

## EMPFEHLUNGEN ZUM BETRIEB VON FREQUENZUMRICHTERN AN KÄLTEVERDICHTERN, DIE NACH DEM VERDRÄNGERPRINZIP ARBEITEN

Inhalt	Seite
1. Umfang und Zielsetzung .....	1
2. Allgemein .....	1
3. Betrieb .....	2
4. Anwendungsbereiche .....	5
5. Auslegungskriterien .....	11
6. Auswahl des Frequenzumrichters und elektrische Auslegung.....	14
7. Empfehlungen zur Inbetriebnahme.....	16

### 1. Umfang und Zielsetzung

Diese Empfehlungen beziehen sich auf die Anwendung von separat montierten Frequenzumrichtern zur Drehzahlverstellung von Kälteverdichtern mit dreiphasigen Asynchronmotoren. Die folgenden Ausführungen sind Grundlage für die Planung, Durchführung und Installation solcher Systeme zur Energieeinsparung. Die Zielsetzung liegt hierbei darin, das Risiko einer Beschädigung des Kältemittelverdichters im drehzahlveränderten Betrieb zu reduzieren und allgemeine Auslegungsrichtlinien für einen zuverlässigen und energiesparenden Betrieb von Kälteanlagen zu vermitteln.

### 2. Allgemein

In der klassischen Anwendung ohne Frequenzumrichter wird der Verdichter mit annähernd konstanter Drehzahl betrieben, abhängig von der Versorgungsfrequenz und der Anzahl der Motorpole.

Der Frequenzumrichter erlaubt die stufenlose Verstellung der Verdichterdrehzahl entsprechend dem Kühlbedarf der Kälteanlage.

Der Betrieb eines Kälteverdichters mit einem Frequenzumrichter weist folgende Merkmale auf:

- Höhere Effizienz des Kältesystems unter Teillast
- Höhere Verdichterstandzeit, da die Anlaufhäufigkeit reduziert wird. Im optimierten Betrieb würde der drehzahlgeregelte Verdichter kontinuierlich arbeiten.
- Integrierte Sanftanlaufsfunktion: Anlaufstrom und -moment sind viel niedriger als bei Stern-/Dreieck-Anlauf oder mit Teilwicklung
- Geringeres Risiko von Flüssigkeitsschlägen durch geringeres Volumen beim Anlaufen
- Oft ist eine Erhöhung der Verdichterleistung durch Betrieb über Nenndrehzahl möglich
- Ein umrichter geregelter Verdichter wird über einen breiten Drehzahlbereich hinweg arbeiten. Bei bestimmten Betriebsbedingungen können mechanische Resonanzen und Gasresonanzen bei kritischen Rohrlängen auftreten. In den meisten Fällen können diese durch gute mechanische Montage und Auslegung und durch entsprechende Einstellung der Frequenzumrichter-Parameter beseitigt werden (z.B. durch Festlegung von Ausblend-Frequenzen).

## 3. Betrieb

### 3.1 Betrieb von Verdichtern ohne Frequenzumrichter-Drehzahlregelung

Die Kühlleistung eines Hubkolbenverdichters kann durch Zylinderbank-Abschaltung, Heißgas-Bypass, Saugdruckregelung, Ein- und Ausschalten der Verdichter eines Verbundes und andere Methoden an den Kältebedarf einer Anlage angepasst werden.

Die Nenndrehzahl des Verdichters ist abhängig von der Versorgungsfrequenz und der Anzahl der Motorpole. Bei einem 4-poligen Asynchronmotor (Käfigläufermotor) ergeben sich daraus ungefähr die folgenden Drehzahlen:

- **4-polig:**      **1450 min<sup>-1</sup> bei 50 Hz**      oder      **1750 min<sup>-1</sup> bei 60 Hz**

Bei einem 2-poligen Motor ergeben sich entsprechend die folgenden Drehzahlen:

- **2-polig:**      **2900 min<sup>-1</sup> bei 50 Hz**      oder      **3500 min<sup>-1</sup> bei 60 Hz**

### 3.2 Betrieb von Verdichtern mit Frequenzumrichter-Drehzahlregelung

Hubkolben-, Schrauben- und Scroll-Verdichter arbeiten nach dem Verdränger-Prinzip. Das durchschnittliche Drehmoment an der Verdichterwelle bleibt über einen breiten Drehzahlbereich (Frequenzbereich) hin annähernd konstant. Kühlleistung und Energieverbrauch variieren deshalb annähernd proportional zur Drehzahl, siehe Abb. 3.2. Die Kühlleistung kann an den Kältebedarf der Anlage durch die frequenzgeregelte Änderung der Verdichterdrehzahl angepasst werden. Dies ermöglicht optimale stufenlose Regelung.

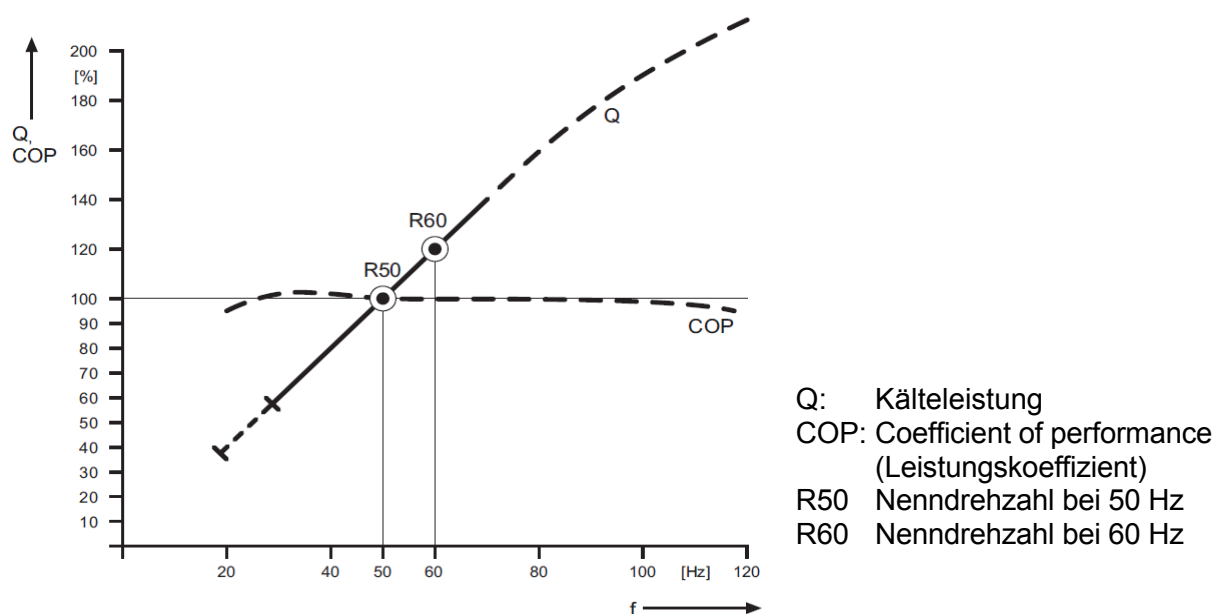
Bei Hubkolbenverdichtern kann der relative COP-Faktor (Leistungszahl)

(COP: Coefficient Of Performance: 
$$\frac{\text{Kälteleistung}}{\text{Energiezufuhr am Verdichter}}$$
)

leicht mit der Betriebsfrequenz und Verdichterdrehzahl variieren, siehe Abb. 3.2.

