

Erfahrungen helfen planen

# Bedingungen für einen langlebigen Verdichterbetrieb

Ulrich Adolph, Leipzig

Schadensstatistiken von Kältemittelverdichtern sagen aus, daß neuzeitliche Kältemittelverdichter eine hohe Fertigungsqualität aufweisen und damit die Voraussetzungen mitbringen, lange und zuverlässig ihren Dienst zu tun. Die Mehrheit der dennoch vorhandenen Ausfälle werden durch Ursachen hervorgerufen, die eigentlich außerhalb des Verdichters liegen. Als hauptsächliche Ursachen sind Ölverdünnung durch gelöstes Kältemittel, Überhitzungen, elektrische Schaltprobleme, Feuchtigkeit im Kreislauf, Antriebs- und Energieversorgungsfragen sowie Gesichtspunkte des Wartungs- und Betriebsregimes zu erkennen.

## Der Verdichter in der Kälteanlage

Die Kältemittelverdichter werden nach der Kälteleistung bei den vorgegebenen Verflüssigungs- und Verdampfungstemperaturen ausgewählt. Als Randbedingungen dienen noch die Antriebsleistung, die Bauart, der Hersteller und nicht unwesentlich der Preis. Bild 1 zeigt die Stellung des Ver-

dichters in der Kälteanlage, wobei mit der gezeigten einstufigen Anlage der einfachste Fall dargestellt ist. Zweistufige Anlagen mit einem zweistufigen oder zwei einstufigen Verdichtern, Verbundanlagen mit parallelgeschalteten gleich oder verschieden großen Verdichtern und Kaskadenanlagen geben ein Bild von der Vielzahl der Möglichkeiten, die praktisch zu bewältigen sind.

Mit der Auswahl des zweckmäßigen Verdichtertyps und der Festlegung der Anzahl gleicher oder verschieden großer Verdichter in einer Anlage, der Bestimmung des zu verwendenden Kältemittels, der Bestimmung der Sammlergröße und der Füllmenge sowie der Temperaturdifferenzen an den Wärmeübertragern, der Spezifik der Verdampferauslegung, der Art der Leistungsanpassung, dem Aufwand für das Überwachungs- und Diagnosesystem, dem Betriebsregime und weiteren Gesichtspunkten werden wich-

### zum Autor

Dr.-Ing. Ulrich Adolph,  
Entwicklungs-  
berater Kälte-  
und Klima-  
technik, Leipzig



tige Entscheidungen für die Zuverlässigkeit des Verdichters in einer Kälteanlage getroffen.

Die verschiedenen Bauarten haben ihre spezifischen Eigenschaften und mit der richtigen Auswahl von Hubkolben-, Schrauben-, Scroll- oder Turboverdichter

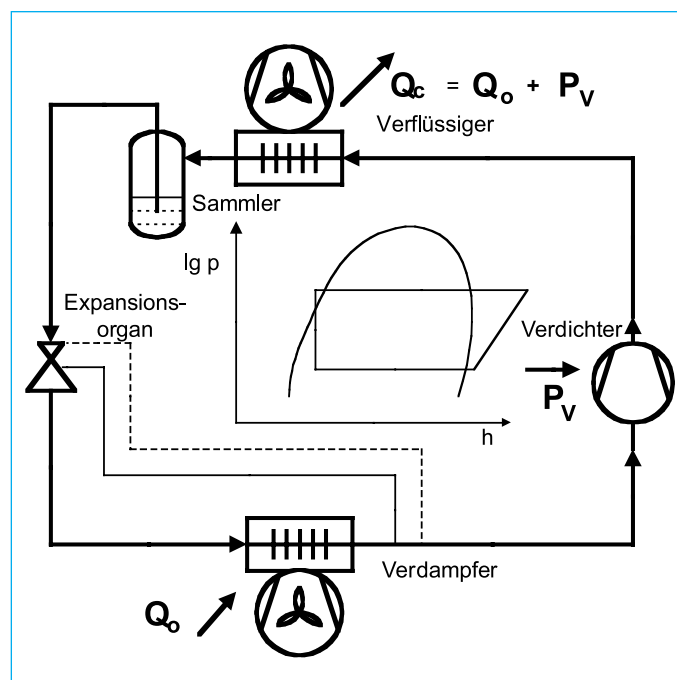


Bild 1 Prinzipieller Aufbau einer einstufigen Kälteanlage

	Scrollverdichter	Hubkolbenverdichter	Schraubenverdichter	Turboverdichter
Arbeitsprinzip	rotierender Verdränger	oszillierender verdränger	rotierender Verdränger	rotierendes Schaufelrad
Bauweise	hermetisch	offen, halbhermetisch, hermetisch	offen, halbhermetisch, hermetisch	offen, halbhermetisch
Förderstrombereich	1 bis 45 m <sup>3</sup> /h	0,5 bis 5000 m <sup>3</sup> /h	50 bis 10 000 m <sup>3</sup> /h	500 bis 50 000 m <sup>3</sup> /h
Maximales Stufendruckverhältnis	6	12	16	3
Strömung in Saug- und Druckleitung	schwellend	pulsierend bis schwellend	quasi-stetig	stetig
Förderstrom bei Druckverhältnis-änderung	wenig abhängig	abhängig	nahezu unabhängig	sehr abhängig
Regelbarkeit bei konstanter Drehzahl	nicht regelbar	stufenweise in begrenztem Bereich	stufenlos in weitem Bereich	stufenlos in begrenztem Bereich
Verhalten bei Flüssigkeitsansaugung	wenig empfindlich	sehr empfindlich	wenig empfindlich	wenig empfindlich
Verschleißteile	wenig	zahlreich	wenig	wenig
Wartung	ohne	einfach, in Abständen	schwierig	schwierig
spezifischer Platzbedarf	gering	groß	mittel	gering bis mittel

Bild 2 Eigenschaften der hauptsächlich Verdichterbauarten

in offener, halb- oder vollhermetischer Ausführung legt man schon den Grundstein für deren praktische Bewährung.

