

Leistungsregelung von Schraubenverdichtern, Drehzahl- und Schieberregelung im Vergleich

Rolf Blumhardt, Sindelfingen

Worum es in diesem Beitrag geht

Zur Anpassung der Verdichter-Kälteleistung an den wechselnden Bedarf der Klima- und Kälteanlagen stehen für Schraubenverdichter unterschiedliche Technologien zur Verfügung:

- Aufteilung des Bedarfs auf mehrere Verdichter (Parallelverbund),
- Verdampfungsdruckregelung mit Heißgas Bypass,
- Interner Bypass im Verdichter,
- Reduzierung des Verdichter-Fördervolumens durch einen Steuerschieber,
- Variable Verdichterdrehzahl.

Die Verfahren unterscheiden sich durch die Qualität der Regelgüte – gestuft oder stufenlos – und durch die erreichbaren Teillast-Wirkungsgrade.

Der im Nachfolgenden dargestellte Vergleich zeigt die Resultate aus umfangreichen Messungen von zwei „modernen“ Verfahren zur Leistungsregelung eines halbhermetischen Kompakt-Schraubenverdichters, Schieberregelung und Drehzahlregelung durch Frequenzumrichter.

Einführung

Zur Anpassung der Verdichter-Kälteleistung an den wechselnden Bedarf der Klima- und Kälteanlagen stehen für Schraubenverdichter unterschiedliche Technologien zur Verfügung:

- Aufteilung des Bedarfs auf mehrere Verdichter (Parallelverbund),
- Verdampfungsdruckregelung mit Heißgas Bypass,
- Interner Bypass im Verdichter,
- Reduzierung des Verdichter-Fördervolumens durch einen Steuerschieber,
- Variable Verdichterdrehzahl.

Die Verfahren unterscheiden sich durch die Qualität der Regelgüte – gestuft oder stufenlos – und durch die erreichbaren Teillast-Wirkungsgrade.

Der nachfolgend dargestellte Vergleich zeigt die Resultate aus umfangreichen Messungen von zwei „modernen“ Verfahren zur Leistungsregelung eines halbhermetischen Kompakt-Schraubenverdichters, einer Schieberregelung und einer Drehzahlregelung durch Frequenzumrichter.

Systembeschreibung

Die **Schieberregelung** ermöglicht eine Anpassung des Verdichter-Fördervolumens an den Leistungsbedarf durch die Möglichkeit, den Verdichtungsbeginn durch eine axiale Verschiebung des Steuerschiebers zu verändern. Gleichzeitig wird bei dieser Verdichter-Bauweise auch das Auslaßfenster an das sich einstellende Volumenverhältnis angepaßt.

Zur **Drehzahlregelung** wurde dem gleichen Verdichter ein Frequenzwandler vorgeschaltet. Die Drehzahl wurde so gewählt, daß sich

in jedem Meßpunkt die selbe Leistung einstellte wie bei der Schieberregelung.

Versuchsaufbau, Komponenten, Kältemittel, Anwendungsbereich

Die Messungen erfolgten auf einem Prüfstand mit Gaskreislauf ohne Kältemittelverflüssigung. Das Wärmeäquivalent der elektrischen Antriebsleistung wird über einen flüssigkeitsgekühlten Wärmeaustauscher abgeführt. Die Arbeitspunkte können mit einem Drosselventil (durch die Temperatur des Kühlmediums) und mit der Kältemittelfüllmenge des Meßkreislaufes eingestellt werden. Zur Ermittlung der Kälteleistung wird der Sauggasvolumenstrom gemessen. Die elektrische Aufnahmeleistung wird aus dem Effektivwert

zum Autor

Dipl.-Ing. (FH)
Rolf Blumhardt,
Leiter Anwendungstechnik,
Bitzer Kühlmaschinen GmbH,
Sindelfingen



der Stromaufnahme und der Spannung berechnet. Alle relevanten Daten, Drücke und Temperaturen werden elektronisch erfaßt und ausgewertet. Die dargestellten Meßwerte sind Mittelwerte einer 5-minütigen Meßzeit.

Für die Messungen wurde ein halbhermetischer Kompakt-Schraubenverdichter Typ CSH6561-60Y eingesetzt. Das theoretische Fördervolumen beträgt 170 m³/h bei 50 Hz, maximaler Betriebsstrom 105 A. Schieberstellung 100 %, 75 % 50 % und 25 %.