Unterhalb der Nenndrehzahl kann sich ein etwas höherer relativer COP-Faktor ergeben.

Oberhalb der Nenndrehzahl kann sich ein etwas niedrigerer relativer COP-Faktor ergeben.



**Abb. 3.2: Kälteleistung eines typischen Verdränger-Kälteverdichters im kontinuierlichen Betrieb oberhalb des zulässigen Frequenzbereiches**

### 3.3 Betrieb unterhalb der Nennfrequenz

Da das Drehmoment eines Elektromotors proportional zum Produkt aus Magnetfluss und internem Strom ist, ist es notwendig, einen konstanten Magnetfluss zu gewährleisten. Um dies zu erreichen, wählt man am Frequenzumrichter einen Regelmodus mit konstantem Spannungs-/Frequenz-Verhältnis ( $V/f$ ). Im Idealfall erreicht die Motorspannung die Nennspannung entsprechend der Versorgungsspannung bei der Nennfrequenz. Bei Verdichtern mit Standardmotoren ist dies wie folgt:

- 400 V bei 50 Hz
- 460/480 V bei 60 Hz

Der Betrieb unterhalb der Nennfrequenz wird als Betrieb im “konstanten Feld” bezeichnet, d.h. der Magnetfluss im Motor bleibt aufgrund des konstanten Spannungs-/Frequenzverhältnisses annähernd konstant.

Die niedrigste zulässige Frequenz wird durch folgende Faktoren eingeschränkt:

- Schmierung
- Massenstrom des Kältemittels, der für eine ausreichende Motorkühlung notwendig ist
- Bei Hubkolbenverdichtern:
  - Trägheitsmoment, um sicherzustellen, dass im oberen Totpunkt des Kolbens keine nennenswerten Drehzahlabfälle auftreten
  - Eignung der Verdichtermontage (bei niedrigeren Frequenzen sollte die Montage oft starrer sein)
- Schraubenverdichter:
  - Adäquate Öldichtung
- Scroll-Verdichter
  - Radiale Zentrifugalkräfte, Gaskräfte, adäquate Öldichtung.

Für Informationen zur niedrigsten zulässigen Betriebsfrequenz wenden Sie sich bitte an den Verdichterhersteller.

### 3.4 Betrieb oberhalb der Nennfrequenz

Die höchste zulässige Betriebsfrequenz eines Verdichters teilt Ihnen der Verdichterhersteller mit.

Im Folgenden sind die gängigen Anschlüsse für Standardverdichtermotoren aufgeführt:

<u>Versorgungsspannung</u>	<u>Anschluss</u>
– 400 V bei 50 Hz / 480 V bei 60 Hz:	Drei Klemmen (sehr häufig bei hermetischen Verdichtern).
– 400 V bei 50 Hz / 480 V bei 60 Hz: 230 V bei 50 Hz:	Sechs Klemmen in Sternschaltung / Sechs Klemmen in Deltaschaltung bei 230 V Netzen.
– 400 V bei 50 Hz / 480 V bei 60 Hz:	2x drei Klemmen für jede Teilwicklung für Frequenzumrichter-Betrieb parallel geschaltet.
– 690 V bei 50 Hz / 828 V bei 60 Hz: 400 V bei 50 Hz / 480 V bei 60 Hz:	Sechs Klemmen in Sternschaltung zum Anlaufen / Sechs Klemmen in Deltaschaltung für Normalbetrieb.

Ein Betrieb bei Frequenzen oberhalb derer bei den o.g. Versorgungsspannungen genannten wird als Betrieb im “feldgeschwächten Bereich” bezeichnet, d.h. der Motorfluss liegt bis zur Nenndrehzahl unterhalb des konstanten Wertes.

Normale Frequenzumrichter können nur Ausgangsspannungen bis zur Versorgungsspannung von 400 V (oder 480 V) bereitstellen. Oberhalb der Nennfrequenz bleibt die Ausgangsspannung konstant bei der Versorgungsspannung. Das Spannungs-/Frequenz-Verhältnis (V/f) wird kleiner, was entsprechend in einer Abnahme des Magnetflusses im Motor resultiert. Das durchschnittliche Drehmoment eines Verdrängerverdichters (wie z.B. Hubkolbenverdichter) jedoch ist normalerweise unter konstanten Lastverhältnissen annähernd konstant. Deshalb wird der Motorstrom annähernd proportional zur Frequenzerhöhung ansteigen.

Die Frequenz kann erhöht werden bis der maximale Effektivwert des Motorstroms (thermisch) erreicht wird. Um einen sicheren Betrieb oberhalb der Nennfrequenz bei Normalkühlung zu gewährleisten, wird der Einsatz einer Verdichtervariante mit größerem Motor empfohlen. Der Betrieb eines Verdichters mit kleinerem Motor für typische Tiefkühl-Anwendungen wird wegen des eingeschränkten Frequenzbereichs nicht empfohlen.

Die höchste zulässige Frequenz wird durch folgende Faktoren eingeschränkt:

- Leistungsreserve des Motors bei Nennfrequenz (Faktor, um den der Strom niedriger ist als der Maximalstrom am Zielpunkt, wobei Kältemittel, Verdampfungstemperatur und Kondensationstemperatur berücksichtigt werden)
- Mechanische Faktoren (z.B. Maximale Kolbengeschwindigkeit)
- Gasfluss und Ventilplatauslegung.

### 3.5 Betrieb oberhalb der Nennfrequenz mit 87 Hz Sonder-Motoranschluss

Die höchste zulässige Betriebsfrequenz für den Betrieb mit diesem Motoranschluss teilt Ihnen der Verdichterhersteller mit.

Hier wurden die folgenden Motoranschlüsse berücksichtigt:

- 230 V bei 50 Hz / 400 V bei 87 Hz: Motor mit drei Leistungsklemmen
- 230 V bei 50 Hz / 400 V bei 87 Hz: 6poligen Stern/Delta-Motor in Deltaschaltung.

Die elektrische Nennfrequenz (die sog. Grundfrequenz) liegt bei diesen Anschlüssen bei 87 Hz.

Anmerkung: 87 Hz entspricht  $\sqrt{3} * 50$  Hz gemäß dem Inversfaktor der Spannung bei der Anschlussänderung einer Motorwicklung von Stern auf Dreieck.

Der Betrieb unter 87 Hz wird als Betrieb im "konstanten Feld" bezeichnet.

Der Betrieb über 87 Hz wird als Betrieb im "feldgeschwächten" Bereich bezeichnet. Dieser Anschluss hat folgende Vor- und Nachteile:

Vorteile:

- Bei vorgegebener Verdichtergröße kann eine höhere Kälteleistung erzielt werden
- Breiter Bereich der Drehzahlverstellung, d.h. gutes Verhältnis  $(Q_{\max} - Q_{\min}) / Q_{\max}$ .

Nachteile:

- 73 % höherer Strom beim Frequenzumrichter und bei den Schaltgeräten, dies könnte entsprechende Kostenaufschläge nach sich ziehen.
- Ein Notbetrieb des Verdichters im direkten Anschluss an die Stromversorgung ist nur mit einem 6poligen Stern/Dreiecks-Motor in Sternschaltung möglich; um den Notbetrieb ohne eine Neuverkabelung aktivieren zu können, würden 4 Leistungsanschlüsse im Schaltschrank benötigt.

