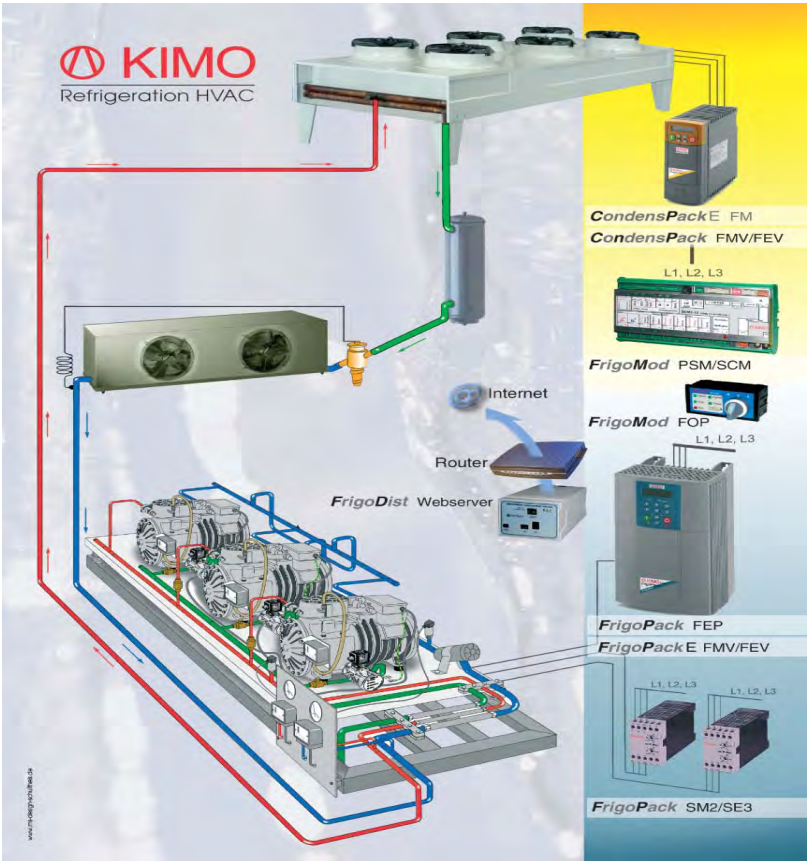


Frequenzumrichter und ihre Wirkung auf Kälteverdichter

Dr. John P. Gibson (Ph.D.)

ART OF COMPRESSION
COLLOQUIUM
3. Mai 2012

INHALT

I Prioritäten

II Verdichterauswahl: **Designkonzept "2004"** (klassisch)

III Verdichterauswahl: **Designkonzept "2012"** (Vorschlag)

- Verdichteranlauf-**SZENARIEN**
- Referenzpunkte für den Anlauf, Kältemittel-Faktoren
- Verdichtertypen, Anlaufmoment-Faktoren
- Umgebungstemperatur, Rack Assisted Starting (RAS) – verbundentlastender Anlauf
- Motoranlaufstrom, Maximalfrequenzen
- Auswahl des Umrichters, FU-Typen
- Auswahl-Software

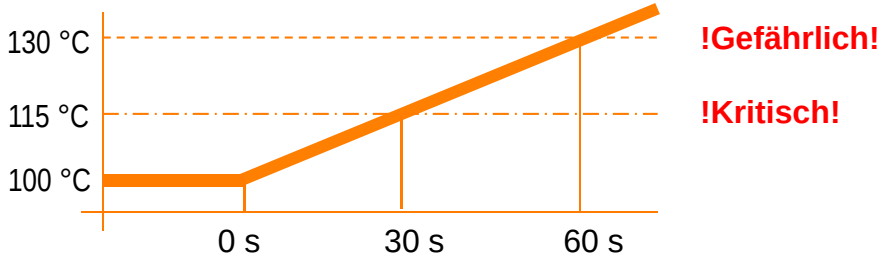
IV Verdichter-Verbund-Design

- Steuerfaktor (= **CF**, **C**ontrol **F**actor)
- Verbundkonfigurationen
- Intelligente Grenzwertverschiebung, Schätzung von f_{max}
- Auswahl-Software, Leistungswerte

V Installationsbeispiele

Frequenzumrichter und ihre Wirkung auf Kälteverdichter
Prioritiäten

Überhitzung der Motorwicklung durch Anlaufüberlastung vermeiden



Schutz des Verdichters

- Gefahr: zu geringes Anlaufmoment
- Überlasterkennung ➔ Sofortige Stromunterbrechung
- Wichtig: Sperrzeit für Motorabkühlung vor dem nächsten Anlaufversuch

Optimaler FU-Einsatz

- Erreichen des höchsten mögl. Anlaufmoments (Warum keine Vektorregelung?)
  $t_{Wicklung}$: -20 ... 100 °C ➔ R_{Cu}: 100 ... 147 %

Ökonomische Gesichtspunkte

- Integrierter Schutz des Verdichters
- Einsatz des kleinstmöglichen Frequenzumrichters
- Höhere Kälteleistung des Verdichters (70 Hz ➔ ca. 40 % mehr Leistung)

Verdichterauswahl: **Designkonzept "2004"** (klassisch)

METHODIK

- Finde: **Maximalen Motorstrom** (Verdichtersoftware)
- Erwäge: **Kompensations-Factor Fc** für Verdichteranlauf
- Schätze: benötigten **Motoranlaufstrom**
- Wähle: **Frequenzumrichter** ($I_{max\ FU}$ > Motoranlaufstrom)

- **2 Zylinder : F_2 = 2.0**
- **4 Zylinder: F_4 = 1.6**
- **6 Zylinder: F_6 = 1.5**

VORTEILE

- Verdichtersicherheit gewährleistet
- Einfache Vorgehensweise
- Universell

EINSCHRÄNKUNGEN

Berücksichtigt nicht:

- Kältemittel-Eigenschaften
- Niedertemperatur-Verdichter mit kleinem Motor
- Pull-down im Verdichterverbund
- Oft Überdimensionierung des Verdichters

Verdichterauswahl: **Designkonzept "2012"** (Vorschlag)

METHODIK

- Wähle: **Anlauf- SZENARIUM** (t_0, t_c)
- Prüfe: **Motorstrom** am **Referenzpunkt** (R404A: +5/+45 °C)
- Prüfe: **Kältemittel-Faktoren** (Basis-Kältemittel: R404A)
- Prüfe: **Verdichtertype**, **Faktor Anlaufmoment** (1.0 … 2.0)
- Prüfe: **Rack Assisted Starting (RAS) – verbundentlastender Anlauf**
  (vor dem Anlauf pull-down ➔ t_0)
- Prüfe: **Umgebungstemperatur** (t_{Umg} ➔ t_c)
- Berechne: benötigter **Motoranlaufstrom** (aus Ersatzschaltbild des Motors)
- Wähle: **Frequenzumrichter** ($I_{max\ Umrichter}$ > Motoranlaufstrom)

VORTEILE

Ökonomischeres Design mit höherer Verdichtersicherheit
(oft Einsatz eines kleineren FUs möglich)

EINSCHRÄNKUNGEN

Auswahlsoftware benötigt
(zu komplex für manuelle Auswahl)

Designkonzept “2012”
Verdichteranlauf-**SZENARIEN**

SZENARIUM I

Anlaufen nach Druckausgleich

- Realistisch:
  t_0, t_c ≈ t_{amb}
- Anlauf:
  - Niedriges Moment
    (kleiner Umrichter)
  - Normalerweise nicht Kälte-relevant

SZENARIUM II

Anlauf nach Netzausfall bei hoher t_{Umgeb}

- Vorschlag Referenzpunkte:
  R404A: t_0: +5 / t_c: +45 °C
- Realistische “worst-case” Anlaufpunkte:
  - t_0: 0…10 °C
  - t_c: t_{Umgeb} max (z.B. 43 °C)
- Kältemittel berücksichtigen
- Anlauf:
  - Hohes Moment
    (großer Umrichter)
  - Mehr auf den ff. Seiten