Der zur Drehzahlregelung eingesetzte Frequenzwandler Typ 75FEP war auf eine



Bitzer semihermetischer Kompakt-Schraubenverdichter Typ CSH 65

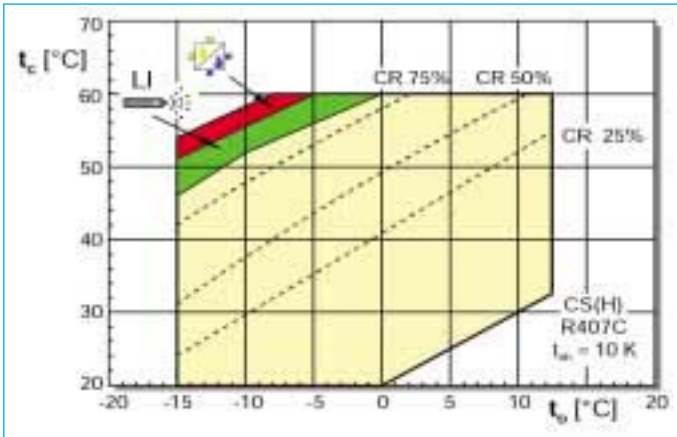


Bild 1 Einsatzbereich

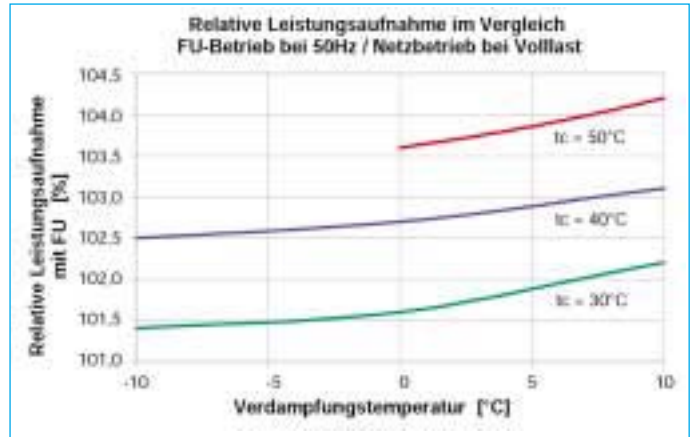


Bild 2 Leistungsaufnahme des Kompaktschraubenverdichters in Relation FU-Betrieb/Netzbetrieb

proportionale Spannungs-Frequenz-Kennlinie eingestellt. Der maximale Betriebsstrom beträgt 145 A, die Nominalleistung 75 kW.

Der frequenzvariable Betrieb erfolgte mit dem Standardmotor für 400 Volt bei 50 Hz. Dies bedeutet, daß der Verdichter bei über 50 Hz ansteigenden Betriebsfrequenzen mit zunehmender Unterspannung und proportional zunehmendem Betriebsstrom betrieben wird. Die maximal mögliche Verdichterdrehzahl wird in diesem Fall durch die Stromgrenze des Motors bestimmt.

Der Einsatzbereich des Verdichters in Verbindung mit dem Kältemittel R 407C ist in Bild 1 dargestellt. Insgesamt wird ein Verdampfungstemperaturbereich von +10 °C bis -10 °C betrachtet, der die Anwendung in Klimaanlage mit Direktverdampfung, Wasser- und Solekühlsätzen bestreicht. Die Verflüssigungstemperatur betrug 30, 40 und 50 °C. Die Verflüssigungs- und Verdampfungstemperaturen beziehen sich jeweils auf die Taupunkttemperatur des Gemischkältemittels R 407 C.

Regelbereiche

Der Steuerschieber des Verdichters wurde, ausgehend von der Vollaststellung 100 %, auf nominell 75 %, 50 % und 25 % positioniert. Die sich dabei einstellende Kälteleistung kann – in Abhängigkeit des Druckverhältnisses – von den nominellen Werten abweichen.

Für die Messungen mit Frequenzwandler wurde die Betriebsfrequenz des Verdichters so gewählt, daß sich in jedem gemessenen Betriebspunkt eine zur Schie-

berregelung identische Kälteleistung einstellte.

Zusätzlich zu den direkt vergleichbaren Messungen wurde die Betriebsfrequenz bei der maximalen Spannung von 400 Volt so weit über 50 Hz erhöht, bis die Stromgrenze des Motors erreicht wurde.

