Vergleichende Betrachtung verschiedener Verfahren zur Veränderung des eingebauten Volumenverhältnisses von Schraubenkompressoren

N. Tewes, Oberhausen

Zusammenfassung

Im Bereich der Kältetechnik werden seit einigen Jahren verstärkt Schraubenkompressoren mit veränderlichem eingebautem Volumenverhältnis angeboten. Die Funktionsweise von einigen der dabei eingesetzten Verfahren wird erläutert. Anhand von geometrischen Überlegungen wird die Wirksamkeit dieser Verfahren dargestellt und miteinander verglichen. Die Darstellung der v_i-Verläufe in Abhängigkeit von der Stellung eines zusätzlichen Volumenschiebers zeigt, daß die betrachteten Verfahren im Teillastbereich von volumengeregelten Maschinen nur geringe Energieeinsparungspotentiale bieten.

Summary

Screw compressors with built-in variable volume ratio have increasingly been offered for the use in refrigeration cycles for several years. The operating mode of some of the methods used is explained. By reference to geometrical considerations, the effectiveness of these methods is described and compared to each other. Representation of the v_i curves versus the position of an additional capacity control slide shows that the methods under consideration have only minor potentials for energy saving in the part-load range of volume-controlled machines.

1. Einleitung

Neben den seit vielen Jahren eingeführten und bewährten Schraubenkompressoren in ungeregelter und volumengeregelter Bauweise werden seit einiger Zeit im Bereich der Kältetechnik von verschiedenen Herstellern in zunehmendem Maße Schraubenkompressoren mit regelbarem eingebautem Volumenverhältnis angeboten [1], [2].
Speziell bei Kälteanlagen mit stark schwankenden Verdampfungs- und Kondensationstemperaturen (z.B. Schiffskälte) versprechen diese Maschinen deutliche Energieeinsparungen. Neben einer optimierten Energieumwandlung im Vollastbereich sollen mit diesen Kompressoren auch im besonderen bei kombinierter Anwendung von v_i- und Volumenregelung im Teillastbereich Energieeinsparungen erreicht werden.

2. Grundlagen des Kompressionsvorgangs in Schraubenkompressoren

2.1 Eingebautes Volumen- und Druckverhältnis

Durch die Lage der konstruktiv vorgegebenen Ein- und Auslaßsteuerkanten eines Schraubenkompressors ist sowohl das Volumen zu Beginn als auch das Volumen bei Abschluß des Verdichtungsvorganges festgelegt. Das Verhältnis dieser beiden Volumina wird als das eingebaute Volumenverhältnis v_i definiert. In Abhängigkeit von dem zu verdichtenden Medium ergibt sich das theoretische innere Druckverhältnis (das Verhältnis des Druckes in der Zahnlücke bei Abschluß des Verdichtungsvorgangs zu dem Druck bei Beginn des Verdichtungsvorganges) Π_i zu:

$$\Pi_i = v_i^{\kappa} = p_{2_i}/p_1$$

2.2 Abweichung zwischen eingebautem und äußerem Druckverhältnis und daraus resultierende Über- und Unterverdichtung

Bei der Verdichtung von Prozeßgasen und in der Kältetechnik können sich oft Betriebszustände ergeben, bei denen das äußere Druckverhältnis Π_a mehr oder weniger stark vom eingebauten Druckverhältnis Π_i abweicht (z.B. Kältemittelverdichtung bei häufig schwankenden Verdampfungs- und/oder Kondensationstemperaturen).

Bild 1 zeigt beispielhaft den Kompressionsvorgang eines Schraubenkompressors im p,V-Diagramm bei isentroper Verdichtung. Die schraffiert dargestellten Flächen stellen die zu verrichtende Arbeit bei der Verdichtung dar. Die kreuzschraffierten Flächen kennzeichnen die zu verrichtende Mehrarbeit, wenn das eingebaute Druckverhältnis vom äußeren abweicht.

Im ersten Beispiel wird das Gas innerhalb der Zahnlücken auf einen höheren Druck als den äußeren Systemenddruck verdichtet und expandiert dann nach Öffnen der Zahnlücke in den Druckstutzen der Maschine. Im dritten Beispiel ist zusätzliche Ausschubarbeit erforderlich, um das innerhalb der Zahnlücken auf einen niedrigeren Enddruck verdichtete Gas gegen den höheren äußeren Enddruck auszuschieben.