Die Funktion des Verdichters besteht im Fördern und Verdichten des Kältemittels im Kreislauf. Das Kältemittel hat bereits die Verdampfungswärme  $Q_0$  aufgenommen, bevor es in den Verdichter eintritt und ihm dort zusätzlich fast die gesamte Antriebsenergie des Verdichters  $P_v$  übertragen wird. Die Größe des Unterschiedes zwischen der zum Verdichterantrieb erforderlichen und der an das Kältemittel übertragenen Energie hängt von der Energiebilanz des Verdichters ab, d. h. der Unterschied ist um so geringer, je besser der Gütegrad des Verdichters ist. Bei Verdichtern für Klimaanlageanlagen mit Wärmepumpenschaltung wird die Heizleistung jedoch um so größer, je weniger von dieser Wärme an die Umgebung übergeht. Für Verdichter im Kühlbetrieb erweist es sich mit größer werdendem Druckverhältnis deshalb als notwendig, möglichst viel der Verlustwärme des Verdichters an die Umgebung abzuführen, um die Öl- und Verdichtungsendtemperaturen in erträglichen Grenzen zu halten. Die zulässigen Grenzen werden vom Hersteller definiert. Dabei werden die Vorgaben des Öl- und des Motorherstellers und bestimmte Werkstoffkennwerte berücksichtigt. Die Angaben verschiedener Hersteller unterscheiden sich im Detail, zeigen aber prinzipiell gleiche Tendenzen.

Wegen der Vielfalt der möglichen Anwendungsfälle für einen bestimmten Verdichter in Abhängigkeit von Kältemittel, Kälteleistung sowie Verdampfungs- und

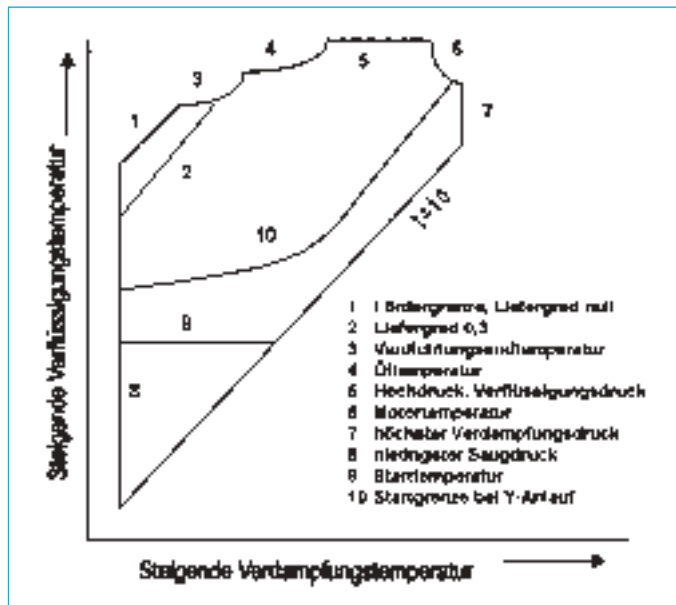


Bild 3 Allgemeines Einsatzgrenzendiagramm eines Kältemittelverdichters

Verflüssigungstemperatur wird die jeweilige Eignung in einem Einsatzgrenzendiagramm beschrieben, innerhalb dessen man den Verdichter betreiben darf, ohne daß er Schaden nimmt, siehe Bild 3.

Dieses Einsatzgrenzendiagramm muß vorrangig für den Vollastbetriebspunkt bereitstehen. Aber auch für alle abweichenden Regelungszustände ist es in gleicher

Weise wichtig, weil sich die Einsatzgrenzen dabei wesentlich verschieben können. Der Zusammenhang zwischen den einzelnen Druck-, Temperatur- und Belastungswerten ist dabei so vielseitig, daß man die Grenze oft nicht ohne weiteres erkennen kann. Besonders trifft das auf den Einfluß des immer mehr üblich werdenden stufenlos regelbaren Antriebes über Frequenzumrichter und des damit gekoppelten oder einzeln benutzten Sanftanlaufes zu [1].

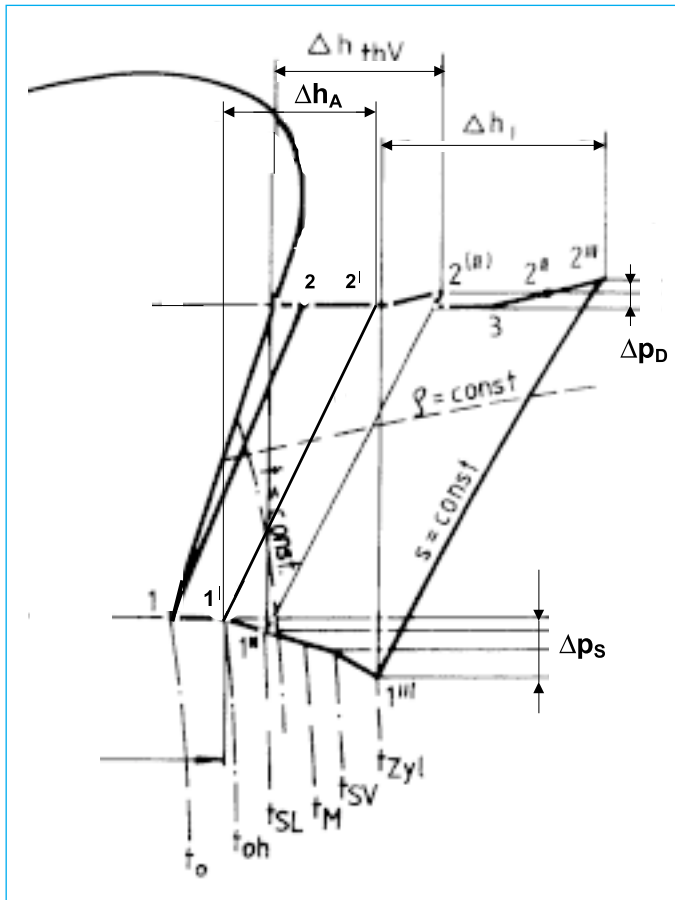
Prinzipiell sind die heute produzierten Kältemittel-Hubkolbenverdichter sehr zuverlässig [2]. Ihre Entwicklung ist ausgereift und die Produktionstechnologie befindet sich wegen der meist großen Stückzahlen auf einem hohen Niveau, so daß sich die aus der Entwicklung stammenden konstruktiven Festlegungen auch am realen Erzeugnis korrekt wiederfinden. Und wenn doch einmal Qualitätsprobleme auftreten, dann zeigen sich diese meist sehr schnell bei oder nach

der Inbetriebnahme. Man ist in den meisten Fällen gut beraten, bei sich wiederholenden Verdichterausfällen die Übereinstimmung der Anlagen- und Betriebsbedingungen mit den Einsatzgrenzen zu überprüfen.