Volumenverhältnis

Das Volumenverhältnis des Verdichters ist durch die Position der Ansaugkante und die Größe des Auslaßkanals definiert. Das Auslaßfenster setzt sich aus einer axial im Druckflansch angeordneten Öffnung und einem radial in den Steuerschieber integrierten Auslaßkanal zusammen.

Die teilweise Integration des Auslaßkanals in den Schieber führt im Teillastbetrieb zu einer automatischen Anpassung des Auslaßfensters. Das Volumenverhältnis bleibt dabei bis 70 % Last in etwa konstant. Bei weiterer Reduzierung der Last (bis 25 %) ergibt sich eine selbsttätige VI-Regelung, durch die das Volumenverhältnis an den im Teillastbetrieb zu erwartenden niedrigeren Verflüssigungsdruck angepaßt wird.

Im frequenzvariablen Betrieb bleibt der Regelschieber auf der 100%-Position. Eine Anpassung des Volumenverhältnisses an die im Teillastbetrieb niedrigeren Bedingungen erfolgt in diesem Fall nicht.

Ergebnisse

Bild 2 zeigt die Leistungsaufnahme mit Frequenzrichter im Vergleich zum Betrieb direkt am Netz.

Die bei FU-Antrieb höhere Aufnahmeleistung basiert auf dem Wirkungsgrad des FU und zu einem geringen – meßtechnisch nicht zu definierenden – Teil auf dem reduzierten Wirkungsgrad des Elektromotors bei Versorgung mit der vom FU gelieferten gepulsten Spannung.

Die weiteren Betrachtungen bei Leistungsregelung erfolgen einzeln für die gemessenen Verflüssigungstemperaturen 30 °C, 40 °C und 50 °C.

Bei 30 °C Verflüssigungstemperatur zeigt die in Bild 3 dargestellte relative Leistungsaufnahme einen stetigen Verlauf bei Wandlerbetrieb. Die relative Leistungsaufnahme bei Schieberregelung liegt teilweise über, teilweise unter der Leistungsauf-

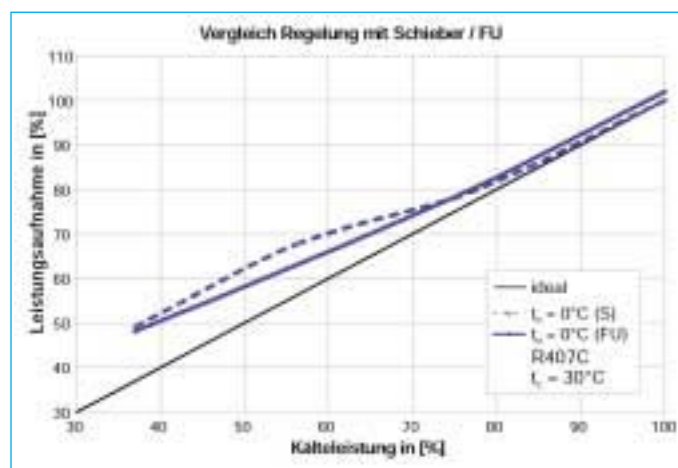


Bild 3 Verlauf der Leistungsaufnahme bei 30 °C Verflüssigungstemperatur

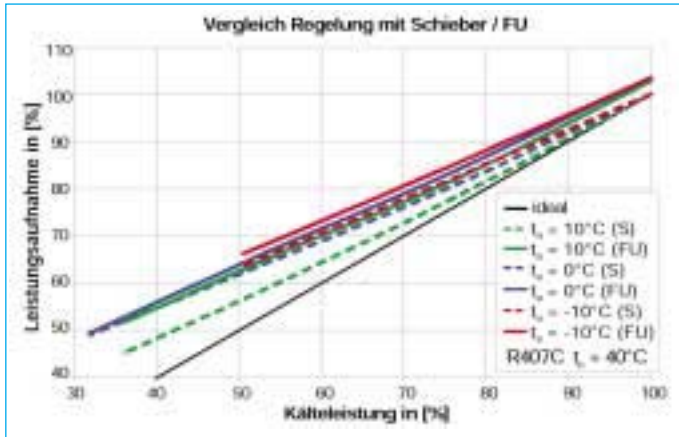
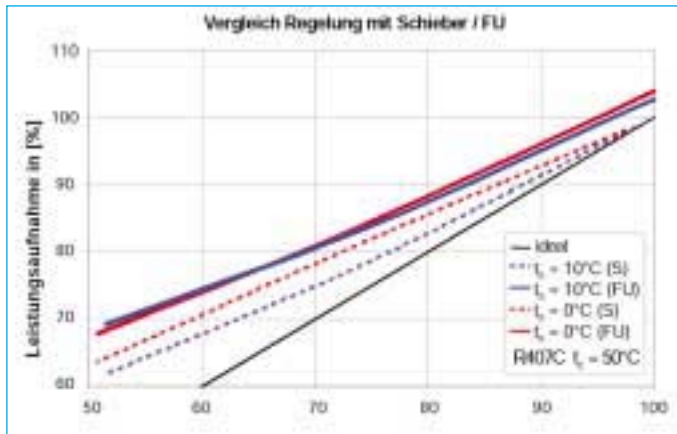