Dieser zusätzliche Energieaufwand kann natürlich vermieden werden, wenn wie im zweiten Beispiel dargestellt inneres und äußeres Druckverhältnis übereinstimmen.

Diese Zusammenhänge führen zu der Überlegung, bei stark schwankenden äußeren Druckverhältnissen das eingebaute Druckverhältnis zu variieren.

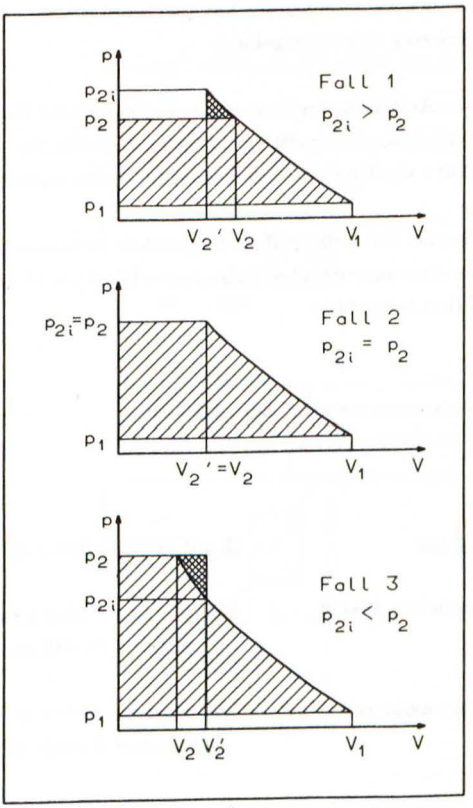

Bild 1: p,V-Diagramme für Schraubenkompressoren

3. Verfahren zur v_i-Regelung

3.1 Übersicht

Grundsätzlich sollte bei der Betrachtung der verschiedenen Verfahren zur v_i-Regelung unterschieden werden zwischen Verfahren ohne gleichzeitige Volumenregelung und Verfahren mit kombinierter Volumenregelung.

Unabhängig von dieser Aufteilung ergibt sich die Möglichkeit zur Regelung des eingebauten Volumenverhältnis sowohl durch Variation des radialen als auch des axialen Auslaßfensters. In Bild 2 werden diese grundlegenden Verfahren dargestellt.

Eine weitere in der letzten Zeit aufgegriffene Möglichkeit besteht in der Verwendung von radial zur Läuferachse angeordneten Hubventilen [3]. Diese Möglichkeit wird im weiteren nicht detailliert betrachtet.

Schraubenkompressoren mit variablem v_i

1. ohne Volumenregelung

1.1 v_i-Schieber mit radialem Auslaß

1.2 v_i-Drehschieber mit axialem Auslaß

2. mit Volumenregelung

2.1 Volumenschieber und v_i-Schieber mit radialem Auslaß hintereinander

2.2 Volumenschieber und v_i-Schieber mit radialem Auslaß ineinander/parallel

2.3 Volumenschieber und v_i-Drehschieber mit axialem Auslaß

3.2 v_i-Regelung mit Variation des radialen Auslasses (Variante 1.1)

Bei der Variation des radialen Auslasses verfährt ein unterhalb der Rotoren angeordneter Schieber in axialer Richtung (vergleichbar mit einem Schieber zur Volumenrege-

lung) und verändert damit bei gleichbleibendem Ansaugvolumen die Größe des zur Verfügung stehenden radialen Auslasses und damit das Volumen bei Verdichtungsende.