## 4. Anwendungsbereiche

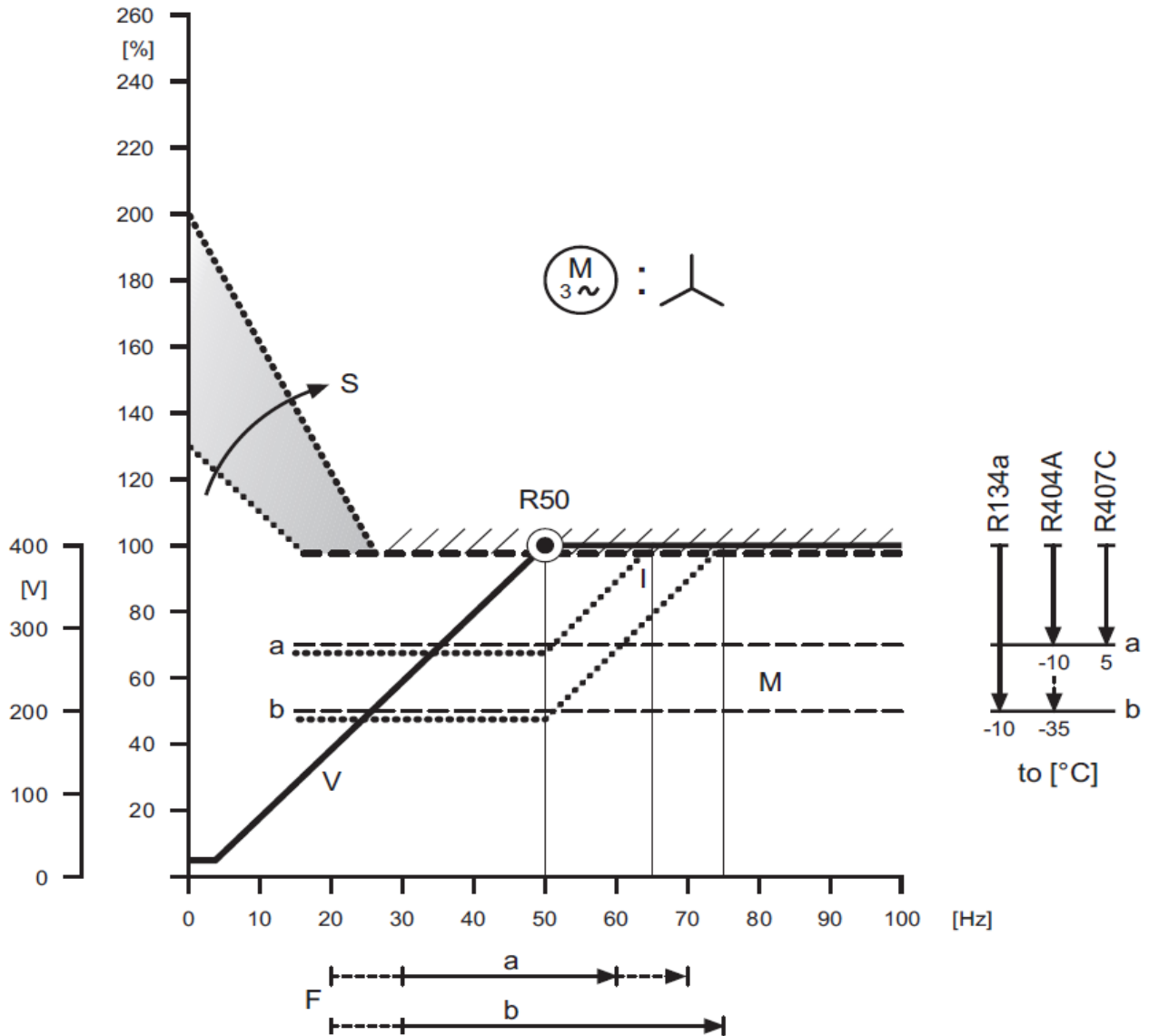
Um den sicheren und zuverlässigen Betrieb eines drehzahlregelten Verdichters zu gewährleisten, ist es notwendig, den zulässigen Frequenzbereich sorgfältig festzulegen. Im Folgenden werden die Grenzen eines sicheren Betriebs von Elektromotor und Verdichter einzeln anhand verschiedener Beispiele von halbhermetischen Hubkolbenverdichtern erörtert.

Der zulässige Frequenzbereich lässt sich anhand folgender Informationen festlegen:

- Spezifischer durch den Verdichterhersteller vorgegebener Frequenzbereich
- Maximalfrequenz am berechneten Arbeitspunkt basierend auf der Netzfrequenz multipliziert mit dem Verhältnis des maximal zulässigen Motorstroms geteilt durch den zu erwartenden Strom am Arbeitspunkt (konservative Grobabschätzung). Die notwendigen Betriebsdaten stellen alle Verdichterhersteller zur Verfügung.

### 4.1 Anwendungsbereich des Elektromotors

Die folgenden Informationen stellen Beispiele typischer Frequenzgrenzwerte dar. Kontaktieren Sie den Verdichterhersteller, um detaillierte Informationen zu einzelnen Verdichtertypen zu erhalten.