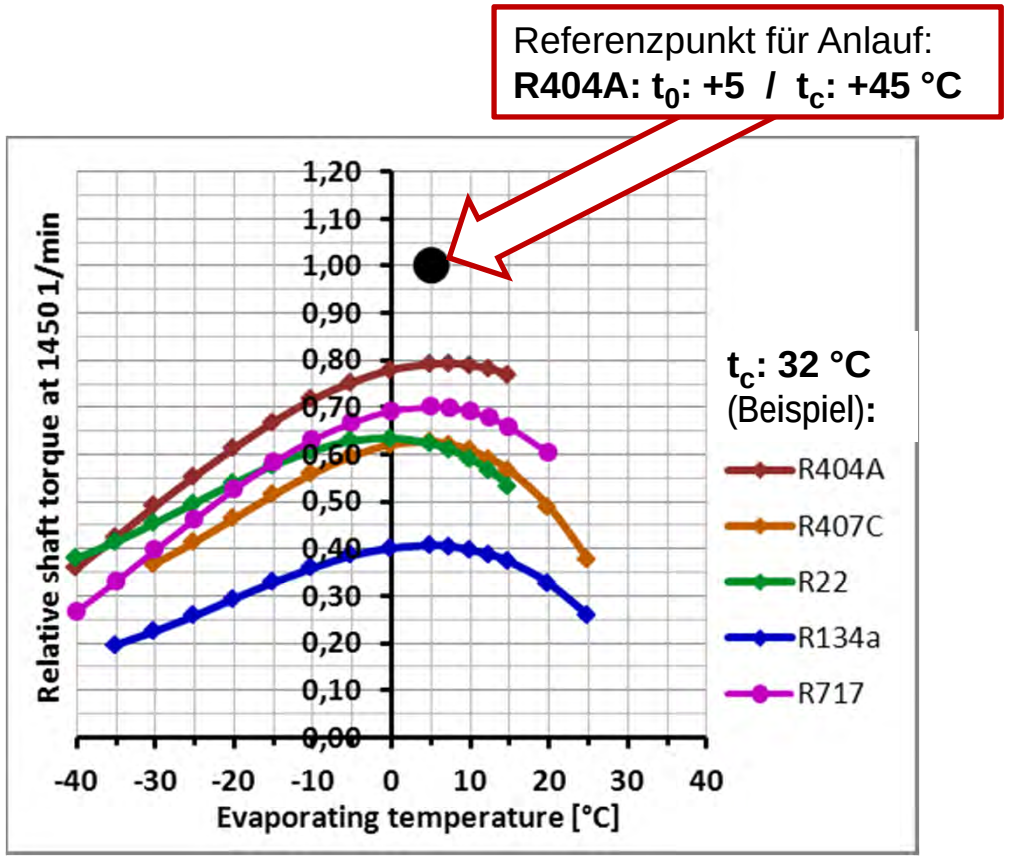
SZENARIUM II + RAS

Anlauf nach Netzausfall bei hoher t_{Umgeb} + RAS (Verbundentlastender Anlauf)

- Praktische Möglichkeiten:
  - NK: **R404A: t_0 <= 0 °C**
  - NK: **R134a: t_0 <= 0 °C**
  - TK: **R404A: t_0 <= -20 °C**
- Mögliche Konfigurationen:
  - Einzelverdichter mit Bypass
  - 2x Verdichter jeweils mit Bypass
  - >= 3x Verdichter
- Anlauf:
  - Mittleres Moment
    (mittelgroßer FU)
  - Mehr auf den ff. Seiten

Designkonzept “2012”
Referenzpunkte für den Anlauf, Kältemittel-Faktoren

BEISPIEL: **Offener, halb-hermetischer** Verdichter mittlerer Größe



METHODIK

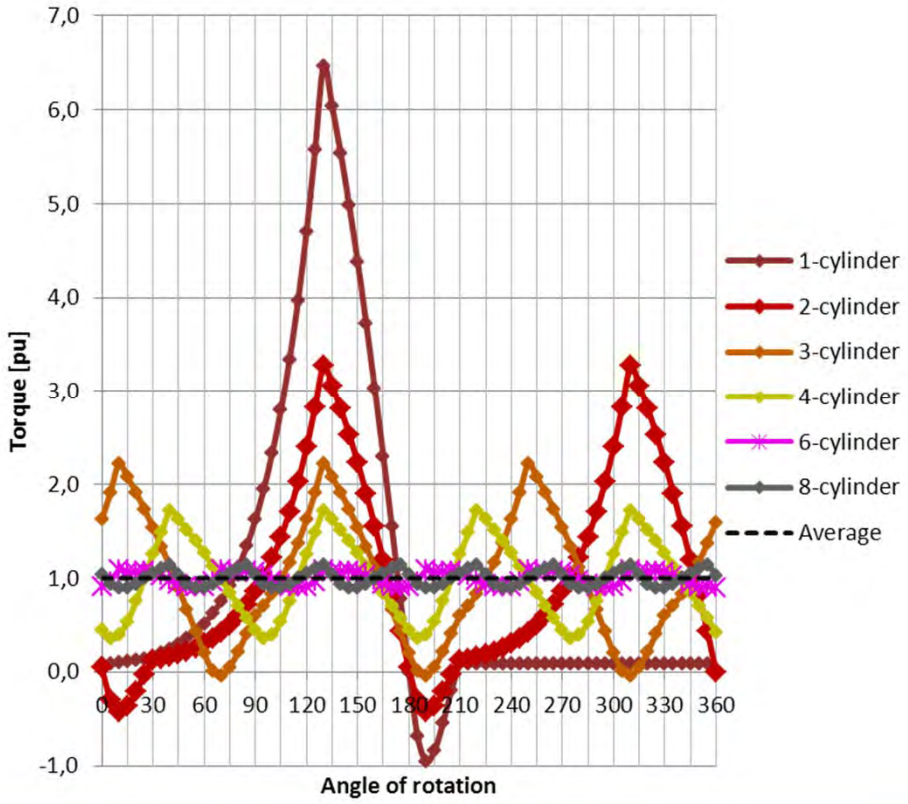
- Wellenleistung / Drehzahl (rad/s) (aus Verdichtersoftware)
  ➔ entspricht Drehmoment
- Höchstes vorkommendes Anlauf-moment

Gewählte Kältemittelfaktoren für $t_c = t_{Umgeb}$ =43 °C

- R404A / R507A: 0.97
- R407C: 0.80
- R22: 0.85
- R134a: 0.55
- R717 / R727: 0.83

Designkonzept “2012”
Verdichtertypen, Anlaufmoment-Faktoren

BEISPIEL: Momenten-/Rotationswinkel-Kurven eines **rotierenden** Hubkolbenverdichters



ANFORDERUNG

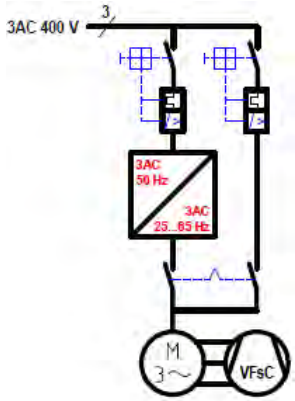
- Frequenzumrichter + Motor müssen mindestens das Spitzenmoment bringen, um einen Anlauf zu garantieren

Gewählte **Anlaufmoment - Faktoren** (nicht gleich Strom)

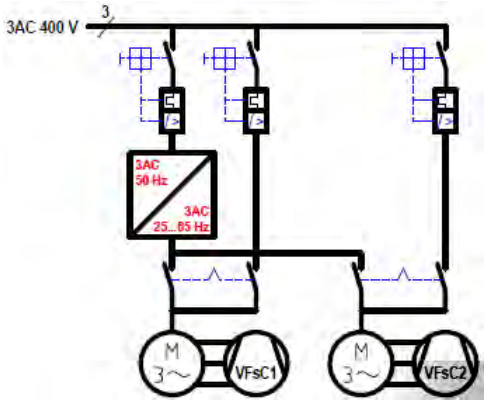
- 2-Zylinder: 2.00x
- 3-Zylinder: 1.60x
- 4-Zylinder: 1.35x
- 6-Zylinder: 1,30x
- 8-Zylinder: 1.20x
- Scroll, Schraube: 1.20x

