

Als stetige Stellglieder für Verdichter und Verflüssigerlüfter

# Frequenzumrichter mit Feldbusanschluß\*

Horst Peter Wurm, Remscheid

## zum Autor

Dr.-Ing.  
Horst Peter  
Wurm,  
Geschäftsführer  
der Firma  
Gustav Wurm  
GmbH & Co.,  
Remscheid



*Frequenzumrichter als stetige Stellglieder für Asynchronmotore haben sowohl im Maschinenbau als auch im Bereich der Gebäudeautomatisierung einen hohen Verbreitungsgrad erreicht. Seit einiger Zeit sind nun auch erste Anwendungen in Gewerbekälteanlagen zu beobachten.*

*Die neueste Generation von Frequenzumrichtern ist für die Integration in Feldbussysteme vorbereitet und gestattet damit den Datenaustausch von Sollwerten, Istwerten, Betriebs- und Störmeldungen mit übergeordneten Regelsystemen zu günstigen Kosten.*

Ziel des folgenden Beitrags ist es, zunächst die zu beachtenden Besonderheiten beim Betrieb von Verdichtern und Verflüssigerlüftern an Frequenzumrichtern zu erläutern. Anschließend werden die Chancen und Risiken von Kälteanlagen mit Frequenzumformern aufgezeigt.

## Drehfeldmaschinen mit variabler Drehzahl

Zum Antrieb von Kompressoren und Verflüssigerlüftern werden in nahezu allen Fällen Standard-Asynchronmotore eingesetzt. Das Drehmoment von Motoren dieser Bauart ist proportional zum rotierenden magnetischen Fluß und zu den im Läufer induzierten elektrischen Strömen.

Der magnetische Fluß erreicht seinen Nennwert bei Nennspannung und Nennfrequenz des Motors. Der induzierte Strom in jeder der drei Läuferwicklungen ist Null, wenn der Läufer synchron mit dem Magnetfeld des Stators umläuft. Ein Drehmoment kann also erst dann entstehen, wenn sich eine Drehzahldifferenz zwischen dem rotierenden Statorfeld und dem Läufer – auch Rotor genannt – einstellt und damit für den Rotor ein Magnetfeld mit der Frequenz  $>0$  entsteht, so daß im Läufer eine Spannung induziert werden kann. Maschinen mit diesem Wirkprinzip tragen die Bezeichnung Asynchronmotor und sind kostengünstig herzustellen.

Mit steigendem Drehmoment nimmt die Drehzahl des Läufers stetig ab. Steigert man das belastende Drehmoment über den Nennpunkt hinaus weiter, so erreicht man das Kippmoment, bei der die Maschine instabil wird, da das Drehmoment trotz abfallender Drehzahl weiter abnimmt. Ein

erneuter Anlauf des Motors ist erst möglich, wenn das belastende Drehmoment deutlich abgesenkt wurde. Dies verdeutlicht Bild 1 mit  $U_1 = U_N$ .

Verringert man die Klemmenspannung des Motors, so wird der magnetische Fluß proportional dazu geringer. Da sich die im Läufer induzierte Spannung ebenfalls mit der Klemmenspannung ändert, wird das Kippmoment mit dem Quadrat der Klemmenspannung beeinflusst. Die Kippdrehzahl bleibt trotzdem unverändert (Bild 1),  $U_1$  variabel.

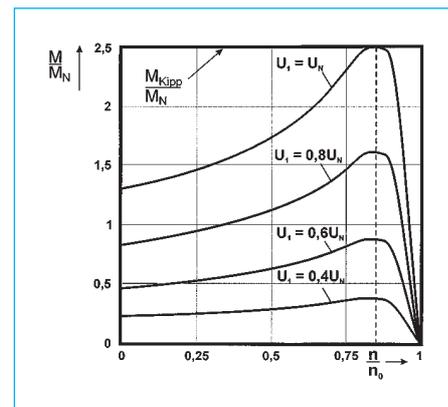


Bild 1 Drehzahl – Drehmomentkennlinie von Asynchronmotoren bei Nennspannung  $U_N$  und bei variabler Spannung  $U_1/U_N$

$n/n_0$ : Auf synchrone Drehzahl normierte Drehzahl  
 $M/M_N$ : Auf Nenn-Antriebsmoment normiertes Drehmoment  
 $M_{\text{kipp}}$ : Kippmoment der Asynchronmaschine

Um den Kondensationsdruck einer Kälteanlage zu regeln, bietet sich die Veränderung der wirksamen Tauscherfläche an, indem die Luftmenge durch Drehzahlveränderung der Kondensatorlüfter variiert wird.

Bei Lüftern verändert sich das Lastmoment proportional zum Quadrat der Drehzahl, so daß im Prinzip eine Drehzahlverminderung allein durch Spannungsabsenkung möglich ist. Der Motor wird trotzdem

\* Als Vortrag gehalten am 19. November anlässlich der Deutschen Kälte-Klima-Tagung 1999 des DKV in Berlin

stabil links vom Kippunkt betrieben, weil das Lastmoment stärker abnimmt als das Antriebsmoment (Bild 2).

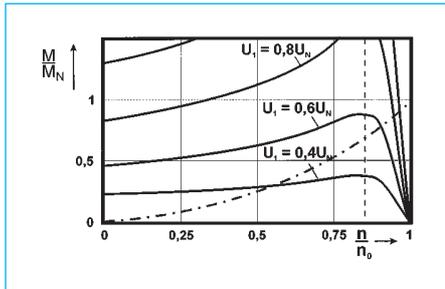


Bild 2 Drehzahl-/Drehmomentverhalten  $M/M_N = f(n/n_0)$  von Lüftermotoren bei variabler Spannung  $U_1/U_N$

