

# Anpassung von Schraubenverdichtern an Betriebsbedingungen

Dipl.-Ing. **F.-J. Peveling**, Dortmund

## Zusammenfassung

Die Untersuchungen geben gezielte Hinweise zur Maschinenkennwertverbesserung aus einer Spaltprioritätsbetrachtung. Ferner wird der Einfluß der Hauptrotordrehzahl in Zusammenhang mit den Spalthöhen im Hinblick auf Verbesserungspotentiale und Kompensationsmöglichkeiten aufgezeigt. Die Volumenverhältnisanpassung an die geforderten Druckverhältnisse stellt Möglichkeiten der Kennwertoptimierung für verschiedene Arbeitsfluide dar, bei dem kein wesentlicher konstruktiver und fertigungstechnischer Mehraufwand erforderlich ist. Die Umschlingungswinkelanpassung gibt eine weitere Möglichkeit der Verbesserung der Maschinenkenngrößen entsprechend den Betriebsbedingungen für heute bereits gebaute Profilformen an.

## Symbole

$h$	Spalthöhe
$m_f$	geförderte Masse pro Arbeitsspiel
$m_{th}$	theoretisch förderbare Masse pro Arbeitsspiel
$\dot{m}_{th}$	theoretischer Massenstrom
$P_i$	indizierte Leistung
$P_s$	isentropie Verdichtungsleistung
$T_E$	Ansaugtemperatur
$v_i$	eingebautes Volumenverhältnis
$(v_i)_{th}$	theoretisches Volumenverhältnis
$(v_i)_R$	berechnetes Volumenverhältnis zur Erreichung der Gütegradeinhüllenden $(\eta_{i,s})_{opt}$
$w_s$	spezifische isentrope Verdichtungsarbeit
$W_s$	isentropie Verdichtungsarbeit
$W_{it}$	indizierte Arbeit
$z_{HR}$	Hauptrotorzähnezahl
$\alpha$	Durchflußbeiwert

$\eta_{i,s}$	isentropen, indizierter Gütegrad
$\Delta\eta_{i,s}$	$\Delta\eta_{i,s} := (\eta_{i,s})_{opt} - (\eta_{i,s})_{th}$
$(\eta_{i,s})_{opt}$	Einhüllende der isentropen, indizierten Gütegradverläufe $\eta_{i,s}$
$(\eta_{i,s})_{th}$	isentropen, indizierter Gütegrad bei Verwirklichung des theoretischen Volumenverhältnisses $(v_i)_{th}$ beim entsprechenden Druckverhältnis $\Pi$
$(\eta_{i,s})_{v_i}$	isentropen, indizierter Gütegradverlauf mit konstantem Volumenverhältnis $v_i$ als Parameter
$(\Delta\eta_{i,s})_{v_i}$	$(\Delta\eta_{i,s})_{v_i} := (\eta_{i,s})_{opt} - (\eta_{i,s})_{v_i}$ max
$\kappa$	Isentropenexponent
$\lambda_L$	Liefergrad
$(\lambda_L)_{opt}$	Einhüllende der Liefergradverläufe $\lambda_L$
$(\lambda_L)_{v_i}$	Liefergrad mit konstantem Volumenverhältnis $v_i$ als Parameter
$\Pi$	Druckverhältnis
$\phi_{M,HR}$	Hauptrotorumschlingungswinkel

### Indizes und Abkürzungen

max	Maximum
N	Nennwert

### 1. Einleitung

Die zur Zeit gebauten Schraubenverdichter müssen den jeweiligen Spezifikationen der Kunden angepaßt werden. Für die trockenlaufenden Schraubenverdichter sind die Hauptanpassungsmerkmale:

- Volumenstromanpassung durch Stufenwahl, Rotordrehzahl und Ansaugvolumen,
- Druckanpassung durch den Eintrittsdruck und den Austrittsdruck und daraus folgend eine Anpassung des eingebauten Volumenverhältnisses  $v_i$ ,
- Arbeitsfluidanpassung entsprechend den thermodynamischen Fluideigenschaften.

Aufgrund der komplexen Zusammenhänge der Verlustmechanismen mit ihrer teilweise gegenläufigen Beeinflussung auf bestimmte Maßnahmen, wie z.B. bei einer Änderung des eingebauten

Volumenverhältnisses, ist eine einfache Berechnung der Auswirkungen nur selten möglich. Sollen bei der Anpassung der Schraubenverdichter an Betriebsbedingungen optimale Maschinenkennwerte erreicht werden, so sind gleichzeitig mehrere Maßnahmen erforderlich, was eine einfache Berechnung zusätzlich erschwert. Deshalb wird in der Regel auf Meßwerte zurückgegriffen. Experimentelle Untersuchungen sind kostenintensiv und liefern bei der Durchführung gezielter Variationen, sofern die Geometrie der Maschine geändert werden muß oder mehrere Maschinen untersucht werden, wegen existierender Fertigungstoleranzen nicht immer eindeutige Ergebnisse. Darum sollte eine theoretische Untersuchung dem Experiment vorausgehen, um das Verhältnis von Aufwand und Nutzen a priori abschätzen zu können. Hier sollen einige Ergebnisse der Auswirkungen von Betriebsparameteranpassungen dargestellt werden.

