## Schraubenverdichter und deren Regelung

Dr.-Ing. J. Paul, Flensburg

#### EINLEITUNG:

Der Bericht gibt einen Ausblick über die Möglichkeiten zur Anpassung eines Kältemittel- Schraubenverdichters an Leistungserfordernisse und Druckverhältnisse.

Eine Doppelschiebermaschine ermöglicht die stufenlose Anpassung. Diese Anpassung wird vorteilhafterweise mit einer Mikroprozessorsteuerung vorgenommen. Der Bericht beschreibt den Weg zur konstruktiven Gestaltung der Maschine und die Strategien zur Regelung.

## 1. VERDICHTER IN KÄLTEANLAGEN

In Kälteanlagen kommen verschiedene Bauarten von Verdichtern zur Anwendung. Dabei spielen Verdrängermaschinen eine dominante Rolle, realisiert sind diese Verdichter als Rotationsverdichter, Hubkolbenverdichter und als Schraubenverdichter. Bei den Strömungsmaschinen hat sich der Radial-Turboverdichter für große Leistungen eingeführt.

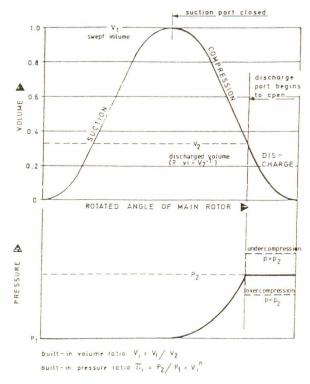
Die ehemals "klassische" Unterteilung nach Leistungsgrößen (klein: Hubkolben, mittel: Schraube, groß: Turbo) geriet in den vergangenen Jahren zunehmend unter den Druck der Schraubenmaschinen. Das Leistungsspektrum umfaßt heute Maschinen von ca. 100 m3/h bis 30.000 m3/h und deckt damit so gut wie alle industriellen Leistungen ab.

Die spezifischen Vorzüge und Eigenschaften der Verdichter erlauben es, Anlagen mit optimalem Wirkungsgrad und hervorragenden Betriebseigenschaften zu konzipieren, wobei Schraubenverdichteranlagen vorteilhaft durch Kolbenverdichter ergänzt werden können. Benutzerfreundliche und optimierte Anlagen sind z.B. zweistufige Kälteanlagen mit Schraubenmaschinen als Niederdruckverdichter und Kolbenmaschinen als Hochdruckverdichter. Dasselbe gilt für den Einsatz dieser Maschinen im Kälte- und Wärmepumpenbetrieb, wo Kolbenverdichter bei Wärmepumpenbetrieb bessere Leistungszahlen ermöglichen als Schrauben.

Ein großer Nachteil war bisher, daß sich Schraubenverdichter hinsichtlich ihres Druckverhältnisses nicht regeln ließen. Erst die Einführung volumen- und damit druckverhältnisgeregelter Schraubenverdichter erlaubte es, diese Maschine so zu betreiben, wie es sich selbsttätig anpassende Hubkolbenverdichter schon immer taten.

#### 2. AUSGANGSPUNKT

Schraubenverdichter sind Verdrängermaschinen, welche in den Hohlräumen zweier ineinandergreifender Rotoren Gas bzw. verdampftes Kältemittel fördern und verdichten. Da Schraubenmaschinen keine Arbeitsventile benötigen und lediglich über die Rotoren- und Gehäusegeometrie einen Gastransport vornehmen, lassen sich bei ungeregelten Maschinen nur genau definierte Volumenverhältnisse bzw. Druckverhältnisse fahren.



<u>Bild 1:</u> Verlauf des Volumens und Druckes als Funktion des Hauptrotor-Drehwinkels

Bild 1 zeigt den Verlauf des Volumens und Druckes als Funktion des Umdrehungswinkels des Hauptrotors. Man erkennt, daß das Ausschieben am Ende des Kompressionsvorganges lediglich von der Anordnung der Auslaßöffnung abhängig ist. Bei derart ungeregelten Maschinen entsteht die Gefahr, daß eine Über- oder Unterverdichtung stattfindet, weil das eingebaute Druckverhältnis (für ein gegebenes Kältemittel) nicht mit dem Druckverhältnis der Anlage übereinstimmt. Bild 2 zeigt die Auswirkung der Unterverdichtung (links oben), Überverdichtung (rechts oben) und den idealen Prozeß, wo eingebautes und tatsächliches Druckverhältnis gleich sind (unten links). Im Vergleich dazu ist das Verhalten eines Kolbenverdichters angegeben (unten rechts).