Bei Kompressoren wird das Lastmoment eines Betriebspunktes im wesentlichen durch Kondensations- und Saugdruck bestimmt. Will man Kompressoren mit variablem Massenstrom betreiben, muß die Drehfrequenz des magnetischen Flusses und damit die Frequenz des speisenden Drehspannungssystems verändert werden. Der Magnetisierungsstrom  $I_0$  in der Hauptinduktivität  $L_h$  (und damit der magnetische Fluß) bleibt allerdings nur unter der Bedingung konstant, daß die Spannung  $U_M$  des Motors proportional zur Frequenz  $f_M$  verändert wird:

$$I_0 = \text{const} = U_M / X_h \quad (1)$$

$$X_h = \omega L_h = 2 \pi f_M L_h \quad (2)$$

$$U_M / f_M = \text{const} \quad (3)$$

$I_0$ : Magnetisierungsstrom [A];  $U_M$ : Spannung an der Motorwicklung [V];  $X_h$ : Hauptreaktanz (Wicklungsreaktanz im Leerlauf) [ $\Omega$ ];  $\omega$ : Kreisfrequenz [ $s^{-1}$ ]

### Variable Spannung und Frequenz durch Pulswechselrichter

Zur Drehzahlregelung von Asynchronmotoren haben sich Pulswechselrichter durchgesetzt, die zunächst aus dem speisenden Dreiphasennetz (z.B. 400V/50Hz) über Diodenbrücken eine konstante Zwischenkreisspannung  $U_d$  erzeugen.

Durch sechs elektronisch gesteuerte Leistungsschalter ( $S_1 \dots S_6$ ) kann jede der drei Ausgangsklemmen des Wechselrichters wahlweise an das positive oder negative Potential ( $+U_{d/2}$ ,  $-U_{d/2}$ ) des Zwischenkreises gelegt werden (Bild 3).

Man erhält die höchstmögliche Ausgangsspannung, wenn die Schalter jeweils kontinuierlich für die Dauer einer Halb-

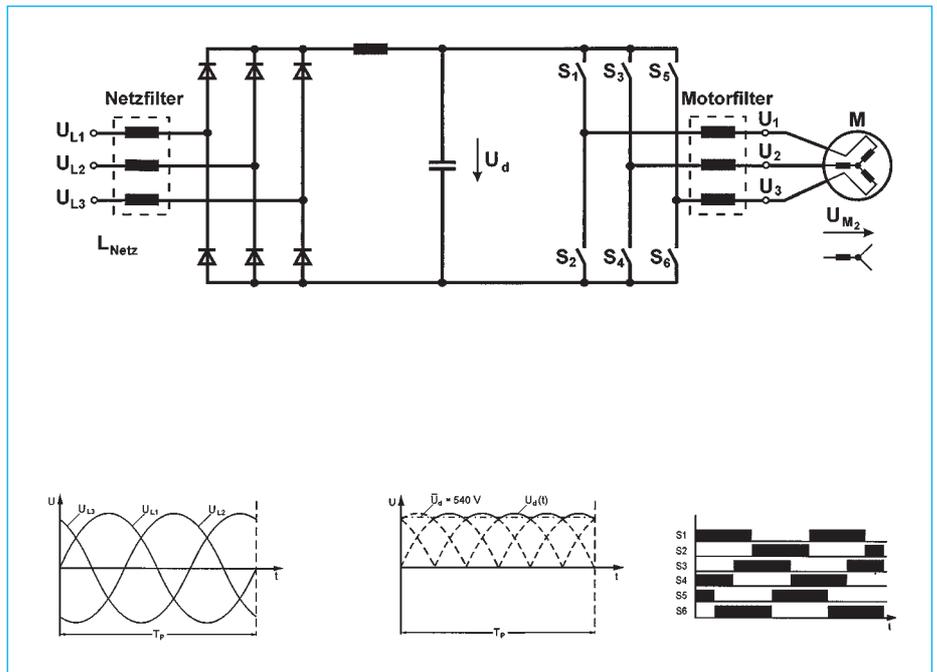


Bild 3 Prinzipschaltbild eines Frequenzumrichters mit Pulsbreitenmodulation

$U_{L1} \dots U_{L3}$ : Netzseitige Phasenspannungen, 50Hz-Netz  
 $U_d$ : Zwischenkreisspannung ( $U_d = \text{const}$ )  
 $S_1 \dots S_6$ : elektronische Leistungsschalter,  $f$  variabel

schwingung geschlossen sind [2]. Die Strangspannungen an den Wicklungen der Maschine haben dann auf Grund der Kombination in der Parallel- und Reihenschaltung von Motorwicklungen treppenförmige Verläufe mit vier verschiedenen Potentialen (Bild 4a).

Um die Grundschwingung der Ausgangsspannung proportional zur Frequenz zu verändern, wird die Ausgangsspannung sinusförmig amplitudenmoduliert. Der Spannungsverlauf setzt sich dann abschnittsweise aus fünf Potentialstufen zusammen (Bild 4b).

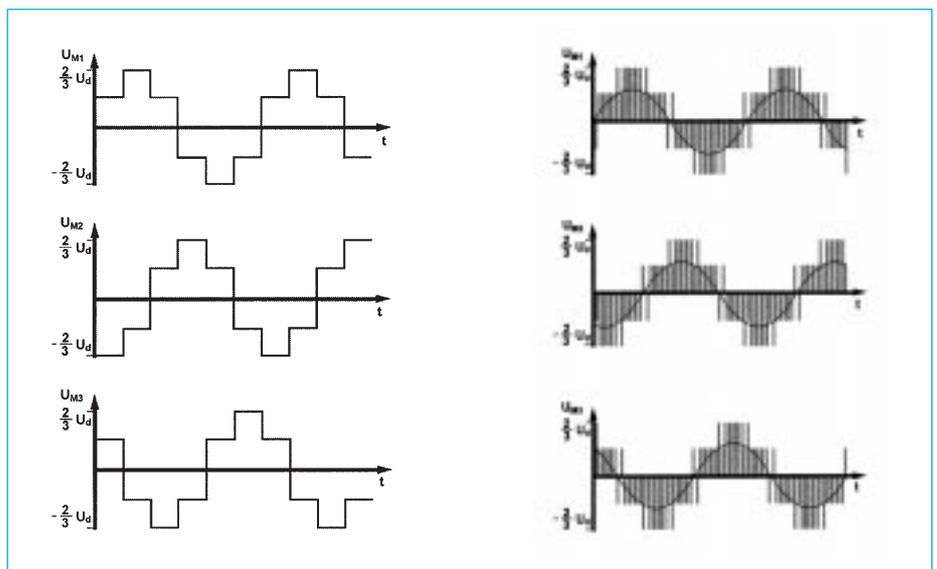


Bild 4 Veränderung der Ausgangsspannung bei Pulswechselrichtern

a) Vollaussteuerung  
 b) Pulsbetrieb  
 $U_{M1} \dots U_M$ : Phasenspannungen an den Motorwicklungen