### Das Temperaturregime eines Kältemittelverdichters

Das Temperaturniveau des Verdichters wird von mehreren Einflüssen bestimmt. An Hand des kältetechnisch üblichen lg p-h-Diagramm nach Bild 4 kann man das deutlich machen [3]:

Bild 4 Der Temperaturverlauf des Verdichtungsprozesses zwischen Verdampferaustritt und Verflüssigereintritt im lg p-h Diagramm



Im Grenzfall saugt der Verdichter im Pkt. 1 trocken gesättigtes Gas aus dem Verdampfer mit der prozeßbedingten Verdampfungstemperatur ohne weitere Druck- und Temperaturveränderungen an und verdichtet dieses isentrop bis zum Zustand 2 mit zugehörigen Werten von erhöhtem Druck und Temperatur. Das ist gleichzeitig der Eintrittszustand in den Verflüssiger. Der wirkliche Verdichtungsprozeß weicht z. T. erheblich davon ab, was zu wesentlich anderen Temperaturen führen kann. Im einzelnen handelt es sich dabei um folgende Einflüsse:

Das Kältemittelgas tritt nicht trocken gesättigt aus dem Verdampfer aus, sondern leicht überhitzt mit einer Überhitzungstemperatur  $t_{oh}$ , die je nach Güte und Einstellung des Expansionsventils von 5 K bis zu 15 K betragen soll. Da die Überhitzung eine Verdampfercharakteristik ist, und der Verdichter im theoretisch günstigsten Fall bei 1' zu verdichten beginnt, wird der Bezugsprozeß des Verdichters

zwischen den Punkten 1' und 2' definiert. Beim realen Prozeß treten bis zum Verdichtungsbeginn weitere Temperaturerhöhungen und Druckverluste auf. Bei zu groß oder zu klein eingestellten Überhitzungen ändern sich auch die nachfolgenden Bedingungen.

In der zwischen Verdampferaustritt und Verdichtereintritt im allgemeinen vorhandenen Saugleitung kann sich das Sauggas weiter erwärmen, wenn im Normalfall die Umgebungstemperatur über der Temperatur  $t_{oh}$  liegt. Dieser Temperaturanstieg ist geringer, wenn bzw. je besser die Saugleitung isoliert ist, was in vielen Anwendungsfällen schon wegen der evtl. auftretenden Schwitzwasserbildung verwirklicht wird. Im Extremfall langer unisolierter Saugleitungen, wie z. B. bei Splitklimaanlagen, erreicht die Temperatur des Sauggases am Verdichter die Umgebungstemperatur. Für Kühlschrankverdichter kann z. B. die Saugtemperatur bis zur Umgebungstemperatur ansteigen.

Zwischen den Punkten 1'' und 1''' liegen die Temperatur- und Druckänderungen zwischen dem Saugstutzen des Verdichters und dem Verdichtungsbeginn im Zylinder des Verdichters. Bei Verdichtern mit sauggasgekühlten Einbaumotoren, wie es

für Klimageräte und Wärmepumpen normal ist, nimmt das Sauggas auch einen großen Teil der Verlustwärme des Motors auf, was die Temperatur zusätzlich erhöht. Druckverluste auf diesem Strömungsabschnitt sind z. T. erheblich, wobei das saugseitige Absperrventil des Verdichters und bei Hubkolbenverdichtern das Saugarbeitsventil den hauptsächlichsten Anteil liefern und somit zur Vergrößerung des inneren Druckverhältnisses beitragen.

Zwischen 1''' und 2''' erfolgt die nahezu isentrope Verdichtung, mit um so höherer Endtemperatur, je ungünstiger der Startpunkt liegt, und je größer der Isentropenexponent des Kältemittels ist.

Diese Zusammenhänge lassen sich auch für zweistufige Verdichter beschreiben. Aus der hier gezeigten Darstellung für den einstufigen Verdichter soll beispielhaft deutlich werden, wie vielfältig die Möglichkeit ist, vom vorgesehenen und zulässigen Temperaturregime abzuweichen und zu Überschreitungen zu kommen, die in der Folge zu Schäden führen können.

### Öl und Kältemittel

Das Öl im Kältemittelverdichter dient wie bei allen anderen nicht trockenlaufenden Verdichtern der Schmierung der Lager und der Zylinder und erfüllt dabei zusätzlich die Aufgabe der Abfuhr der Reibungswärme von diesen Schmierstellen. Gleichzeitig übernimmt es Dichtfunktionen an den Kolbenringen und den Ventilen.

Bei offenen Verdichtern sperrt und kühlt das Öl zusätzlich die Gleitringdichtung, wobei ein geringes Ölleck an dieser Stelle (wenige Tropfen je Stunde) ein Zeichen für verschleißfreien und kältemittelgedichteten Betrieb ist. Gefährdet ist eine trockenlaufende Dichtung und unbrauchbar ist eine Dichtung mit einem größeren Leckstrom.

Kältemittel und Öl haben im Kurbelgehäuse des Verdichters intensiven Kontakt miteinander, wodurch der Kältemittelstrom im Kreislauf mit einer geringen Ölmenge (bis 5 %) beladen ist. Dieses mitgerissene Öl muß unter den Bedingungen des Kältekreislaufes, d. h. bei Verdampfungs- und Verflüssigungstemperaturen, kontinuierlich transportfähig sein. Das erreicht man in den meisten Fällen durch den Einsatz von Ölen, die sich in jedem Verhältnis mit Kältemittel mischen. Ist das

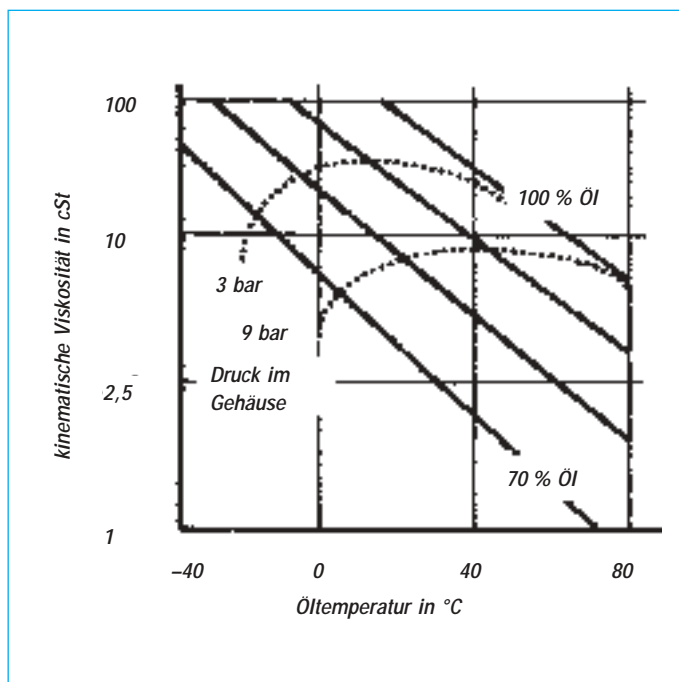
nicht gegeben, wie z. B. bei den konventionellen Ölen für das Kältemittel Ammoniak, bei verzweigten Splitkälteanlagen oder bei Tieftemperaturanlagen, muß durch einen Ölabscheider in der Druckleitung für die Ölrückführung in das Kurbelgehäuse gesorgt werden. Im normalen Mischbarkeitsfall diffundiert und kondensiert während längeren Stillstandes der

