

Drehzahlgeregelte Schraubenkompressoren mit Elektroantrieb

Dr.-Ing. **H. Rausch**, Dipl.-Ing. **K. Wolters**, Mönchengladbach, und Dr.-Ing. **R. Schüler**, Simmern

1. Einleitung

In der letzten Zeit liest man in Fachpublikationen und Zeitschriften für Anwender von Schraubenverdichteranlagen immer mehr von neuen Regelkonzepten. Steigende Anforderungen an die Konstanz des Druckes in den Druckluftnetzen bei speziellen Anwendern sowie Wirtschaftlichkeitsgedanken führen zu einer Veränderung der Regelphilosophie. Damit ist unter anderem ein stärkeres Nachdenken über Kompressoranlagen mit drehzahlgeregelten Antrieben verbunden. Was bei fahrbaren Kompressoren mit Dieselmotor schon weit verbreitet ist, beginnt sich im stationären Bereich erst langsam durchzusetzen. In diesem Vortrag sollen die speziellen Eigenheiten der Drehzahlverstellung bzw. Drehzahlregelung bei Schraubenverdichteranlagen aufgezeigt werden.

2. Regelung von Schraubenverdichteranlagen

Eine Schraubenverdichteranlage ist in der Regel auf einen Nennvolumenstrom ausgelegt, der aber in den seltensten Fällen vom Netz des Betreibers in exakt der gleichen Größe abgenommen wird. Das bedeutet, daß der momentan abgegebene Volumenstrom durch einen Regelmechanismus an die Netzbedingungen angepaßt werden muß.

Die einfachste Art einer Volumenstromregelung zur Anpassung der Kompressoranlage an die Erfordernisse des Betreiber-netzes ist die weit verbreitete Zwei-Punkt-Regelung. Der Verdichter geht in den Leerlauf, wenn der Druck einen oberen Schalterpunkt überschreitet. Bei Unterschreiten eines unteren Schalterpunktes wird der Lastlauf wieder aufgenommen. Zusätzlich kann bei längeren Leerlaufphasen die Anlage komplett abgeschaltet werden, sofern die zulässige Einschalthäufigkeit des Motors dies gestattet. Bei dieser Art der Regelung

ist immer ein Pufferbehälter notwendig, dessen Größe sich nach der gewünschten Schalthysterese und damit nach den zulässigen Netzdruckschwankungen richtet. Sind solche Netzdruckschwankungen nicht erwünscht, gibt es weitere Möglichkeiten der kontinuierlichen Regelung:

- Saugseitige Drosselung

Hier können mit vertretbaren Wirkungsgraden nur kleinere Regeleingriffe (bis ca 80 % des Nennvolumenstroms) ausgeführt werden, da bei kleineren Volumenströmen das Druckverhältnis der Stufe unzulässig ansteigt und dann die Leistungsaufnahme in diesem Betriebspunkt relativ zu hoch ist.

- Saugseitige Volumenstromregelung durch Steuerschieber

Hier wird das Ansaugvolumen durch einen saugseitig angeordneten Steuerschieber verändert. Wenn nicht auch gleichzeitig die druckseitigen Steuerkanten verändert werden, wie bei Kälteverdichtern üblich, muß auch hier mit Wirkungsgradeinbußen gerechnet werden. Zudem verhindert die spezielle Geometrie der Schraubenmaschine einen zu großen Regelbereich.

- Drehzahlregelung

Bei dieser Regelungsart erhält man die besten Wirkungsgrade kontinuierlich über den gesamten Betriebsbereich der Stufe, so daß sich bei öleingespritzten Schraubenverdichtern ein Regelbereich von ca 15-50 m/s, also ein Volumenstrombereich von ca. 30%-100% ergibt. Allen Regelkonzepten mit kontinuierlicher Regelung ist gemeinsam, daß im Wirkungsbereich der Regelung keine großen Druckschwankungen entstehen können, weil eine gute Anpassung des geförderten Volumenstroms an den Volumenstrombedarf erreicht werden kann. Die Höhe der Druckschwankungen hängt nur noch von der Güte der jeweiligen Regeleinrichtung ab.

Dabei wird durch den kontinuierlichen Betrieb die Verdichterstufe und die Gesamtanlage deutlich weniger belastet, weil auch im Durchlaufbetrieb mit verminderter Drehzahl die Schmierölversorgung ständig aufrechterhalten wird und Anfahrvorgänge mit Ausnahme ausgesprochener Schwachlastzeiten, in denen auch ein geregelter Verdichter abschaltet, weitgehend wegfallen.

