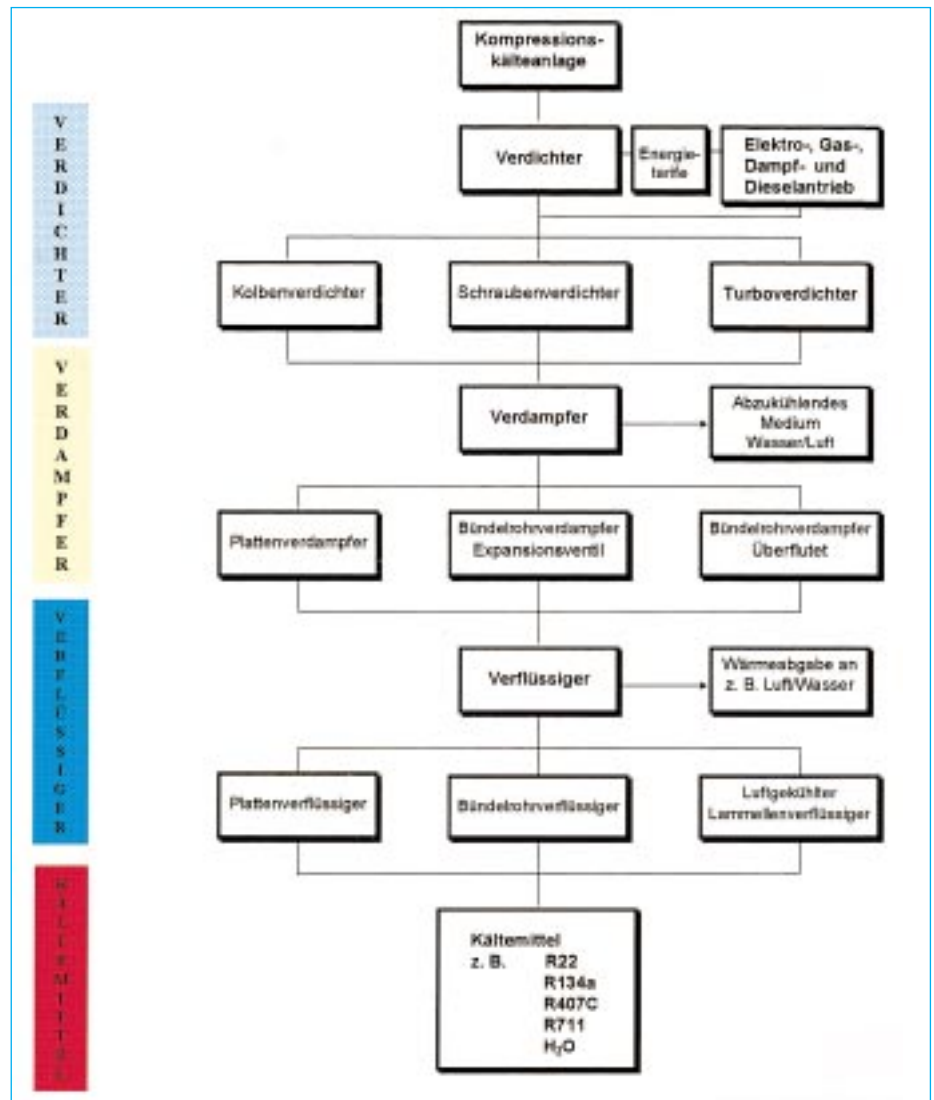


Bild 1 Schema der üblichen Kompressionskälteanlage

Stückzahlen erheblich reduziert worden und andererseits sind die Service- und Kundendienstaufwendungen für die robusten Schraubenverdichter niedrig. Körper- und Luftschallwerte und Platzbedarf sind wichtige Entscheidungskriterien bei der

den. Bei den Verdampfern kämpfen die Plattenverdampfersysteme gegen die Vormachtstellung von Bündelrohrwärmetauschern.

Die Bündelrohrwärmetauscher werden in Direkt- und überflutete Verdampfer ein-

Nachlauf der Pumpen ist unbedingt erforderlich, um durch den Wasserfluß die Temperatur der Kältemittelfüllung über den Gefrierpunkt zu halten. So kann auch bei Stillstand der Anlage das Wasser in den Rohren nicht einfrieren.