## 2. Berechnungsverfahren

Bei dem Berechnungsverfahren handelt es sich um ein iteratives Verfahren für beliebige trockenlaufende Schraubenmaschinen, das auf ein adiabates Kammermodell und auf an Modellen experimentell gewonnenen Durchflußbeiwerten für die Spaltströmungen und druckseitigen Steuerkanten aufbaut.

Als Profil für die Untersuchungen wurde ein symmetrisches Kreisbogenprofil mit vier Hauptrotor- und sechs Nebenrotorzähnen und einem Hauptrotorumschlingungswinkel von  $\phi_{M,HR} = 300^\circ$  gewählt, da für dieses Profil am Fachgebiet für Fluidenergiemaschinen eine Vielzahl von Messungen, insbesondere Indikatordiagramme, zur experimentellen Abstützung vorliegen. Die Ergebnisse für dieses Kreisbogenprofil lassen sich aber qualitativ auf andere Profilformen übertragen. Die beiden Maschinenkenngrößen Liefergrad  $\lambda_L$  und isentroper, indizierter Gütegrad  $\eta_{i,s}$  sind wie folgt definiert:

$$\lambda_L := \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_{th}} \quad \text{Gl. (1)}$$

$$\eta_{i,s} := \frac{P_s}{P_i} = \frac{\lambda_L \dot{m}_{th} w_s}{z_{HR} \dot{m}_{HR} w_{it}} \quad \text{Gl. (2)}$$

### 3. Spaltprioritäten

Die Spaltströme im Verdichter und die daran beteiligten Spaltarten haben einen wesentlichen Einfluß auf sein Betriebsverhalten. Wegen ihrer verschiedenen Geometrien und Verbindungsarten haben die Spaltarten einen unterschiedlichen quantitativen Einfluß auf den isentropen, indizierten Gütegrad und den Liefergrad. Die Kenntnis über die Spaltprioritäten ist jedoch für die Entscheidung zur Durchführung von Anpassungsmaßnahmen und die Beurteilung des Einflusses von Fertigungstoleranzen lohnend.

Bild 1 und Bild 2 zeigen die Spaltprioritäten als Funktion des isentropen, indizierten Gütegrades und des Liefergrades, sowie die Änderung dieser Größen, wenn nur für eine bestimmte Spaltart die Spalthöhe reduziert wird. Für die Kennzeichnung des Kopfrundungsöffnungseinflusses ist der Durchflußbeiwert des Blasloches variiert worden. Die Bilder 1 und 2 zeigen, daß sowohl beim Gütegrad als auch beim Liefergrad der Profileingriffsspalt die größte Wirkung hat. Die Ursache hierfür liegt in der relativ großen Profileingriffsspaltlänge gegenüber den anderen Spaltarten und den anliegenden Druckgefällen, die in die ND-Seite hinein expandieren. Der Stirnspalt spielt in der Spaltprioritätsliste eine stark untergeordnete Rolle. Der Gehäusespalt bewirkt den zweitgrößten Einfluß. Die Priorität der Kopfrundungsöffnung liegt deutlich unter der des Gehäusespaltes, jedoch sichtbar über der des Stirnspaltes.

Bei der Aufteilung des Profileingriffsspalttes ist eine erhöhte Priorität des Profileingriffsspalttes von der HD- zur ND-Seite zu erkennen und zeigt so die Wichtigkeit dieses Spaltanteiles. Bei größeren eingebauten Volumenverhältnissen  $v_1$  geht diese Priorität aufgrund kürzer werdender Spaltlängen zugunsten des Profileingriffsspalttes zwischen den verdichtenden Kammern und der ND-Seite zurück.

Ferner zeigt sich, daß die Spaltarten, die immer eine Verbindung zur ND-Seite bilden, im Vergleich zum Gütegrad beim Liefergrad eine höhere Priorität besitzen. Die Spaltströme dieser Spaltarten reduzieren die geförderte Masse direkt.