versorgung und letztlich erhöhtem Lagerverschleiß. Das kann mehrere Minuten andauern und bis zum Lagerausfall führen. Dieser Zustand ungenügender Schmierung ist oft mit das Triebwerk besonders belastenden Flüssigkeitsschlägen verbunden. Diese entstehen durch das beim Start aufschäumende Öl-Kältemittel-Gemisch, das auch den Saugraum des Verdichters aus-

down-Schaltung (Abpumpschaltung), bei der der Verdichter über einen Saugdruckschalter immer dann kurzzeitig in Betrieb gesetzt wird und das Kältemittel aus dem Kurbelgehäuse wieder absaugt, wenn der Druck im Kurbelgehäuse auf einen bestimmten Wert angestiegen ist.

Die Saugdrucksteuerung des pump-down wird manchmal auch durch eine zeitgesteuerte Schaltung ersetzt, was aber eine Kenntnis des Zeitverhaltens des Druckanstieges im Kurbelgehäuse voraussetzt. Diese Maßnahmen können allerdings nur wirken, wenn außerhalb der Betriebszeit der Kühlanlage Spannung an der Verdichtersteuerung anliegt. Andernfalls ist ausreichende Sicherheit nur gegeben, wenn man die vom Verdichterhersteller vorgegebenen zulässigen Kältemittelfüllmengen der Anlage nicht überschreitet. Trotz dieser bekannten Bedingungen gibt es doch Einsatzfälle, bei denen ihre Einhaltung Probleme bereitet. Insbesondere ist das bei Anlagen der Transportkälte- und -klimatetechnik der Fall, bei denen es immer wieder längere Betriebspausen ohne Energieversorgung der Ölheizung oder der Abpumpschaltung gibt, in denen sich Kältemittel in unzulässiger Menge im Öl ansammeln kann. Wenig wirkungsvoll ist die in solchen Fällen manchmal angewendete pump-down-Steuerung vor dem Ausschalten des Verdichters, da dies nur eine Verzögerung des Ölverdünnungseffektes ergibt. Manchmal, d. h. bei nicht zu langen Betriebspausen, reicht das aus, aber eigentlich müßte man tatsächlich in diesen Fällen die Verdichterabsperrventile bei Außerbetriebnahme schließen und vor dem Start wieder öffnen. Da das aber in den automatisch gesteuerten Anlagen von Hand erfolgen müßte und praktisch niemals funktioniert und auch kaum zumutbar ist, wurde für solche Fälle eine Lösung mit einem selbsttätigen Absperrventil geschaffen, das als Hilfsenergie für das Öffnen oder Schließen den Öl- oder Kältemitteldruck benutzt und damit von äußerer Energiezufuhr unabhängig den Verdichter beim Abschalten von der Anlage mit ihrem Kältemittelinhalt trennt und kurz nach dem Einschalten des Verdichters wieder mit ihr verbindet. Dieses Ventil hat sich praktisch in einigen Anwendungen bewährt, wurde dann aber wegen der damit verbundenen Kosten nicht weiter produziert [5]. Dagegen wird mit mancherlei Überwachungseinrichtungen und Regelungssoftwaremaßnahmen versucht, das Problem zu lösen, ohne wirklich das Übel an der Wurzel packen zu können. Die üblicherweise als Absperrventile verwendeten Magnetventile sind zwar eine einfa-

Bild 5 Beispiel für das Verhalten eines Öl-Kältemittel-Gemisches



Anlage entsprechend den Löslichkeitsbedingungen (Druck, Temperatur, Standzeit), Kältemittel in das Öl. Durch den Kältemittelanteil im Öl verringert sich die Viskosität und verschlechtert sich die Schmierfähigkeit [4], siehe Bild 5. **Im Grenzfall kann sich bis auf einen Kältemittelrest, der sich aus dem Sättigungsdruck ergibt, fast alles Kältemittel im Öl befinden!**

Die Viskosität liegt dann im Bereich derjenigen von Wasser, was für die Schmierfähigkeit viel zu niedrig ist. Besonders beim Start des Verdichters nach längerer Betriebspause spielt das eine große Rolle. Viele Verdichterschäden gehen auf die Verletzung der erforderlichen Startbedingungen bezüglich der Ölkonditionen zurück. **Da bei Inbetriebnahme des Verdichters der Druck im Kurbelgehäuse schnell absinkt, kommt es zum Ausdampfen des Kältemittels und zur Bildung eines Ölschaums, der von der Ölpumpe nicht oder nur schlecht gefördert werden kann. Die Folge ist ein Betrieb der Lager mit mangelhafter oder ohne Öl-**

füllt und mit angesaugt wird. Wegen der geringen Kompressibilität der mitgerissenen Flüssigkeit entsteht der hohe Druck des Flüssigkeitsschlages, wenn der Kolben in die Nähe des Druckventiles kommt. Das Druckventil ist für Kältemittelgas ausgelegt und deshalb für eine Flüssigkeit mit der viel höheren Dichte viel zu klein. Manche Verdichter sind deshalb vorbeugend mit Flüssigkeitsschlagsicherungen an den Druckventilen ausgestattet.

**Wirksame Abhilfe gegen diese Probleme schafft man durch Schließen der Absperrventile bei Stillsetzung der Anlage, durch Vorwärmung des Öles vor Inbetriebnahme auf 10 bis 30 K über Umgebungstemperatur, um das Eindringen des Kältemittels zu verringern oder das Kältemittel wieder auszutreiben. Eine andere Schutzmaßnahme ist die pump-**

che Lösung, ihre begrenzte Dichtheit löst das Problem nicht wirklich, sondern verschiebt die Wirkungszeit nur im günstigen Sinne. *Zumindest sollte man für derartig schwierige Fälle Ölheizung und Abpump-schaltung kombinieren und nach Wiederverfügbarkeit der Spannung für die Heizung zunächst vorheizen. Der Verdichterstart müßte dann während der erforderlichen Heizzeit, die experimentell zu ermitteln ist, verriegelt werden.* Da diese Zeit in die Größenordnung von Stunden reicht, ist das aber teilweise auch problematisch, z. B., wenn der Kühlbefehl in einer Klimaanlage bei Inbetriebnahme an einem warmen Tag schon bei oder kurz nach der Inbetriebnahme folgt. Das setzt aber weiterhin voraus, daß die in den Verdichtern installierten Ölheizungen wirksam sind, indem sie die vorgesehene Heizleistung konstant über einen längeren Zeitraum aufbringen. *Bei den in vielen Verdichtertypen vorgesehenen selbstlimitierenden PTC-Heizungen, die vor allem bei Hermetikverdichtern zu finden sind, wird die Heizung wegen des schlechten Wärmeüberganges vom Heizdraht über seine Isolierung, durch den Luftspalt in der Hülse und durch die Hülse in das Öl*