Das abzukühlende Medium hat auch einen wesentlichen Einfluß auf die Verdampferbauart. Bei direkter Abkühlung der Luft haben sich Lamellenkühler durchgesetzt. Die zu kühlende Luft streicht über die Lamellen, die auf Rohren aufgereiht sind. In den Rohren ist das Kältemittel. Durch den Verdampfungsprozeß werden die Rohre und Lamellen kalt und entziehen der über sie hinweg streichenden Luft die Wärme. Je nach Verwendungszweck werden ähnliche Konstruktionen auch als Verflüssiger eingesetzt. Auch hier ist ein wachsender Einsatz von geprägten Platten, die zu Verflüssigerpaketen zusammengeschweißt werden, zu beobachten.

Ganz heiß war in den letzten Jahren die Diskussion um das richtige Kältemittel. Die Ozonkiller und die das Treibhaus besonders anheizenden Stoffe sind zwischenzeitlich aus dem Verkehr gezogen worden. Vor allem das Chlor in den alten Kältemitteln steht im Verdacht, das O₃ in der Ozonschicht zu zerstören. Die westeuropäische Statistik von 1997 (Bild 2) zeigt R 22 mit 83 % noch als häufigste Kältemittelanwendung. Ihm folgen R 134a mit 10 % und R 407C. NH₃ nimmt in Europa bescheidene 1 % für sich in Anspruch. Ein anderes Bild zeigt die Statistik in der Bundesrepublik Deutschland. Hier sind es für R 22 66 %, für R 134a 15 %, R 407C 14 % und NH₃ 4 %.

Bild 2 Kältemittel-Statistik 1997

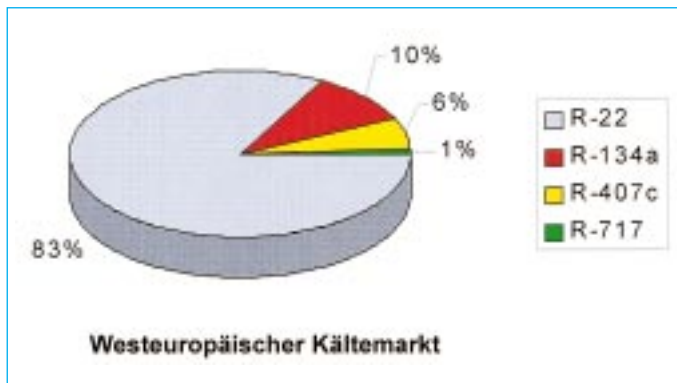
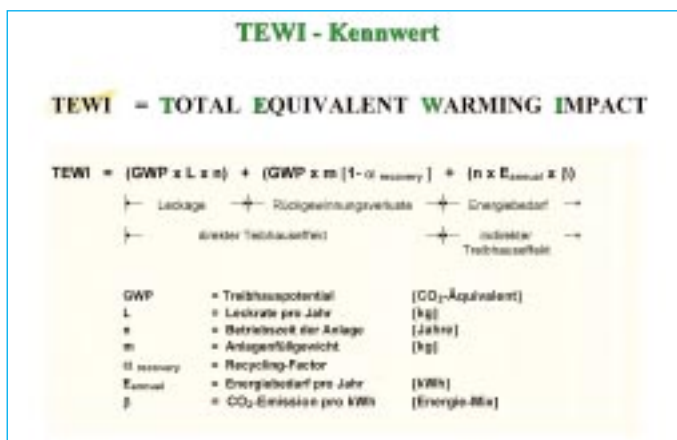


Bild 3 Beurteilung von Kältemitteln durch den TEWI-Wert



Wahl des optimalen Kälteverfahrens. Die Turboverdichter sind in einstufiger Bauweise besonders für Niederdruckkältemittel geeignet und für besonders große Leistungen in MW-Bereichen. Die Kälteindustrie bietet Hochleistungsaggregate mit hervorragenden Leistungszahlen an. Durch konstruktive Verbesserungen der Wärmetauscher und deren Wärmeaustauscherrohre, sowie ständige Optimierung der Turboaggregate, sind die Leistungszahlen von von ca. 4 auf über 7 bei klimatischen Bedingungen gesteigert wor-