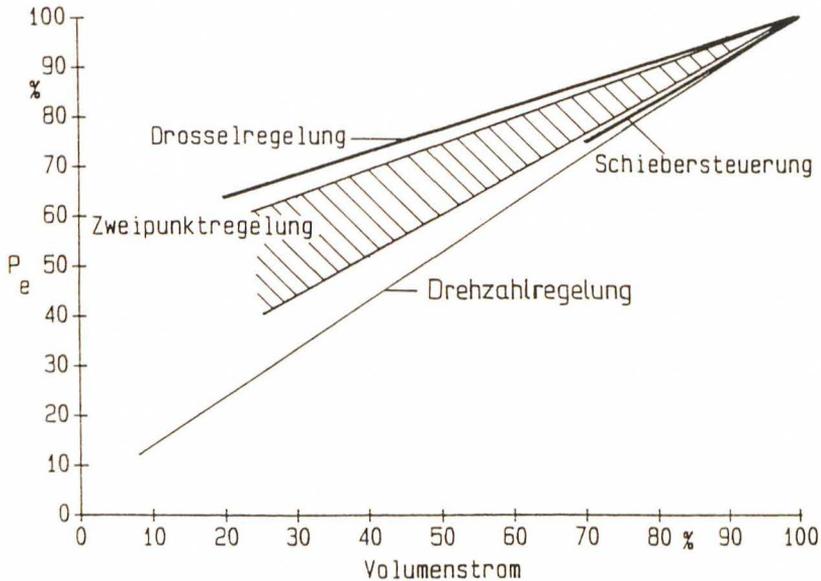


Bild 1 : Verhalten verschiedener Regelkonzepte für Schraubenverdichteranlagen

Bei der Betrachtung von Bild 1 erkennt man, daß die Drehzahlregelung offenbar die Betriebsweise mit den besten erreichbaren Wirkungsgraden darstellt, d.h., daß aus der Sicht der laufenden Betriebskosten bei Anlagen mit stark schwankendem Verbrauch oder hohen Anforderungen an die Druckkonstanz der drehzahlgeregelte Antrieb ein gewisses Optimum darstellt.

3. Möglichkeiten der Drehzahlverstellung

Neben der stufenlosen Drehzahlverstellung durch Antrieb mit Dieselmotoren gibt es noch die Möglichkeit der Drehzahlregelung durch mechanische Verstellgetriebe, die hier aber nicht behandelt werden sollen und durch die Verwendung elektrischer Antriebe, die Thema dieses Vortrags sein sollen.

Die Festlegung der zweckmäßigsten Antriebslösung setzt heute detaillierte Kenntnisse der Komponenten sowie ihrem Zusammenwirken voraus.

3.1 Der Gleichstromantrieb

Der älteste und in der Drehzahl veränderbare Elektroantrieb ist der Gleichstrommotor. Wird seine Speisespannung verändert, so verändert sich auch seine Drehzahl. Die Entwicklung einer immer leistungsfähiger werdenden Elektronik gestattete den Bau von statischen Stellgliedern, welche ohne verschleißbehaftete Mechanik die Netzwechselspannung in veränderbare Gleichspannungen umwandelt. In Verbindung mit dieser Technik ließen sich nun relativ kostengünstige, drehzahlveränderbare Elektroantriebe realisieren. Der Gleichstrommotor ist mechanisch relativ aufwendig und ist mit seinen Bürsten und seinem Kommutator entsprechend wartungsbedürftig. Ferner sind höhere Schutzarten (z.B. IP54) nur mit platzraubenden Zusatzanbauten realisierbar (z.B. Wärmetauscher).