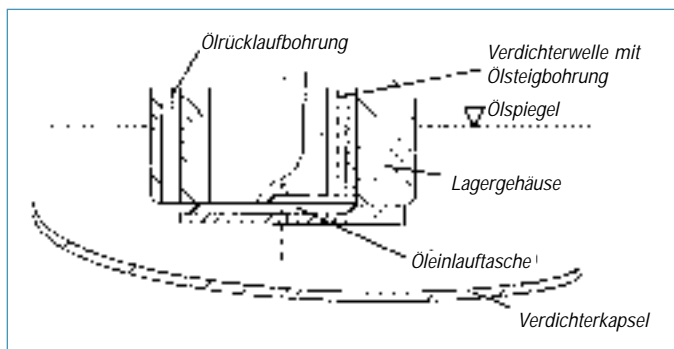


Bild 7 Wellenende von Hermetikverdichtern ohne bzw. mit nur geringer Wirkung auf die Ölbeugung

Wenn also das Gemisch im Halbhermetikverdichter den Flüssigkeitsspiegel so weit ansteigen läßt, daß ein Triebwerksteil eintaucht, meist sind das die unteren Pleuelschalen, erfolgt eine derartig starke Bewegung der Flüssigkeit, daß schon nach kurzer Zeit (weniger als eine Minute) das Öl seine Normalkondition erreicht hat. Im Bild 6 ist eine solche Lösung zu sehen.

Die Ölbeugung kann auch durch eine Schleuderscheibe, durch einen Treibstrahl oder bei senkrechter Welle durch den Ölförderkegel, siehe z. B. Bild 8, erfolgen. Kaum in diesem Sinne wirksam sind die weit verbreiteten Ölfördereinrichtungen

mittels bei Kurbelgehäusedruck abkühlen, z. B. bei Transportkälteanlagen im Winter während des Abstellbetriebes. Dann kondensiert das Kältemittel an den kalten Wandungen und sinkt unter das Öl, so daß am Saugstutzen der Ölpumpe nur reines Kältemittel ansteht. In diesen Fällen ist eine wirksame Ölheizung unumgänglich.

*Immer positiv wirkt sich der sparsame Umgang mit der Kältemittelfüllmenge bzw. die Unterschreitung der vom Hersteller vorgegebenen zulässigen Kältemittelfüllmenge aus, was durch kompakte Anlagen und geringes oder kein Sammlervolumen vorteilhaft beeinflusst wird.*

Die optimalen Öltemperaturen im Betrieb liegen zwischen 10 K über Umgebungstemperatur und 70 bis 90 °C. Diese Grenze kann schnell überschritten werden, wenn beim leistungsreduzierten Betrieb die dabei wärmer werdenden Bauteile das Öl zusätzlich erwärmen. Andererseits kann beim Start des Verdichters die Öltemperatur bis zur jeweiligen Umgebungstemperatur niedriger liegen, vor allem dann, wenn keine Ölheizung als Schutz gegen eindringendes Kältemittel vorgesehen ist. In Abhängigkeit von der Ölviskosität werden Starttemperaturen bis ca. -20 °C zugelassen, ohne daß Vorkehrungen für die Fließfähigkeit getroffen werden müssen. Darunter ist das Öl meist nicht mehr fließfähig genug, so daß dann eine Verriegelung der Temperaturgrenze in der Verdichtersteuerung erfolgen muß, die den Start erst nach dem Erreichen des erforderlichen Mindestwertes durch Vorwärmung zuläßt. Die Einhaltung dieser Bedingung gilt unabhängig von der Verhinderung der Ölverdünnung durch eindiffundiertes Kältemittel. Diese kann aber im Dauerbetrieb zum Problem werden, wenn durch falsche Einstellung des Expansionsventils die Ansaugüberhitzung den o. g. erforderlichen Mindestwert nicht erreicht und damit auch im normalen Verdichterbetrieb das Öl zu stark verdünnt.

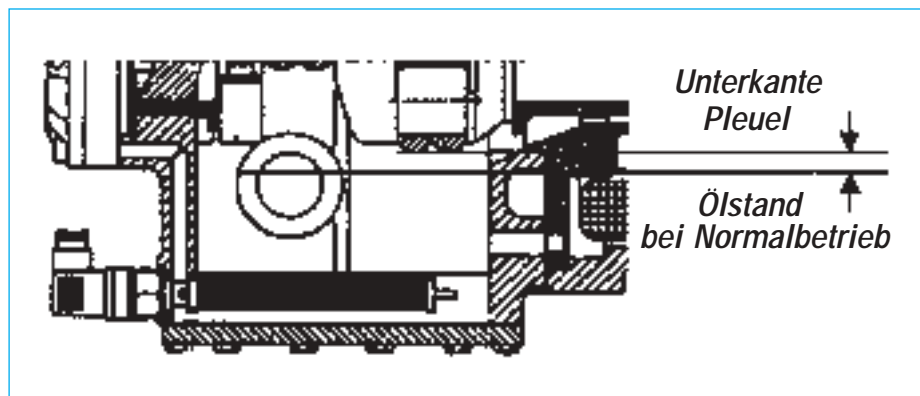


Bild 6 Verdichtertriebwerk mit geringem Abstand zwischen Ölstand und Pleuelunterkante

*schon wenige Sekunden oder höchstens Minuten nach dem Einschalten gesperrt und ist nahezu wirkungslos, so daß der in solchen Fällen erforderliche Langzeiteffekt nicht eintritt.*

*Daß trotzdem viele Verdichter unter so ungünstigen Bedingungen schadensfrei starten, erklärt sich aus der Erfahrung, daß ein mit dem Start in Bewegung gesetztes Öl-Kältemittel-Gemisch viel schneller das Kältemittel abgibt als ruhendes Öl.*

bei Hermetikverdichtern mit senkrechter Welle, die das Wellenende fast vollständig vom Ölraum trennen, siehe Bild 7.