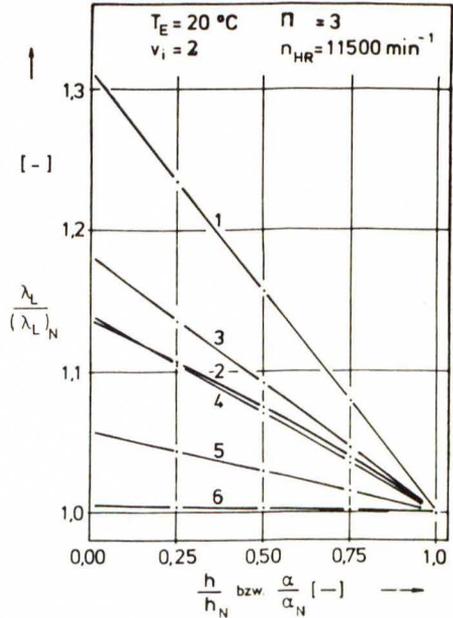
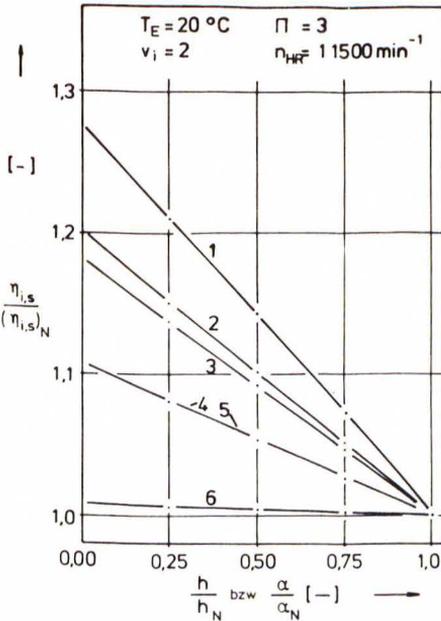


Bild 1

Bild 2

Bezogener isentroper, indizierter Gütegrad  $\eta_{i,s}/(\eta_{i,s})_N$  und bezogener Liefergrad  $\lambda_L/(\lambda_L)_N$  in Abhängigkeit von der bezogenen Spalthöhe  $h/h_N$  bzw. Durchflußbeiwert  $\alpha/\alpha_N$  bezüglich einer Spaltart für Luft

Parameter: Spaltart

- |   |  |
|---|--|
| 1 Gesamtprofileingriffsspalt                            | 4 Teilprofileingriffsspalt zwischen den verdichtenden Kammern und der ND-Seite |
| 2 Gehäusespalt  | 5 Kopfrundungsöffnung (Blasloch)   |
| 3 Teilprofileingriffsspalt zwischen der HD- u. ND-Seite | 6 Stirnspalt   |

Die relativ hohe Priorität des Gehäusespaltes und der Kopfrundungsöffnung auf den Gütegrad bezüglich des Liefergrades ist sowohl in der Erhöhung des Liefergrades als auch in der Verkleinerung der indizierten Arbeit  $W_{it}$  (s. Gl. (2)) begründet. Somit werden Änderungen am Profileingriffsspalt bevorzugt den Liefergrad beeinflussen, Änderungen beim Gehäusespalt und bei der Kopfrundungsöffnung jedoch den Gütegrad.

#### 4. Einfluß von Hauptrotordrehzahl und Spalthöhen

In diesem Abschnitt soll der Einfluß der Spalthöhen insgesamt in Verbindung mit den Hauptrotordrehzahlen, ausgehend von einem Betriebspunkt, betrachtet werden, womit dann abgeschätzt werden kann, wie sich entsprechende Anpassungsmaßnahmen auswirken und gegebenenfalls kompensiert werden können. Ferner zeigen die Diagramme das Verbesserungspotential durch Drehzahl- und Spalthöhenänderung.

Im Bild 3 und im Bild 4 sind der isentrope, indizierte Gütegrad und der Liefergrad in Abhängigkeit von der Drehzahl bei einem festgehaltenen Druckverhältnis mit der Spalthöhe als Parameter aufgetragen. Dabei wurde die Spalthöhe für alle Spaltarten gleichprozentig variiert. Wie die Bilder 3 und 4 zeigen, ist der Verlauf des Gütegrades hauptsächlich durch den Liefergradverlauf geprägt, wenn das Druckverhältnis konstant gehalten wird und nicht zu sehr vom Auslegungspunkt abweicht. Allerdings ist mit steigender Drehzahl bzw. geringeren Spalthöhen ein relativ größerer Anstieg des Gütegrades gegenüber dem Liefergrad zu erkennen, was durch die gleichzeitige Liefergradverbesserung und Verringerung der indizierten Arbeit hervorgerufen wird. Der verstärkte Abfall des Liefergrades mit kleiner werdender Hauptrotordrehzahl wird durch die relativ größer werdenden zurückströmenden Spaltmassen in die verdichtenden Kammern und die ND-Seite sowie durch eine verstärkte Erwärmung des Fluids in der ND-Seite hervorgerufen. Die zuströmenden Spaltmassen in die verdichtenden Kammern bewirken eine Druckverlaufsanhebung beim Verdichtungs Vorgang, wodurch eine Anhebung des mittleren Druckes und so ein stärkerer Liefergradabfall hervorgerufen wird. Für engspielige Maschinen ist, wie aus den Kurven ersichtlich, nur noch mit sehr hohem Aufwand eine Maschinenverbesserung möglich. Andererseits bedeutet eine zu großspielige Fertigung ein überproportionales Abfallen der Maschinenkennwerte. Eine Kompensation der Kennwerte bei einer geforderten Drehzahlminderung ist, wie die Bilder 3 und 4 veranschaulichen, in erster Näherung durch eine Spalthöhenminderung im gleichen Verhältnis möglich.