Bild 4 Verlauf der Leistungsaufnahme bei 40 °C Verflüssigungstemperatur

Vergleich der Einsatzgrenzen

Die für den Betrieb mit Schieber und den Antrieb über den Frequenzwandler ermittelten Vollast-Einsatzgrenzen sind in Bild 6 dargestellt. Die obere Grenzlinie basiert auf der maximal zulässigen Motortemperatur. Für den Betrieb mit Frequenzumrichter ergibt sich im Vergleich zum Netzbetrieb eine Einschränkung der maximal möglichen Verflüssigungstemperatur. Ursache ist die stärkere Erwärmung des Motors bei Frequenzwandlerantrieb.

Bild 5 Verlauf der Leistungsaufnahme bei 50 °C Verflüssigungstemperatur



Betrieb des Verdichters bei Frequenzen über 50 Hz

Die dargestellten Daten für den Betrieb des Schraubenverdichters wurden mit dem Standardmotor (400 V, 50 Hz) bei einer proportionalen Kennlinie des Frequenzwandlers ermittelt. Betriebsfrequenzen über 50 Hz sind bei einer konstanten Speisespannung möglich. In diesem Bereich der sogenannten Feldschwächung erhöht sich die Stromaufnahme proportional zur Drehzahl. Der Motor wird also bei steigender Frequenz mit zunehmender Unterspannung betrieben. Dieser Betrieb ist bis zur maximalen Stromaufnahme des Verdichters möglich. Die Stromreserven des Motors ergeben sich aus dem Verhältnis der maximal möglichen Stromaufnahme und dem Betriebsstrom im gewählten Betriebspunkt. Erfahrungswerte zeigen, daß der Betriebsstrom bei Frequenzwandlerantrieb maximal 90 % des

me bei Wandlerbetrieb. Dieses unstetige Verhalten wird durch das in den verschiedenen Schieberstellungen definierte Volumenverhältnis verursacht. Die Ergebnisse zeigen, daß dieser Verdichter nicht für die relativ niedrige Verflüssigungstemperatur von 30 °C optimiert ist. Dies ist durchaus üblich, da luftgekühlte Klimaanlage nicht mit derart niedriger Verflüssigungstemperatur arbeiten (für wassergekühlte Systeme stehen Verdichter mit entsprechend angepaßtem Volumenverhältnis zu Verfügung).

Bei 40 °C Verflüssigungstemperatur liegt die Leistungsaufnahme des mit dem Schieber geregelten Verdichters in allen Betriebspunkten ($t_o = -10\text{ °C}$, 0 °C und $+10\text{ °C}$) unter der bei Wandlerbetrieb.

Bei 50 °C Verflüssigungstemperatur (Bild 5) liegt das Verhältnis der Leistungsaufnahme des mit Schieber geregelten Verdichters noch etwas günstiger als bei 40 °C t_c . In diesem Betriebspunkt zeigen sich die Vorteile der Schieberregelung sehr deutlich. Zudem wirkt sich die

bei niedrigeren Drehzahlen reduzierte Umfangsgeschwindigkeit der Zahnschnecken negativ auf den Liefer- und Gütegrad des Verdichters aus.