Dabei ist offensichtlich, daß die Ausgangsspannungen des Wechselrichters sowohl bei Vollaussteuerung (Bild 4a) als auch bei Amplitudenmodulation erhebliche Oberschwingungen aufweisen. Bei Vollaussteuerung beträgt der Klirrfaktor der Spannung ca. 18%! Durch die Streuinduktivitäten der Maschine wird der Zeitverlauf des Stroms der Sinusform zwar näherkommen, er enthält jedoch immer noch erhebliche Oberschwingungsanteile. Nur die Grundschiwingung des Stroms trägt zum Drehmoment bei, die Oberschwingungsströme führen ausschließlich zu Pendelmomenten.

### Verluste bei Pulswechselrichtern und Antrieben

Früher traten in den elektronischen Leistungsschaltern  $S_1 \dots S_6$  sogenannte Schaltverluste auf, die erheblich zur Erwärmung der Thyristoren und Transistoren beitrugen. Heute wird der Potentialwechsel an den Ausgangsklemmen in weniger als einer  $\mu s$  vollzogen, so daß die Schaltverluste äußerst gering sind und mit hohen Pulsfrequenzen von 16 kHz und mehr gearbeitet werden kann.

Damit läßt sich – besonders bei geringen Motordrehzahlen – die Sinusform des Motorstroms wesentlich besser annähern, jedoch führen die schnellen Potentialwechsel in Wechselwirkung mit Kabelkapazitäten und Motorinduktivitäten zu hochfrequenten Schwingungspaketen, die sich wellenförmig über die Leitungen zum Antriebsmotor ausbreiten. Die Schwingungspakete erreichen Spitzenspannungen von typisch 1500 V und können die Isolierung der Ständerwicklung des Motors zerstören, so daß es im Laufe der Zeit zu einem Wicklungsschluß kommt [3]. Bei Motoren mit hoher Isolierfestigkeit genügt ein sogenannter Motorfilter, der zwischen Ausgangsklemmen des Umrichters und Motor geschaltet wird und die Überspannungsspitzen reduziert. Hochwertige Frequenzumformer besitzen bereits eingebaute Motorfilter.

Bei einfachen Normmotoren (z.B. Kondensatorlüftern) muß von einer geringen Isolationsfestigkeit ausgegangen werden. In diesen Fällen ist ein sogenannter Sinusfilter einzubauen, der die Klemmenspannungen der angestrebten Sinusform wesentlich besser annähert.

Von Nachteil sind allerdings die Verluste solcher Filter, denn neben der Erwärmung durch die Lastströme führen die einge-

bauten Induktivitäten zu einem frequenzproportionalen Spannungsverlust, der bei Nennfrequenz typisch 3 % bis 4 % erreicht.

Aufgrund des Gesetzes zur elektromagnetischen Verträglichkeit kann ein Fre-

dichter also um 20 % größer ausgelegt werden, damit die zusätzliche Erwärmung bei Belastung mit Nennmoment nicht zur Überhitzung führt. Dabei ist zu beachten, daß Verdichter in der Kältetechnik gerade

Spannung	Idealer Frequenzumrichter	Realer Frequenzumrichter	Gesamt-Verluste
Eingangsspannung $U_{12}$ (Effektivwert, verkettet)	$U_{12} = 400 \text{ V}$	392 V (nach Netzfilter)	2%
Zwischenkreisspannung $U_d$ (konstant)	$U_d = 3 \sqrt{2} U_{12} / \pi = 540 \text{ V}$	524 V	3%
max. Ausgangsspannung $U_{12}$ (Effektivwert, verkettet)	$U_{12} = \sqrt{6} U_d / \pi = 421 \text{ V}$	395 V (nach Motorfilter)	7%

Tabelle 1 Spannungsverluste bei Frequenzumrichtern

quenzumrichter eingangsseitig in der Regel ebenfalls nicht ohne Filter betrieben werden. Diese Filter sind meist als magnetisch gekoppelte Induktivitäten ausgeführt und reduzieren die Klemmenspannung an den Eingängen gegenüber dem theoretisch möglichen Wert um ca. 2 %.

Ein geringer Spannungsverlust von insgesamt ca. 4 V tritt ferner an den Dioden der Gleichrichterbrücke im Eingang und an den geschalteten Leistungshalbleitern auf.

Die Spannungsverluste führen resultierend zu Aussteuerungsverlusten. Die Nennspannung des Motors wird nur noch knapp erreicht, obwohl die maximale theoretische Ausgangsspannung des Frequenzumformers 5 % höher ist als die Eingangsspannung.

Die Tabelle zeigt damit auch klar, daß die Motorspannung bei übersynchronem Betrieb von Normmotoren mit 400 V/50 Hz konstant bleibt. Der Motor wird dann im Bereich der Feldschwächung betrieben.

Eine Leistungserhöhung von Verdichtern mit Normmotor durch übersynchronen Betrieb ist definitiv nicht möglich.

Die thermischen Verluste von Frequenzumrichtern betragen – je nach Leistungsbereich – 3 % bis 5 % der Nennleistung. Die Verluste der Filter und die Leistungsaufnahme der Schaltschranklüfter sind darin nicht enthalten.

### Verdichter mit Frequenzumrichterspeisung

Der zulässige Frequenzbereich von Normverdichtern beträgt – abhängig vom jeweiligen Hersteller – ca. 30 Hz bis 60 Hz, der normierte Frequenzbereich also 0.6 bis 1.2  $f_N$ . Um den Feldschwächbereich  $f_N$  bis 1.2  $f_N$  ausnutzen zu können, muß der Ver-

dichter im Sommer mit dem höchsten Drehmoment belastet werden, wenn auch die Anlagenleistung ihren Maximalwert erreicht. Eine Reserve ist bei richtiger Anlagenauslegung nicht vorhanden.