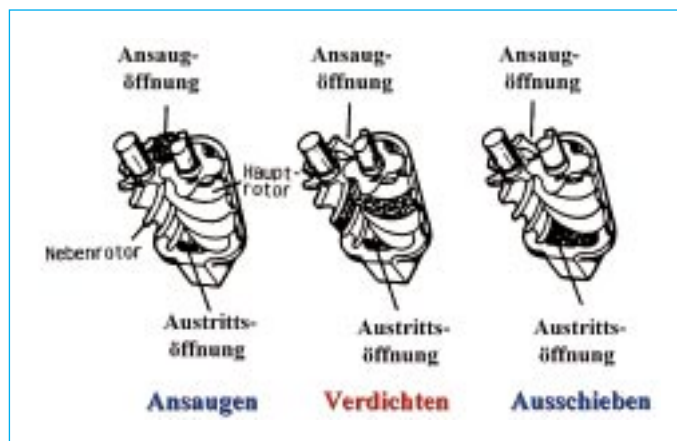
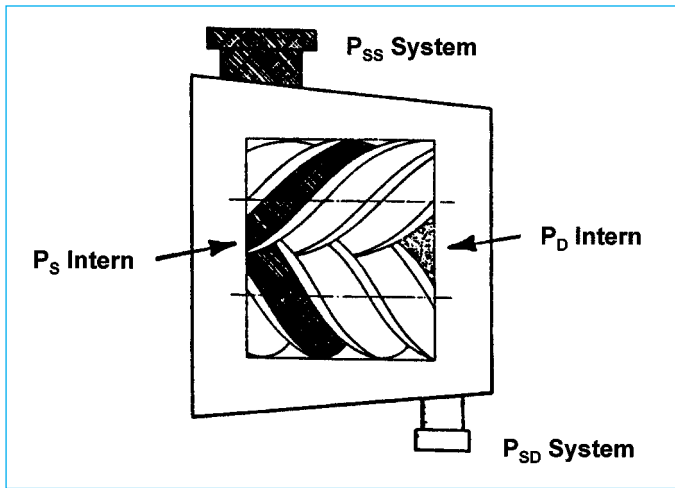


Bild 4 Arbeitsgänge bei Schraubenverdichtern

geteilt. Die real zu erzielenden Leistungszahlen sind bei überfluteten Verdampfersystemen etwas günstiger, allerdings wird dafür eine größere Kältemittelfüllung benötigt. Die Gefahr der Vereisung ist aber wegen der großen Kältemittelfüllung bei überfluteten Verdampfern bei sehr tiefen Kaltwassertemperaturen größer. Ein

Bild 5 Interne und externe Drücke bei Schraubenverdichtern



Bei der Beurteilung der Kältemittel hat sich der sog. TEWI-Kennwert durchgesetzt (Bild 3). Mit diesem Wert wird der Anteil der Anlage am direkten und indirekten Treibhauseffekt errechnet. Die Leckageverluste und Rückgewinnungsverluste beim Recycling des Kältemittels sind direkte Beiträge des Systems zu dem Treibhausklima. Dagegen muß der Energiebedarf der Anlage als indirekter Beitrag zur Steigerung des Treibhausklimas gewertet werden. Da manche sog. Ersatzkältemittel aber bei gleicher Kälteleistung eine größere Antriebsenergie benötigen, sind die Vorteile durch die Reduzierung des direkten Treibhauseffektes durch den

gesteigerten indirekten Beitrag zum Treibhausklima oft aufgezehrt. Wichtig ist, durch genau auf das Ersatzkältemittel abgestimmte und optimierte Verdichter und Wärmetauscherkonstruktionen die Antriebsenergie so niedrig wie möglich zu halten und ein Kältemittel zu wählen, welches durch hervorragende thermodynamische Eigenschaften einen niedrigen Energiebedarf möglich macht.