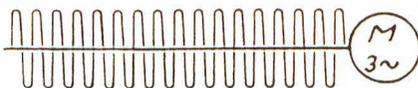
3.2 Der Drehstromantrieb

In stationären Kompressoranlagen ist seit langem der robuste und nahezu wartungsfreie Drehstrom-Käfigläufermotor als Elektroantrieb weit verbreitet. Hauptsächlich wird hierbei der Motor bestenfalls durch ein Umschalten der Wicklung in festen Drehzahlstufen betrieben. Andere Drehstrom-Maschinenbauarten haben hier keine wirtschaftliche Bedeutung. Eine verlustarme, kontinuierliche Drehzahlverstellung erfordert eine Speisespannung mit variabler Frequenz. Heute stehen serienmäßig gefertigte elektrische Geräte zur Umwandlung von

Spannungen bzw. Strömen mit variablen Frequenzen zur Verfügung, wobei die Frequenz lückenlos von nahe Null bis weit über den Nennwert der Netzfrequenz hinaus verstellt werden kann. Im allgemeinen Sprachgebrauch hat sich für diese Geräte der Begriff "Frequenzumrichter" (oder einfach "Umrichter") durchgesetzt.

3.2.1 Frequenzumrichter

Frequenzumrichter sind Geräte, welche die elektrischen Wechselgrößen des Netzes, die nur mit fester Frequenz zur Verfügung stehen, umwandeln in ein Drehstromsystem mit variabler Frequenz. Hierzu ist keine verschleißbehaftete Mechanik mehr erforderlich. Bild 2 deutet die grundsätzlichen Zusammenhänge an.



Maschine am Netz: Drehzahl konstant



Maschine am Umrichter: Drehzahl steuerbar

Bild 2 : Steuerung der Antriebsdrehzahl durch Umrichter

Frequenzumrichter werden im wesentlichen als spannungs- oder stromeinprägende Systeme ausgeführt. Es haben sich entsprechend die Begriffe U- bzw. I- Umrichter ("U" für Spannung und "I" für Strom) eingebürgert.

Spannungseinprägende Frequenzumrichter liefern eine fest der Ausgangsfrequenz zugeordnete Ausgangsspannung. Somit bildet sich der Strom im Motor entsprechend den Lastverhältnissen frei aus. Demgegenüber regeln stromeinprägende Frequenzumrichter den Ausgangsstrom für den angeschlossenen Motor im-

	Spannungseinprägende Umrichter		Stromeinprägende Umrichter
	mit variabler Zwischenkreis-spannung	mit konstanter Zwischenkreis-spannung Pulsurrichter	mit variablem Zwischenkreis-strom
<p>Übersichtsschaltplan</p> <p>Steuerung von:</p> <p>U_d --> Zwischenkreis Spg.</p> <p>I_d --> Zwischenkreisstrom</p> <p>f --> Ausgangsfrequenz</p> <p>U --> Ausgangsspannung</p>			
<p>Typischer Verlauf von:</p> <p>Ausgangsspannung</p>			
<p>Ausgangsstrom</p>			

Bild 3 : Gegenüberstellung verschiedener Umrichter-systeme mit ihren Ausgangsgrößen

mer so, daß er den augenblicklichen Lastverhältnissen entspricht. Damit bildet sich die Amplitude der Spannung im Motor frei aus. Bild 3 gibt einen Überblick auf die heute üblichen Umrichtersysteme mit ihren Ausgangsspannungen und Ausgangsströmen.

3.2.2 Aufbau der Frequenzumrichter

In ihrem Leistungsteil bestehen Frequenzumrichter aus einem Netzstromrichter (Gleichrichter), einem Zwischenkreis und dem Motorstromrichter (Wechselrichter). Die Eingangsspannung wird im Netzstromrichter gleichgerichtet, im Zwischenkreis von Oberschwingungsanteilen weitestgehend befreit ("geglättet") und im Motorstromrichter wieder in ein Drehstromsystem mit variabler Frequenz (und Amplitude) umgewandelt. Diesem Leistungsteil zugeordnet ist eine Steuer-, Melde- und Überwachungslogik.

3.3 Auswahlkriterien bei U- und I-Umrichtern

Die Antwort auf die Frage nach dem richtigen Umrichtersystem bei stationären Kompressorstationen hängt stark von den Anlagegegebenheiten ab.

3.3.1 Einsatzkriterien bei U-Umrichtern:

Spannungseinprägende Umrichter sind unabhängig von einer Last, d.h. sie sind leerlauffest. Diese Eigenschaft bedeutet andererseits auch, daß am U-Umrichter sowohl einer als auch mehrere Motoren betrieben werden können. Genauer gesagt, während des Betriebs können Motoren zu- und abgeschaltet werden, solange durch die Schalthandlungen (Motoranlaufströme usw.) oder durch die Summe der Motorströme der maximale Ausgangsstrom des Gerätes nicht überschritten wird. 20-50% Überlastung für 30-60 sec. ist heute bei den meisten Geräten möglich.