Bild 5 zeigt den typischen nutzbaren Stellbereich für einen Verdichter mit Frequenzumrichter.

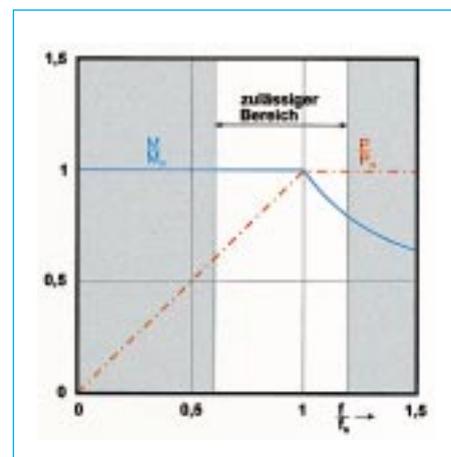


Bild 5 Normiertes Drehmoment  $M/M_N$  und normierte Leistung  $P/P_N$  von Verdichtern als Funktion der normierten Frequenz  $f/f_N$  ( $f_N = 50 \text{ Hz}$ )

Um den Stellbereich weiter auszudehnen, sind entweder weitere Verdichter mit je einem zugehörigen Frequenzumrichter oder zumindest stufig zugeschaltete Verdichter erforderlich.

### Verflüssigerlüfter mit Frequenzumrichterspeisung

Die Lastmomentkennlinie von Lüftern hängt quadratisch von der Drehzahl ab (Bild 2). Der Betrieb von Lüftern im übersynchronen Betrieb scheidet aus, wenn das Lüfterrad auf Nennlast ausgelegt ist. Dafür gibt es keine Einschränkungen im unteren Drehzahlbereich: – Der Stellbereich beträgt 0 ... 100 %  $f_N$ . Da das Lastmoment bei geringeren Drehzahlen quadratisch abnimmt, ist die Bereithaltung des vollen Drehmomentes  $M_N$  unnötig. Zur Energieeinsparung kann bei vielen Frequenzumrichtern eine Feldschwächung programmiert werden, indem die Spannung nicht mehr proportional zur Frequenz ( $U/f = \text{const.}$ ), sondern mit einer quadratischen Kennlinie verläuft ( $U/f^2 = \text{const.}$ ), siehe Bild 6.

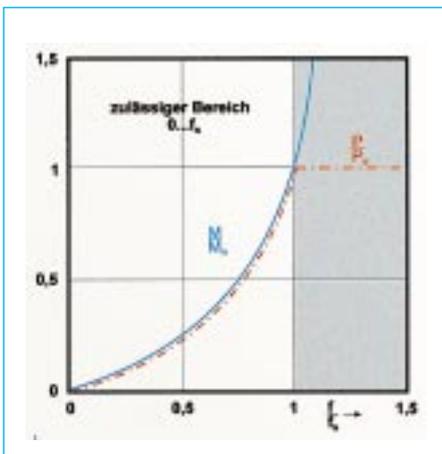


Bild 6 Normierte Leistung  $P/P_N$  eines Frequenzumrichters als Funktion der normierten Frequenz  $f/f_N$  ( $f_N = 50 \text{ Hz}$ ). Quadratische Spannungskennlinie  $U/U_N = f^2 / f_N^2$ .

### Frequenzumrichter mit Feldbus

Handelsübliche Frequenzumrichter besitzen heute standardmäßig einen parametrierbaren PI-Regler, der beispielsweise die Saugdruckregelung übernehmen kann. Mehrere analoge Eingänge lassen unter anderem den direkten Anschluß von Drucksensoren zu. Ferner können spezielle Start- und Stopbedingungen über digitale Eingänge parametrierbar werden, so daß der Frequenzumrichter als eigenständige Funktionseinheit betrieben werden kann. Die Parameterliste kann – je nach Fabrikat – mehr als einhundert Werte enthalten.

Frequenzumrichter können auch von übergeordneten Regelsystemen über analoge Signale, z.B. 0 ... 10 V, angesteuert werden. Will man Istwerte und Zustandsmeldungen oder Störungen aus dem Frequenzumrichter zurücklesen, benötigt man entsprechende analoge und digitale Ausgänge (Bild 7a).

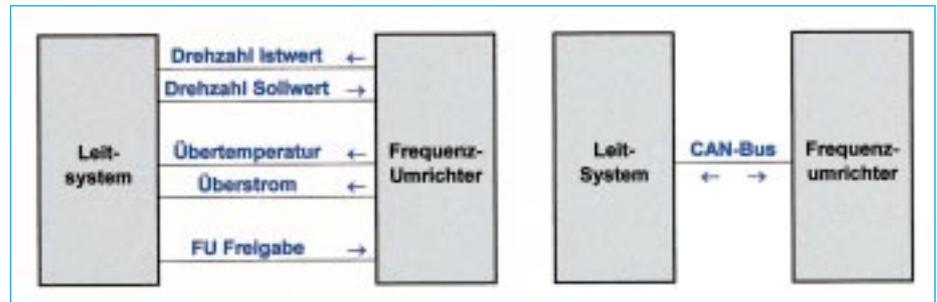


Bild 7 Datenaustausch zwischen Leitsystem und Frequenzumrichter  
a) über digitale und analoge Steuersignale  
b) über Feldbus

Frequenzumrichter moderner Bauart können bereits mit sogenannten Feldbus-Karten bestückt werden, die die Kommunikation mit einem genormten, offengelegten Protokoll gestatten. Neben dem Austausch der Meßgröße, des Sollwertes und einiger Statusinformationen kann der Frequenzumrichter bei entsprechender Programmierung im übergeordneten System sogar vollständig parametrierbar werden (Bild 7b).