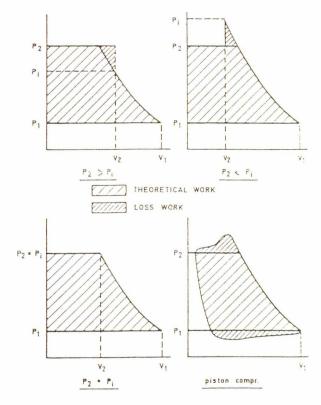


Bild 2: Arbeitsdiagramme für unterverdichtenden (li.o), überverdichtenden (re.o) und idealen Schraubenverdichter (li.u); Kolbenverdichter zum Vergleich (re.u)

In begrenztem Umfang ist die geometrische Anordnung der Auslaßöffnung durch einen Schieber zu beeinflussen. In diesem Fall wird dem, im Enddeckel der Druckseite angeordneten Axialauslaß ein Radialauslaß hinzugefügt, welcher durch einen sogenannten "Leistungsschieber" verstellbar wird. Dieser Radialauslaß kann durch entsprechende
geometrische Ausgestaltung das eingebaute Volumen- bzw.
Druckverhältnis ändern. Bild 3 zeigt den isentropischen
Wirkungsgrad einer Reihe von Radialauslässen (A1 - A3) mit
ausgeprägtem Optima und den Schnittpunkten untereinander,
wo der nebenliegende Auslaß ebenso gut ist.

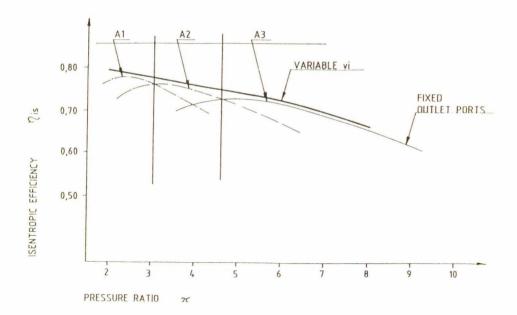


Bild 3: Isentropischer Wirkungsgrad als Funktion der Schieber-Auslaßkante (A1-A3) im Vergleich zur volumenverhältnisgeregelten Schraubenmaschine

Den Zusammenhang zwischen Volumen- und Druckverhältnis einer Schraubenmaschine zeigen nachfolgende Betrachtungen:

Eingebautes Volumenverhältnis vi definiert als:

Zusammenhang zwischen vi und Druckverhältnis pi:

$$pi = \frac{p2}{p1} vi^K$$

mit K = Isentropenexponent des Kältemittels (K=f(p,T)) oder vi = pi

in kältetechnischen Bezeichnungen ist demnach:

$$vi = \frac{vo}{vc}$$
 und

$$pi = \frac{pc}{po}$$

mit den Indices und (o) und (c) für Verdampfung und Kondensation.

Man erkennt also, daß durch das Ändern des Volumenverhältnisses eine Anpassung an die Betriebsdrücke einer Kälteanlage möglich ist.

# 3. KONSTRUKTIONSANFORDERUNGEN AN EINE NEUENTWICKELTE SCHRAUBENMASCHINE MIT ÄNDERLICHEM VOLUMENVERHÄLTNIS

Unter der Typenbezeichnung SABROE SAB 163 wurde eine Schraube konstruiert, welche folgende Eigenschaften aufweißt:

- alternativer Haupt- und Nebenrotorbetrieb
- assymmetrisches SRM Profil 4:6
- Bereich des eingebauten Volumenverhältnisses Hochdruckmaschine: vi = 2,6 - 4,0 Boostermaschine: vi = 2,3 - 3,0
- Rotordurchmesser 163mm
- Kältemittel: alle fluorierten Kohlenwasserstoffe und Ammoniak, ggf. LPG und LNG