Designkonzept “2012” - Umgebungstemperatur, Rack Assisted Starting (RAS) = verbundentlastender Anlauf

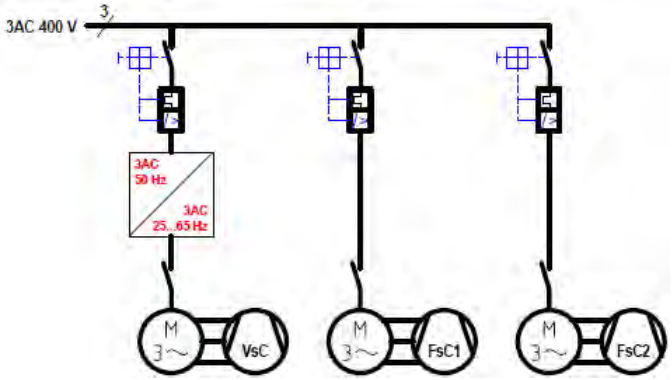
Mögliche RAS-Schaltungen:



1x Verdichter VsC

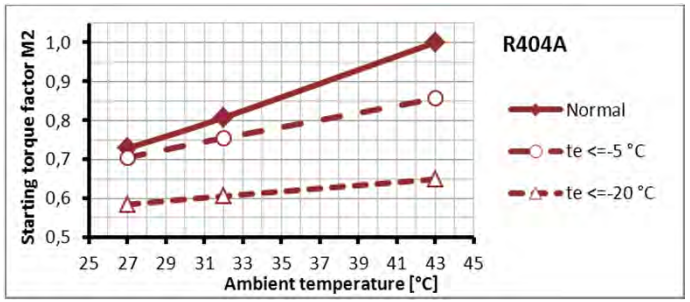


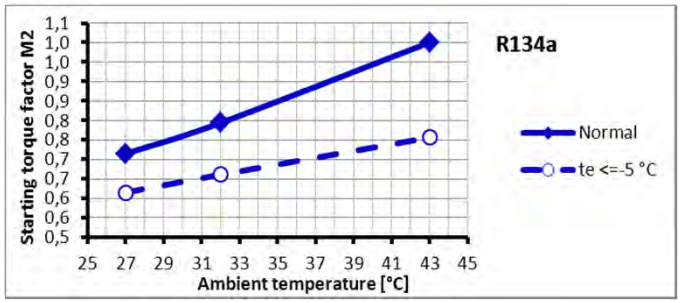
2x Verdichter VFsC



1x VsC + ≥2x FsC Verdichter

Momentenreduzierung





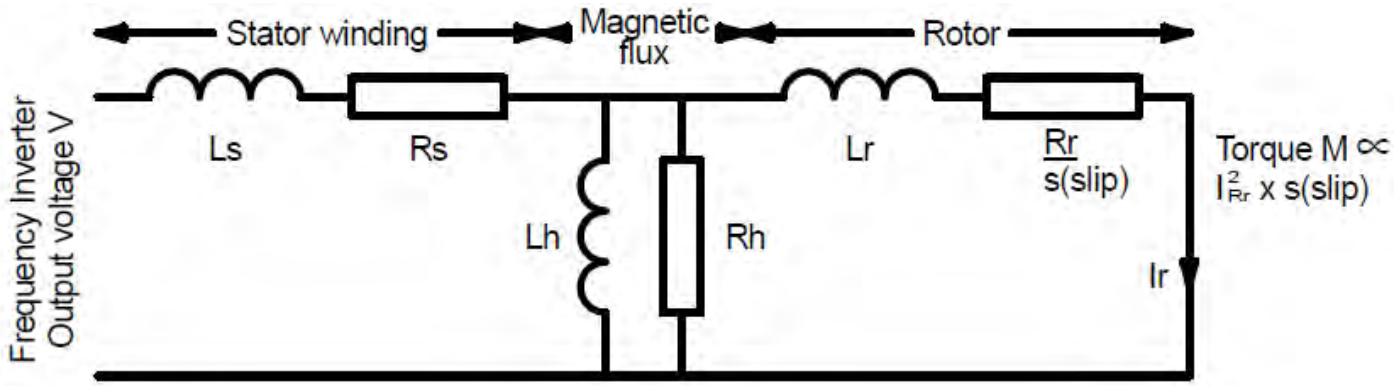
Regelung:

Intelligente Verbund-regelung notwendig

KIMO Refrigeration HVAC

Designkonzept “2012”
Motoranlaufstrom

Methodik: Motor-Ersatzschaltbild verwenden



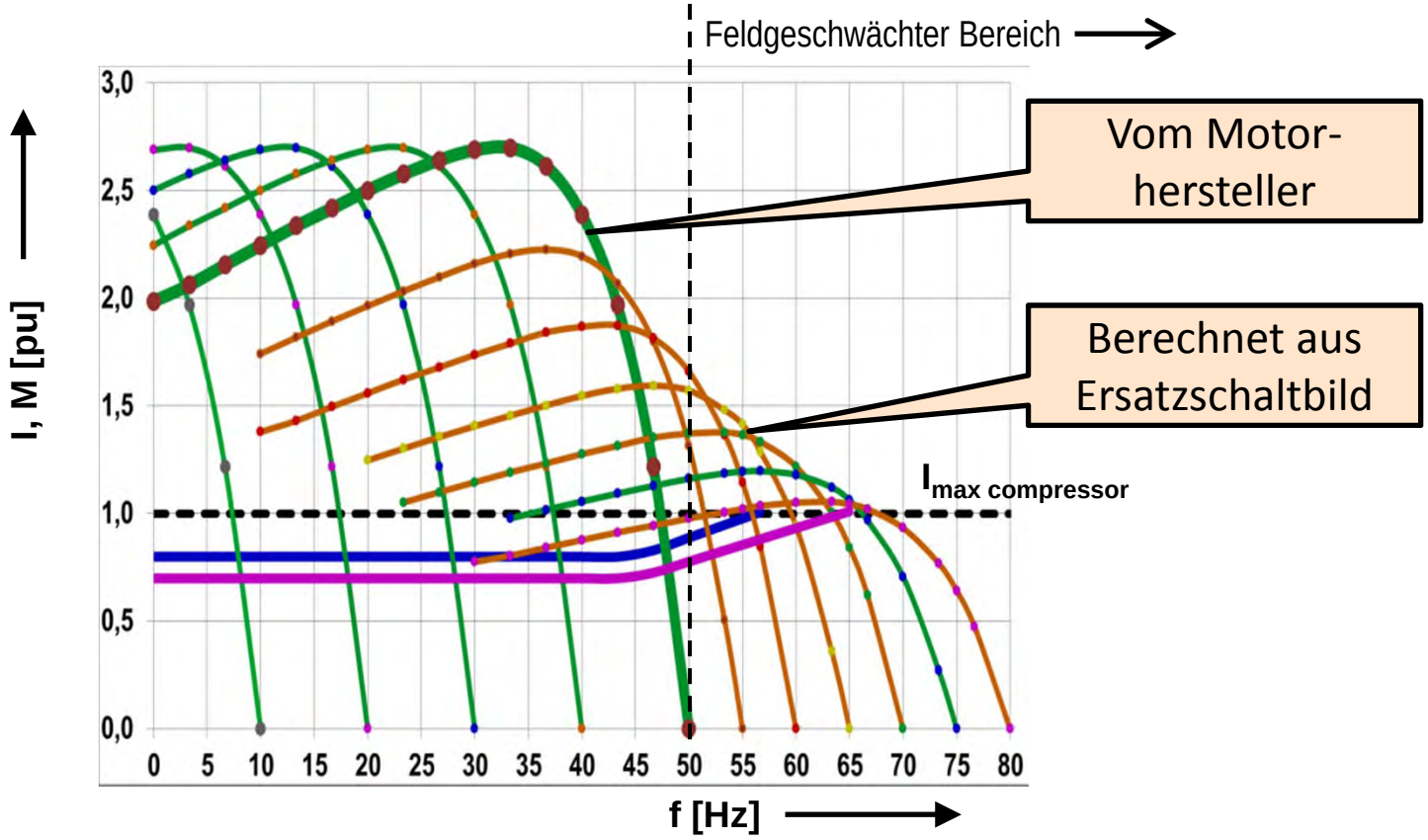
Problem: Identifizierung der Motorparameter