und 5). Bisher wurde je nach Einsatzbereich und Verdichtungsverhältnis ein Schraubenverdichter mit kleinem oder großem eingebautem Druck- oder Volumenverhältnis gewählt. Der Schraubenverdichter arbeitete aber nur in den Betriebsstunden im optimalen Bereich, wenn das eingebaute Druckverhältnis genau den tatsächlichen Verhältnissen der Anlage entsprach. Wenn der Verflüssigerdruck der Anlage durch z. B. kalte Luft oder kaltes Kühlwasser niedrigere Enddrücke der Anlage zulassen würde, dann verdichtet der Schraubenverdichter mit fest eingebautem Druckverhältnis immer auf den hohen Enddruck. Dadurch arbeitet der Verdichter in bezug auf den möglichen Anlagendruck immer mit einer Überkompression. Wenn aber andererseits die Anlage höhere Enddrücke erforderlich macht, dann wird mit einer Schraube mit zu niedrigen, eingebauten Verdichtungsverhältnissen immer eine Unterkompression erreicht.

Das Diagramm eines Schraubenverdichters, bei dem der Wirkungsgrad in Funktion des eingebauten Druck- oder Volumenverhältnisses der Schraube aufge-

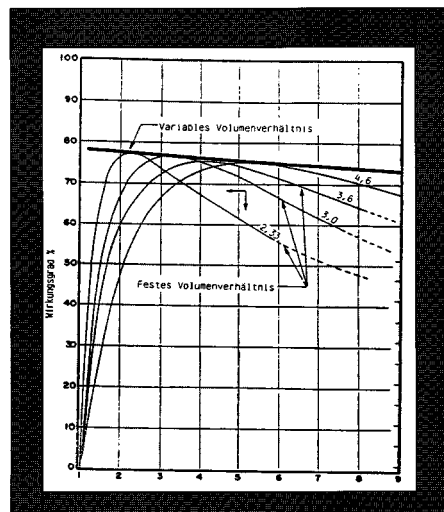


Bild 6 Wirkungsgrad des Schraubenverdichters abhängig vom Volumenverhältnis

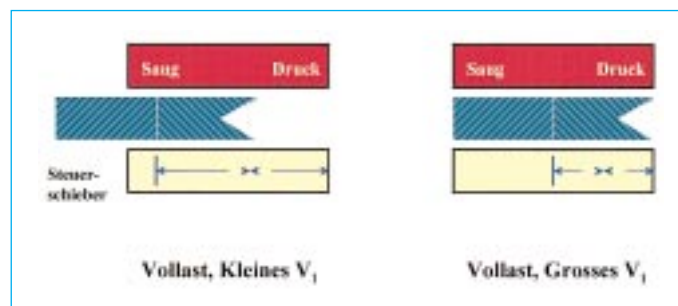


Bild 7 Steuer- und Leistungsschieber bei Vollast mit kleinem und großem Volumenverhältnis

Bei dieser Umwelt- und Energiebeurteilung fällt das althergebrachte Kältemittel NH_3 besonders angenehm auf. Denn bei NH_3 ist der GWP (Global-Warming-Potential) gleich Null. Der TEWI-Kennwert wird bei NH_3 nur durch den Energiebedarf bestimmt. Bekanntlich hat aber das NH_3 gute physikalische und thermodynamische Eigenschaften und hat deshalb in Deutschland eine nie erwartete Bedeutung bei Kälteanlagen in der Klimatechnik erreicht. Eine große Bedeutung bei der Auswahl und der Wirtschaftlichkeit von Kompressionskälteanlagen hat natürlich die Auswahl des optimalen Verdichters. Durch ständige Verbesserungen auf der Basis der Betriebserfahrungen und den Einsatz von besseren Materialien und verbesserter Konstruktionen ist der Gesamtprozeß ständig verbessert worden. Als Beispiel soll die positive Entwicklung bei den Schraubenverdichtern dienen (Bild 4

führt ist, zeigt ein Maximum, wenn eingebauten Druckverhältnis und tatsächliches Druckverhältnis der Anlage genau übereinstimmen (Bild 6). Bei Über- oder Unterkompression geht der Wirkungsgrad des Schraubenverdichters enorm zurück. Eine wesentliche Verbesserung dieses Dilemmas wird durch das variable Druck- bzw. Volumenverhältnis von Schraubenverdichtern erreicht (Bild 7). Bei dieser Konstruktion wird eine Anpassung des eingebauten Volumenverhältnisses auf die tatsächlich an der Anlage herrschenden Bedingungen erreicht. Empfindliche Sen-