**Abb. 4.1a: Standard Motoranschluss; Betrieb bei 400 V / 50 Hz (Beispiel)**

**Schlüssel:**

**a:** Standard-Applikation Klasse a (R404A: -10 / 45 °C; R407C: 5 / 50 °C)

**b:** Standard-Applikation Klasse b (R404A: -35 / 40 °C; R134a: -10 / 45 °C)

**M [%]** Durchschnitt. Drehmom. nach Anlauf: **R50:** Nennwert 400 V / 50 Hz

— — — : Maximum

- - - · : Bei Standard-Applikation Klasse a oder b

**I [%]** ······· : Motorstrom

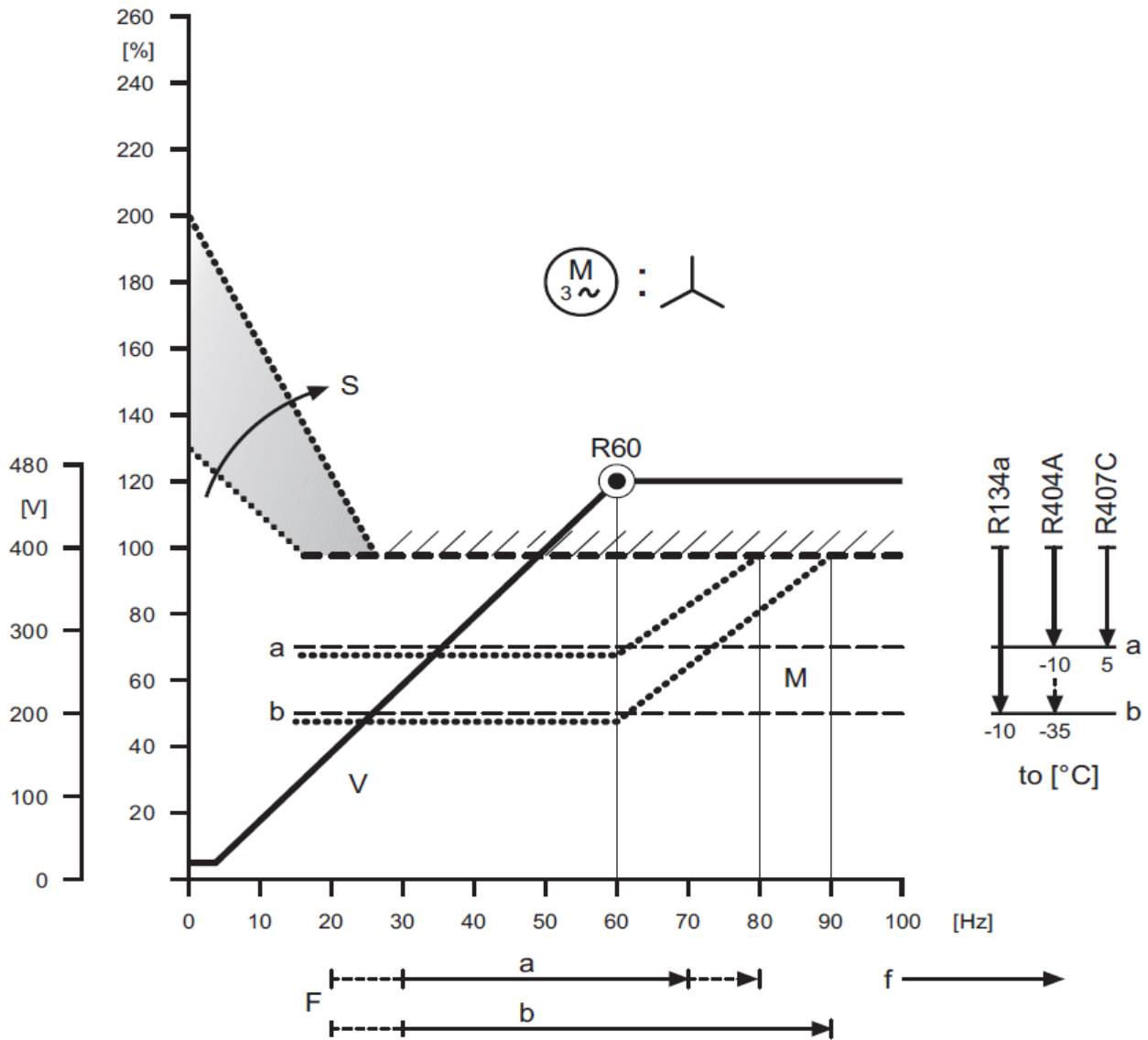
**to:** Verdampfungstemperatur

**V:** ——— : Motorspannung

**F:** Zulässiger Frequenzbereich

**S:** Motor-Anlaufstrom erforderlich.

Der graue Bereich zeigt die Abweichung zwischen Verdichtern mit 2 Zylindern (obere Markierung) und Verdichtern mit 8 Zylindern oder Schraubenverdichtern (untere Markierung).



**Abb. 4.1b: Standard-Motoranschluss; Betrieb bei 460 V / 60 Hz**

**Schlüssel:**

**a:** Standard-Applikation Klasse a (R404A: -10 / 45 °C; R407C: 5 / 50 °C)

**b:** Standard-Applikation Klasse b (R404A: -35 / 40 °C; R134a: -10 / 45 °C)

**M [%]** Durchschnitt. Drehmoment nach Anlauf: **R60:** Nennwert 460 V / 60 Hz

— — — : Maximum

- - - . : Bei Standard-Applikation Klasse a oder b

**I [%]** ..... : Motorstrom

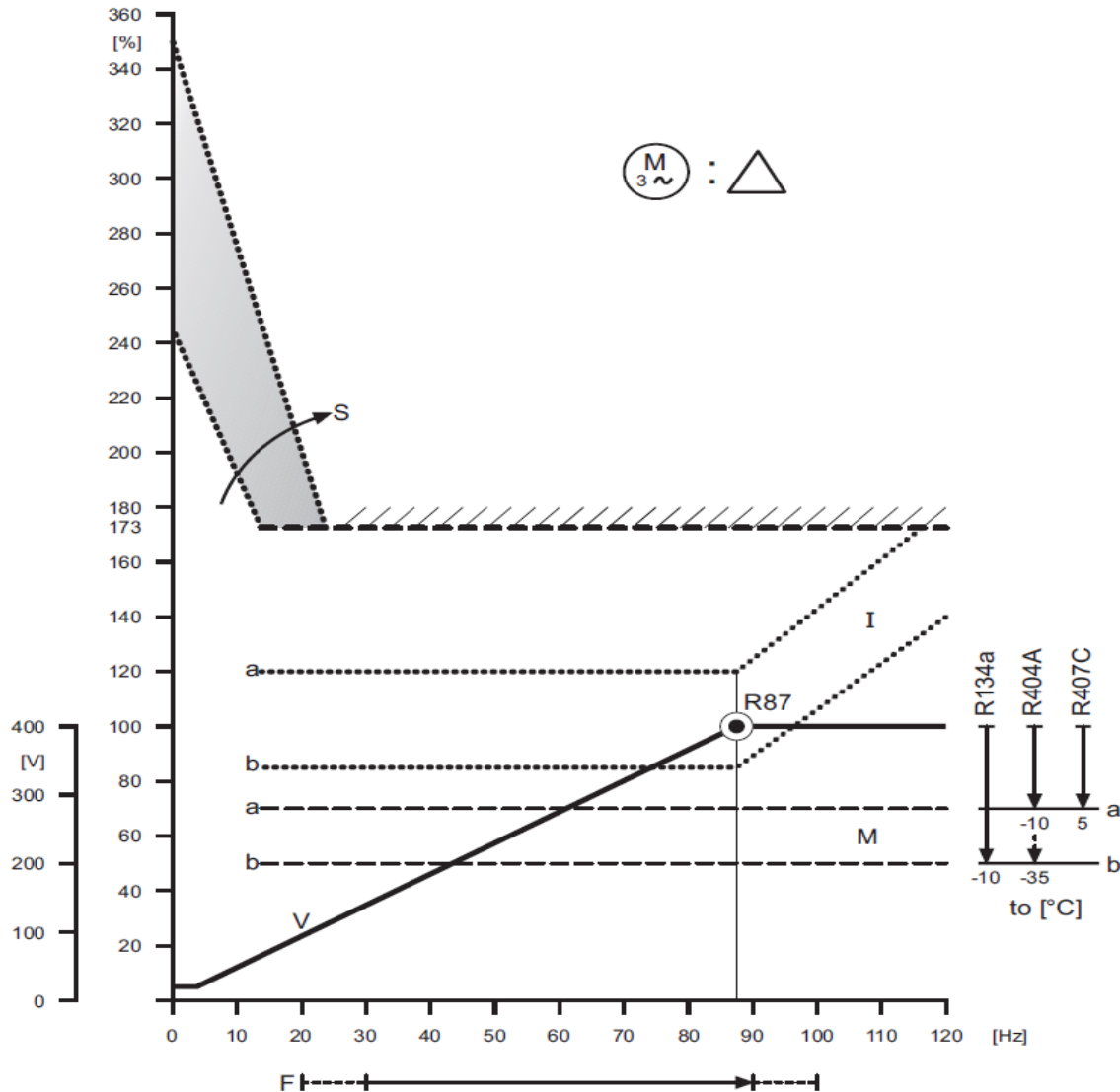
**to:** Verdampfungstemperatur

**V:** — : Motorspannung

**F:** Zulässiger Frequenzbereich

**S:** Motor-Anlaufstrom erforderlich.

Der graue Bereich zeigt die Abweichung zwischen Verdichtern mit 2 Zylindern (obere Markierung) und Verdichtern mit 8 Zylindern oder Schraubenverdichtern (untere Markierung).