Lösung: Verfügbare Daten aus der Verdichtersoftware verwenden:

- DOL Strom: I_{DOL}
- Max. Motorstrom: I_{max}
- Min. Motorstrom: I_{min}
  (z.B. R134a bei -30 / 20 °C mit CC bei >= 4 Zylindern)
- Nenndrehzahl: n_{Nenn}
- Numersiche Datenanalyse

KIMO Refrigeration HVAC

Designkonzept “2012”
Maximalfrequenzen



Ergebnisse:

- Optimale Inverterparameter-Einstellungen
- Inverterstrom für zuverlässigen Anlauf
- Maximale Verdichterfrequenz

Designkonzept “2012”
Auswahl des Umrichters, FU-Typen

Industrieumrichter

Anlaufmoment:	100 %
Überlastschutz:	Sonder-Software notwendig
Anlaufzeiten:	Sonder-Software notwendig
Strom begrenzung:	Sonder-Software notwendig
Verdichter-diagnostik:	Sonder-Software notwendig
Regelung:	Externe Steuerung nötig

Kälteumrichter

Anlaufmoment:	120 ... 125 % (Referenz R744-TC Anlauf)
Überlastschutz:	Standard
Anlaufzeiten:	Standard
Strom-begrenzung:	Standard
Verdichter diagnostik:	Standard
Integrierte intelligente Regelung:	- p_0 , p_c - Überwachung von: - Sauggasüberhitzung - Verdampfungstemp. - Verbundregelung

Designkonzept “2012”
Auswahlsoftware

Eingaben:

Hersteller [BITZER ... SCI]

Kältemittel [R134a ... R744_TC]

Verdichtertype (+ Anzahl Zylinder) [halbhermetisch, 2-Zylinder ... Umlaufkolben]

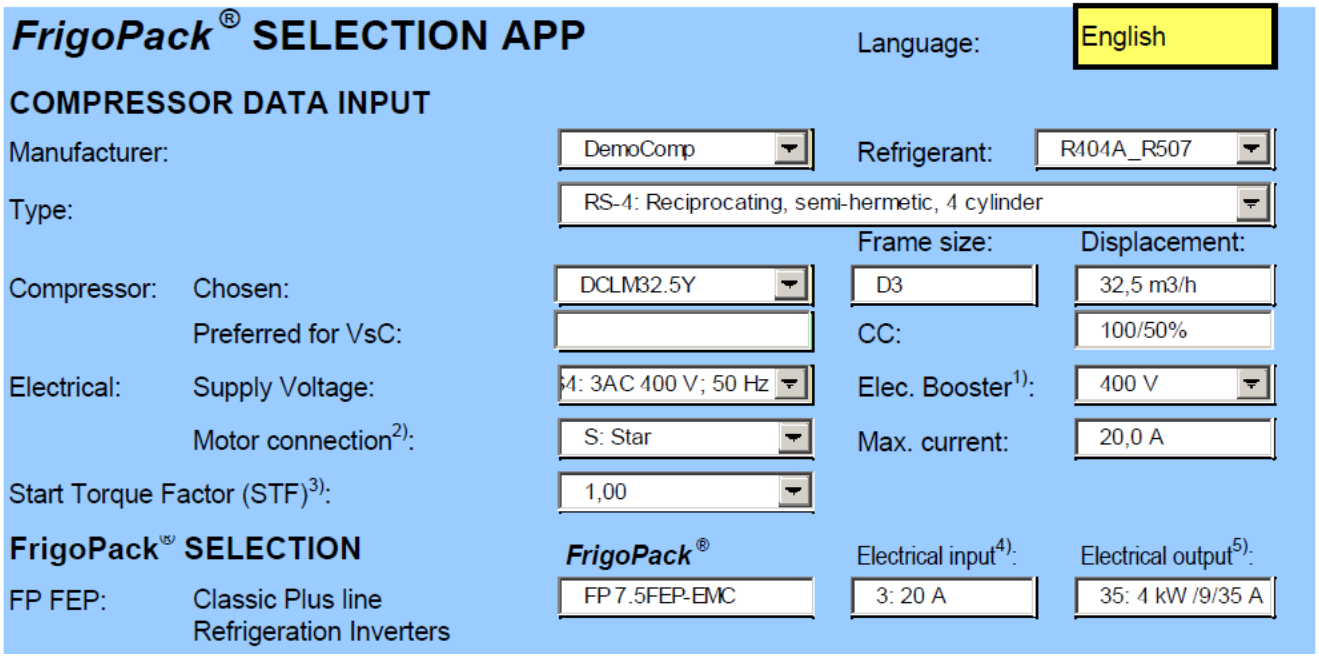
Verdichterauswahl [....]

Spannung [3AC 230 V ... 3AC 480 V]

Elektr. Booster [400 / 440 / 480 V]

Motoranschluss [Stern, Dreieck, Teilwicklung]

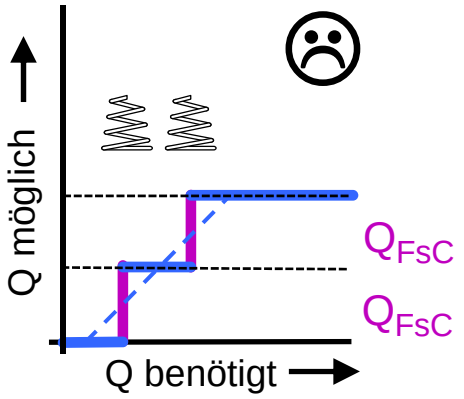
Faktor Anlaufmoment [1.0, 1.9, 1.8]



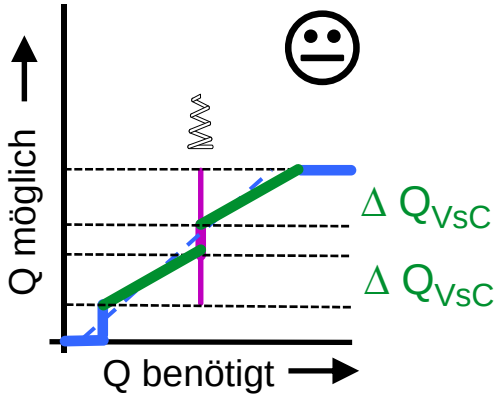
IV Verdichter-Verbund-Design
Steuerfaktor (= **CF**, **C**ontrol **F**actor)

Definition: Steuerfaktor CF = $\frac{\text{Leistungsveränderung des Verdichters veränderbarer Drehzahl } (\Delta Q_{VSC})}{\text{Leistungsstufe des Verdichters fester Drehzahl } (Q_{FSC})}$

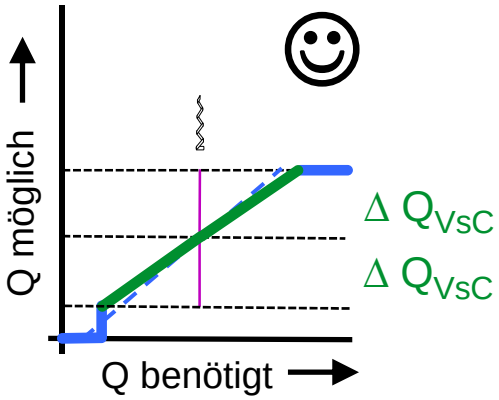
Beispiel: 1x VsC (Verdichter veränderb. Drehzahl) + 1x FsC (Verdichter fester Drehzahl)