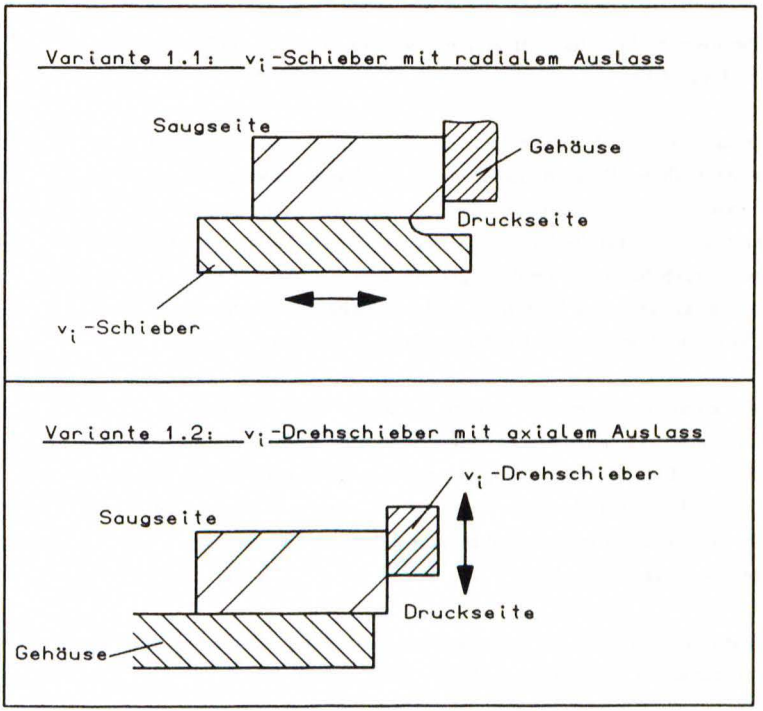

Bild 2: Varianten der v_i Regelung ohne Volumenregelung

3.3 v_i-Regelung mit Variation des axialen Auslasses (Variante 1.2)

Die zweite Möglichkeit ist gegeben durch die Änderung der axialen Teile des Auslasses durch Verdrehen von in der druckseitigen Stirnfläche des Gehäuses zu den Rotorach-

sen zentrisch angeordneten Steuerscheiben. Dabei verändert sich die Größe des axialen Auslasses und damit die Größe des Volumens bei Abschluß des Verdichtungsvorgangs.

3.4 Kombinationen von v_i- und Volumenregelung

Die denkbaren Möglichkeiten bei gleichzeitiger Volumen- und v_i-Regelung sind in Bild 3 dargestellt.

Die erste Variante (2.1) zeigt die in der Praxis bisher meist verwendete Kombination von unterhalb der Rotoren angeordneten kombinierten Volumen- und v_i-Schiebern. Der Anschlag für den Volumenschieber, der bei volumengeregelten Kompressoren als feststehendes Bestandteil des Gehäuses ausgebildet ist, ist hier als axial verfahrbarer Schieber ausgeführt, der unabhängig vom Volumenschieber bewegt werden kannn. Durch das gleichzeitige Verfahren beider Schieber ist, wie bei der reinen v_i-Regelung, eine Veränderung des radialen Auslassfensters gegeben.

Bei der zweiten und dritten Variante (2.2 und 2.3) erfolgt die Regelung von Volumen und v_i unabhängig voneinander. Zur Volumenregelung wird ein klassischer unterhalb der Rotoren liegender Steuerschieber mit feststehendem axialem Schieberanschlag eingesetzt. Die Einstellung des v_i erfolgt in Variante 2.2 durch einen innerhalb des Volumenschiebers angeordneten zweiten Schieber, der unabhängig vom Volumenschieber bewegt werden kann.

Bei Variante 2.3 erfolgt die v_i-Einstellung durch einen axialen Drehschieber, der ebenfalls unabhängig vom Volumenschieber verfahren werden kann.

4. Wirksamkeit der Verfahren

4.1 Verfahren ohne Volumenregelung

Bei der reinen v_i-Regelung (ohne Volumenregelung) läßt sich, wie man leicht nachvollziehen kann, im Rahmen der regelungstechnischen Möglichkeiten und abhängig von der Art der Betätigung des Schiebers/Drehschiebers (z.B. hydraulische Betätigung; Betätigung über Stellmotoren) das eingebaute Volumenverhältnis im Rahmen der mechanischen Grenzen des jeweiligen Schiebers stufenlos bzw. in Stufen einstellen.