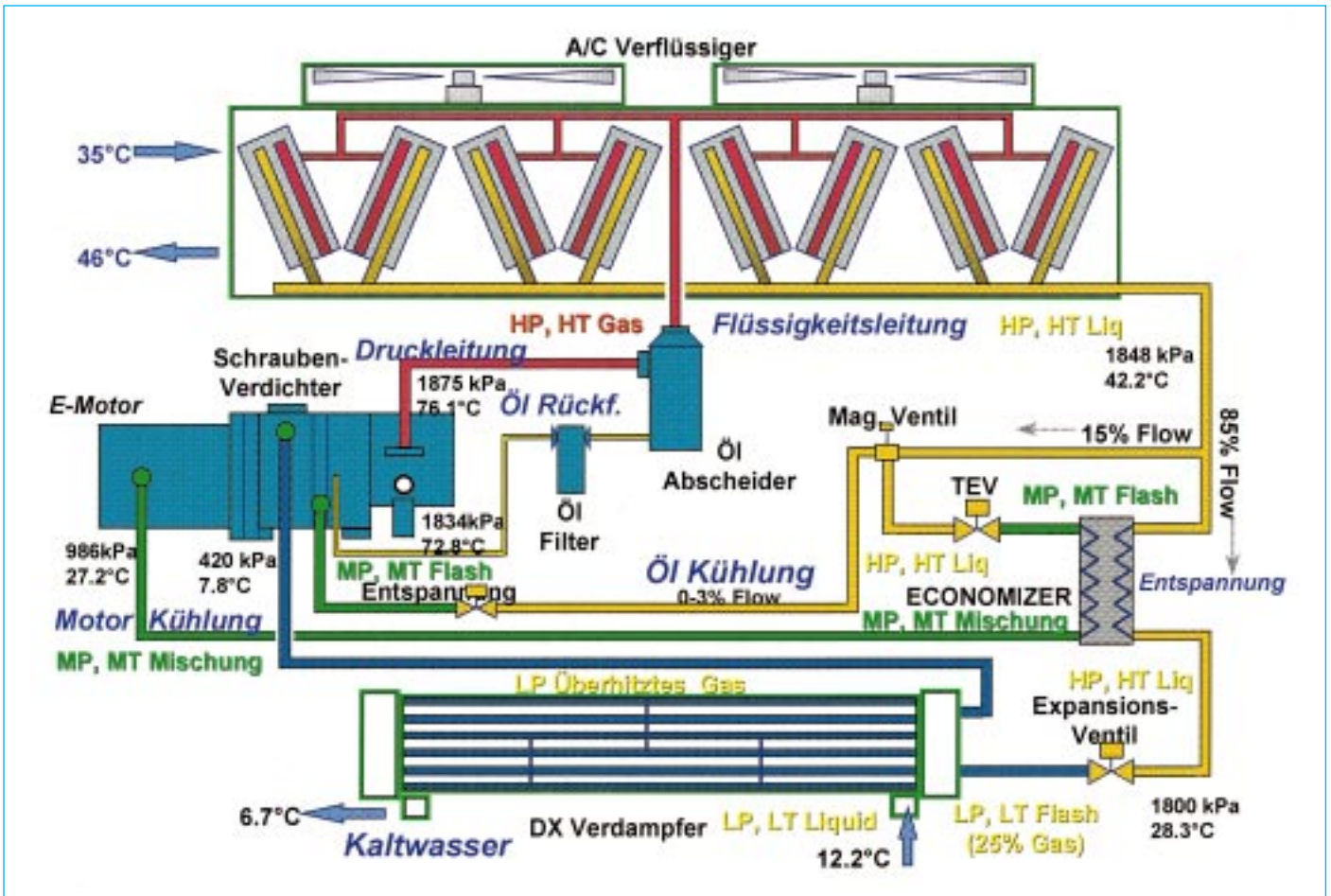


Bild 8 Einbau von Economizern bei Standardgeräten

soren registrieren den von der Anlage gewünschten Saug- und Verflüssigungsdruck. Eine elektronische Steuerung rechnet genau aus, welche Stellung der hydraulische Steuerschieber einnehmen muß, damit das wirksame Verdichtungsverhältnis genau den tatsächlichen Anlagebedingungen entspricht. Diese Steuer- und Regelungstechnik garantiert, daß bei jedem Anlagendruckverhältnis die Schraube im Maximalpunkt des Wirkungsgrades arbeitet und keine Über- oder Unterkompression mehr in der Schraube auftritt. Dieser Vorteil erhöht die Jahresleistungszahl der Gesamtanlage erheblich. Auch bei Anlagen mit sog. Swingbetrieb, die z. B. tagsüber mit normalen Klimabedingungen und nachts zur Eiszerzeugung mit tieferen Verdampfungs- und niedrigen Verflüssigungstemperaturen arbeiten, führt diese Technik ebenfalls zu größerer Wirtschaftlichkeit der Kälteanlage. Neben der konstruktiven Verbesserung der Wärmeaustauscher und optimaler Abstimmung der eingesetzten Komponenten auf die Eigenschaften des eingesetzten Kältemittels und des dazu passenden Öles kann die Ge-