CF = 0%
Stufenschaltung



CF = 60%
Gerade akzeptabel

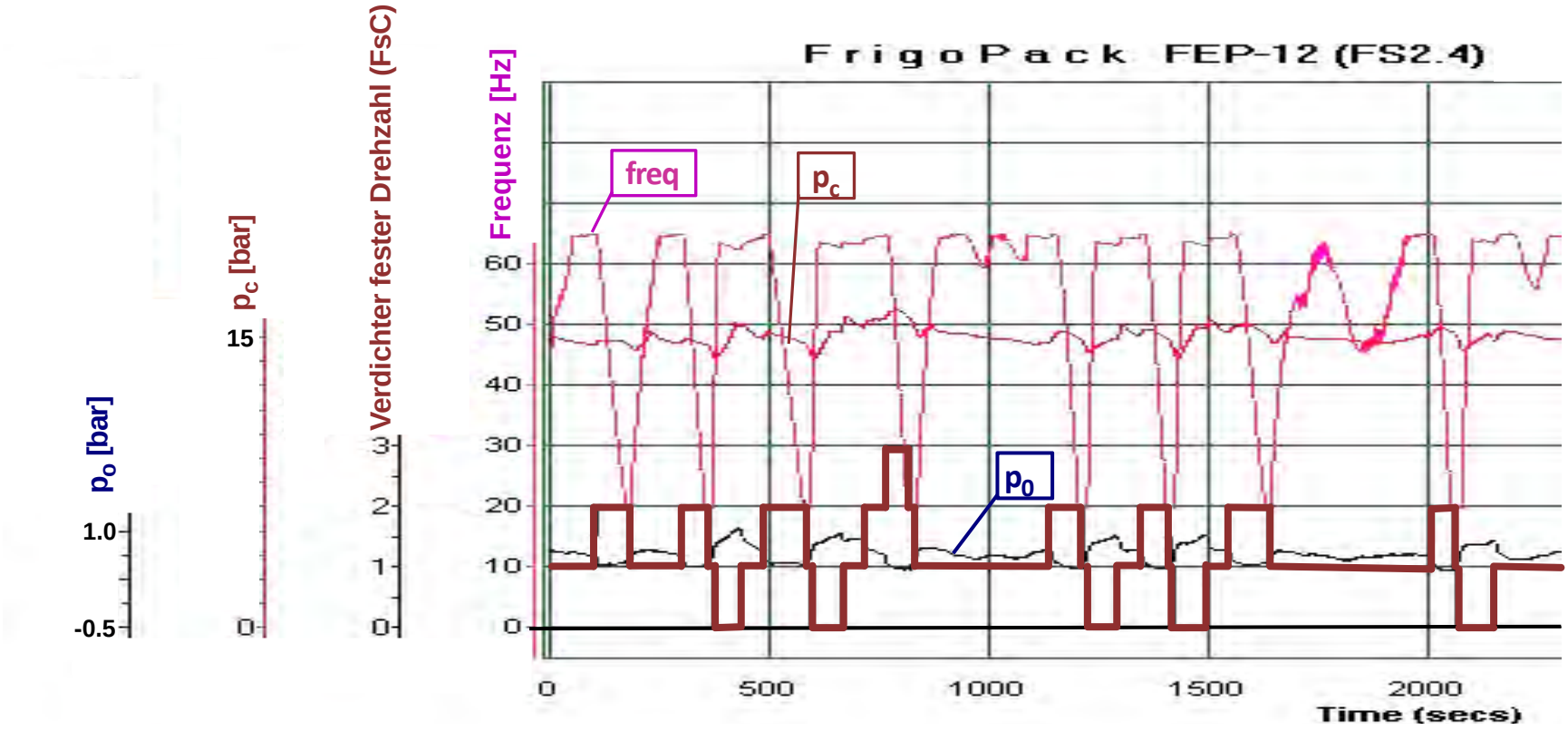


CF = ≥100%
Ausgezeichnet

Designziel: CF ≥80%

KIMO Refrigeration HVAC

IV Verdichter-Verbund-Design – Verbundkonfigurationen: Beispiel eines schlechten Steuerfaktors

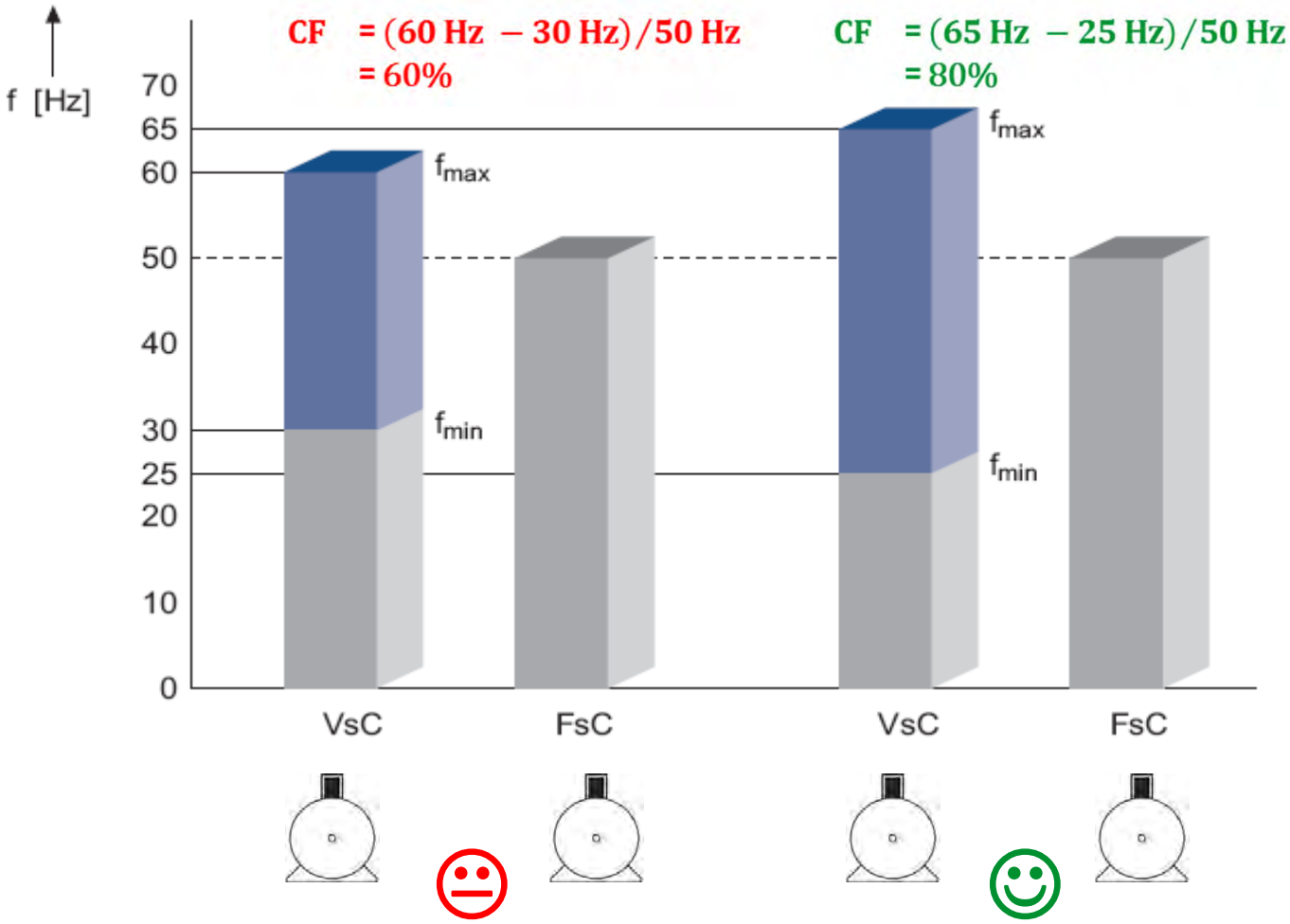


Anlage:
Supermarkt mit
4-Verdichter-Verbund

Steuerfaktor:

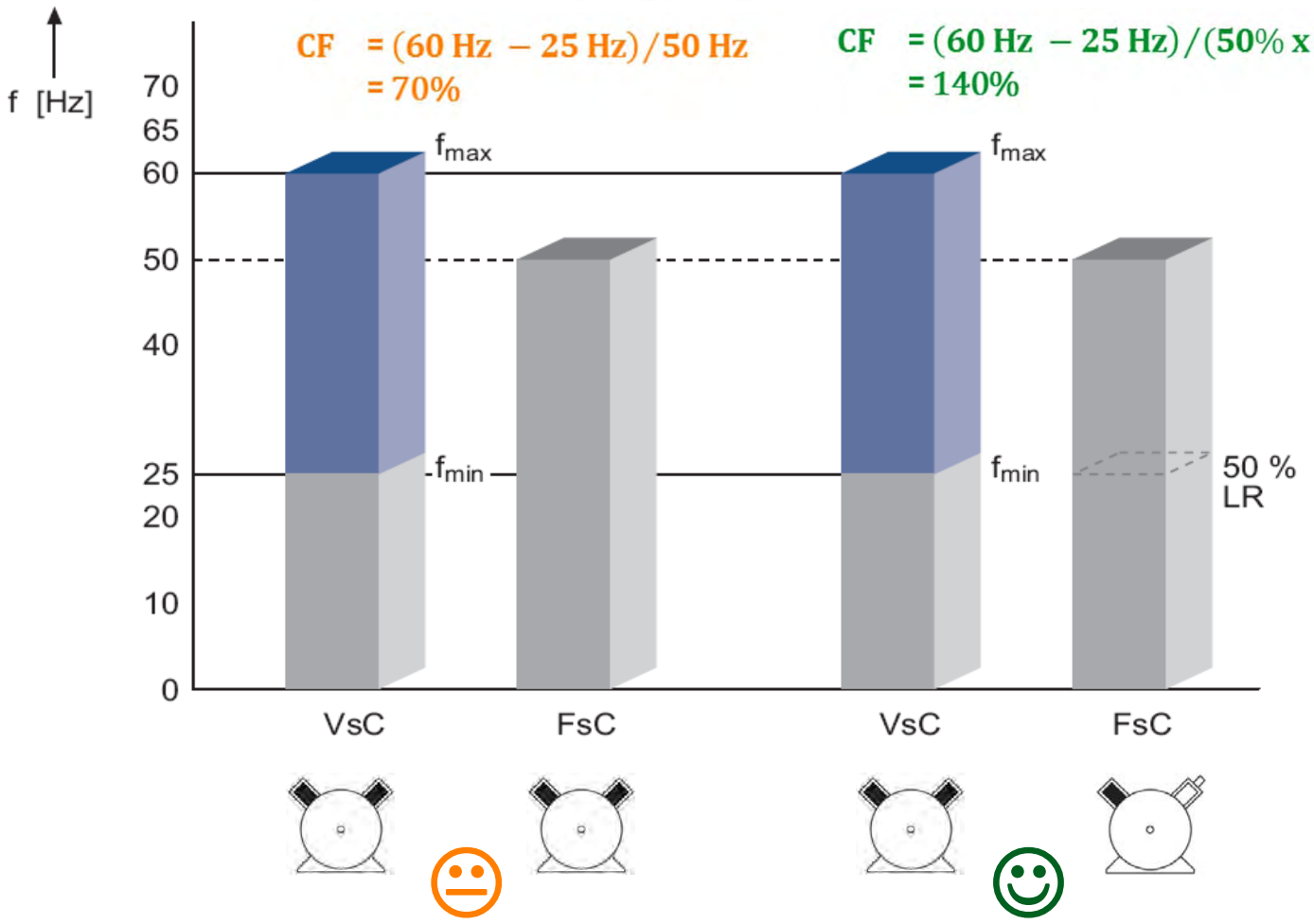
Ursprünglich:	25 ... 60 Hz:	47%
Mit erweitertem Frequenzbereich:	20 ... 65 Hz:	60 %

IV Verdichter-Verbund-Design – Verbundkonfigurationen: 2-Zylinder-Hubkolbenverdichter



KIMO Refrigeration HVAC

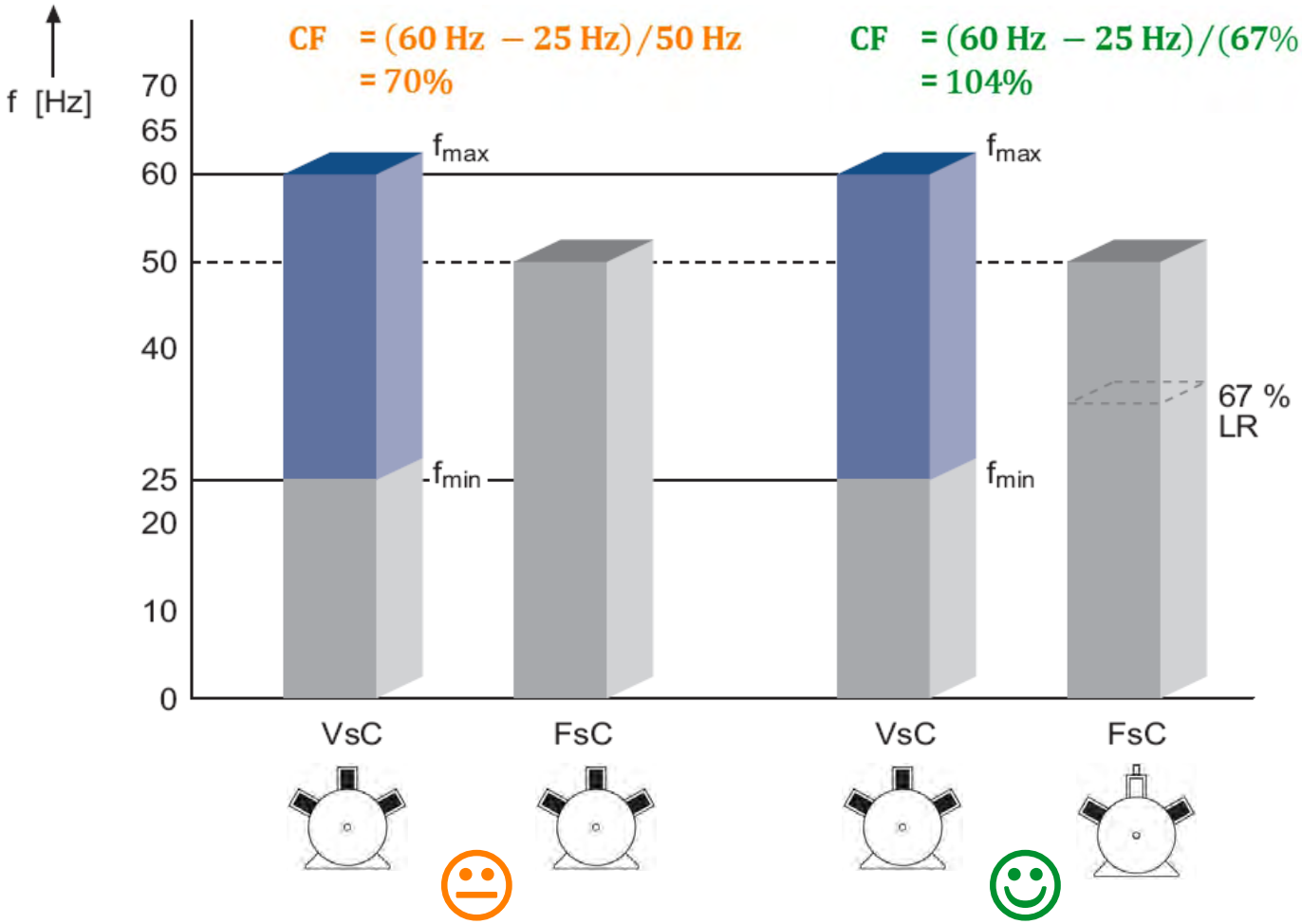
IV Verdichter-Verbund-Design – Verbundkonfigurationen: 4-Zylinder-Hubkolbenverdichter