Umrichter dieses Systems können in der Regel ohne Anpassung an den Motor in Betrieb genommen werden. Meist genügt die Justage einiger Betriebsparameter, wie Hoch- und Ablaufzeiten, Spannungsgrenzwerte für den Anlauf und evtl. Minimal- und Maximalfrequenzgrenzen. Diese Werte können problemlos vom Anwender nach Angaben aus der Betriebsanleitung selbst eingestellt bzw. verändert werden.

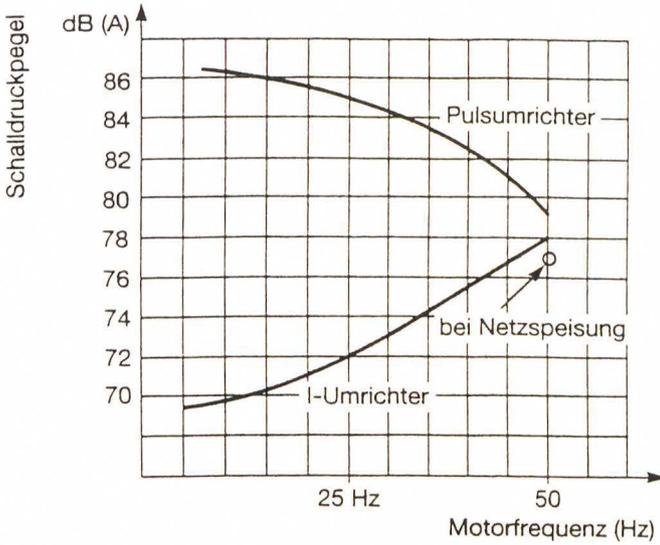
Mit U-Umrichtern sind Ausgangsfrequenzen bis in den Kilohertzbereich möglich. Sie eignen sich daher auch gut für Antriebe mit hohen Drehzahlen.

3.3.2 Betriebseigenschaften des I-Umrichters:

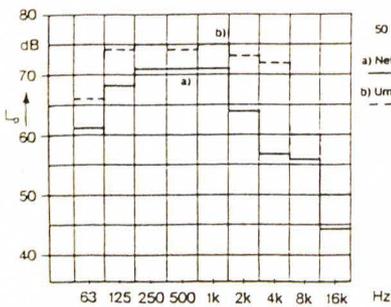
Stromeinprägende Umrichter beziehen den angeschlossenen Motor in ihren Funktionsvorgang mit ein, daher sind diese Geräte nicht leerlauffest und benötigen in der Regel immer die motorische Last, für die sie ausgelegt sind. Es sind typische Einzelmotorenantriebe. Mehrmotorenantriebe (auch mit unterschiedlichen Leistungen und Lasten) sind realisierbar, diese dürfen aber nur in engen Grenzen zu- oder abgeschaltet werden. Im Herstellerwerk werden diese Umrichter auf den Motor abgestimmt. 20-50% Überlastung während 30-60 sec. ist heute bei den meisten Geräten möglich.

Da der Ausgangsstrom dieses Systems regeltechnisch beeinflusst und begrenzt wird, sind diese Geräte ohne besonderen Aufwand kurzschlußfest.

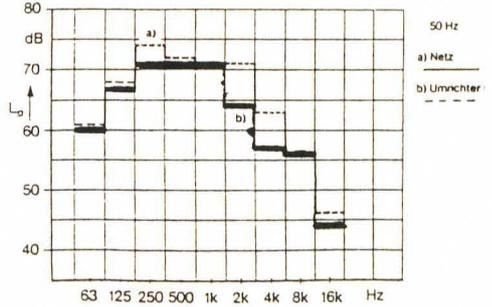
Die unteren Betriebsfrequenzen liegen bei 5 bis 7Hz. Dies wird durch die im Motor entstehenden Pendelmomente bestimmt. Durch geeignete Einstellungen des Umrichteranlaufs auf die Arbeitsmaschine können die Anlaufpendelmomente eliminiert werden. Einige I-Umrichter pulsen den Strom im unteren Frequenzbereich und gestatten damit auch einen Betrieb mit besonders niedrigen Drehzahlen. Systembedingt liegt die obere Ausgangsfrequenz bei ca. 100 Hz (höhere Frequenzen bis ca. 200 Hz, nur mit Sonderkonstruktion), so daß mit 2-poligen Motoren obere Drehzahlen von etwa 6000 (12000) Umdrehungen pro Minute erreichbar sind.