- Konstruktionsziele: kompakt, einfach, leicht bedienbar, betriebssicher, effektiv, Betrieb ohne Ölpumpe (nur Vorschmierungspumpe), einfaches Umstellen von Haupt- auf Nebenrotorbetrieb
- Anforderungen an die konstruktive Ausführung: einbautes Saugfilter, Ausgleichskolben für axiale Entlastung der druckseitigen Lager, einfache Justierung des Spieles zwischen Schieberauslaßkante und Rotoren, automatisches Herabfahren auf Minimumleistung bei Stillstand (entlasteter Start), optische Anzeige der Schieberstellung, Möglichkeit des Economizerbetriebes, Regelung des Volumenverhältnisses, Anschlußmöglichkeit eines Mikroprozessors
- übergeordnetes Ziel ist es, eine Maschine zu bauen, die hinsichtlich Regelbarkeit, Teillastverhalten, Anpassungsfähigkeit und Betriebssicherheit den Stand unseres Wissens materialisiert.
- 4. REGELUNG DES VOLUMENSTROMES UND DES VOLUMENVERHÄLT-NISSES

Bild 4 zeigt die Auswirkung des Leistungsschiebers auf das Fördervolumen und das Druckverhältnis einer gängigen Schraubenmaschine. Erstaunlicherweise wird mit dem Leistungsschieber auch das Druckverhältnis in hohem Mase mit beeinflußt, von Regelung kann man nicht sprechen, da die Änderung des Volumenverhältnisses nicht zu beeinflussen ist. Der starke Abfall nach Verlassen des Vollastbetriebspunktes ist auf die relativ hohen Strömungsverluste des Radialauslasses zurückzuführen. Da der Leistungsschieber (wie erkennbar) neben dem Fördervolumen auch das Druckverhältnis ändert, wird eine, im Vollastbetriebspunkt optimal angepaßte Anlage nur zufällig auch im Teillastbetrieb optimal arbeiten und in der Regel daher zur Über- oder Unterverdichtung neigen. Alle Betrachtungen des Verdichterverhaltens müssen auch am Verhalten vor- und nachgeschalteter Apparate vorgenommen werden, da sich durch veränderte Leistungen auch Grädigkeiten von Wärmeaustauschern ändern können, welche das Druckverhältnis des Systems verändern. Der Abfall des eingebauten Volumen- und Druckverhältnisses kann daher in zufälligen Fällen mit der Anlage übereinstimmen, wird es in der Regel aber nicht tun. Kälteanlagen mit starren Verdampfungs- und/oder Kondensationstemperaturen verlangen ein weitgehend konstantes Druckverhältnis, welches von leistungsschiebergeregelten Maschinen nur in Nähe des Vollastbetriebes erbracht werden kann. Häufiger Teillastbetrieb führt unweigerlich zu Verlusten des Wirkungsgrades.

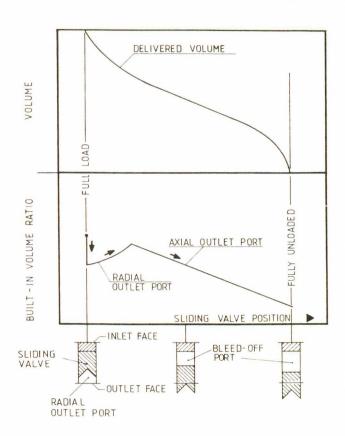


Bild 4: Fördervolumen und Volumenverhältnis einer Schraubenmaschine im Voll- und Teillastbetrieb als Funktion der Leistungsschieberstellung

Kälteanlagen, welchen starken Schwankungen der Verdampfungs- und/oder Kondensationstemperaturen unterworfen sind
können unter keinen Umständen mit einer ausschließlich
leistungsgeregelten Maschine optimal bedient werden, dies
ist anhand Bild 3 einfach und eindeutig erkennbar.