samtwirtschaftlichkeit durch den Einbau von Unterkühlern oder Economizern verbessert werden (Bild 8). Das Kältemittelschema eines luftgekühlten Schraubenkältemittels zeigt eine solche Anwendung. Eine Teilmenge des Gesamtflüssigkeitsstromes wird vor dem Economizer abgezweigt. Dieser Teilstrom unterkühlt den Hauptflüssigkeitsstrom und wird auch benutzt für die Ölkühlung. Das wirt-

schaftliche Ergebnis dieser Technik zeigt das Druck-Enthalpy-Diagramm (Bild 9). Die Unterkühlung in dem Economizer ermöglicht im Verdampfer eine größere Kälteleistung ohne Erhöhung des Kältemittelvolumenstromes.

Alle konstruktiven Maßnahmen und Verbesserungen haben dazu geführt, daß nicht nur die Energieaufnahme in der Vollast, sondern auch im Teillast verbessert

Bild 9 Druck- und Enthalpy Diagramm

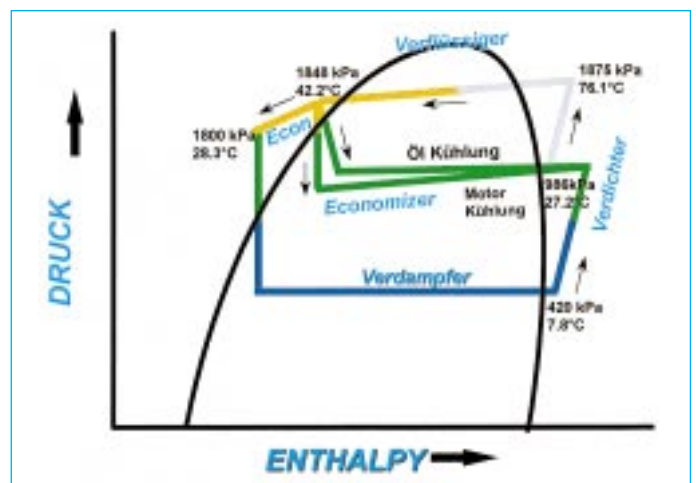
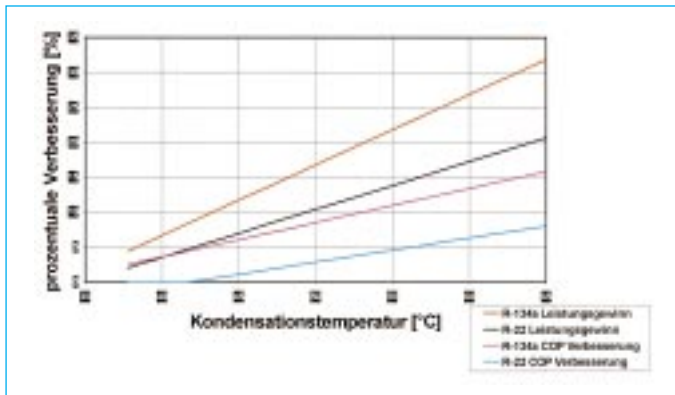