Typ. A-bewerteter Schalldruckpegelverlauf eines 75 kW-Motors am U-Puls- und am I-Umrichter gemessen in 1 m Abstand.



U-Pulsrichterspeisung



I-Umrichterspeisung

Bild 6 : Typ. Oktavbandanalyse eines 75 kW-Motors im 50 Hz-Betriebspunkt
Vergleich: Netz- und Umrichterbetrieb

Tabelle 1 - Antriebe für stationäre Kompressoranlagen

Technische Auswahlkriterien	Bewertungsstufen					B e m e r k u n g e n		
	< - günstig + >					Gleichstromantrieb (⊖)	Drehstromkäfigläufermotor mit	
	1	2	3	4	5		U-Pulsumrichter (=)	I-Umrichter (■)
Einzelmotorenantrieb					⊖■=	Antriebsleistung ca. 50-500 kW bis ca. 500V	Antriebsleistung ca. 50-800 kW bis ca. 660 V	Antriebsleistung ca. 50-1500 kW bis ca. 1 kV
Mehrmotorenantrieb	⊖■				=	Gleichstromregelgerät speist mehrere Motoren, die einzeln oder in Gruppen zu-u.ab-schaltbar sind	Drehstromregelgerät speist mehrere Motoren, die einzeln oder in Gruppen zu-u.ab-schaltbar sind	möglich, jedoch Motoren nicht zu- und abschaltbar
max. Drehzahl			■	⊖	=	ca. 4.000 U/min. begrenzt durch mech. Festigkeit des Kommutators	12.000/min (24.000/min bis 1 MW)	ca. 6.000 U/min (12.000 U/min bis ca. 500 kW)
min. Drehzahl		■			⊖ =	< 500 U/min	< 500 U/min	< 500 U/min
Anlaufmoment			■	=	⊖	bis 1,5-fach	bis 1,2-fach	bis 1,0-fach
Überlastfähigkeit			⊖	■=		bis 1,1-fach für 60 sec.	bis 1,5-fach für 60 sec.	bis 1,2-fach für 60 sec.
Motor-Platzbedarf	⊖			■=	⊖	Stufe 2 für IP54 Stufe 5 für IP23	abhängig vom Drehmoment	abhängig vom Drehmoment
Motor-Schutzart	⊖		⊖		■=	Stufe 2 für IP54 Stufe 4 für IP23	möglich bis Ex-Schutz	möglich bis Ex-Schutz
Motor-Geräusch		=		⊖■		mechan. Geräusch der Bürsten am Kommutator besonders bei höheren Drehzahlen	siehe Bild 5	siehe Bild 5

Tabelle 2 - Antriebe für stationäre Kompressoranlagen

Wirtschaftliche Auswahlkriterien	Bewertungsstufen					B e m e r k u n g e n		
	< - günstig + >					Gleichstrom- antrieb (⊖)	Drehstromkäfigläufermōtor mit	
	1	2	3	4	5		U-Pulsumrichter (≡)	I-Umrichter (■)
Anschaffungskosten für Motor und Speisegerät		≡	■	⊖■				Stufe 4 bei größeren Leistungen
Platzbedarf des Speisegerätes			■≡	⊖		Speisegeräte als luftgekühlte Einheiten aufgebaut		
Montage und Inbetriebnahme				⊖■	≡	üblicher Montageaufwand für Motor und Speisegerät sowie der Zeitaufwand für die Inbetriebnahme des Gesamtssystems		
Wartung		⊖			■≡	Lager und Kommutator	Lager	Lager
Verfügbarkeit				⊖	■≡	notwendige Wartung bezogen auf die Betriebsdauer bzw. Ausfallwahrscheinlichkeit		
Betriebskosten					⊖■≡	Energiebereitstellung und Energieverbrauch		
Wirkungsgrad v. Motor u. Speiseg.		⊖	≡	■			siehe Bild 3	siehe Bild 3 + 4
Blindleistungs- bezug bzw. Kom- pensationsaufwand		⊖ ■		≡		Stromrichter mit gesteuertem Eingang	Stromrichter mit ungesteuertem Eingang	Stromrichter mit gesteuertem Eingang

sattelungen. Dies gilt natürlich auch für Drehzahlveränderungen innerhalb des Drehzahlstellbereiches. Beide Umrichterarten belasten das Speisernetz. Zum einen durch blockförmige Ströme, die entsprechende Oberschwingungsanteile beinhalten und zum anderen durch Blindleistungen.