Die durch den Leistungsschieber freigegebene Öffnung auf der Saugseite ermöglicht dem angesaugten Gas, ohne verdichtet zu werden teilweise in den Saugraum zurück zu

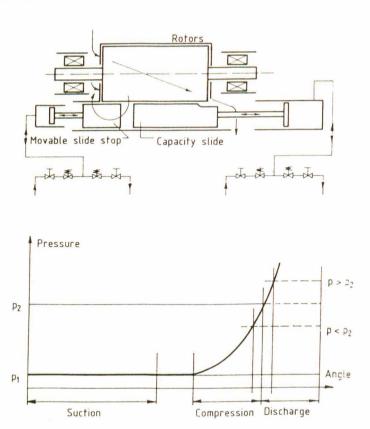


Bild 5: Schema eines Schraubenverdichters mit Doppelschieber zur Leistungs- und Volumenverhältnisregelung

strömen, weshalb der Fördervolumenstrom durch Betätigung des Schiebers reduziert wird. Ebenso wird durch den Leistungsschieber und die damit verbundene Änderung des Druckverhältnisses eine Regelung vorgenommen, welche wegen der Unterverdichtung bei zunehmendem Teillastbetrieb wirkungsgradmindernd wirkt. Daher kann man das Volumen- und damit Druckverhältnis eines Verdichters nur durch den Einbau eines zweiten Schiebers beeinflussen. Dieser zweite Schieber regelt sowohl die Lage als auch die Größe der Öffnung vor dem Leistungsschieber.

Diese Doppelschieberanordnung ermöglicht demnach die Leistungs- und Druckverhältnisregelung in einer Maschine bei stark reduzierten Verlusten. Bild 5 zeigt im unteren Teil den Verlauf des Druckes als Funktion des Umlaufwinkels. Schematisch sind Schieberanordnungen und Stellungen sowie die Auswirkung auf das Indikatordiagramm in Bild 6 dargestellt.

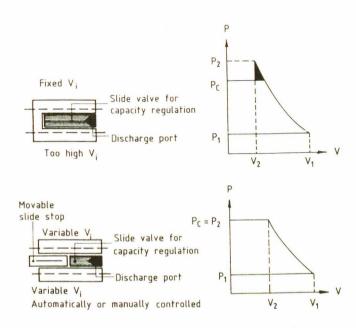


Bild 6: Ein- und Doppelschiebermaschine

In Anbetracht der vorerwähnten Tatsachen läßt sich feststellen, daß eine doppelschiebergesteuerte Schraube mit veränderlicher Leistung und veränderlichem Druckverhältnis quasi einer zweistufigen Verdichteranordnung entspricht, wie dies in Bild 7 dargestellt ist. Die im linken Teil des Bildes angeordnete Schieberregelung bewirkt eine Änderung des Fördervolumens, wie es beispielsweise in der Analogbetrachtung im unteren Bildteil durch den Boosterverdichter angedeutet ist, welcher beispielsweise durch Drehzahlregelung das Fördervolumen und damit bei gegebenen Ansaugdruck den sogenannten "Mitteldruck" festlegt. Der rechts angeordnete Schieber sorgt mit einem schieberstellungsabhängigen Druck- bzw. Volumenverhältnis für die Verdichtung auf den gewünschten Enddruck, der vom Mitteldruck abhängig ist. Es ist daher festzustellen, daß die doppelschiebergesteuerte

Schraube eine perfekte Analogie bei zweistufigen Kälteanlagen aufweißt, wobei die Niderdruckseite über die Verdichtergröße bzw. Drehzahl (Fördervolumen) und die Hochdruckseite über das eingebaute Druckverhältnis festgelegt ist.

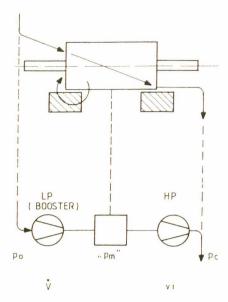


Bild 7: Analogmodell einer Doppelschiebermaschine

Die Regelung zweier Schieber, welche wegen der Einflußgrößen Saugdruck, Mitteldruck und Enddruck sowie der anlagenseitigen Betriebsbedingungen kompliziert ist, kann daher am besten über einen Mikroprozessor vorgenommen werden, wenn nicht konstante Verhältnisse vorliegen und eine einmalige, manuelle Einstellung genügt.