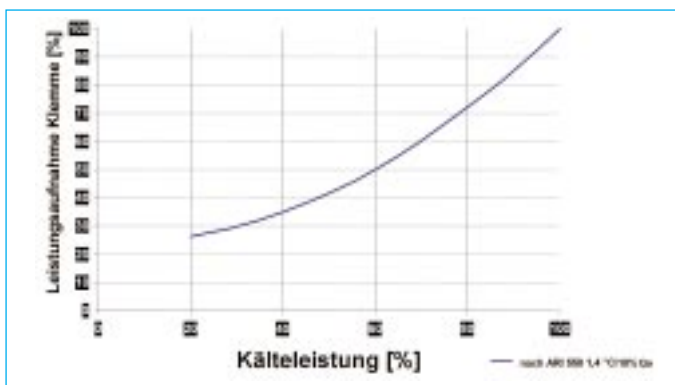
Bild 10 Leistungs-gewinn durch Economizer



punkt. Neben dem Intergrated-Part-Load-Value der sich nach ARI 590 auf eine Verdampfungstemperatur von 6,7 °C und eine Verflüssigungstemperatur von 35 °C bezieht, gibt es noch ein Application-Part-Load-Value. Dieses bezieht sich auf die tatsächlichen Bedingungen der Anlage, nicht auf die theoretischen Werte nach ARI. Einen modernen luftgekühlten Kaltwassersatz und Schraubenverdichter zeigt Bild 13.

Die Entscheidungskriterien für die optimale Kaltwassererzeugungsanlage sind immer komplexer und vielfältiger geworden. Eine objektive Beurteilung ist nur möglich, wenn alle Kriterien bei der Auswahl vorbehaltlos berücksichtigt werden. Neben den Energietarifen sind die örtlichen Einbauverhältnisse unbedingt zu berücksichtigen. Sie bestimmen neben der Wahl der Kältemaschine die Investitionskosten für Kalt- und Kühlwasserpumpen, Rohrleitungen, Armaturen und Anlagenzubehör wesentlich. Dabei kommt es darauf an, daß nicht nur die eigentlichen Kältemaschinen miteinander verglichen werden, sondern die gesamte Anlagenperipherie ist in dem Investitionskostenvergleich unbedingt zu berücksichtigen. Die

Bild 11 Leistungs-aufnahme bei Teillast



worden ist. Einen typischen Verlauf moderner Schraubenkaltwassersätze zeigt das Diagramm in welchem die Leistungsaufnahme als Funktion der Kälteleistung dargestellt ist (Bild 11). Die Reduzierung der Leistungsaufnahme ist nicht proportional der Kälteleistungsreduzierung. Bei 50 % Kälteleistung wird lediglich 40 % der Vollantriebsleistung benötigt. Die Leistungszahl in der Teillast ist somit besser als in Vollast.

Um unterschiedliche Anlagensysteme miteinander objektiv vergleichen zu können, müssen die Teillastkurven bei gleichen Betriebsbedingungen dargestellt werden. Da die Klimakälteanlagen nur 2 % der Gesamtlaufzeit bei Vollastbedingungen arbeiten, ist eine Gewichtung der Betriebshäufigkeiten in den jeweiligen Teillaststufen notwendig.