3.4 Auswahlkriterien in der Übersicht

In der Tabelle 1 sind für stationäre Kompressorenanlagen für Antriebsleistungen von etwa 50-1500 kW technische Auswahlkriterien der hier behandelten Antriebsarten in fünf Stufen bewertet. In der Tabelle 2 sind wirtschaftliche Auswahlkriterien entsprechend bewertet.

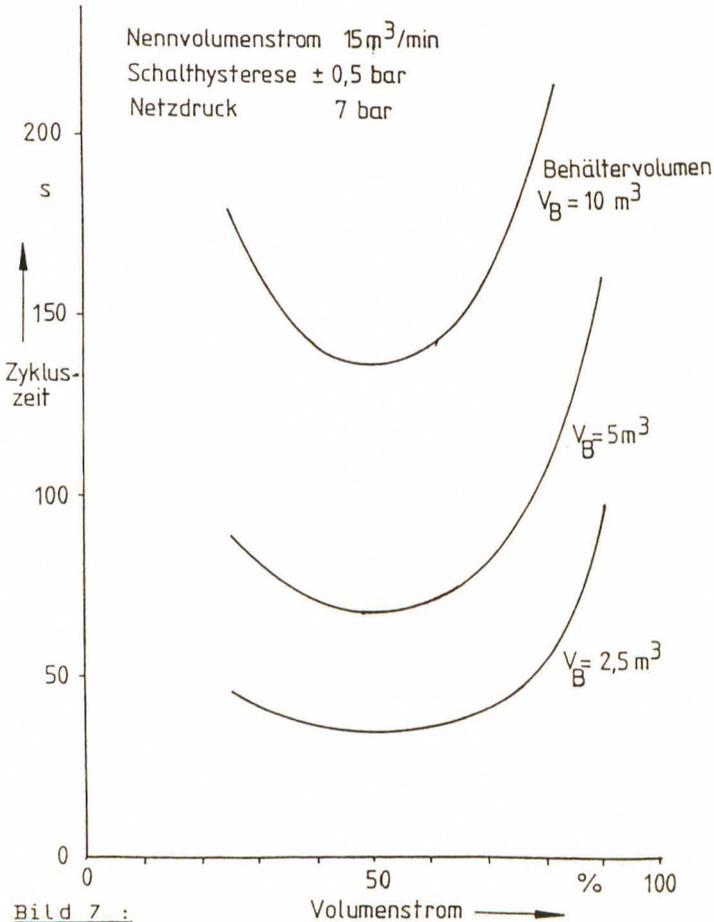
4. Wirtschaftliche Gesichtspunkte

Für den Anlagenbetreiber ergeben sich beim Einsatz eines drehzahlgeregelten Antriebes noch weitere Vorteile. Durch die Auslegung der Umrichtersteuerung mit ihrer Anlaufstrombegrenzung wird das Netz deutlich weniger belastet, ein Anlauf erfolgt mit max. Nennmoment. Das bedeutet aber gleichzeitig, daß alle anderen Bauteile der Anlage, wie Keilriemen und deren Spannvorrichtung, Verdichterblock, Rahmen usw. beim Anlaufen geschont werden (Sanftanlauf) - eine längere Lebensdauer der meisten Anlagenkomponenten ist zu erwarten. Aufgrund der Momentenverläufe von Verdichterblock und Umrichterantrieb entfällt der bisher übliche Anlauf mit geschlossener Drosselklappe.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Vermeidung von Leerlaufzeiten. Es ist bekannt, daß eine leerlaufende, also nicht ins Netz fördernde Kompressoranlage je nach Restdruck im Ölabscheidebehälter 30 % und mehr ihrer Nennleistung aufnimmt, also Strom verbraucht, ohne dafür Druckluft ins Netz zu liefern. Dies ist im Bild 1 berücksichtigt. Der schraffierte Bereich für die Zweipunktregelung wird durch zwei Linien begrenzt. Die untere Linie entspricht einer Leerlaufleistung von 20 % der Nennleistung, entsprechend einem Restdruck von 1 bis 2 bar. Die obere Linie entspricht einer Leerlaufleistung von 50 %. Dieser Wert kann als Mittelwert

für die Leistungsaufnahme in der Abblasezeit des Behälters auf Restdruck angenommen werden, wenn die Leerlaufzeit unter ca. 60 sec liegt. Die Leerlaufleistungsaufnahme liegt also immer im schraffierten Bereich.