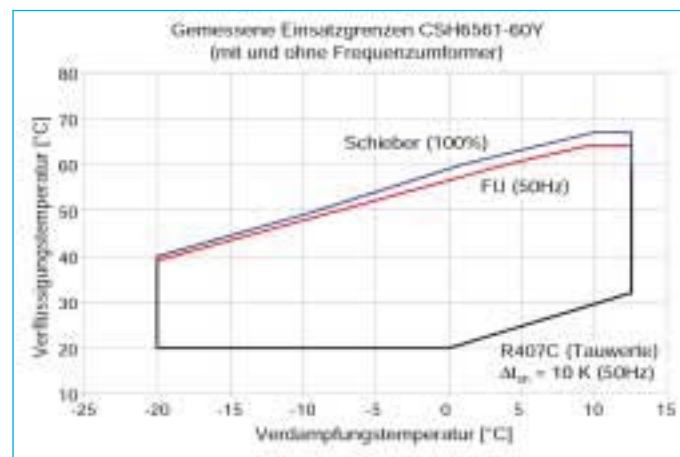


Bild 6 Einsatzgrenzen

Betr. Punkt	Stromaufn.	I_{max}	Max. Frequenz bei $I_{max} = 94,5\text{ A}$
-10 °C/40 °C	60,1 A	105 A	78 Hz
-10 °C/50 °C	71,4 A	105 A	66 Hz
0 °C/40 °C	62,9 A	105 A	75 Hz
0 °C/50 °C	74,5 A	105 A	63 Hz

Tabelle 1

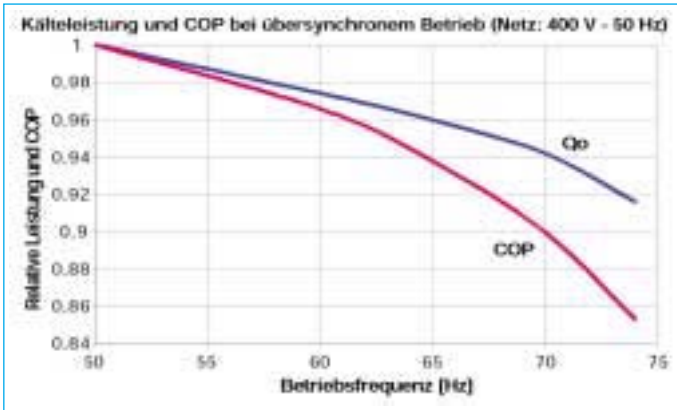


Bild 7 Relativer Verlauf von Leistung und COP bei Frequenzen über 50 Hz

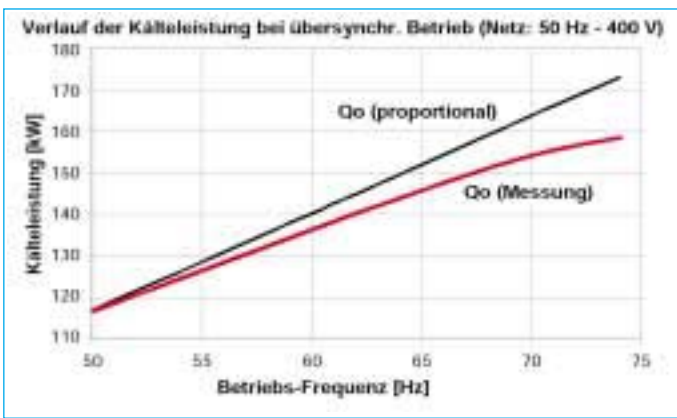


Bild 8 Verlauf der Kälteleistung

Betriebsdaten wurden mit dem für die Messungen zur Verfügung stehenden Motor bei proportional zur Frequenz erhöhter Spannung (50 Hz, 390 V bis 60 Hz, 460 V) gemessen. In Bezug auf Motorwirkungsgrad und Drehzahl sind die Ergebnisse mit dem unter normalen Umständen zu verwendenden Motor 230 V, 50 Hz zu vergleichen. Als Betriebspunkt wurde $t_o = 0^\circ\text{C}$, $t_c = 45^\circ\text{C}$ gewählt.

Die Kälteleistung steigt unterproportional auf 99 % relativ. Die Leistungsaufnahme steigt ebenfalls unterproportional auf 98 % relativ. Daraus ergibt sich eine Erhöhung der Leistungszahl um 1,4 %.