$\Pi = 3$   $(\eta_{i,s})_{SN} = 62,9\%$

$(\lambda_L)_N = 68,8\%$

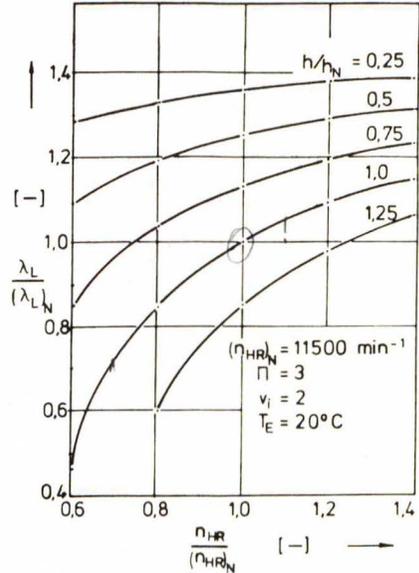
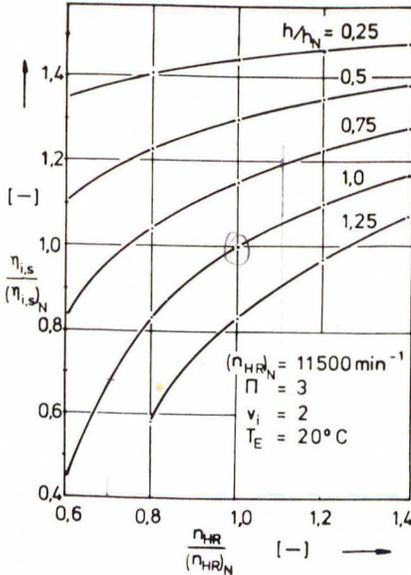


Bild 3

Bild 4

Bezogener isentroper, indizierter Gütegrad  $\eta_{i,s}/(\eta_{i,s})_N$  und bezogener Liefergrad  $\lambda_L/(\lambda_L)_N$  in Abhängigkeit von der bezogenen Hauptrotordrehzahl  $n_{HR}/(n_{HR})_N$  für Luft

Parameter: Bezogene Spalthöhe  $h/h_N$ , wobei die Spalthöhenänderung bei allen Spalten gleichprozentig durchgeführt wurde.

5. Anpassung von Druck- und Volumenverhältnis

Die gefertigten Verdichterstufen sind den jeweiligen geforderten Druckverhältnissen anzupassen. Dies impliziert eine Volumenverhältnisanpassung. Bedingt durch die Leckmassenströme und die Ausströmverhältnisse an den druckseitigen Steuerkanten führt die Verwirklichung eines theoretischen Volumenverhältnisses  $(v_i)_{th}$ , das sich aus der isentropen Zustandsänderung

$$(v_i)_{th} = \Pi^{\frac{1}{\kappa}} \tag{3}$$

ergibt, nicht zu optimalen Gütegraden. Bild 5 veranschaulicht den Verlauf des isentropen, indizierten Gütegrades und Bild 6 den Verlauf des Liefergrades in Abhängigkeit vom Druckver-