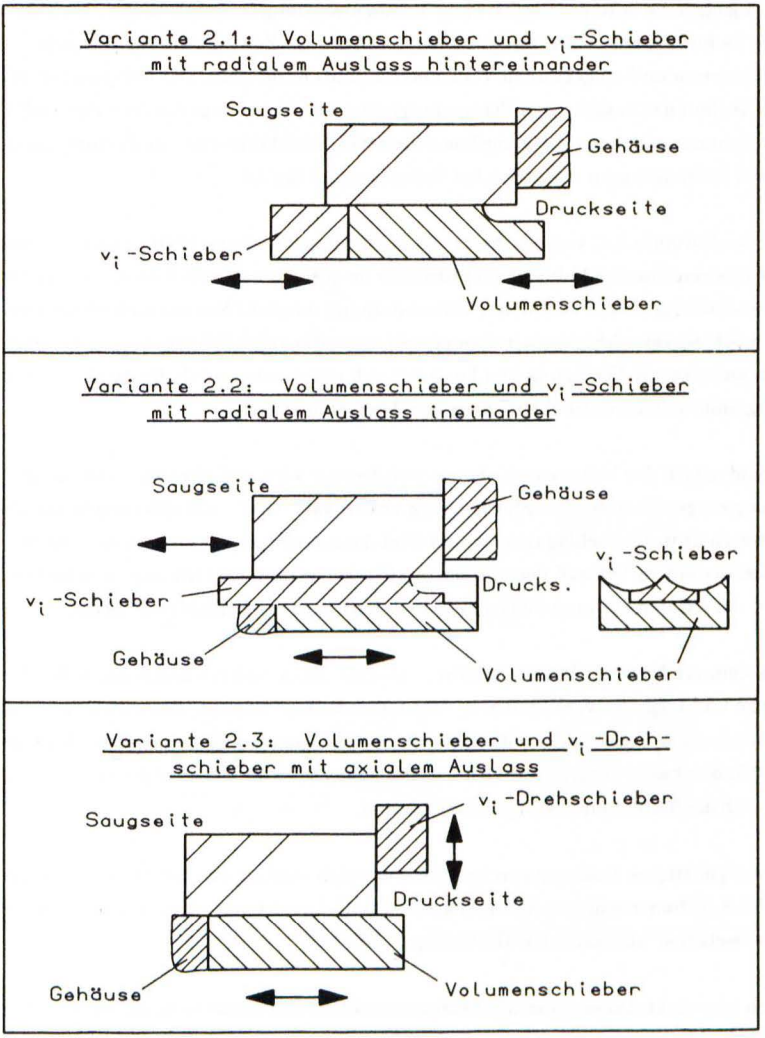

Bild 3: Varianten der v_i-Regelung mit Volumenregelung

4.2 Verfahren mit Volumenregelung

Wird jedoch die v_i-Regelung mit einer Volumenregelung kombiniert, ergeben sich andere Bedingungen. In den Bildern 4 und 5 werden die Zusammenhänge zwischen Schieberweg und eingebautem Volumenverhältnis dargestellt. Die Abbildungen zeigen den Verlauf des eingebauten Volumenverhältnisses in Abhängigkeit von der Stellung des Volumenschiebers. Ausgangsbasis für beide Abbildungen ist ein Kompressor mit einem veränderbaren v_i-Bereich bei Vollast von 2,0 bis 4,8.

Bei der Variante 2.1, veränderbarer axialer Schieberanschlag, (Bild 4) ist eine Variation des eingebauten Volumenverhältnisses im gesamten Einstellbereich nur in der 100%-Stellung (100% Volumen = Vollaststellung) möglich. Nur dann steht die änderbare Schieberanschlaglänge in Summe mit der wirksamen Schieberlänge als Verdichtungsstrecke zur Verfügung und kann der sich gleichzeitig durch die axiale Verschiebung ändernden Ausschubstrecke gegenübergestellt werden.

Sobald jedoch der Volumenschieber so weit bewegt wird, daß der vom Schieberanschlag eingeschlossene Zahnlückenraum unwirksam wird, sinkt das eingebaute Volumenverhältnis fast schlagartig ab und folgt dann unabhängig von der Stellung des v_i-Schiebers einem Verlauf, der nur von der Größe der radialen Öffnung im Schieber, bzw. der axialen Öffnung im Gehäuse und der Länge des Schiebers abhängt.