Dafür ist ein sog. Part-load-factor (Wichtungsfaktor) eingeführt worden. Dieser ist im Diagramm in Abhängigkeit von der Vollast dargestellt (Bild 12). Bei der Berechnung der Jahresleistungszahl wird der Wichtungsfaktor PLF im 90%-



Bild 12 Bewertung des Teillastbetriebes

Teillastpunkt vom 100%-Vollastpunkt subtrahiert. Das Ergebnis wird mit dem arithmetischen Mittel der Leistungszahl von Vollast und 90%-Teillast multipliziert. Genauso wird mit dem 90%- und 80%-Teillastpunkt verfahren. Da die Hauptbetriebszeit der Anlagen im Bereich von ca. 30 bis 75 % der Vollast liegt, gehen die besseren Leistungszahlen des Teillastbetriebes entsprechend der Häufigkeit mehr in die Berechnung der mittleren Jahresleistung ein. Bei der gewählten und dargestellten Schraubenkaltwasseranlage ist z. B. die Leistungszahl bei 20 % Teillast immer noch besser als der Vollastbetriebs-

Frage, ob eine luft- oder wassergekühlte Kältemaschine eingesetzt werden soll, ist nicht nur von den Wasserver- und -entsorgungskosten abhängig, sondern auch von den örtlichen zugelassenen Schallemissionen. Um aus der Vielzahl der technischen Lösungsmöglichkeiten die für Pla-

ner und Endkunden wirtschaftlichste Lösung vorwählen zu können, hat YORK International von einem unabhängigen Softwareunternehmen ein Rechenprogramm entwickeln lassen, mit dessen Hilfe alle Kriterien der Energieversorgung eingelesen werden können. Die Investitionskosten der verschiedenen Kaltwasseranlagen sind ebenso wie Kühltürme, Kaltwasser- und Kühlwasserverrohrung, Elektroinstallation usw. in dem Programm

Bild 13 YORK Strato-Chiller

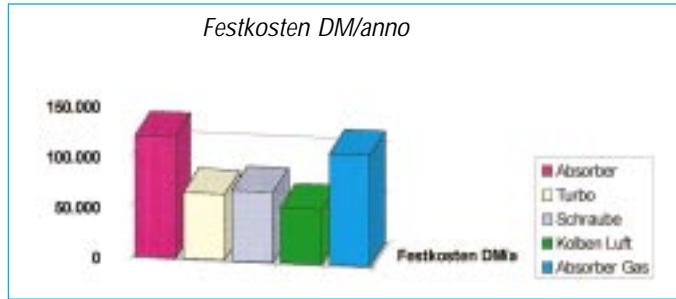
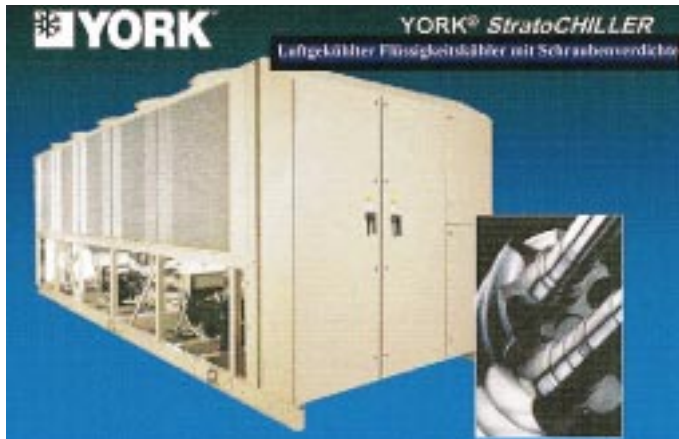


Bild 14 Betriebs- und Kapitalkosten

preislich hinterlegt. Die Daten werden immer wieder aktualisiert (Bild 14).

So ist es möglich, aus einer Vielzahl von Lösungsangeboten die Anlagenkonfigurationen zu finden, die bei Berücksichtigung aller Einflußfaktoren detailliert untersucht werden soll. Das Programm soll für die planenden Ingenieurbüros und Kälteanwender eine wichtige Weichenstellung sein. Die übliche sorgfältige und notwendige Wirtschaftlichkeitsberechnung und Anlagenauslegung ist dadurch aber nicht zu ersetzen. Die Berechnungsdiskette kann bei YORK International in Mannheim gegen eine Schutzgebühr von 50,- DM angefordert werden. □