Die SAB 163 hat daher zwei Regelungsmöglichkeiten des Druckverhältnisses, nämlich

- manuell und
- vollautomatisch
- 5. REGELUNG VON DOPPELSCHIEBER- SCHRAUBENMASCHINEN MIT VERÄNDERLICHEM VOLUMEN- UND DRUCKVERHÄLTNIS .

Wie bereits erwähnt ist die Regelung von Doppelschiebermaschinen nicht mehr einfach. Für den Fall ausgesprochenen Saisonbetriebs (z.B. Winter- oder Sommerbedingungen) mit geringer Häufigkeit des Auftretens wird man ohne weiteres zufrieden sein, eine manuelle Anpassung beispielsweise zweimal im Jahr vorzunehmen. Für Anlagen mit stark schwankenden Leistungen und Druckverhältnissen wird man hingegen auf vollautomatischen Betrieb gehen wollen, welcher durch einen Mikroprozessor möglich ist. Der für den Betrieb der SAB 163 vorgesehene Mikroprozessor (auch für andere Kompressoren und Anlagen verwendbar) hat fünf Ausführungen, wie dies Bild 8 zeigt.

Ausführung Option	1	11	III	IV	٧
Anschluß an Zentralrechner					<ul><li>Interfacing</li><li>Fernbedienung</li><li>Modem</li></ul>
Energie- management				° vollautoma- tische Rege- lung des vi Wochenprogramm	° Printout ° Telefonalarm
Erweiterte Ausstattung der Regelung			Begrenzung und Display für:  Stromaufnahme Kondnsator- druck  Druckeran- schluß  erweiterte Garantie	für:  ° max. el. Arbeit und ° max. el. Le:stung  ° HT/NT Rege- lung	
Automatische Regelung		Regelung für:  Saugdruck Leistung Öltemperatur			
Überwachung und manuelle Regelung	<ul> <li>alle Einrich- tungen zur Regelung und - Sicherheits- überwachung</li> <li>man. Einstellung des vi</li> <li>Öleinziehen</li> </ul>				

Bild 8: Optionen und Ausführung der Mikroprozessorsteuerung in 5 Hirachien

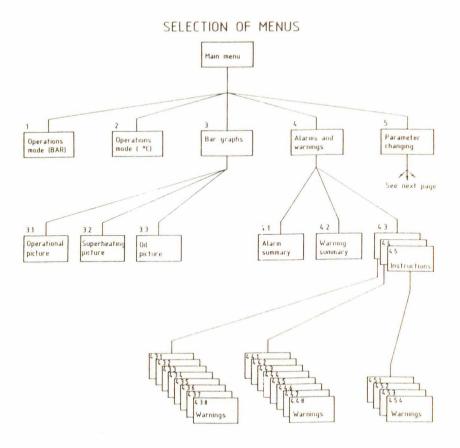


Bild 9: Programmenue der Mikroprozessorsteuerung

In der Ausführung I werden alle Einrichtungen zur Grundregelung und Sicherheitsüberwachung angeboten, genauere Erläuterungen befinden sich im Text des Bildes 8. Ausführung II beinhaltet auch eine automatische Regelung für Saugdruck, Leistung und Öltemperatur, welche bei der Ausführung III erweitert werden kann. Besonders interessant ist dabei die Begrenzung und Anzeige der Stromaufnahme, der Druckeranschluß und – durch die Ausstattung bedingt – die erweiterte Garantie für die Maschine. Man kann sagen, daß bei Position III eine Fehlbedienung quasi ausgeschlossen ist.

Die wahren Vorzüge des Mikroprozessors kommen in der Ausführung IV und V zu Tage, wo das eingebaute Volumen- und damit Druckverhältis vollautomatisch angepaßt wird, der

Mikroprozessor kan weiterhin ein Wochenprogramm für maximale elektrische Arbeit und Leistung aufnehmen und abarbeiten und damit Niedertarifstrom weitgehend ausnutzen. Die
Möglichkeit des Anschlusses an übergeordnete Zentralrechner, der Fernbedienung, der Telefonüberwachung und Fernalarmierung komplettieren die vielfältigen Möglichkeiten
eines mikroprozessorgesteuerten Kälteanlagenbetriebes.