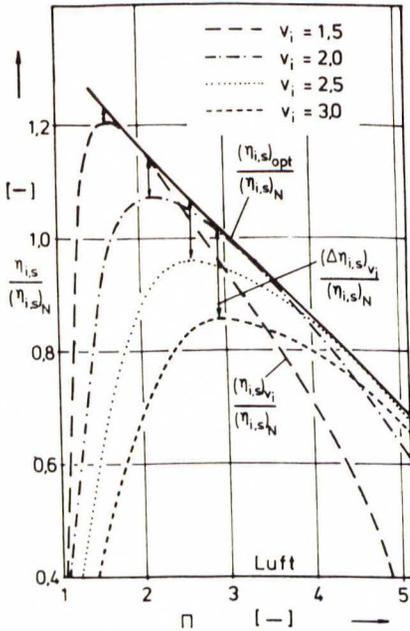


Bild 5

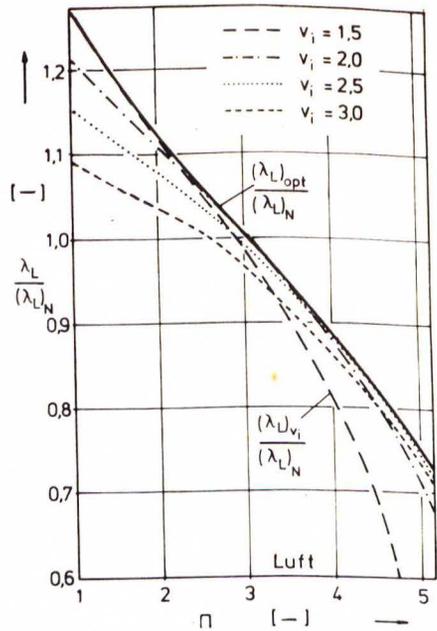


Bild 6

Bezogener isentroper, indizierter Gütegrad  $(\eta_{i,s})_{v_i} / (\eta_{i,s})_N$  und bezogener Liefergrad  $(\lambda_L)_{v_i} / (\lambda_L)_N$  in Abhängigkeit vom Druckverhältnis  $\Pi$  für Luft mit den Einhüllenden  $(\eta_{i,s})_{opt} / (\eta_{i,s})_N$  und  $(\lambda_L)_{opt} / (\lambda_L)_N$

$$n_{HR} = 11500 \text{ min}^{-1} ; T_E = 20^\circ\text{C}$$

Parameter: eingebautes Volumenverhältnis  $v_i$

hältnis für das Arbeitsfluid Luft mit dem eingebauten Volumenverhältnis  $v_i$  als Parameter, sowie die Einhüllende des Gütegrades  $(\eta_{i,s})_{opt}$  und des Liefergrades  $(\lambda_L)_{opt}$ . Bild 6 zeigt für die Liefergradverläufe  $(\lambda_L)_{v_i}$  mit kleinen  $v_i$ -Werten einen steileren Kurvenabfall und größere Startwerte, für größere Druckverhältnisse dagegen sind die Liefergradverläufe  $(\lambda_L)_{v_i}$  mit großen  $v_i$ -Werten günstiger. Dies wird bei kleinen Druckverhältnissen durch einen niedrigeren Druckverlauf bei kleinen  $v_i$ -Werten bezüglich den großen  $v_i$ -Werten verursacht, weil eine geringere Drucküberhöhung gegenüber dem Gegendruck stattfindet und daraus ergibt sich insgesamt eine geringere Druckverlaufsanhebung. Bei großen Druckverhältnissen bewirken zu kleine Volumenverhältnisse wegen der

erhöhten Ladungswechselarbeit ebenfalls eine Druckverlaufsanhebung. Die Druckverlaufsanhebung bewirkt in beiden Fällen eine Erhöhung der Spaltströme und eine Erwärmung in der ND-Seite und damit eine Verschlechterung des Liefergrades. Der Abfall der Liefergradeinhüllenden  $(\lambda_L)_{opt}$  resultiert aus der Anhebung des Gegendruckes. Der Verlauf der Gütegradkurven im Bild 5 wird einerseits durch den Liefergradverlauf und andererseits durch das Verhältnis der Arbeitsfläche  $W_s$  der isentropen Verdichtung zur indizierten Arbeitsfläche  $W_{it}$  im p,V-Diagramm (s.Gl. (2)) geprägt. Dieses Verhältnis wird als Arbeitsflächenverhältnis  $W_s/W_{it}$  bezeichnet. Mit größer werdenden  $v_i$ -Werten verschiebt sich das Arbeitsflächenverhältnismaximum  $(W_s/W_{it})_{max}$  hin zu größeren Drücken, bedingt durch die Minimierung der indizierten Arbeit aus Drucküberhöhung und zusätzlicher Ausschiebearbeit, mit einem gleichzeitigen Abfall der Maxima aufgrund der relativ stärker anwachsenden Zusatzarbeit aus einer Druckverlaufsanhebung. Der Abfall des Liefergrades, sowie die Verringerung der  $(W_s/W_{it})_{max}$ -Werte mit dessen Verschiebungstendenz bewirken die Senkung der jeweiligen Gütegradmaxima  $(\eta_{i,s})_{v_i,max}$  bei steigenden Volumenverhältnissen. Das Gütegradmaximum  $(\eta_{i,s})_{v_i,max}$  liegt wegen der fallenden Tendenz des Liefergrades bei kleineren Druckverhältnissen als die  $(W_s/W_{it})_{max}$ -Werte.

Da die Einhüllende des Gütegrades  $(\eta_{i,s})_{opt}$  um die Differenz  $(\Delta \eta_{i,s})_{v_i}$  höher liegt als das Gütegradmaximum  $(\eta_{i,s})_{v_i,max}$ , ist für das entsprechende Druckverhältnis das zur Gütegradeinhüllende gehörige Volumenverhältnis  $(v_i)_R$  zu wählen. Der Gradient der Senkung für die Einhüllenden des Liefergrades  $(\lambda_L)_{opt}$  und der  $(W_s/W_{it})_{max}$ -Werte und somit der Verlauf der Gütegradeinhüllenden  $(\eta_{i,s})_{opt}$ , sowie deren absolute Werte, sind arbeitsfluidabhängig, insbesondere von deren Schallgeschwindigkeit.