Bei den meisten Anlagen sind die Pufferbehälter aus Investitionsgründen vergleichsweise klein ausgeführt. Dadurch werden die Zykluszeiten im Zweipunkt-Regelbetrieb deutlich kürzer als die durch eine vom Motorhersteller aus thermischen Gründen vorgegebene Nachlaufzeit ist. Bild 7 verdeutlicht die Verhältnisse an einem Beispiel. Für eine Anlage mit einem Nennvolumenstrom von $15 \text{ m}^3/\text{min}$ sind die Schaltzykluszeiten für verschiedene Behältergrößen dargestellt.



Man sieht, daß eine solche Anlage, obwohl nicht voll ausgelastet, nie abschaltet. Bei der Zweipunkt-Regelung muß der Druckschalter immer mit einer gewissen Schalthysterese eingestellt sein. Der obere Schaltpunkt liegt immer über dem gewünschten Netzmitteldruck. Das bedeutet, daß immer eine Druckreserve und damit eine unnötige Mehrleistung des Kompressors erforderlich ist. Weiterhin benötigt man zur Verlängerung der Zykluszeiten eine größere Schalthysterese, die nur durch eine entsprechende Vergrößerung des Druckkessels kompensiert werden kann. Durch Einsatz eines drehzahlgeregelten Kompressors kann sowohl diese Mehrleistung vermieden als auch ein entsprechend großer Druckbehälter eingespart werden. Ein interessanter Nebeneffekt ist noch die Möglichkeit einer Messung von Netzleckagen mit bedingter Ortung ohne Mehraufwand.

Die Zahl von Kompressoranlagen mit elektronischen Meß- und Überwachungseinrichtungen wächst ständig. Frequenzumrichter von drehzahlgeregelten Antrieben sind zur Erzeugung des frequenzvariablen Drehstroms mikrocomputergesteuert und mit elektronischen Überwachungssystemen ausgerüstet. Dadurch ist eine Koppelung der Elektronik von Antrieb und Verdichteranlage möglich. Man kann den Verdichter und Antrieb zu einem System zusammenfassen, das mit entsprechenden Schnittstellen ausgerüstet werden kann.

Dadurch ergeben sich vielfältige Möglichkeiten der Verknüpfung von Verdichteranlagen mit optimierten Betriebsweisen. So ist zum Beispiel ein belastungsoptimierter Betrieb mit mehreren Verdichteranlagen möglich. Dabei ist unerheblich, ob die Anlagen mit Umrichterantrieb oder konventioneller Drehstromtechnik ausgerüstet sind. Die Elektronik erlaubt, Verdichter in zentrale Leitwarten mit Meßwertübertragung zu integrieren, Störungsspeicher geben dem Wartungspersonal wichtige Hinweise auf die Vorgeschichte eines Ausfalls. Durch eine computerisierte zentrale Überwachung mit einer direkten Verbindung zum Hersteller können durch vorausschauende Wartung größere Ausfälle verhindert und damit Kosten gesenkt werden.

5. Schnellaufende Direktantriebe

Durch die Verwendung von Elektromotoren mit Umrichtern, welche mit Frequenzen weit über 50 Hz betrieben werden, ergeben sich neue interessante Gesichtspunkte im Anlagenbau.

Das Auslegungskriterium für Schraubenverdichter ist die Umfangsgeschwindigkeit. Das bedeutet, daß die Drehzahl von der Stufenbaugröße abhängt. Durch die umgekehrte Proportionalität ist bei kleinen Stufen die Drehzahl deutlich größer als bei größeren Stufen.