Der Betreiber muß beileibe kein Computerfachmann sein, um diese Steuerung zu verstehen und zu bedienen. Zu diesem Zweck ist das Arbeiten mit dem Mikroprozessor auf einfache Weise in ein Programmenue überführt worden, welches in Bild 9 dargestellt ist. Durch einfachen Tastendruck lassen sich Betriebsdrücke, Temperaturen, Warnungen und Alarm sowie Betriebsparameter einstellen, verändern und protokollieren. In Bild 10 sind zwei "Displays" des Mikroprozessorpanels abgebildet entsprechend der oberen Module 1-5 des Bildes 9.

## SELECTION OF MENU

```
Sabroe Compressor Controller
1: Operations mode (BAR)
2: Operations mode (°C/R)
3: Bar graph
4: Alarms and warnings
5: Parameter changing >select 1-5<
```

```
MANUAL 850802 14:25
PRELUBRICATION
SLIDE POS 0: MOTOR CURR 337 A
SUCT.PRES-13.8°C/R717 SUCT.TEMP. -10.7°C
OUTL.PRES 32°C/R717 OUTLET (EMP. 53°C
OIL PRES 5.1 Bar OIL TEMP. 45°C
```

Bild 10: Display des Mikroprozessors zur Menuewahl (Numerierung entspricht Bild 9)

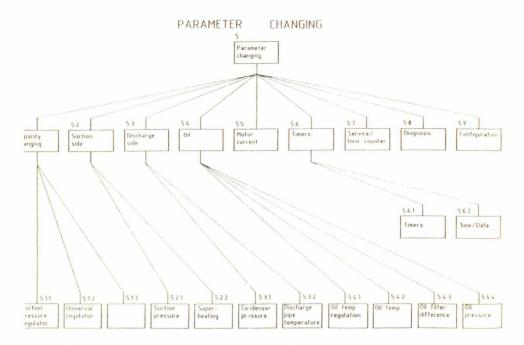


Bild 11: Veränderung von Betriebsgrößen des Verdichters bzw. der Kälteanlage (Detail aus Bild 9, Pkt. 5)

Neben der reinen Überwachung und Alarmierung kommt der Einstellung und Änderung der Betriebsparameter die größte Bedeutung zu. Bild 11 zeigt die Möglichkeiten, alle Funktionen der Kälteanlage und des Verdichters vorzugeben. Leistungsregelung, Verdampfer- und Kondensatorbetrieb, Ölkreislauf, Stromaufnahme, Betriebszeitüberwachung und Fehlerdiagnose sind höchst einfach möglich und in kürzester Zeit erlernbar und beherrschbar. Die Bilder 12 und 13 zeigen beispielhaft das Display des Mikroprozessors, in Bild 12 im unteren Teil das Wochenprogramm für Strombegrenzung und in Bild 13 im unteren Teil ein Beispiel einer Fehlerdiagnose.

Zusammenfassend läßt sich zur Regelung von Doppelschieberschrauben demnach sagen, daß bei Unterstützung des Anlagenbetriebes durch einen Mikroprozessor folgende Vorteile sichtbar werden:

- weniger unbeabsichtigte Betriebsunterbrechungen
- Energieoptimierung durch vollautomatische Steuerung des Druckverhältnisses

- Wochenprogramm für die Stromaufnahme, damit Nutzung von Niedertarifstrom
- komplette, einfache und flexible Einstellung, Überwachung und Sicherung
- Ausschluß der Möglichkeit zur Fehleinstellung
- Möglichkeit der Einbeziehung weiterer Verdichter
- Übernahme der Anlage auf eine übergeordnete, zentrale Leitstelle