Bild 7 und Bild 8 veranschaulichen den Einfluß des Arbeitsfluids. Die Bilder beinhalten die Einhüllende des Gütegrades  $(\eta_{i,s})_{opt}$  und dem zur Gütegradeinhüllenden gehörenden Liefergrad für die Arbeitsfluide Dichlortetrafluoräthan (R114),

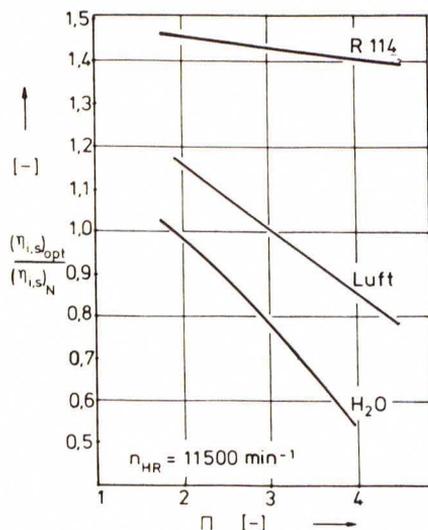


Bild 7

Bezogene Gütegradeinhüllende

$(\eta_{i,s})_{opt}/(\eta_{i,s})_N$  in Abhängigkeit vom Druckverhältnis  $\Pi$

Parameter: Fluidart

Luft

Wasserdampf ( $\text{H}_2\text{O}$ )

Dichlortetrafluoräthan (R114)

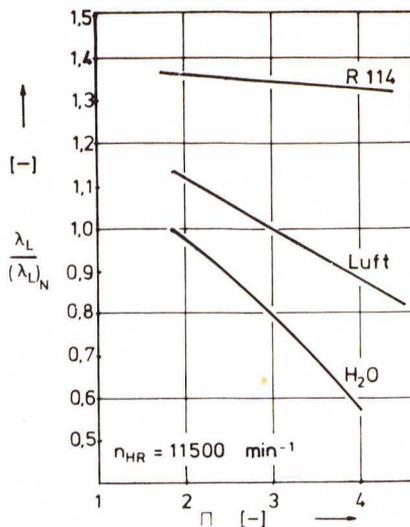


Bild 8

Bezogener Liefergrad

$\lambda_L/(\lambda_L)_N$ , der zur Gütegradeinhüllenden gehört, in Abhängigkeit vom Druckverhältnis  $\Pi$

$T_E = 20^\circ\text{C}$

$T_E = 100^\circ\text{C}$

$T_E = 20^\circ\text{C}$

Luft und Wasserdampf. Für Arbeitsfluide mit relativ kleinen Schallgeschwindigkeiten (z.B. R114) sind höhere Gütegrade und Liefergrade zu erzielen, und ihre Abhängigkeit vom Druckverhältnis ist geringer, bedingt durch die relativ kleineren Spaltströme.

Es ist anzumerken, daß die  $(W_s/W_{it})_{max}$ -Werte der Kurven mit konstantem Volumenverhältnis als Parameter bei den Arbeitsfluiden mit höheren Schallgeschwindigkeiten schneller abfallen und die Maxima bei relativ kleineren Druckverhältnissen liegen. Dies führt in Verbindung mit dem Liefergradverlauf  $\lambda_L$  für den Gütegradverlauf  $(\eta_{i,s})_{opt}$  zu einem stei-

leren Kurvenabfall. Die Auslaßkontur wird die Kennlinien um so stärker beeinflussen, je kleiner die Schallgeschwindigkeit des Arbeitsfluids ist, da für diese Fluide beim Ausströmvorgang höhere Druckgefälle nötig sind. Dies wirkt sich dann wie eine Vergrößerung des eingebauten Volumenverhältnisses aus. Bei großen eingebauten Volumenverhältnissen wird die Wirkung der Auslaßkontur im allgemeinen wegen der kleineren Ausströmflächen nochmals verstärkt. Damit kommt es zu einer Verschiebung der Gütegradmaxima  $(\eta_{i,s})_{v_i, \max}$  hin zu größeren Druckverhältnissen. Berechnet man aus den zu dem Gütegradmaxima  $(\eta_{i,s})_{v_i, \max}$  gehörigen Druckverhältnis nach Gl. (3) das theoretische Volumenverhältnis  $(v_i)_{th}$ , so stellt man fest, daß das jeweilige mit dem Maxima verbundene Volumenverhältnis (s. Bild 5) bei Luft größer ist als das theoretische Volumenverhältnis. Dies tritt verstärkt bei Wasserdampf auf. Bei R114 ist das Volumenverhältnis dagegen kleiner als das theoretische Volumenverhältnis. Für R114 wird dies durch die relativ dichten Spalte und den bereits angesprochenen starken Einfluß der Auslaßkontur aufgrund der geringen Schallgeschwindigkeit verursacht. Dagegen kommt bei Luft und Wasserdampf die Verschiebungstendenz der  $(W_s/W_{it})_{\max}$  Werte zu kleineren Druckverhältnissen in Zusammenhang mit den steiler abfallenden Liefergradverläufen bei Fluiden mit höheren Schallgeschwindigkeiten zum Tragen. Wie bereits erwähnt, liegt die Gütegradeinhüllende  $(\eta_{i,s})_{opt}$  um  $(\Delta \eta_{i,s})_{v_i}$  über dem Gütegradmaximum  $(\eta_{i,s})_{v_i, \max}$  (Bild 5). Dies zeigt sich um so deutlicher, je höher die Schallgeschwindigkeit des Arbeitsfluids ist. Das zur Erzielung der Gütegradeinhüllenden zu verwirklichende Volumenverhältnis  $(v_i)_R$  hat einen kleineren Wert als das zum Gütegradmaximum  $(\eta_{i,s})_{v_i, \max}$  gehörende Volumenverhältnis. Da diese Relation um so größer wird, je höher die Schallgeschwindigkeit des Arbeitsfluids ist, kommt es zu den in den Bildern 9, 10 und 11 dargestellten Volumenverhältnisverläufen  $(v_i)_R$  in Abhängigkeit vom Druckverhältnis, die auch für Luft und Wasserdampf kleiner sind als das theoretische Volumenverhältnis  $(v_i)_{th}$ . Das einzubauende Volumenverhältnis für ein gegebenes