### Anlagen mit einem geschalteten und einem stetig steuerbaren Verdichter

Anlagen für die Gewerbekälte wurden aus Kostengründen meist nach dem in Bild 9

gezeichneten Schema gebaut. Die erforderliche Kälteleistung wird mit zwei Normverdichtern bereitgestellt, wobei ein Verdichter von einem Frequenzumrichter gespeist wird. Der Saugdruck wird vom internen PI-Regler des Frequenzumrichters geregelt. Meist besitzen diese Frequenzumrichter auch die erforderliche logische

Verknüpfung, um das Verdichterschütz für den unregelmäßig betriebenen Verdichter zu schalten. Die Verdichter wurden für die folgenden Experimente im Bereich 50% bis 100% der Nennfrequenz betrieben.

Das interne Ausgangssignal des PI-Reglers ist das Stellsignal für die Kombination aus Verdichterschütz und Frequenzumrichter. Aufgrund des eingeschränkten Stellbereiches für den Verdichter ergibt sich die in Bild 10 dargestellte Steuerkennlinie.

Die Steuerkennlinie ist nur abschnittsweise stetig. Im geschlossenen Regelkreis führen Unstetigkeitsstellen in Verbindung mit den zugehörigen Verzögerungszeiten zu einem Totzeitverhalten und damit zu Regelschwingungen hoher Amplitude, die nur durch einen deutlich verminderten

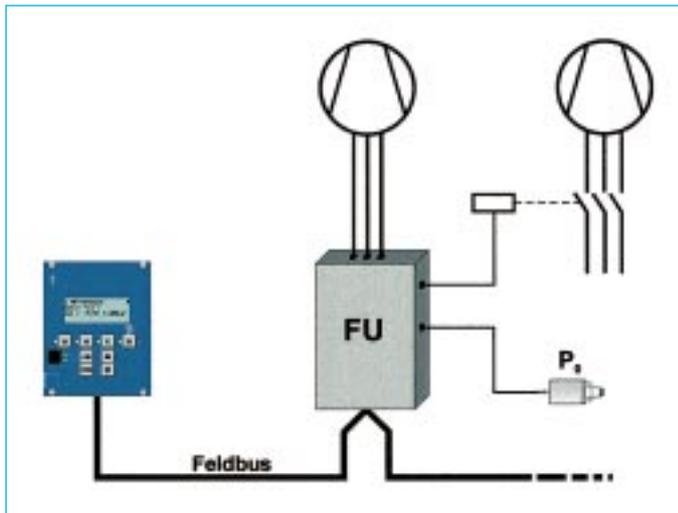
Typ	Bedeutung	Verwendung
Identifizierung	Bestimmt die Priorität der Nachricht und enthält die Geräteadresse	Wird immer zu Beginn des Telegramms gesendet, um die folgenden Daten zu definieren
Initialisierung	Nutzdaten dienen zum Aufbau der Kommunikation über den CAN-Bus	z.B.: Antrieb vom Datenverkehr am Bus an- oder abkoppeln
Parametrierung (SDO = Service Data Object)	Nutzdaten dienen zum Parametrieren des FU. Beispiel: Hochlaufzeit	Einzelne Parameter aus Frequenzumrichter auslesen oder neu beschreiben
Prozeßdaten (PDO = Process Data Object)	Nutzdaten dienen zum schnellen Austausch von oft zyklischen Informationen	z.B.: Ist- und Sollwert der Drehzahl zyklisch auslesen

Tabelle 2 Beispiel für den Datenaustausch über CANopen



Bild 8 Vereinfachter Aufbau eines CAN-Telegramms

Bild 9 Beispiel für eine Verbundanlage mit einem geschalteten und einem über Frequenzumrichter stetig geführten Verdichter. Regelung über einen im Frequenzumrichter integrierten PI-Regler. Datenaustausch über Feldbusssystem



bundanlage typisch im Bereich 25% bis 100% stetig variieren. Die Übergabe bei 50% Gesamt-Stellsignal von FU1 mit 100% durch Zurücksteuern von FU1 auf 50% und Starten von FU2 mit 50% gestattet einen nahezu kontinuierlichen Betrieb ohne Störgrößen für die Saugdruckregelung. Wenn die Kälteleistung innerhalb des stetigen Stellbereiches variiert, werden gute Regeleigenschaften erreicht (Bild 13).

### Betrachtungen zum Energieverbrauch

Konventionell gebaute Verbundanlagen, bei denen die Leistung durch stufiges Schalten der Verdichter variiert wird, sind heute weitgehend mit Regelsystemen ausgestattet, die zumindest eine Sollwertführung des Saugdrucks gestatten. Der Saugdruck-Sollwert wird dann nach der

Proportionalanteil vermieden werden können [4]. Der geringe p-Anteil läßt jedoch das schnelle Ausregeln von Saugdruckänderungen nicht mehr zu, so daß das Ergebnis enttäuschend ist (Bild 11).

Mit zwei Frequenzumrichtern, die nach der oben gezeichneten Kennlinie gesteuert werden, kann die Kälteleistung der Ver-

Der Arbeitsbereich der Kälteanlage liegt hier im Bereich 50 % bis 90 % der bereitgestellten Kälteleistung. Der Grundlastverdichter schaltet im vorliegenden Beispiel noch nicht zurück, jedoch kommt es häufig zu einem schnellen Zurückfahren des stetig gesteuerten Verdichters. Der Saugdruck sinkt in diesen Zeitabschnitten stark und führt zu Pendelungen der Expansionsventile. In den restlichen Zeitabschnitten treten starke Regelschwankungen aufgrund des eher kleinen Proportionalanteils auf.

Die den Frequenzumrichtern zugesprochenen Energieeinsparungen sind deshalb bei dieser Betriebsart nicht zu erwarten.