Den Verdichtertypen mit Ölheizung oder mit durch das Öl geführter Druckleitung kommt weiterhin vorteilhaft zugute, daß durch die entstehenden Temperaturunterschiede vor oder gleich nach dem Start dem Öl eine thermische Bewegung aufgeprägt wird, wobei man bei druckleitungserwärmtem Öl natürlich die thermische Öleinsatzgrenze im Auge haben muß.

Eine besondere Problematik mit dem Kältemittel im Öl ergibt sich bei Anlagen, bei denen die Verdichterkapseln bei niedrigen Außentemperaturen bis unter die Kondensationstemperatur des Kälte-

Ein Lagerschaden ist dann vorprogrammiert. *Ein praktisches Warnsignal ist eine zu niedrige Öltemperatur infolge des Wärmeentzuges durch das nachverdampfende Kältemittel, fühlbar von Hand am Ölraum des Kurbelgehäuses oder sichtbar durch ein feuchtigkeitsbeschlagenes oder vereistes Kurbelgehäuse.*

Für den Öltransport zu den Reibstellen im Verdichter (Lager, Zylinder) sorgen entweder Ölpumpen mit Ölüberdrücken gegenüber dem Saugdruck bis 4 bar oder fliehkraftunterstützte und nahezu drucklos arbeitende Ölversorgungssysteme. Die druckölversorgten Verdichter können mittels Druckschaltern gegen zu grobe Fehler im Ölhaushalt geschützt werden. Allerdings kann es dann passieren, daß mit der zweckmäßigen Wiedereinschaltsperrung der Kühlobetrieb unterbrochen wird, bis die Fehlerbeseitigung und Rückstellung erfolgt ist. Da dies nicht im Sinne einer guten Kälteanlage ist, sollten die genannten Fehlermöglichkeiten von vornherein ausgeschlossen werden. Es gibt auch als Ausnahmefall den bewußten Verzicht auf den Verdichterstopp bei Öldruckproblemen, um das wertvolle Kühlgut nicht zu gefährden. Man begnügt sich dann mit der Signalisierung des Fehlers und nimmt einen Verdichterausfall in Kauf, muß dann aber im Schadensfall eine Ersatzmaschine bereithaben.

Für Verdichter mit Zentrifugalschmierung hat sich noch kein Sicherheitssystem gegen unzureichende Ölförderung durchgesetzt.

## Antrieb durch Frequenzumformer und mit Sanftanlaufeinrichtungen

### Anwendungsgesichtspunkte

Während die meisten der bisher beschriebenen Gefahren für den zuverlässigen Betrieb von Kältemittel-Hubkolbenverdichtern durch gute Projektierung der Anlagen und durch Erfahrungen aus Schadensfällen weitgehend beherrscht werden, hat sich mit der Einführung und sich immer mehr durchsetzenden Anpassung der Verdichterleistung an den Leistungsbedarf der Anlage durch die vorteilhafte stufenlose Einstellung der jeweils erforderlichen Antriebsfrequenz für den Motor mittels Frequenzumformer ein neues Gefahrenpotential aufgetan, das oft zu unerwarteten Schwierigkeiten führt. Die o. g. Probleme werden dabei meist verstärkt wirksam. Während in den Fachveröffentlichungen über Frequenzumformer auf deren vorteilhafte Wirkung hinsichtlich des Energieverbrauches ausführlich be-

richtet wird, gibt es nur am Rande Hinweise zu den Verdichterbetriebsproblemen. Ney [6] wünscht sich in KK 8/99 spezielle, extra für Frequenzstellung entwickelte Verdichter. Im KK-Aufsatz zu optimalen Verdichterantrieben im vorhergehenden Heft sind wesentliche Hinweise gegeben [1]. Oft sind die Frequenzumformer mit Sanftanlaufeigenschaften ausgestattet bzw. es werden getrennte Sanftanlaufgeräte verwendet, die zu dieser Problematik nicht unwesentlich beitragen.

Die Notwendigkeit und Zweckmäßigkeit der Leistungsanpassung ist bei Klimaanwendungen am meisten ausgeprägt, weil dabei der momentane Leistungsbedarf im Verlaufe des zeitlichen Temperaturanges zwischen Vollast und nahezu Nullast liegt. Oft nutzt man auch die Stellmöglichkeit zu höherer Leistung hin bis zu der von den meisten Verdichtern ertragenen Antriebsfrequenz von 60 oder gar 75 Hz, so daß man Leistungsspitzen abdecken kann, ohne den nächstgrößeren Verdichter für die Spitzenlast einsetzen zu müssen, die manchmal nur wenige Stunden im Jahr anliegt [7].

Auf die im folgenden beschriebenen Einflüsse der Drehzahlstellung mittels Frequenzumformer und des Sanftanlaufes hat auch die jeweilige Konzeption dieser Geräte einen Einfluß, indem die Spannungsform und die elektromagnetische Verträglichkeit zu betriebstechnischen Schwierigkeiten beitragen können. Abweichungen von der Sinusform des Spannungsverlaufes führen zu höheren Wärmeverlusten des Motors, da der  $\cos \varphi$  stark reduziert wird, und unerwartete elektromagnetische Impulse können die Schalthäufigkeit der Verdichter schädlich steigern.

*Man kann all diesen Gefahren nur entgegengehen, wenn man sich vom Hersteller der Verdichter ausreichende technische Unterlagen über die Anwendungsgrenzen der neuartigen Antriebstechniken besorgt, und die von ihm empfohlenen bzw. zugelassenen Frequenzwandler und Sanftanlaufgeräte benutzt.* Gibt es solche Unterlagen noch nicht, ist bei der unumgänglichen Erprobung einer neuen Lösung die enge Zusammenarbeit mit dem Verdichtertierlieferanten angesagt. Oft steht vor einer Freigabe eine entsprechender Erprobung beim Hersteller, beim Anwender oder bei beiden und danach die sachkundige Befundung aller Verdichterteile. Dieser Weg

belohnt diejenigen, die ihn gehen, mit der erwarteten Zuverlässigkeit des Betriebes der Verdichter.