Leistungs-Regelung

KIMO Refrigeration HVAC

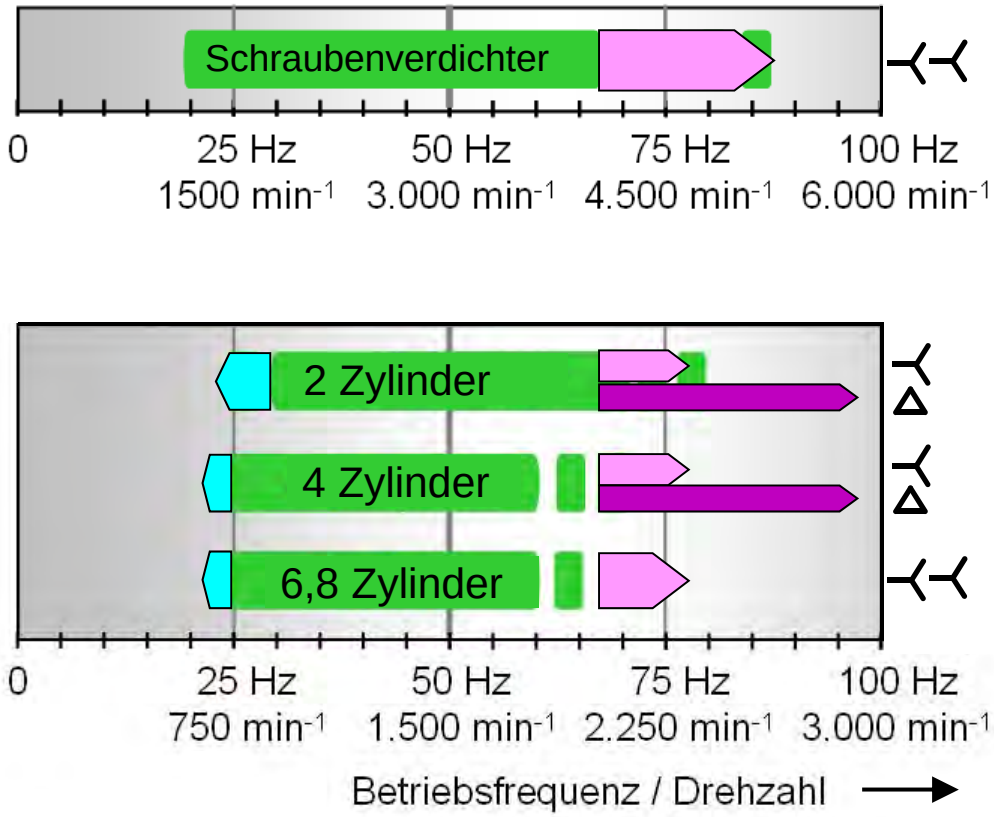
IV Verdichter-Verbund-Design – Verbundkonfigurationen: 6-Zylinder-Hubkolbenverdichter



Leistungs-Regelung

KIMO Refrigeration HVAC

IV Verdichter-Verbund-Design
Steuerfaktor: Intelligente Grenzwertverschiebung



f_{max} Limit:
Automatisch selbst-anpassend (Intelligente Grenzwertverschiebung)

f_{min} Limit:
Automatisch selbst-anpassend (Intelligente Grenzwertverschiebung)

Intelligente Grenzwert-verschiebung:
Basierend auf:
Kältemittel,
p_0, p_c, t_s, t_d, M_{mot}

KIMO Refrigeration HVAC

IV Verdichter-Verbund-Design:
Steuerfaktor: f_{max} limit (am Beispiel 4-Zylinder)

Industrieumrichter

- Klima: R404A +5 / +50 °C:
  ⊣⊢: 55 Hz △: 87 Hz
- NK: R404A -10 / +45 °C:
  ⊣⊢: 60 Hz △: 87 Hz

  R134a -10 / +45 °C
  ⊣⊢: 60 Hz △: 87 Hz
- TK: R404A -35 / +40 °C:
  ⊣⊢: 60 Hz △: 87 Hz

Bemessungsstrom FU (≈Kosten):
⊣⊢: 100 % △: 167%

Kälteumrichter

- Klima: R404A +5 / +50 °C:
  ⊣⊢: 57 Hz △: 87 Hz
- NK: R404A -10 / +45 °C:
  ⊣⊢: **68** Hz △: 87 Hz

  R134a -10 / +45 °C
  ⊣⊢: **75 Hz** △: 87 Hz
- TK: R404A -35 / +40 °C:
  ⊣⊢: **75 Hz** △: 87 Hz

Intelligente Grenzwertverschiebung:

Basierend auf:
Kältemittel, p_0, p_c, t_s, t_d, M_{mot}

KIMO Refrigeration HVAC

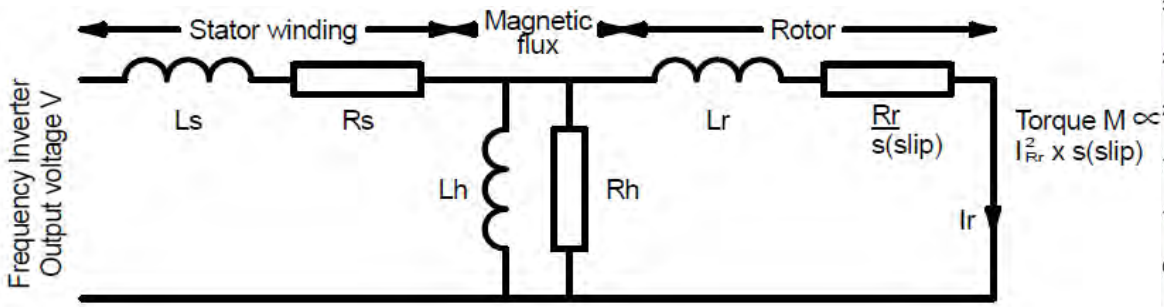
IV Verdichter-Verbund-Design:
Steuerfaktor: Abschätzung von f_{max} Limit

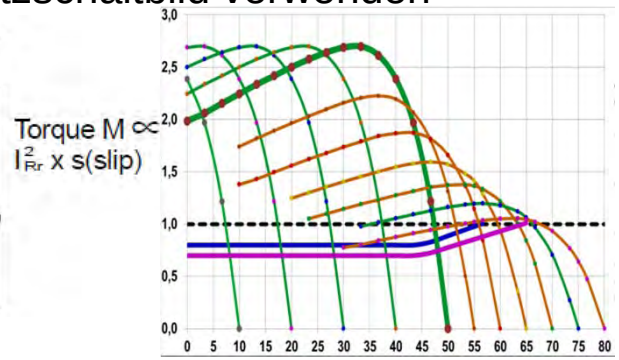
Mechanische Kriterien

- Ölpumpe
- Druckgastemperatur
- Kolbengeschwindigkeit
- Hoher f_{max} ➔ besserer Steuerfaktor
  ➔ Weniger Verdichteranläufe
- Immer den Verdichterhersteller konsultieren

Elektrische Kriterien

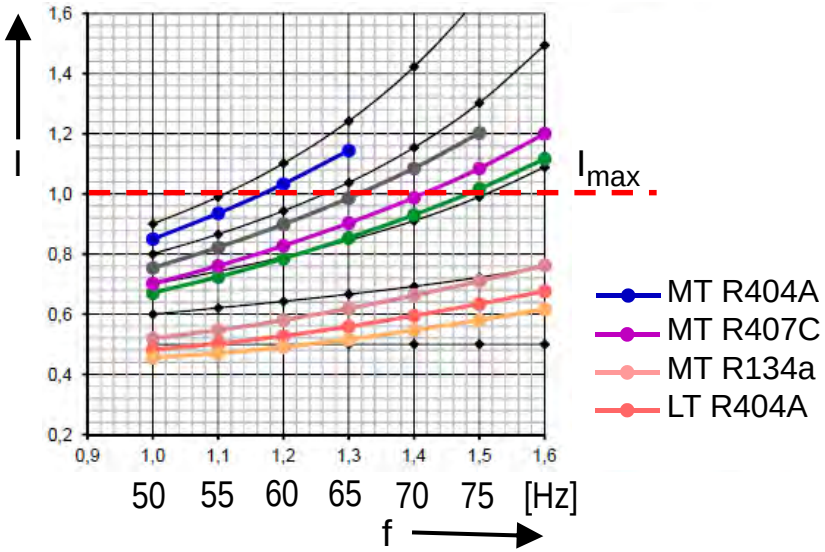
- Maximaler Motorstrom
- Versorgungsspannung (Grenze im feldgeschwächten Bereich)
- Motor-Ersatzschaltbild verwenden