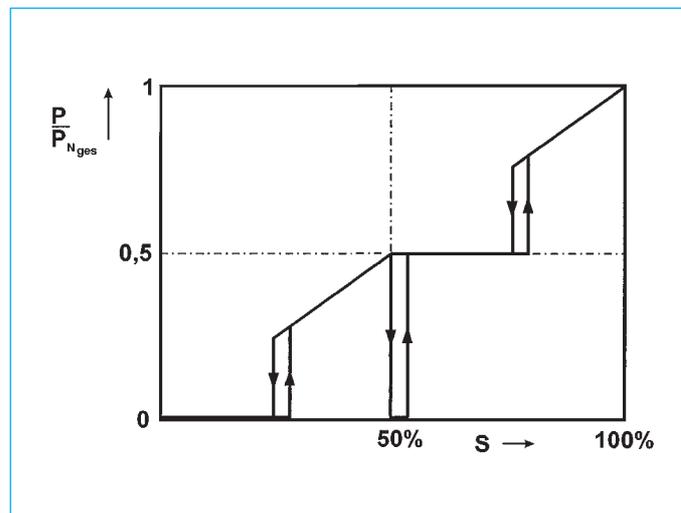


Bild 10 Steuerkennlinie  $P/P_{Nges} = f(s)$  für die normierte Kälteleistung einer Verbundanlage mit einem geschalteten und einem im Bereich  $0,5 f_N \dots f_N$  stetig geführten Verdichter ( $T_0$  und  $T_C$  konstant)

### Anlagen mit zwei stetig steuerbaren Verdichtern

Zur Verbesserung der Regeleigenschaften können beide Verdichter mit je einem Frequenzumrichter gespeist werden. Ein FU übernimmt dabei die Saugdruck-Regelung und steuert über einen zweiten 0 ... 10 V-Ausgang den als Folgesystem angekoppelten FU. Die Steuerkennlinie zeigt Bild 12.

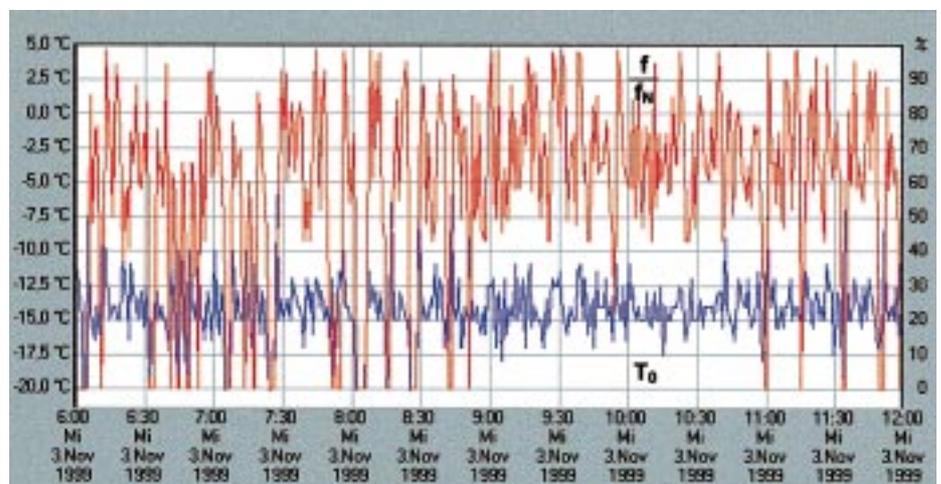


Bild 11 Über Feldbus erfaßte Meßgrößen Verdampfung  $T_0$  und normierte Steuerfrequenz  $f/f_N$  einer Verbundanlage mit einem geschalteten und einem im Bereich 50 % ... 100 % stetig steuerbaren Verdichter

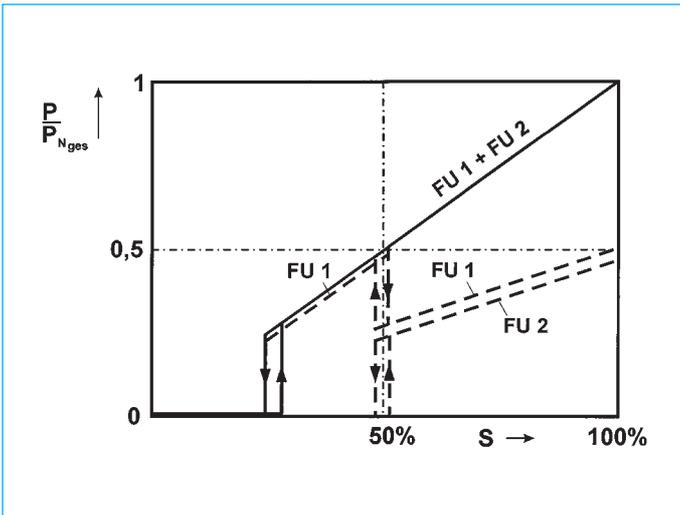


Bild 12 Steuerkennlinie für die normierte Kälteleistung  $P/P_{Nges}$  einer Verbundanlage mit zwei im Bereich  $0,5 f_N \dots f_N$  stetig geführten Verdichtern ( $T_0, T_C$  konstant)

Auch die Abtauphasen, deren Gesamtdauer mehrere Stunden pro Tag betragen können, werden als Störgrößen zusätzliche Schaltvorgänge auslösen.

Die Meßwerte aus Bild 13, verglichen mit denen aus Bild 11, bestätigen diese Überlegungen eindrucksvoll: Ist eine stetige Steuerkennlinie mit weitem Stellbereich realisiert, sind äußerst gleichmäßige Verläufe des Saugdrucks möglich und damit die erwarteten günstigen Eigenschaften auf die Verdampferfüllung.

Allerdings stehen diesen Ergebnissen deutlich höhere Investitionskosten für den zweiten Frequenzrichter gegenüber.

Bei stetig drehzahlregulierten Kondensatorlüftern fällt die Antwort eindeutig aus: Da der Stellbereich  $0 \dots 100\%$  beträgt und die Kondensatorlüfter parallel an einem Frequenzrichter betrieben werden können, sind regelungstechnisch und energetisch optimale Bedingungen möglich. Wird am Frequenzrichter noch die quadratische Abhängigkeit der Motorspannung von der Antriebsfrequenz gewählt,

Umgebungstemperatur in der Kühlzone oder – besser noch – nach der Raumluftenthalpie gesteuert [5].

Im Teillastbereich können damit erheblich höhere Verdampfungstemperaturen in den Kühlmöbeln eingestellt werden, so daß damit Energieeinsparungen in der Größenordnung von über 10 % erreicht werden. Darauf muß bei den derzeit erhältlichen Standard-Frequenzrichtern verzichtet werden.