**Abb. 4.1c: Sonder-Motoranschluss 87 Hz; Betrieb bei 400 V / 50 Hz (Beispiel)**

**Schlüssel:**

- a:** Standard-Applikation Klasse a (R404A: -10 / 45 °C; R407C: 5 / 50 °C)
- b:** Standard-Applikation Klasse b (R404A: -35 / 40 °C; R134a: -10 / 45 °C)
- M [%]** Durchschnitt. Drehmoment nach Anlauf      **R87:** Nennwert 400 V / 87 Hz  
 - - - : Maximum  
 - - - - : Bei Standard-Applikation Klasse a oder b
- I [%]** ..... : Motorstrom      **to:** Verdampfungstemperatur  
 (verglichen mit Stern 400 V / 50 Hz)
- V:** ——— : Motorspannung      **F:** Zulässiger Frequenzbereich
- S:** Motor-Anlaufstrom erforderlich.  
 Der graue Bereich zeigt die Abweichung zwischen Verdichtern mit 2 Zylindern (obere Markierung) und Verdichtern mit 8 Zylindern oder Schraubenverdichtern (untere Markierung).



## 4.2 Beurteilung des zulässigen Anwendungsbereichs (Safe Operation Envelope)

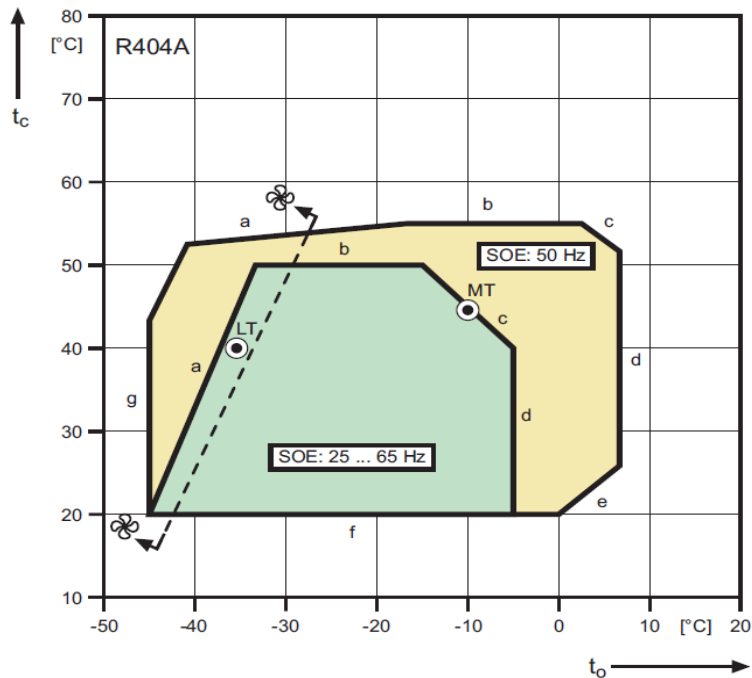
Um bei Einzelverdichtern und Verdichterverbunden ein hohes Energiesparpotential zu erreichen, ist eine genaue stufenlose Regelung der Kälteleistung erforderlich. Dies erreicht man am besten über einen breiten Drehzahlbereich oder eine Frequenzregelung am drehzahlveränderbaren Verdichter. Die Daten im vorhergehenden Abschnitt machen deutlich, dass der Einsatz von Verdichtern mit Motoren in geeigneter Auslegung einen klaren Vorteil bietet.

Die Abbildungen 4.2a und 4.2b zeigen Beispiele für die zulässigen Anwendungsbereiche von Verdichtermotoren in geeigneter Größe.

Für einen sicheren Betrieb sollten die folgenden Begrenzungsfaktoren berücksichtigt werden:

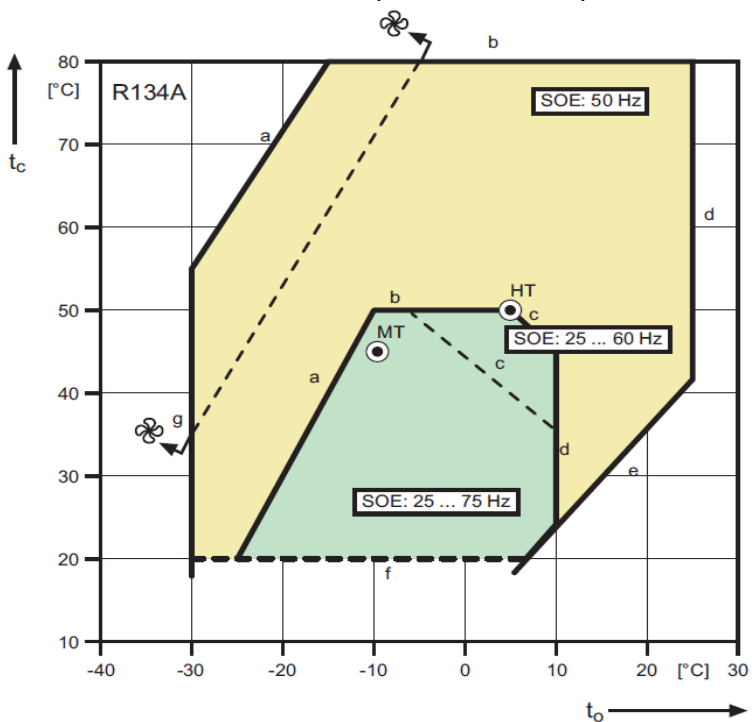
- a: Zulässige maximale Druckgastemperatur
- b: Zulässiger maximaler Hochdruck
- c: Maximaler (thermischer) Dauerstrom des Motors
- d: Maximale Verdampfungstemperatur
- e: Differenzdruck, um korrekte Ventilfunktion zu gewährleisten
- f: Minimum des Enddrucks, um die zuverlässige Funktion des Expansionsventils sicherzustellen
- g: Minimaldruck – dieser sollte vorzugsweise leicht über dem atmosphärischen Druck liegen.

Die Gesamtheit aller Begrenzungsfaktoren wird als Safe Operation Envelope (SOE) bzw. als die sicheren Einsatzgrenzen bezeichnet.