Ein weiterer Nachteil dieses Verfahrens besteht darin, daß bei ungünstiger Wahl von Länge und Lage des veränderbaren Schieberanschlags (vorhandene wirksame Schieberlänge nach Überschreiten der Saugabschlußkante) eine Vorverdichtung des Gases stattfinden kann. Dieser zusätzliche Energieaufwand kann dann nicht mehr durch zusätzliche Maßnahmen kompensiert werden.

Etwas günstigere Bedingungen im Teillastbereich ergeben sich für die Varianten 2.2 und 2.3, Volumenschieber mit ineinander/parallel angeordnetem v_i-Schieber bzw. Volumenschieber und axialer v_i-Drehschieber (Bild 5).

Auch hier sinkt das eingebaute Volumenverhältnis fast schlagartig ab, wenn der Volumenschieber soweit bewegt wird, daß das vom Schieberanschlag eingeschlossene Zahnlückenvolumen unwirksam wird. Im weiteren Verlauf des Schieberweges (bei unveränderter Stellung des v_i-Schiebers) verringert sich das angesaugte Volumen bei gleich-

bleibendem Volumen bei Verdichtungsabschluß. Daraus resultiert, daß, wie in Bild 5 dargestellt, der mögliche Regelbereich des eingebauten Volumenverhältnisses im Teillastbereich mit sinkendem Ansaugvolumen geringer wird und in der Minimalstellung (entspricht v_i=1,0) zu Null wird.