Bedingt durch die bei steigendem Massenstrom höheren Strömungsverluste im Verdichter erhöht sich die Kälteleistung unterproportional zur Drehzahlerhöhung. Die relative Reduzierung der Leistungsaufnahme ergibt sich aus den bei höheren Frequenzen geringeren Rückströmverlusten des Verdichters. In der Summe erhöht sich die Leistungszahl um 1,4 %. Mit dem 400-V-Motor reduzierte sich die Leistungszahl in diesem Betriebspunkt – wie vorab berichtet – auf 97 %. Dieses Ergebnis zeigt, daß Anlagen, die mehrheitlich mit Frequenzen über 50 Hz betrieben werden, mit einem Motor ausgerüstet sein sollten, der auch in diesem Bereich eine

maximal zulässigen Betriebsstromes bei Direktantrieb betragen darf. Tabelle 1 zeigt einige Beispiele.

Für den Betriebspunkt $t_o = 0^\circ\text{C}$, $t_c = 45^\circ\text{C}$ wurde das Betriebsverhalten des Verdichters in Verbindung mit dem Frequenzwandler aufgezeichnet. Die maximale Frequenz ergab sich mit 74 Hz.

Bild 7 zeigt die Steigerung der Kälteleistung und den Verlauf der Leistungszahl über der Drehzahl. Beide Werte verhalten sich nicht proportional zur Drehzahlerhöhung.

Die auf die Frequenz bezogene relative Kälteleistung beträgt bei 74 Hz noch ca. 92 %. Ursachen sind ein erhöhter Schlupf des Motors bei der sich bei Betrieb über 50 Hz einstellenden Unterspannung und der durch die Erhöhung des Kältemittel-Massenstromes verursachte Anstieg der Drosselverluste im Verdichter. Die bei Drehzahlerhöhung durch die höhere Umfangsgeschwindigkeit der Rotoren reduzierten Rückströmverluste können diesen Effekt nicht kompensieren.

Die Leistungszahl zeigt ein ähnliches Verhalten. Die proportional zur Frequenz steigende Unterspannung verursacht eine verringerte Magnetisierung des Motors

	50 Hz	60 Hz	Relative Werte bei 60 Hz
Kälteleistung [kW]	116,9	139,4	99 %
Leistungsaufnahme [kW]	41,9	49,3	98 %
Leistungszahl [-]	2,79	2,83	1,014

Tabelle 2

und in der Folge eine Reduzierung des Wirkungsgrades. Bei der in diesem Betriebspunkt maximal möglichen Frequenz von 74 Hz sinkt die Leistungszahl um 14 %.

Unter der Voraussetzung, daß die Maximalfrequenz nur zur Abdeckung von Spitzenlasten – die nur während weniger Tage des Jahres anstehen – benötigt wird, rückt die Reduzierung der Leistungszahl in den Hintergrund. Wichtig ist vor allem die sich bei höheren Frequenzen einstellende Leistungserhöhung des Verdichters – in diesem Betriebspunkt – um 36 % von 117 auf 159 kW.

Alternativ zu der gewählten Motorspannung 400 V, 50 Hz kann der Verdichter auch mit einem Motor für 230 V, 50 Hz ausgerüstet werden. Der Frequenzwandler ist in diesem Fall in der Lage, über den gesamten Drehzahlbereich eine der Frequenz proportionale Spannung zu liefern. Die vorab für den Betrieb mit Unterspannung geschilderten Einbußen von Leistung und Leistungszahl können dadurch vermieden werden. Die entsprechenden

proportionale Steigerung von Spannung und Frequenz ermöglicht. Dies ist in diesem Fall ein auf 230 V, 3 Ph, 50 Hz ausgelegter Motor. Es muß in diesem Zusammenhang beachtet werden, daß der Frequenzwandler auf die – bei Verwendung des 230-V-Motors – höheren Ströme ausgelegt sein muß.

Leistungsverlauf mit Frequenzwandler (27 bis 74 Hz)

Das Diagramm zeigt das Teillastverhalten mit Frequenzwandler bei $0^\circ\text{C}/45^\circ\text{C}$ mit R 407C. Die rote Kurve stellt das Teillastverhalten bei proportionaler Veränderung von Spannung und Frequenz dar. Bei Frequenzen über 50 Hz nähert sich die Kurve der Proportionalinie. Der immer noch vorhandene Abstand zur Proportionali-