**Abb. 4.2a: R404A; Großer Motor; Standardanschluss; Betrieb bei 400 V / 50 Hz (Beispiel)**

**Schlüssel:** SOE: Safe Operation Envelope MT: -10 / 45 °C; LT: -35 / 40 °C



**Abb. 4.2b: R134a; Standardanschluss; Betrieb bei 400 V / 50 Hz (Beispiel)**

**Schlüssel:** SOE: Safe Operation Envelope HT: +5 / 50 °C; MT: -10 / 45 °C

## 5. Auslegungskriterien

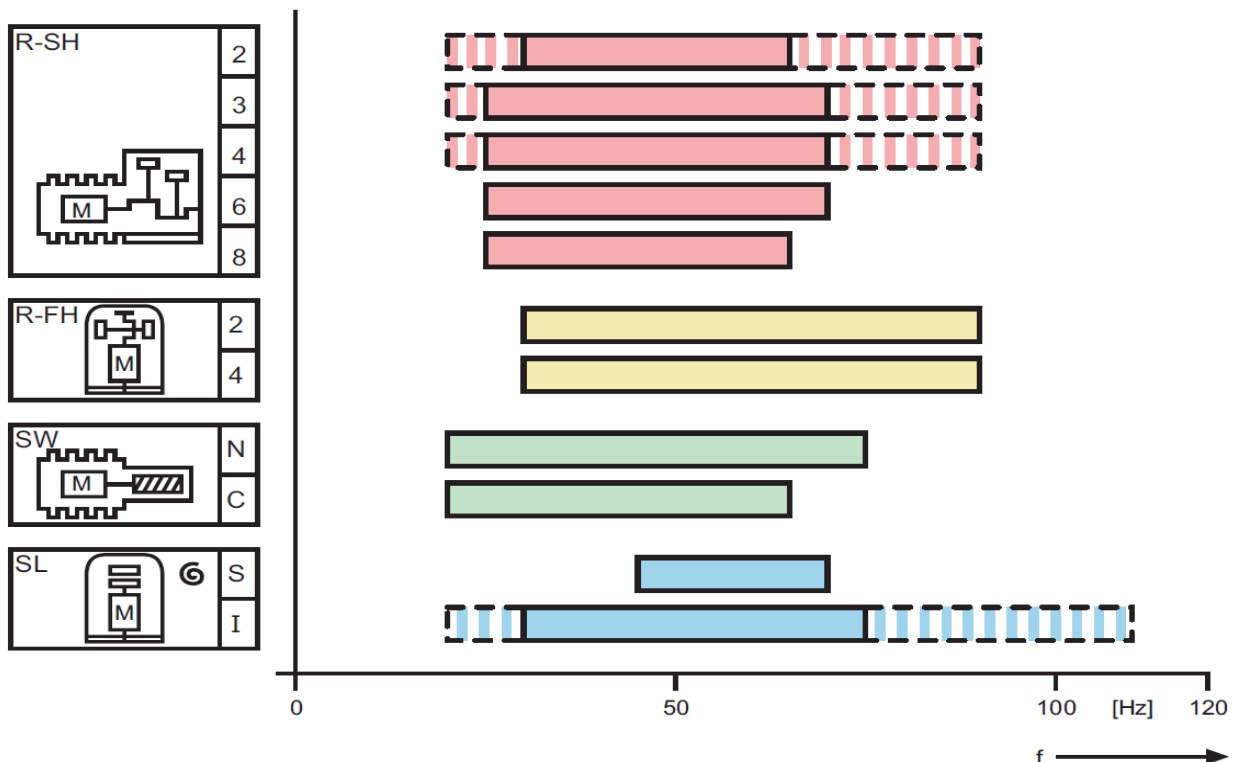
### 5.1 Zulässige Betriebsfrequenz

Abbildung 5.1 zeigt den typischen zulässigen Frequenzbereich verschiedener Verdichtertypen.

Auf die Begrenzungsfaktoren bezüglich Minimal- und Maximalfrequenz wurde bereits in den Abschnitten 3.3 ... 3.4 eingegangen. Hier weitere typenrelevante Kriterien:

- Vertikalhermetische Verdichter: Wegen der Fliehkräftschmierung wird eine Minimaldrehzahl benötigt, um das Öl an die beweglichen mechanischen Teile zu transportieren
- Halbhermetische Schraubenverdichter: Eine sorgfältige Abstimmung der Öleinspritzverzögerung und, falls notwendig, der Schieberstellung während des Anlaufs ist notwendig
- Hermetische und halbhermetische Schraubenverdichter mit integriertem Ölseparator: Um übermäßige Ölabscheidung zu vermeiden, sollte die Maximaldrehzahl (-frequenz) sorgfältig festgelegt werden

Für jeden Verdichter müssen die zulässigen Frequenz-Grenzwerte für den geplanten Arbeitspunkt beim Hersteller angefragt werden. Auch Arbeitspunkte, die vorübergehend oder im Fehlerfall auftreten könnten, müssen berücksichtigt werden.



**Abb. 5.1: Typische zulässige Frequenzbereiche verschiedener Verdichtertypen**

Key: R-SH: Hubkolben, halbhermetisch      2 ... 8: Anzahl der Zylinder  
 R-FH: Hubkolben, hermetisch      N: Halbhermetisch  
 SW: Schraube      C: Hermetisch mit integriertem Ölseparator  
 SL: Scroll      S: Standard  
    I: Ausgelegt für Frequenzumrichterbetrieb

## 5.2 Überlegungen zu offenen Schraubenverdichtern

- **Kühlung:**  
Der Motor wird normalerweise über einen eingebauten Lüfter gekühlt, der entweder auf der Verdichterwelle sitzt oder durch einen separaten Motor angetrieben wird. Für Lüfter, die über die Verdichter-Hauptwelle angetrieben werden, gilt zu bedenken:
  - Reduzierte Kühlung bei niedrigeren Drehzahlen
  - Starke Belastung des Lüfters bei höheren Drehzahlen.
- **Motorschutz:**  
Der Einsatz eines Thermistor-Motorschutzes wird empfohlen, um den Motor im gesamten Drehzahlbereich zu schützen.
- **Wellenkupplung:**  
Bei Hubkolbenverdichtern sollte die Wellenkupplung sorgfältig ausgesucht werden. Für einen Betrieb bei niedrigen Drehzahlen (Frequenzen) muss eine Wellenkupplung mit ausreichendem Trägheitsmoment ausgewählt werden.
- **Auswahl von Motorgröße und Frequenzumrichter:**  
Die Auswahl eines geeigneten Motors und Frequenzumrichters sollte unter Rücksprache mit dem Verdichterhersteller erfolgen.