Stufig geschaltete Verdichter können sehr wirtschaftlich betrieben werden, da im Stillstand ja keine Leistung aufgenommen wird. Der Frequenzrichter hat im Vergleich dazu zusätzliche Verluste durch Eigenerwärmung und durch Netz- und Motorfilter. Auch die verstärkte Schaltschrankbelüftung führt zu einem höheren Energieverbrauch.

Verdichtern mit Frequenzrichter- speisung werden dennoch deutliche Vorteile beim Energieverbrauch von Kälteanlagen zugesprochen. Dies liegt im wesentlichen an den günstigen Betriebsbedingungen für die Expansionsventile und damit für die Verdampferfüllung, wenn der Saugdruck nicht mehr die typischen Schwankungen der stufig geschalteten Anlagen aufweist, sondern weitgehend konstant gehalten werden kann. Dieser Vorteil ist besonders wichtig, wenn der Verdichter lediglich auf einen oder zwei Verdampfer wirkt. Eine konventionelle Verbundanlage mit Saugdruckregelung ist bei diesen Lastbedingungen kaum stabil zu betreiben.

Die zuvor dargestellten Betriebsergebnisse haben aber gezeigt, daß abschnittsweise stetige Steuerkennlinien zu häufigen Schaltvorgängen mit der gleichen nachteil-

gen Wirkung auf den Saugdruck und damit auf die Expansionsventile führen, wenn der Arbeitspunkt in der Umgebung der Unstetigkeitsstelle liegt. Bei Gewerkekälteanlagen – insbesondere bei Super-

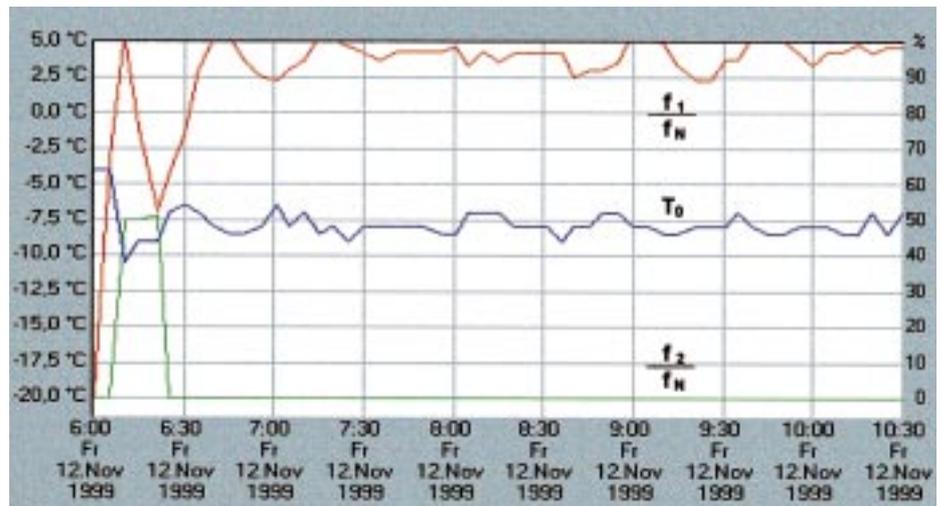


Bild 13 Über Feldbus erfaßte Meßgrößen Verdampfung  $T_0$  und normierte Steuerfrequenzen  $f_1/f_N$  und  $f_2/f_N$  von zwei FU-gepeisten Verdichtern einer Verbundanlage mit einem Stellbereich von je  $50\% \dots 100\%$

märkten – sind Arbeitspunkte im Bereich von 50 % der maximalen Kälteleistung wesentlich häufiger anzutreffen, als Zeitpunkte unter hoher Last.

Eine stabile Saugdruckregelung wird nun zusätzlich dadurch erschwert, daß die thermostatisch geregelten Kühlstellen mehrmals pro Stunde schalten. Bereits bei 10 Kühlstellen werden sich Massenstromänderungen statistisch im Minutenabstand ergeben, die der Frequenzrichter ausregeln muß. Bei großen Kühlstellen führen diese Massenstromänderungen immer zum Überschreiten der Umschaltsschwelle, so daß sich die gleichen Nachteile wie bei stufig geschalteten Verdichtern ergeben.

können die Motorverluste wesentlich reduziert werden, auch speziell im Vergleich zur Drehzahlveränderung über die Steuerung der Motorspannung.

Als Regelverfahren kann ohne Bedenken eine PI-Regelung auf einen definierten Kondensationsdruck-Sollwert mit dem eingebauten PI-Regler realisiert werden. Wenn im Winter jedoch bei tieferen Sollwerten kondensiert werden soll, bietet sich eine Sollwertführung durch ein übergeordnetes System an, wie im nächsten Abschnitt beschrieben.

## Neue Wege in der Regelung von Kälteanlagen mit Frequenzumrichtern und Feldbus-Vernetzung

In den vorangegangenen Beispielen wurde der Feldbus lediglich zur Freigabe der Frequenzumrichter und zur schnellen Signalerfassung verwendet. Die eigentlichen Regelfunktionen der Verbundanlagenleistung wurden durch die im Frequenzumrichter enthaltenen Standard-Regler realisiert und ließen keine der bekannten Optimierungsstrategien zu.

Neue Wege in der Regelung von Kälteanlagen mit Frequenzumrichtern können besprochen werden, wenn die Frequenzumrichter nur als Stellglieder benutzt werden und die Kälteanlage durch ein übergeordnetes Regel- und Überwachungssystem koordiniert betrieben wird. Voraussetzung für solche Regelstrategien sind schnelle Datenpakete, so daß das übergeordnete System die Regelungsaufgaben selbst erfüllen kann. In der Automatisierungstechnik haben sich im wesentlichen zwei Bussysteme durchgesetzt, die die Anforderungen an solche Echtzeit-Regelsysteme erfüllen:

- der von Siemens entwickelte Profi-Bus und
- der ursprünglich für die Automobiltechnik entwickelte CAN-Bus.

Der CAN-Bus bietet mit seinem offengelegten Protokoll CANopen deutlich günstigere Kosten für Hard- und Software, so daß der zunehmende Einsatz im Bereich automatisierter Gewerbekälteanlagen zu erwarten ist.