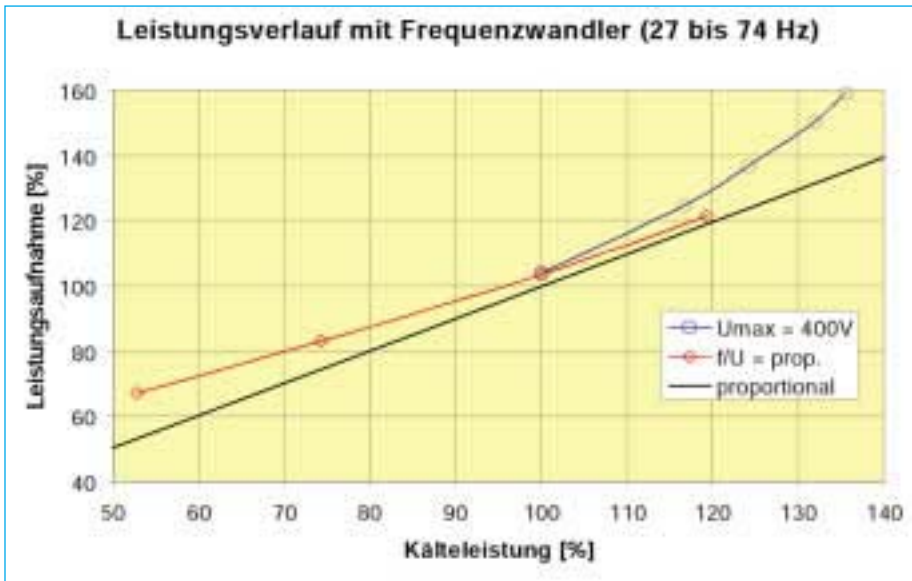


Bild 9 Diagramm über das Teillastverhalten mit Frequenzumwandler bei 0 °C/45 °C und mit dem Kältemittel R 407C

nie entsteht durch den Wirkungsgrad des Frequenzwandlers. Die Messungen wurden bis 60 Hz durchgeführt. Bei höheren Frequenzen wird der Wirkungsgrad des Wandlers durch den bei höheren Drehzahlen besseren Gütegrad des Verdichters nahezu kompensiert. Dieser positive Effekt wird durch die zunehmenden Drosselverluste des Verdichters zum Teil wieder aufgehoben.

Die blaue Kurve zeigt das Teillastverhalten bei Betrieb des Verdichters mit ab 50 Hz zunehmender Unterspannung. Es ist deutlich zu sehen, daß die Leistungsaufnahme bei steigender Frequenz überpro-

portional zunimmt. Diese mit dem 400 Volt Standardmotor erzielbare Charakteristik sollte nur genutzt werden, wenn die hohe Leistung nur zeitweise benötigt wird.

Zusammenfassung

- Bedingt durch den Wirkungsgrad des Frequenzumrichters ist die mit diesem System erreichbare Leistungszahl über dem betrachteten Regelbereich immer niedriger als bei Betrieb direkt am Netz.
- Der Einsatzbereich des Verdichters wird bei Betrieb mit Frequenzwandler eingeschränkt. Dies führt zu einer ge-

ringfügigen Reduzierung der maximal möglichen Verflüssigungstemperatur. Für Anwendungen mit höheren Verflüssigungstemperaturen steht mit dem Kältemittel R 134a eine hervorragende Alternative zur Verfügung.

- Die Möglichkeit, durch den Betrieb über 50 Hz die Leistung der Verdichter zu steigern und in der Folge kleinere Verdichter einsetzen zu können, erhöht die Wirtschaftlichkeit derartiger Systeme.
- Für Anlagen, die hauptsächlich über 50 Hz betrieben werden, sollte geprüft werden, ob der Einsatz eines Motors mit 230 V eine wirtschaftliche Lösung darstellt.
- Sofern Forderungen der Energieversorgungsunternehmen zur Begrenzung der Anlaufströme vorliegen, können diese auch durch den Einsatz von Frequenzwandlern erfüllt werden. Separate Softstarter können entfallen.
- Beide Systeme, Schieberregelung und frequenzvariabler Betrieb, eignen sich, um die Leistung der Verdichter an den geforderten Bedarf anzupassen. Die Entscheidung, welches System das geeignete ist, kann nur nach einer rechnerischen Überprüfung der Anlagenkonfiguration in bezug auf Leistung, Leistungszahl und Investitionskosten getroffen werden.
- Netzimpedanz, Sinusfilter und die Auslastung des Frequenzumrichters können den Blindstromanteil bei Frequenzwandlerantrieb deutlich reduzieren. Die Wertigkeit der einzelnen Maßnahmen muß noch durch weitere Messungen genauer spezifiziert werden.