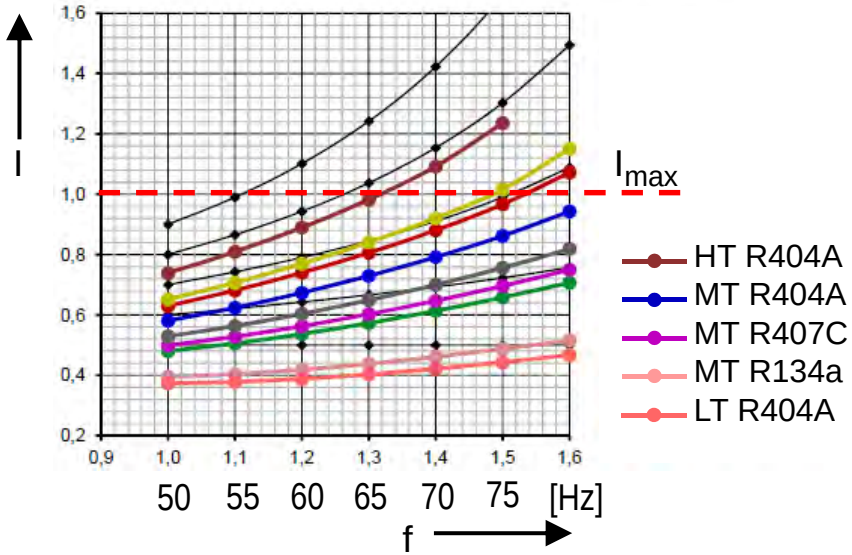


IV Verdichter-Verbund-Design:
Regelfaktor: f_{max} Limit bei Sternschaltung

Verdichter mit kleinem Motor (Beispiel):



Verdichter mit großem Motor (Beispiel):



Kleiner Verdichtermotor in Sternsch.

NK R404A: Nicht empfohlen
NK R134a: f_{max}: ...75 Hz CF: ≈100 %
TK R404A: f_{max}: ...75 Hz CF: ≈100 %

Großer Verdichtermotor in Sternsch.

NK R404A: f_{max}: ...68 Hz CF: ≈ 90 %
NK R134a: kleiner Verdichtermotor bevorzugt
TK R404A: kleiner Verdichtermotor bevorzugt

IV Verdichter-Verbund-Design:
Auswahl-Software – Wo ist sie hilfreich?

COMPRESSOR DATA INPUT

Manufacturer:		DemoComp	Refrigerant:	R404A_R507
Type:		RS-4: Reciprocating, semi-hermetic, 4 cylinder		
			Frame size:	Displacement:
Compressor:	Chosen:	DCLM32.5Y	D3	32,5 m3/h
	Preferred for VsC:		CC:	100/50%
Electrical:	Supply Voltage:	4: 3AC 400 V; 50 Hz	Elec. Booster[1]:	400 V
	Motor connection[2]:	S: Star	Max. current:	20,0 A
Start Torque Factor (STF)[3]:		1,00		
FrigoPack® SELECTION		*FrigoPack®*	Electrical input[4]:	Electrical output[5]:
FP FEP:	Classic Plus line Refrigeration Inverters	FP 7.5FEP-EMC	3: 20 A	35: 4 kW /9/35 A

Eingabe:
Kältedaten
Verdichterdaten
Elektrische Daten
Anlaufbedingungen

Auswahl:
Kälteumrichter +
Elektrische Daten für die Auslegungsplanung

FREQUENCY RANGE

			Maximum:	Minimum:	Control factor[6]:
Operating temperatures:	HT:	+5 / 50 °C:	60 Hz	25 Hz	70%
	IT	0 / 45 °C:	67 Hz	23 Hz	88%
	MT	-10 / 45 °C:	75 Hz	23 Hz	104%
	LT	-35 / 40 °C:	75 Hz	25 Hz	100%

SPECIAL CONSIDERATIONS

Leistung:

Klima: f_{min}, f_{max}, CF
IT: f_{min}, f_{max}, CF
NK: f_{min}, f_{max}, CF
TK: f_{min}, f_{max}, CF

KIMO Refrigeration HVAC

IV Installationsbeispiele
Kälte in der Nahrungsmittelherstellung

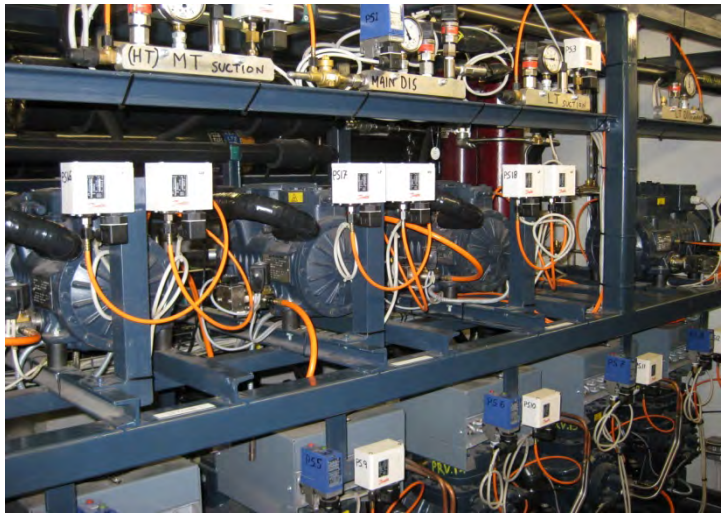
- **Tiefkühlung:**
  - **FU-geregelter VsC Verdichter**:
    4 Zyl. Hubkolben
  - **Verdichter fester Drehzahl (FsC):**
    2 x 6 Zyl. Hubkolben
  - **Kälteumrichter**
- **Normalkühlung:**
  - **FU-geregelter VsC Verdichter**:
    6 Zyl. Hubkolben
  - **Verdichter fester Drehzahl (FsC):**
    2 x 6 Zyl. Hubkolben
    100 / 67 %
    Leistungsregelung
    Steuerfaktor: 120 %
  - **Kälteumrichter**

IV Installationsbeispiele
Supermarkt mit R744 Technologie (transkritisch)

- Tiefkühlung (**L**ow **T**emp / **LT**):

- Normalkühlung (**M**edium**T**emp):

- Zwischendruck



Kälteumrichter mit
optimiertem Steuerfaktor

IV Installationsbeispiele
Großmarkt (R507A)

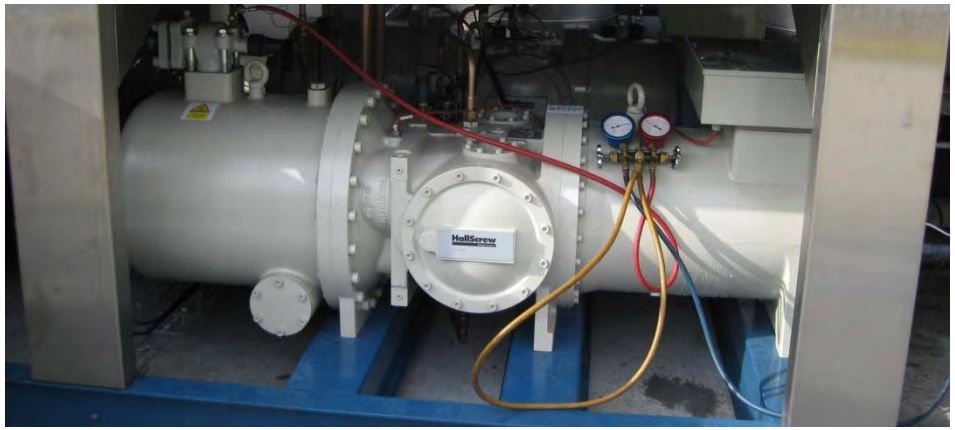
NK1: 6x Verdichter
NK2: 5x Verdichter
NK3: 4x Verdichter
TK: 4x Verdichter

Alle 4x Kälteumrichter mit optimiertem Steuerfaktor:

	f_{min}	f_{max}	RF:
NK	23	68 Hz	90%
TK	23	70 Hz	94%

Kaltwassersatz für Spritzgussmaschine

Prozesskühlung (R407C; 720 kW)
- **2x VsC: Schraubenverdichter**
- **2x Kälteumrichter:**
  - **Optimierter Steuerfaktor**
  - **Integrierte, energie-optimierte Kaltwassersatz-Regelung**



KIMO Refrigeration HVAC