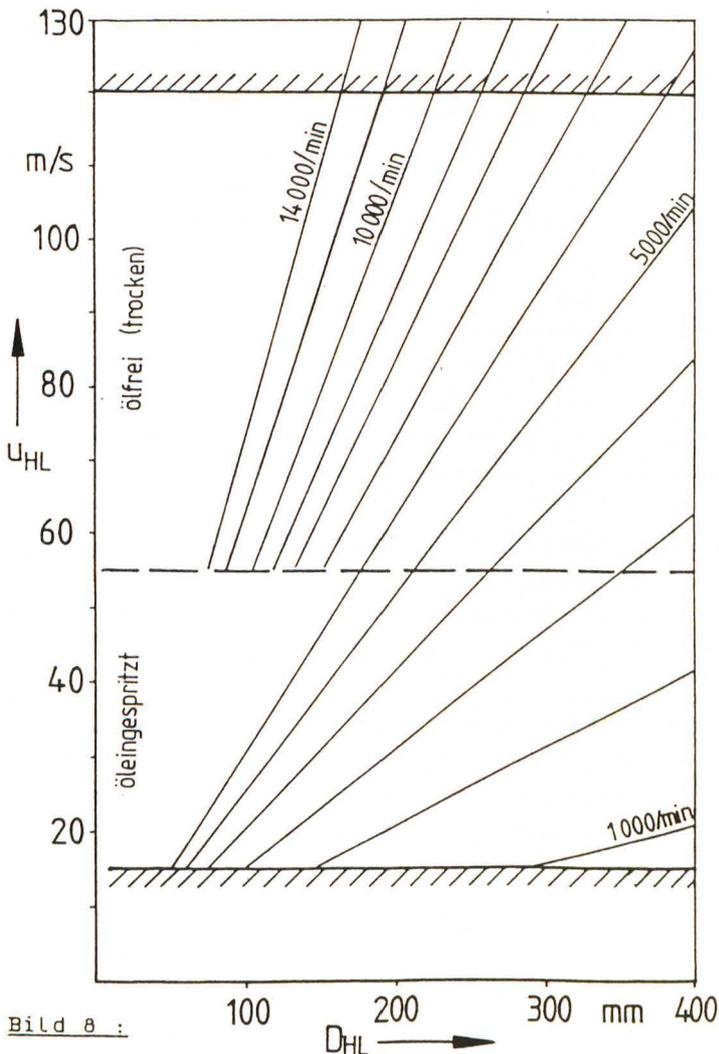


Bild 8 :

Das Bild 8 zeigt diesen Zusammenhang für die beiden Schraubenverdichterbauarten. Zur Verdeutlichung sind einige Linien konstanter Drehzahl eingetragen. So lassen sich bei öleingespritzten Schraubenverdichterstufen mit Durchmessern über ca. 250 mm und ca 40 m/s Umfangsgeschwindigkeit noch Direktantriebe mit Umrichterfrequenzen ≤ 50 Hz realisieren.

Fast im gesamten Bereich der ölfreien Schraubenverdichter (Trockenläufer) können höherfrequente Antriebe direkt verwendet werden.

Ein wichtiger Aspekt für den Direktantrieb ist die mögliche starre Verbindung zwischen Motor und Verdichterstufe und die damit verbundene Reihenaufstellung, die eine günstig gestaltete Gesamtanlage möglich macht. Gleichzeitig nimmt ein schnellaufender Motor wegen seiner geringeren Baugröße nur einen Teil des Raumes eines Normalantriebs ein.

So hat z. B. ein Motor mit 90 kW in der Normalausführung für 1500/min die Baugröße 280, während ein schnellaufender Antrieb mit z.B. 6000 U/min nur die Baugröße 200 beansprucht (Bauvolumeneinsparung ca. 47%).

Ein Motor mit höherer Drehzahl hat eine etwas geringere Stromaufnahme, so daß der gesamte elektrische Teil in einer Verdichteranlage zwischen Umrichter und Motor mit einer entsprechend kleineren Dimensionierung auskommt.

Der drehzahlgeregelte Antrieb benötigt i.a. einen Fremdlüfter, da bei niedrigen Drehzahlen eine Eigenbelüftung nicht ausreicht. Bei Fremdbelüftung wäre eine kostengünstige Kombination von Motorlüfter und Öl-Luftkühleranlage denkbar.

Bei der Dimensionierung der Motorlagerung kann von gleichen Voraussetzungen wie bei der Verdichterstufe ausgegangen werden, d. h. es sind durchschnittliche Lebensdauerwerte von 25 000 Betriebsstunden, bezogen auf Nenndrehzahl, zu erwarten.