## 5.3 Sonstige Kriterien

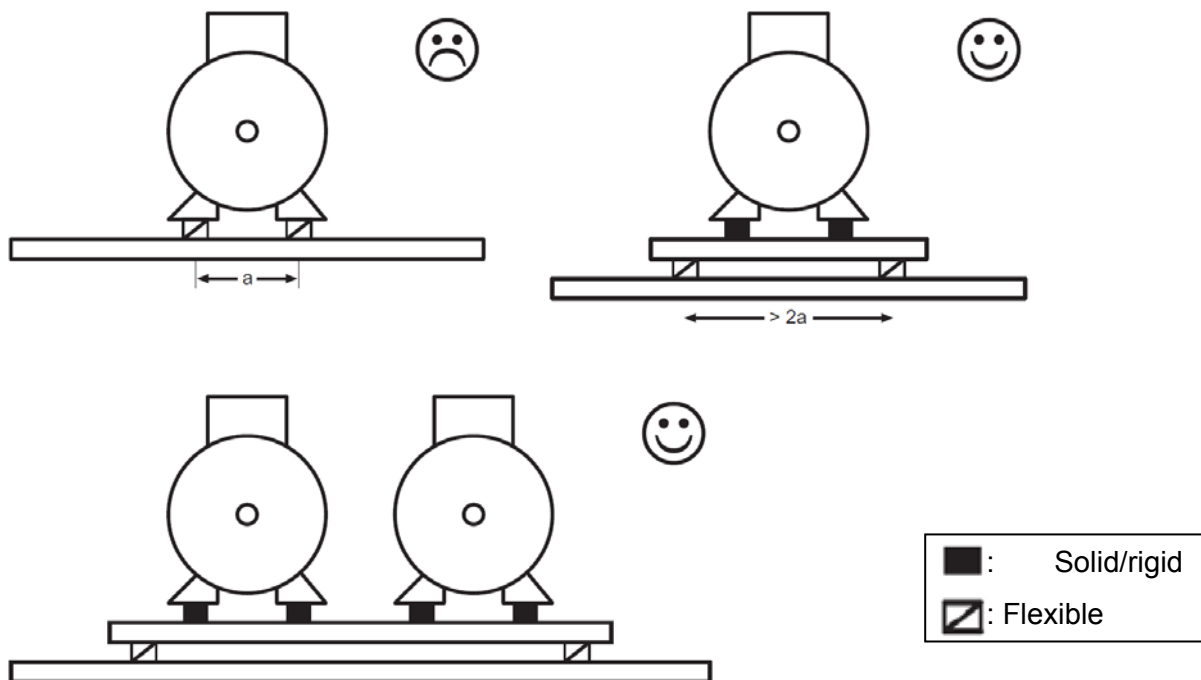
- **Leistungsregelung:**  
Der Betrieb von Verdichtern mit Frequenzumrichtern in Verbindung mit einer herkömmlichen Leistungsregelung über die Sauggasleitung zu den Zylinderbänken ist normalerweise nicht erlaubt. Hier kann eine ausreichende Motorkühlung nicht gewährleistet werden, weil der Kältemittelmassenstrom stark eingeschränkt ist. Desweiteren kann es aufgrund der relativ hohen Drehmomentpulsationen zu schwerwiegenden Vibrationsproblemen kommen.
- **Ölausgleich bei Tandemverdichtern:**  
Werden Tandemverdichter über einen Frequenzumrichter betrieben, kann es zu Unterschieden im Ölstandslevel der beiden Verdichterseiten kommen. Oft wird ein Regelsystem zum Ausgleich des Ölstands oder des Öl- und Gasniveaus benötigt.
- **Flüssigkeitseinspritzventil für 2-stufige Verdichter:**  
Im gesamten Drehzahlbereich sollte sichergestellt sein, dass am Flüssigkeitseinspritzventil eine ausreichende Überhitzung vorliegt. Deshalb sollte das Flüssigkeitseinspritzventil sorgfältig ausgewählt werden. Der Einsatz elektronischer Expansionsventile wird empfohlen.
- **Phasenfolge / Drehrichtung:**  
Hubkolben:
  - Normalerweise unkritischSchraube und Scroll:
  - Sehr kritisch. Eine falsche Drehrichtung wird den Verdichter beschädigen. Beim ersten Anlaufen bitte immer sicherstellen, dass der Saugdruck niedriger und der Austrittsdruck höher wird.
  - Ein Frequenzumrichter, der für den Einsatz mit Verdichtern geeignet ist, wird eine falsche Drehrichtung verhindern.

- Phasefolgerelais:
  - Können meistens die Ausgangsspannung eines Frequenzumrichters nicht erfassen
  - Verdichterhersteller konsultieren
- Verrohrung:
  - Montage möglichst parallel zur Kurbelwelle und möglichst nahe, um Rohrbrüche durch Materialermüdung des Metalls zu vermeiden.
- Montage von Hubkolbenverdichtern:

Die Gummischwingungsdämpfer, die bei den meisten Verdichtern mitgeliefert werden, sind für einen Betrieb bei 50 oder 60 Hz ausgelegt. Im Betrieb bei niedrigeren Frequenzen können starke Vibrationen am Verdichter auftreten. Dies erfordert eine der folgenden Maßnahmen:

  - Starre Montage auf ein Untergestell unter Verwendung von Kunststoff- oder Metallhülsen
  - Starre Montage auf ein Untergestell mit Schwingungsdämpfern, die in mindestens doppeltem Abstand der Verdichterbefestigungsfüße montiert sind.

Abbildung 5.3 zeigt die Montagealternativen.



**Abb. 5.3: Montage von Hubkolbenverdichtern für drehzahlgeregelten Betrieb (Beispiel Hubkolbenverdichter mit 2 Zylindern)**

## 6. Auswahl des Frequenzumrichters und elektrische Auslegung

### 6.1 Notwendiger Strom

Der Frequenzumrichter muss den Verdichter-Motor kontinuierlich mit dem maximalen Dauerstrom (bei maximalen Verdampfungs- und Verflüssigungstemperaturen) versorgen können. Eine zusätzliche Reserve von 10 % sollte eingeplant werden.

### 6.2 Anlaufmoment

Das Anlaufmoment von Hubkolbenverdichtern ändert sich mit dem Rotationswinkel der Kurbelwelle: je mehr Zylinder, desto konstanter ist das Moment. Bei einer kleineren Anzahl von Zylindern wird ein höheres Anlaufmoment benötigt.

Um unter allen Betriebsbedingungen einen zuverlässigen Anlauf zu erreichen, ist ein kurzzeitiges Anlaufmoment von einigen Sekunden notwendig. Empfehlungen zum Anlauf-Überstrom sollten beim Verdichter-Hersteller eingeholt und dann bei der Auswahl des Frequenzumrichters berücksichtigt werden.

Der Versuch, einen Frequenzumrichter ohne ausreichenden Anlaufstrom einzusetzen, kann zu schwerwiegenden Schäden am Verdichter führen. Auch unter den schwierigsten Anlaufgegebenheiten, wie z.B. nach einem Stromausfall unter extremen Umgebungsbedingungen, muss ein zuverlässiges Anlaufen gewährleistet sein.

Der Einsatz von Frequenzumrichtern für Lüfterbetrieb ohne Überlast wird nicht empfohlen, wenn diese nicht entsprechend für die Bereitstellung des benötigten Anlaufstroms ausgelegt sind. Die Frequenzumrichter müssen für den Betrieb für Konstantmoment mit linearem V/f-Verhältnis voreingestellt sein.

Der Einsatz von Frequenzumrichtern beim Anlauf bietet die folgenden Vorteile:

- Geringere mechanische Belastung am Motor und an beweglichen mechanischen Teilen
- Erheblich reduzierter Strom beim Anlaufen. Der maximale Eingangsstrom am Verdichter wird in der Regel nicht überschritten, obwohl der tatsächliche Eingangsstrom am Verdichter kurzzeitig beim Anlaufen darüber liegt.

### 6.3 Elektroinstallation

Die europäischen Richtlinien zu Sicherheit und EMV sollten hinsichtlich des Einsatzortes (Krankenhaus, Gewerbe, Industrie) und der erforderlichen Konformität (CE Zeichen) sorgfältig eingehalten werden. Unter Umständen ist der Einsatz von EMV-Filtern und Netzdrosseln notwendig.

Die Installationsempfehlungen und –vorschriften des Frequenzumrichter-Herstellers sollten strikt eingehalten werden. Im Besonderen sollte Folgendes beachtet werden:

- Das Kabel zwischen Verdichter-Motor und Frequenzumrichter sollte kupferummantelt oder mit einem anderen geeigneten EMV-Schirm versehen sein, der sowohl mit der Montageplatte des Schaltschranks als auch mit dem Motorgehäuse über eine breite Kontaktfläche sauber verbunden ist. Darüber hinaus sollte der Motor über den Erdleiter dieses Kabels geerdet sein.
- Auch der Montagerahmen des Verdichters ist separat über ein Kabel mit geeignetem Querschnitt zu erden.
- Bezüglich des Motorkabels sollten die Empfehlungen des Frequenzumrichter-Herstellers eingehalten werden. Im Einzelnen:
  - Die festgelegte maximale Länge darf nicht überschritten werden
  - Der Abstand zu weiteren Kabeln muss den empfohlenen Angaben entsprechen.