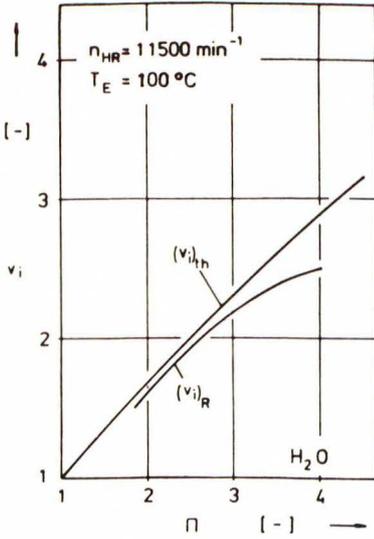


Bild 9

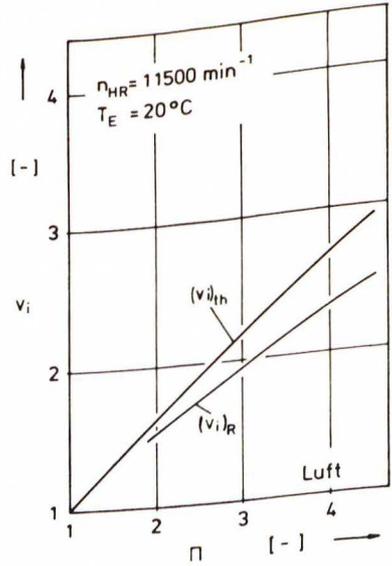


Bild 10

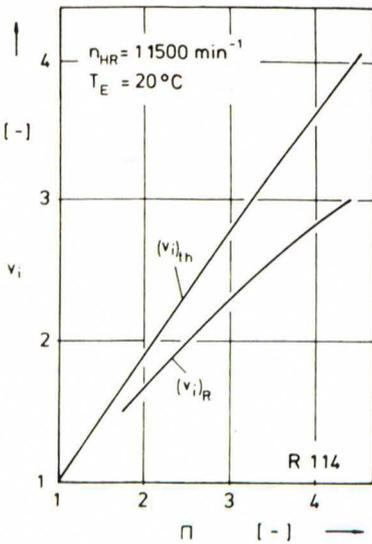


Bild 11

Theoretisches Volumenverhältnis  $(v_i)_{th}$  aus der isentropen Zustandsänderung und berechnetes Volumenverhältnis  $(v_i)_R$  zur Erreichung der Gütegradeinhalten  $(\eta_{i,s})_{opt}$  in Abhängigkeit vom Druckverhältnis  $\pi$

Bild 9 :  $\text{H}_2\text{O}$

Bild 10 : Luft

Bild 11 : R114

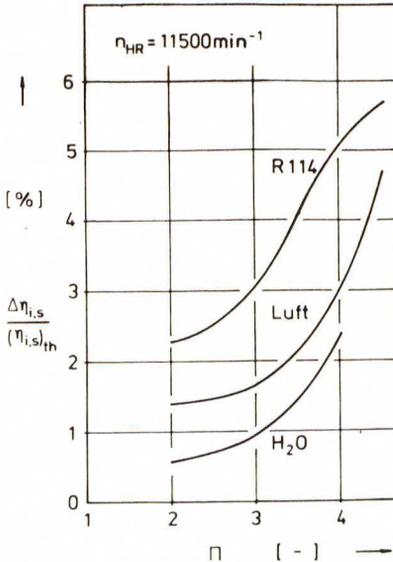


Bild 12

Relative Gütegradverbesserung

$\Delta \eta_{i,s}/(\eta_{i,s})_{th}$  in Abhängigkeit vom Druckverhältnis  $\Pi$  bei Verwirklichung des berechneten Volumenverhältnisses  $(v_i)_R$  in Bezug auf das theoretische Volumenverhältnis  $(v_i)_{th}$