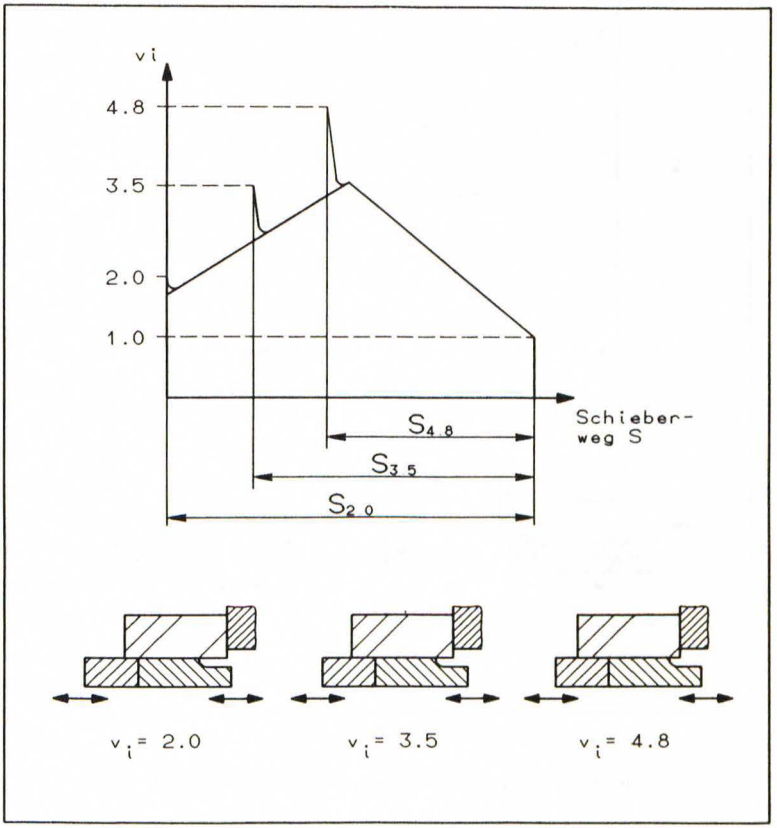

Bild 4: v_i-Verlauf in Abhängigkeit vom Schieberweg

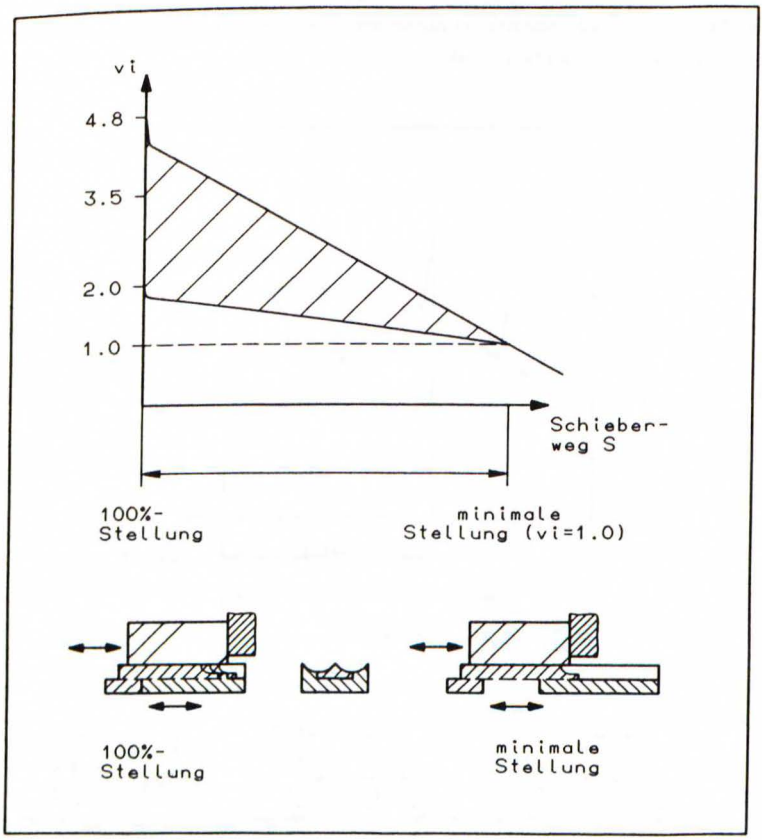

Bild 5: v_i-Verlauf in Abhängigkeit vom Schieberweg

4.3 Bewertung

Das System nach Variante 2.1, veränderbarer axialer Schieberanschlag, bietet Vorteile, wenn die Maschine ausschließlich in 100%-Stellung betrieben wird und die zu fahrenden Drücke bzw. Druckverhältnisse sich häufig ändern.

Bei Industriekälteanlagen, welche im allgemeinen mit konstanten Drücken (Temperaturen) aber auch leider sehr häufig im Teillastbereich betrieben werden, ist eine solche Ausführung ein nicht sinnvolles Zubehör, welches nicht kostenlos ist und sicherlich als zusätzliche Störquelle betrachtet werden muß.

Als Grundlastmaschine bei wechselnden Ansaug- und/oder Enddrücken ist dieses System zu empfehlen. Allerdings ist dann der Schieber zur Volumenregelung überflüssig und eine Maschine nach Variante 1.1 sinnvoller.

Kompressoren mit voneinander unabhängiger v_i- und Volumenregelung (Varianten 2.2 und 2.3) bieten im Vollastbetrieb die gleichen Vorteile. Im Teillastbetrieb sind sie der Variante 2.1 überlegen. Aber auch bei diesen Ausführungen kann eine Optimierung der Energieumwandlung im Teillastbereich aufgrund des stark eingeschränkten Regelbereichs des eingebauten Volumenverhältnisses nur in geringem Maße erfolgen.

5. Zusammenfassung

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß alle aufgeführten Verfahren im Vollastbetrieb je nach Größe der Schwankung der Betriebsdrücke deutliche Energieeinsparungen erzielen. In Verbindung mit einer Volumenregelung ergeben sich jedoch gerade im häufig genutzten Teillastbereich nur eingeschränkte bzw. keine Möglichkeiten zur Optimierung der Energieumwandlung. Demgegenüber steht ein deutlich erhöhter konstruktiver Aufwand, der einen solchen Kompressor in der Herstellung teurer und im Betrieb durch die vielen zusätzlichen beweglichen Teile wahrscheinlich nicht betriebssicherer macht.

6. Literaturverzeichnis

[1] Heyer, Immo:
Schraubenverdichter mit variablem Volumenverhältnis. Ki Kälte - Klima - Heizung, 6/1988, S. 277/284

[2] Mosemann, D. und Kolberg, P.:
v_i-geregelter Kältemittelschraubenkompressor auf Schiffen. VDI-Bericht 859, S. 185/206, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1990

[3] Kauder, K. und Piatkowski, R.:
Gibt es eine konstruktive Alternative zur Schieberregelung von Schraubenkompressoren? Pumpen · Kompressoren · Vakuumpumpen, 1993, S. 64/70