### Temperatureinflüsse

Das Temperaturniveau der hermetischen und halbhermetischen Verdichter steigt bei Drehzahlreduzierung mit abnehmendem Massestromdurchsatz zunächst an, da die Verlustleistung des Motors und des Verdichters weniger stark abnehmen, als es der Leistungsreduzierung entspricht. Infolge dessen steigen die Gastemperaturen und die Temperatur der Motorwicklung an. *Beim Erreichen des zulässigen Wertes der jeweiligen Grenztemperaturen ist die Grenze für die Drehzahlabsenkung erreicht, ansonsten treten die auf Übertemperatur zurückzuführenden Schäden auf.* Hinsichtlich der Gastemperaturen hilft man sich mitunter durch das Nachspritzen von flüssigem Kältemittel in das Sauggas. Damit kann man wirkungsvoll die Endtemperatur senken, aber nicht ohne negative Einflüsse bei zu niedrigem Massestrom. *Man kühlt den auf der Eintrittsseite des Sauggases am Motorwickelkopf sitzenden Temperaturschutzschalter nämlich auch dann noch ausreichend gut, wenn der verdichterseitige Wickelkopf des Motors seine zulässige Temperatur unbemerkt längst überschritten hat und in der Folge der Motor auf dieser heißen Seite thermisch zerstört wird.* Dazu kommt die Problematik des Leistungsverlustes durch das Nachspritzen, wodurch evtl. der erwartete positive Effekt auf den spezifischen Energieverbrauch der Anlage mit Frequenzumformer wieder aufgebraucht wird. Die Gefahr, die der zusätzliche Weg für das Kältemittel in das Öl im Kurbelgehäuse bei Stillstand des Verdichters mit sich bringt, steigt dadurch ebenfalls an.

### Ölversorgungseinflüsse

Die sichere Ölversorgung der Lagerstellen des Verdichters erfordert einen bestimmten Mindestöldruck, eine Mindestdrehzahl und eine schon beschriebene Mindestviskosität. Während Verdichter mit Ölpumpe oder bei horizontaler Welle mit Schöpfölversorgung in eine Einlauftasche am Wellenende Drehzahlabsenkungen im Dauerbetrieb bis unterhalb der 50 %-Grenze meist schadensfrei überstehen, sind die Verdichter mit senkrechter Welle eher gefährdet, siehe Bild 8. Bei ihnen muß das Öl durch eine exzentrische Wellenbohrung bis zur Höhe des oberen Lagers gefördert werden. *Die mögliche Exzentrizität ist infolge des endlichen Wellendurchmessers begrenzt, und die Förderhöhe nimmt*

mit dem Quadrat der Drehzahl ab. Dadurch wird die Grenze bei der Drehzahlreduzierung schnell erreicht, und die Welle frißt sich im entsprechenden Verdichterlager fest.

Beim Sanftanlauf kann der Schaden noch schneller eintreten, wenn man die Drehzahl zu langsam steigert. Die Ölreserve an den Lagerstellen aus der vorhergehenden Betriebsperiode reicht dann bis zum Erreichen des Ölförderbeginns nicht aus, andererseits steht aber schon nach kurzer Betriebszeit der volle Verdichtungsdruck und damit die volle Lagerbelastung an. Man muß deshalb das Startregime so wählen, daß einerseits der An-

Bei der als Discpack<sup>®</sup>, bekanntgewordenen Lösung zur Leistungsanpassung [8] treten diese drehzahlabhängigen Probleme nicht auf, da die Verdichter immer bei Nenndrehzahl arbeiten. Man nimmt dabei eine Schalthäufigkeit des einzelnen Verdichters bis  $4 \times$  je Stunde in Kauf, was so gering ist, daß keine nachteiligen Lebensdauereinflüsse zu erwarten sind. Möglich ist diese Lösung durch gute Leistungsanpassungen im Projektstadium und durch die pulsweitenmodulierte Kältemittelversorgung der einzelnen Kühlstellen. Diese Lösung setzt das Vorhandensein von möglichst mehr als einem Verdichter je Anlage und mehrere Kühlstellen voraus.

genannten des Einzelverdichters. Oft arbeiten die Verdichter aber wie beim o. g. Discpacksystem<sup>®</sup>, auf einen gemeinsamen Kältekreislauf, wodurch man weitere Gesichtspunkte beachten muß. Dieser betriebstechnisch ungünstige Parallelbetrieb insbesondere bei der Supermarktkühlung resultiert daraus, daß die kältetechnischen Handwerksbetriebe mit großen Verdichtern technisch und wirtschaftlich oft überfordert sind, für den örtlichen Kälteservice aber den idealen Partner darstellen. Als Tribut an diese günstige Verfahrensweise muß man sich mit den Installations- und Betriebsproblemen des Parallelbetriebes von z. T. vielen meist gleichartigen Verdichtern in einem Kältekreislauf auseinandersetzen.

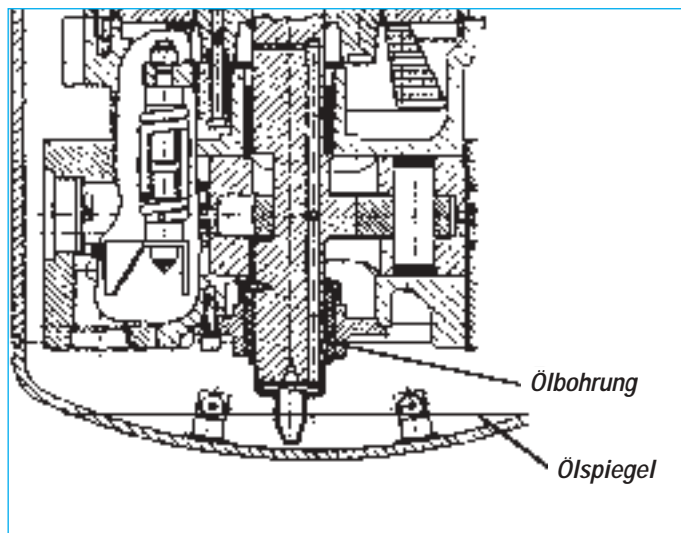
Die Ölräume und die gasseitigen Ansaugräume der parallelen Verdichter sind mit ausreichenden Querschnitten zu verbinden oder Ölspiegelregulatoren sind zu verwenden, um den Ölstand im stehenden und im laufenden bzw. in den unterschiedlich laufenden Verdichtern immer im sicheren Niveau zu halten. Bei Betriebszustandsänderungen gibt es dann keine unzulässigen Ölverlagerungen.

Die parallelen Verdichter sind mit einem Rückschlagventil in der Druckleitung auszurüsten, um Kältemittelkondensation in den stehenden Verdichter zu verhindern bzw. auf ein Mindestmaß zu begrenzen. Das Rückschlagventil muß wegen der an dieser Stelle unvermeidlichen Druckschwankungen speziell für Verdichterparallelbetrieb ausgelegt sein, d. h. es benötigt eine stärkere Feder, als die in der Kältetechnik sonst üblichen Ventile. Damit ist auch zu überprüfen, ob der stehende Verdichter mit dem momentenreduzierten Antrieb des Startes am Frequenzumformer oder Sanftstarter überhaupt anlaufen kann. Andernfalls ist der stehende Verdichter mit Druckentlastung zu starten.