- Die Lufttemperatur in der Umgebung des Umrichters sollte überprüft werden. Der Betrieb bei hoher Umgebungstemperatur hat eine erhebliche Reduzierung der Standzeit des Umrichters zur Folge. Ein Temperaturanstieg von 10 K kann zur Halbierung der Standzeit eines typischen Umrichters führen; kritische Bauteile diesbezüglich sind Lüfterlager und Zwischenkreis-Kondensatoren.

## 6.4 Sicherheitskreis

Sicherheitsrelevante Störungen wie eine Hochdruckstörung müssen zum umgehenden Anhalten des Umrichters führen (ohne elektronische Steuerung). Es müssen im Notfall (wie z.B. bei einer Hochdruckstörung) geeignete Mittel zum Erreichen eines „sicheren Stopps“ zur Verfügung stehen. Hier könnte beispielsweise ein Schütz zwischen Umrichter und Verdichter-Motor eingesetzt werden oder ein Umrichter mit zugelassener integrierter Sicherheitskreits-Schaltung gemäß EN61800-5-2 (Adjustable speed electrical power drive systems – Part 5-2:Safety requirements – Functional)

## 6.5 Rampenzeit bis zur Minimaldrehzahl

Erfahrungsgemäß ist eine Rampenzeit von 1 .. 4 s bis zur Minimaldrehzahl ein guter Kompromiss. So wird ein sanfter Anlauf und gleichzeitig ausreichende Schmierung erreicht.

Einige Scrollverdichter benötigen beträchtlich längere Rampenzeiten.

Erfragen Sie bei Sonder-Verdichtern die empfohlenen Rampenzeiten beim Hersteller.

## 6.6 Start Boost

Für einen erfolgreichen Verdichteranlauf empfiehlt es sich, das Anlaufmoment kurzzeitig zu erhöhen (der sog. Boost). Um dies zu erreichen sollte die Motorspannung während des Anlaufens bei niedriger Frequenz erhöht werden, um die lineare V/f-Kennlinie zu überschreiten; es können auch andere äquivalente Methoden eingesetzt werden. Vergleichen Sie dazu entsprechende Hinweise zur Einstellung der Parameter für das Anlaufdrehmoment in der Umrichterbeschreibung.

Der Anlaufboost sollte nur die Anlaufphase betreffen und darf nicht zu einer Abweichung von der normalen V/f-Kennlinie oder einer anderen äquivalenten Regelmethode führen.

Die kurzzeitig notwendige Überstromreserve für einen zuverlässigen Anlauf ist bei Hubkolbenverdichtern abhängig von der Zylinderanzahl und bei anderen Verdichterarten von verschiedenen anderen Faktoren. Die Abbildungen 4.1a...d zeigen typische Werte. Entsprechende Empfehlungen sollten beim Verdichterhersteller erfragt werden.

## 6.7 Modulationsfrequenz

Die Modulations- (oder Schalt-) Frequenz ist die Frequenz, bei der die Spannung der Leistungsausgangsstufe des Umrichters zwischen den positiven und negativen Spannungen des Gleichstromzwischenkreises umschaltet. Die Ausgangsspannung entspricht der Grundschwingung und liegt normalerweise im Bereich 25 ... 60 Hz. Die Modulation kann Störgeräusche verursachen. Jeder Spannungswechsel stellt eine Belastung für die Motorwicklung und Isolierung dar. Deshalb sollte die Modulationsfrequenz auf die niedrigste mögliche Frequenz eingestellt werden. Um eine lange Standzeit des Verdichtermotors zu erreichen sollten Werte zwischen 2 kHz und 6 kHz gewählt werden.

## 6.8 Kabel zwischen Frequenzumrichter und Verdichter-Motor

Die folgenden allgemeinen Empfehlungen tragen zur Sicherung der Zuverlässigkeit und einer langen Standzeit des Verdichtermotors und Frequenzumrichters bei (vgl. Sie dazu auch Abschnitt 6.3 zu ähnlichen Anforderungen für EMV-Konformität):

- Verwenden Sie kupferummanteltes mehradriges Kabel, welches sowohl mit der Montageplatte des Schaltschranks als auch mit dem Motorgehäuse über eine breite Kontaktfläche verbunden ist.
- Stellen Sie sicher, dass die Kabellänge den Empfehlungen des Umrichter-Herstellers entspricht

## 6.9 Umschalten der Umrichterausgangsspannung

Der Ausgang eines modernen Frequenzumrichters mit IGBT-Technologie erfolgt mit hoher Spannungssteilheit (typ.  $5 \text{ kV}/\mu\text{s}$ ), die oft als  $dV/dt$ -Verhältnis bezeichnet wird. Diese hohe  $dV/dt$  Wechselrate am Umrichter-Ausgang ist eine potentielle Gefahr für die Isolierung der Kupferwicklung aufgrund des sog. "Teilentladungs-Effekts".

Erfahrungen aus zahlreichen Einsatzfällen FU-geregelter Verdichter haben gezeigt, dass dieses Problem bei normalen Betriebsspannungen von 3AC 400 V zu vernachlässigen ist. Es wird jedoch empfohlen, die elektrische Installation gemäß den Hinweisen in Abschnitt 6.3 durchzuführen, da dies zu einer zusätzlichen Spannungsdämpfung  $dV/dt$  an der Motorwicklung beiträgt. Es wird noch einmal ausdrücklich auf das geschirmte Motorkabel mit breiter Kontaktfläche an der Montageplatte und am Motor hingewiesen. Darüber hinaus wird die Einhaltung der Norm IEC/TS 60034-25 empfohlen.

## 7. Empfehlungen zur Inbetriebnahme

### 7.1 Vibrationen

Beim drehzahlgeregelten Betrieb eines Verdichters können die folgenden Vibrationsquellen auftreten:

- Gaspulsationen in der Druckleitung
- Drehmomentschwankungen, die auf die Verdichterbefestigung wirken
- Drehmomentschwankungen, die auf die Leitungs-Flanschverbindungen wirken
- Resonanzen in der Economizer-Leitung von Schraubenverdichtern

Die Frequenz dieser Vibrationen steht in Zusammenhang mit der Verdichter-Betriebsfrequenz, die sich in einem breiten Bereich bewegen kann. Es besteht die potentielle Gefahr, mechanische Resonanzen im Verdichterverbund auszulösen. Dies kann zu Rohrleitungsbrüchen aufgrund von Materialermüdung und anderen resonanzbedingten Problemen führen.

Es ist daher zu empfehlen, die ganze Anlage bei allen möglichen Betriebsfrequenzen sorgfältig auf Vibrationen und Resonanzen zu prüfen.

Frequenzen, bei denen Resonanzen auftreten, müssen über die entsprechenden Parameter am Frequenzumrichter ausgeblendet werden.

---

Diese Empfehlungen richten sich an Fachleute, Hersteller und Installateure von industriellen, gewerblichen und Haushaltskälteanlagen. Dieser Entwurf stützt sich auf die aktuellen wissenschaftlichen und technischen Kenntnisse, die nach Meinung des ASERCOM zum Zeitpunkt des Entwurfs galten, jedoch übernehmen weder der ASERCOM noch seine Mitgliedsunternehmen die Verantwortung dafür und insbesondere keine Haftung für alle Maßnahmen – Handlungen oder Unterlassungen –, die auf der Grundlage dieser Empfehlungen ergriffen werden.

---