In Bild 14 ist eine Kälteanlage mit hohem Automatisierungsgrad und einer übergeordneten Regelstrategie dargestellt. Die Verbundanlage ist a) mit zwei Verdichtern aufgebaut, deren Drehzahlen getrennt einstellbar sind und b) mit stetig geregelten Kondensatorlüftern, die parallel am Ausgang eines Frequenzumrichters angeschlossen sind.

Wenn die Regelung im übergeordneten System erfolgt, das durch den schnellen Datenaustausch über Feldbus die Einschaltdauer, die Temperaturen und die Schaltzeitpunkte der Kühlstellen kennt, bietet sich eine Regelstrategie mit möglichst hohem Saugdruck an. Dann kann für

die Verdichter der jeweils energetisch beste Arbeitspunkt eingestellt werden. Auch die überlappenden Steuerbereiche der beiden Frequenzumrichter können im übergeordneten System realisiert und optimiert werden.

Eine weitere Verbesserung der Regeleigenschaften und ein günstigerer Energieverbrauch werden erreicht, wenn die Magnetventile der Kühlstellen nicht mehr thermostatisch, sondern nach einem zuvor optimierten Zeitplan angesteuert werden. Durch Kombinieren der einzuschaltenden Magnetventile unter Berücksichtigung der

Werden aus Kostengründen Verbundanlagen ausgewählt, bei denen nur ein Verdichter stetig steuerbar ist, kommt der Steuerkennlinie eine zentrale Bedeutung zu: Liegen die Arbeitspunkte häufig in der Umgebung des Umschaltpunktes auf den unregelmäßig Verdichter, so stellen sich ähnlich ungünstige Saugdruckverläufe ein, wie sie bei konventionellen Verbundanlagen mit beispielsweise drei geschalteten Kompressoren bekannt sind.

Bei Anlagen mit mindestens zwei jeweils stetig steuerbaren Verdichtern können gute Regeleigenschaften mit in Folge

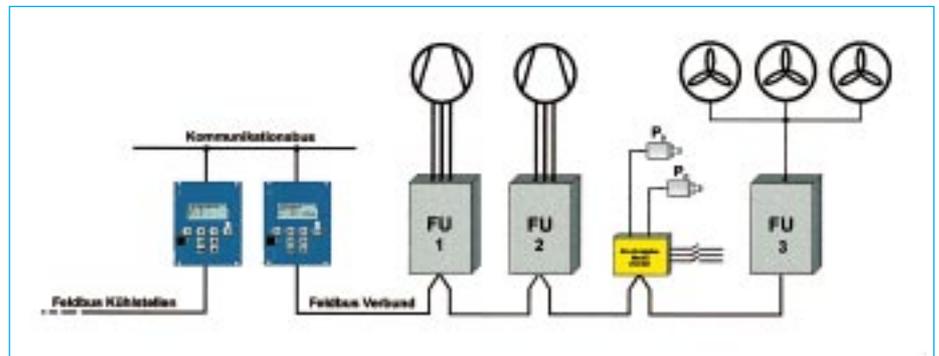


Bild 14 Beispiel für eine über Feldbus vernetzte Gewerbekälteanlage mit übergeordneter Echtzeit-Regelung und -optimierung

jeweiligen Kühlstellentemperatur kann der Kältemittelmassenstrom so beeinflusst werden, daß sich die Regeleigenschaften weiter erheblich verbessern. Dieses Verfahren führt bereits bei stufig geschalteten Verdichtern zu deutlich reduzierten Energiekosten [6].

Für die Kondensatorlüfter ist eine Regelstrategie mit möglichst tiefer, jedoch nach unten begrenzter Kondensationstemperatur anzustreben. Dazu kann die vom übergeordneten System ohnehin erfaßte Außentemperatur herangezogen werden.

## Zusammenfassung

Um Norm-Verdichter mit Frequenzumrichtern zu betreiben, sind das Verständnis für die physikalischen Vorgänge und die sorgfältige Auslegung unter der Berücksichtigung der Mindest-Frequenz und des Feldschwähebereiches zwingend erforderlich, da Verdichter typisch nur im Bereich von ca. 60 % bis 100 % der Nenn-drehzahl mit dem Nenn-Drehmoment betrieben werden können. Auch die Wirkung der erforderlichen Netz- und Motorfilter muß berücksichtigt werden.

Durch Feldbus-Vernetzung von Frequenzumrichtern mit einem übergeordneten System konnten folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

niedrigem Energieverbrauch durch gute Verdampferfüllung erwartet werden.

Kondensatorlüfter, die über Frequenzumrichter gespeist werden, können im Drehzahlbereich  $0...100\% f_N$  stetig geregelt werden, wobei sich durch eine quadratische Spannungs-/Frequenzkennlinie besonders geringe Energiekosten erzielen lassen.

In Zukunft sind Automatisierungslösungen zu erwarten, die Verdichter und Verflüssigerlüfter regeltechnisch in ein Gesamtkonzept einbinden. Zur Realisierung solcher Konzepte ist ein Feldbus mit Echtzeit-Eigenschaften auszuwählen. □

## Literatur

- [1] Eckhardt, H.: Grundzüge elektrischer Maschinen. Verlag B.G. Teubner, Stuttgart, 1982
- [2] Heumann, K., Stumpe, A.: Thyristoren. Verlag B.G. Teubner, Stuttgart, 1974
- [3] Unbehauen, J.: Verbessertes Zusammenspiel zwischen Frequenzumrichter und Motoren. Das Danfoss Journal, 2-1994
- [4] Reuter, M.: Regelungstechnik für Ingenieure. Vieweg-Verlag, Braunschweig, 1986.
- [5] Wurm, H. P.: Ein neues Verfahren zur Temperaturregelung in Gewerbekälteanlagen mit Kälte-träger-system. KI Luft- und Kältetechnik, Heft 6/1997, Seite 262. C.F. Müller Verlag, Hüthig GmbH, Heidelberg.
- [6] Bänfer, C., Holzhäuser, E.: Discpack2 Systemlösungen für kleine Supermärkte unter Berücksichtigung von Ökologie und Investition. DKV-Tagungsbericht, Band III, Seite 169, Berlin, 1999.