Alle parallelen Verdichter sind möglichst gleichmäßig lange bei den jeweiligen Konditionen zu betreiben, um sie gleichmäßig verschleifen zu lassen. Dazu ist die Startfolge durch die Software des Reglers in bestimmten Abständen zu wechseln.

Wenn man mehrere Verdichter parallel betreibt und gleichmäßig in der Leistung reduziert, kann man sie kostengünstig an-

Bild 8 Hermetikverdichtertriebwerk mit Fliehkraftschmierung durch die Exzentrizität der Ölbohrung in der senkrechten Welle



laufstrom den erwünschten niedrigen Wert annimmt – die Absenkung vom bis zu 9fachen auf das Zweifache des Nennstromes ist ohne weiteres einhaltbar – andererseits aber in ausreichend kurzer Zeit Öl gefördert wird. Die Frequenzänderungsgeschwindigkeit beim Start sollte schon einige Hz/s betragen, und es empfiehlt sich zunächst ein Durchstarten bis zur Nenndrehzahl, bevor auf Regelbetrieb im zugelassenen Bereich übergangen wird. Die Frequenzumformer und Sanftanlaufgeräte, die mit Rücksicht auf die Bedingungen der Kältetechnik entwickelt wurden, erfüllen diese Bedingungen, während man sich mit einem beliebigen Gerät vom reichlichen Marktangebot u. U. die genannten Probleme einhandeln kann.

### Verdichterparallelbetrieb

Frequenzumformerantriebe werden bevorzugt für Verbundanlagen mit mehreren Verdichtern im Parallelbetrieb vorgeschlagen. Damit erreicht man eine bessere Optimierung des Systems über die im vorhergehenden Abschnitt erläuterte untere Leistungsgrenze eines einzelnen Verdichters hinaus. Dann ist es möglich, die zulässige untere und obere Drehzahl eines oder mehrerer Verdichter auszuschöpfen und dann mit dem Einverdichterbetrieb eine weitere Leistungsreduzierung der Anlage zu erreichen. Bei zwei Verdichtern und 50 % zulässiger Drehzahlreduzierung je Verdichter erreicht man dann z. B. insgesamt 25 % als untere Grenze.

Die bevorzugte Schaltung bei mehreren parallelen Verdichtern ist der Betrieb jedes Verdichters auf einen eigenen kältetechnisch vom anderen getrennten Kreislauf bei gemeinsamen Kühl- und Verflüssigungsseiten. Dann gibt es kaum zusätzliche Komplikationen zu den schon

einem gemeinsamen Frequenzumformer betreiben, hat dann aber nicht den Bonus der Leistungsreduzierung über den Bereich eines Verdichters hinaus. Bei getrennter Ansteuerung genügt dann ein kleinerer Frequenzumformer für den Pilotverdichter und ein billigerer Sanftanlasser für den Folgeverdichter, wenn man auf die gleichmäßige Benutzung verzichtet.

*Insgesamt ergibt sich die Einschätzung, daß meist der komplikationslosere Betrieb jedes Verdichters an einem eigenen Kältekreislauf über die Lebensdauerkosten gerechnet günstiger ist und zu besseren Zuverlässigkeitsergebnissen führt.*

### Antriebskupplungen

Die bei offenen Verdichtern bei fluchtendem Antrieb meist verwendeten elastischen Kupplungen sind schwingungsfähige Gebilde, die für jede Drehzahl und Zylinderzahl auf Resonanz mit einer Harmonischen der Antriebsdrehzahl überprüft werden müssen. Bei Festdrehzahl betrifft das die Leistungsanpassung mittels Zylinderabschaltung, und bei Frequenzumfor-

merantrieb überlagert sich der gesamte vorgesehene Drehzahlbereich. Es ist gar keine Seltenheit, daß eine Kupplung durch Torsionsschwingungen gerade im Zustand geringster Belastung zerstört wird. Wenn man die unzulässigen Drehzahlen kennt, muß man diese aus dem Regelprogramm ausblenden, was manche Frequenzumformer als Option für bis zu drei Drehzahlbereichen anbieten [1].

### Zusammenfassung

Die Verdichter sind eine sehr wichtige Komponente in der Kältetechnik. Sie erfüllen für viele kältetechnische Bedingungen problemlos die an sie gestellten Anforderungen.

Bei Einhaltung der Einsatzgrenzen der Verdichter sowohl im Normalbetrieb als auch bei davon abweichenden Bedingungen bestätigt sich das hohe technische und technologische Niveau in einer dauerhaft zuverlässigen Arbeitsweise.

Mit den immer mehr angewendeten Frequenzumformern für die Steuerung der Verdichterdrehzahl zur Regelung der Käl-

teleistung und mit Sanftanlaufeinrichtungen sind für die Beibehaltung des erreichten Zuverlässigkeitsstandes zusätzliche Bedingungen zu beachten, die in der automatischen Regelung und Überwachung der Kälteanlagen ihre technisch reale Widerspiegelung finden und im Laufe der weiteren Entwicklung immer bessere Berücksichtigung finden werden. □

### Literatur

- [1] Adolph, U.: Optimale Verdichterantriebe – Vorteile durch Frequenzstellung und Softstart, KK Die Kälte & Klimatechnik 10/1999, 90–97
- [2] Adolph, U. u. W. E. Kraus: Der Kolbenverdichter in der Kältetechnik und seine aktuellen Zuverlässigkeitsprobleme, Vortrag zum European Forum for Reciprocating Compressors, Dresden, 1999
- [3] Lehngut, M.: Kältemittelverdichter: Energiebilanzen, Zustandsänderungen und Schlußfolgerungen, KI Luft- und Kältetechnik (1997) 2, 61–66
- [4] DEA/Fuchs Mineralölwerke GmbH: Technische Information, Arbeitsblätter für Kältetechniker, Mannheim
- [5] Adolph, U.: Kältemittel-Hubkolbenverdichter, Gedanken zu Forschung und Konstruktion, KK Die Kälte & Klimatechnik 11/1998, 876–885
- [6] Ney, A.: Energieeinsparung durch Verdichter-Drehzahlregelung mittels Frequenzumformung, KK Die Kälte & Klimatechnik 8/1999, 26–35
- [7] Invertergeregelte Verbundanlagen mit WRG, Die Kälte & Klimatechnik 8/1999, 36–42
- [8] Holzhäuser, E.: Discpack 2<sup>®</sup> nutzt Einsparpotentiale, Die Kälte & Klimatechnik, 10/1999, 131–138