## PARAMETER CHANGING

```
Parameter changing

1: Cap. controller 6: Timers

2: Suction side 7: Service

3: Outlet side 8: Diagnoses

4: Oil 9: Configuration

5: Motor current >select 1-9<
```

```
Parameter changing: Motor current
          TUE
                          FRI
                                    SUN
Day:
     MON
              WED
                    THU
                               SAT
LOW:
                600
                    600 600
      600
           600
                               600
                                    600
HIGH: 1800 1843 1800 1800 2000 1200
                                    600
Setpoint HIGH Cap 450 A LOW Cap. 250 A
New value 0.00
                       (2359.0
                                 (600.0)
```

Bild 12: Display des Mikroprozessors für die Eingabe von Betriebsgrößen für den Schraubenverdichter bzw. die Kälteanlage

### PARAMETER CHANGING

```
Parameter changing: limers
Pause before restart 29 min
Pause before stop 5 min
Prelubricating time 60 sec
Pause between prints 0 min
New value 10.0< < 60.0 ( 20.0)
```

### INSTRUCTIONS

```
Suction pressure low
POSSIBLE REASONS: Excessive capacity *
Excessive oil in evaporator * filter in
liquid line blocked * Condensation in
system * Ice in exp. valve * Blocked
suction filter * Throttled valve
```

Bild 13: Display des Mikroprozessors für Betriebsgrößenvorgaben (oben) und Störungsanweisungen (unten, im Beispiel für zu niedrigen Saugdruck)

#### SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK

Die Praxiserfahrungen mit einer Doppelschieberschraube sind ausgezeichnet. Betriebssicherheit und Anpassungsfähigkeit einer Maschine erlauben problemfreien Betrieb bei optimaler Wirtschaftlichkeit in sehr weiten Grenzen. In Verbindung mit der Mikroprozessorsteuerung ist die Fehlbedienung ausgeschlossen und eine tarifgebundene Wochenbetriebsweise auf einfache Weise möglich.

Augrund dieser Erfahrungen werden weitere Maschinen des SABROE Verdichterprogrammes zusammen mit der Aerzener Maschinenfabrik für Doppelschieberbetrieb entwickelt und ergänzen den Leistungsbereich nach oben. Aufgrund der leistungsunabhängigen "festen" Kosten für Doppelschieberarrangement und Mikroprozessorsteuerung ist derzeit eine Anwendung bei sehr kleinen Maschinen nicht denkbar, dort sind aber betriebliche Belange ohnehin oftmals sehr stark abweichend von Großanlagen.

Insgesamt lassen sich durch die Doppelschiebermaschine des Typs SAB 163 folgende Feststellungen quantifizieren:

- die Anpassung des Volumen/Druckverhältnisses bringt eine Energieeinsparung um 5%
- die Möglichkeit des Wegfalls einer Betriebsölpumpe bringt eine Energieeinsparung von 1 - 2%
- die zusätzliche Option auf Economizerbetrieb erhöht
   wie bisher die Leistungszahl bzw. das Kälteleistungs/Antriebsverhältnis bis zu 25%
- der Liefergrad läßt sich durch die Verstellung der Toleranz zwischen druckseitigem Ende des Rotors und Verdichtergehäuse einstellen, ein Rückströmen auf die Saugseite wird in hohem Maß verhindert und damit der Liefergrad hochgehalten

#### 7. SCHLUSSBEMERKUNGEN

Durch ein Doppelschieberarrangement lassen sich Schraubenverdichter hinsichtlich ihrer Leistung und hinsichtlich des eingebauten Volumen- bzw. des daraus resultierenden Druckverhältnisses an jeden Betriebsfall einer Kälteanlage stufenlos anpassen. Damit haben Schraubenverdichter in dieser wesentlichen Eigenschaft mit Kolbenverdichtern gleichgezogen, wenngleich die Korrektur dieses "Geburtsfehlers" einer Schraubenmaschine natürlich nicht ohne Aufwand ist. Positive Betriebserfahrungen ermuntern, auf diesem Weg weiterzugehen und weitere Maschinen des Verdichterprogrammes neu zu entwickeln.

#### 8. SCHRIFTTUM

- /1/ Villadsen, V.: Skruekompressorer til koleanlaeg Kulde 25 (1971) 1, S. 2-7
- /2/ Schrifttum Sabroe SAB 163