Parameter: Fluidart

R114, Luft, H<sub>2</sub>O

Druckverhältnis sollte, wie die Bilder 9, 10 und 11 erkennen lassen, kleiner als das theoretische Volumenverhältnis sein. Die Verringerung des einzubauenden Volumenverhältnisses muß um so größer sein, je niedriger die Schallgeschwindigkeit des Arbeitsfluids und je größer das anliegende Druckverhältnis wird. Werden die berechneten Volumenverhältnisse  $(v_i)_R$  statt des theoretischen Volumenverhältnisses  $(v_i)_{th}$  ver-

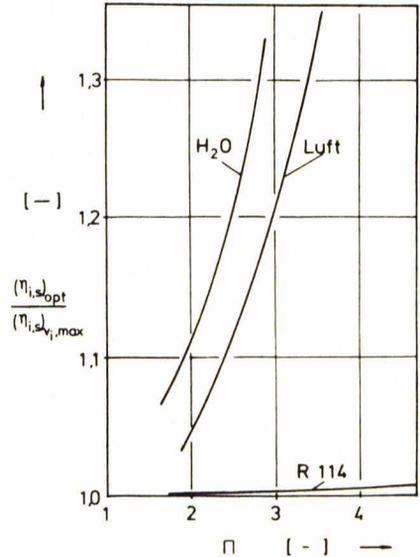


Bild 13

Relatives Gütegradverhältnis

$(\eta_{i,s})_{opt}/(\eta_{i,s})_{v_i,max}$  in Abhängigkeit vom Druckverhältnis, wenn für das Druckverhältnis  $\Pi$ , bei dem eine Gütegradkennlinie mit konstantem  $v_i$  ihr Maximum  $(\eta_{i,s})_{v_i,max}$  hat, statt des zum Maximum gehörenden  $v_i$ 's das zur Einhüllenden  $(\eta_{i,s})_{opt}$  berechnete  $(v_i)_R$  eingesetzt wird.

wirklicht, so lassen sich die im Bild 12 dargestellten relativen Gütegradverbesserungen in Abhängigkeit vom Druckverhältnis erzielen. Die Lage der Gütegradverläufe zueinander und in Abhängigkeit vom Druckverhältnis findet ihre Ursache in den Verhältnissen von  $(v_i)_{th}$  und  $(v_i)_R$  zueinander (Bilder 9, 10 und 11). Realisiert man für das Druckverhältnis, bei dem das Gütegradmaxima  $(\eta_{i,s})_{v_i,max}$  einer Kennlinie mit konstantem Volumenverhältnis (Bild 5) liegt, das zur Gütegradeinhüllenden  $(\eta_{i,s})_{opt}$  gehörende Volumenverhältnis  $(v_i)_R$ , so ergibt sich das in Bild 13 dargestellte Gütegradverhältnis  $(\eta_{i,s})_{opt}/(\eta_{i,s})_{v_i,max}$  in Abhängigkeit vom Druckverhältnis für die jeweiligen Arbeitsfluide. Dieses Verhältnis wird um so größer, je höher die Schallgeschwindigkeit des Arbeitsfluids ist. Dies wird verursacht durch die bereits angesprochene Relation der Volumenverhältnisse zueinander, die den Gütegraden zugeordnet sind.

#### 6. Umschlingungswinkelanpassung

Eine weitere Anpassungsmöglichkeit für Schraubenverdichter an Betriebsbedingungen ist in einer geeigneten Wahl des Hauptrotorumschlingungswinkels  $\phi_{M,HR}$  unter Beibehaltung der Stirnschnittprofilform gegeben. Dabei kann die Konstruktion der Maschinen weitestgehend beibehalten werden, für die Rotorfertigung wären jedoch unterschiedliche Werkzeugsätze notwendig.

Bild 14 und Bild 15 zeigen den Liefer- und Gütegrad in Abhängigkeit vom Druckverhältnis und Hauptrotorumschlingungswinkel bei einem konstanten eingebauten Volumenverhältnis  $v_i = 2$  und für Luft als Arbeitsfluid. Der Liefergrad fällt in Abhängigkeit vom Druckverhältnis für alle Hauptrotorumschlingungswinkel, dies um so stärker, je größer der Umschlingungswinkel wird. In Abhängigkeit vom Hauptrotorumschlingungswinkel finden sich für ein festgehaltenes Druckverhältnis maximale Werte für einen Umschlingungswinkel um  $\phi_{M,HR} = 200^\circ$ . Die Maxima sind bei hohen Druckverhältnissen ausgeprägter. Die Maxima im Bereich des Hauptrotorums-

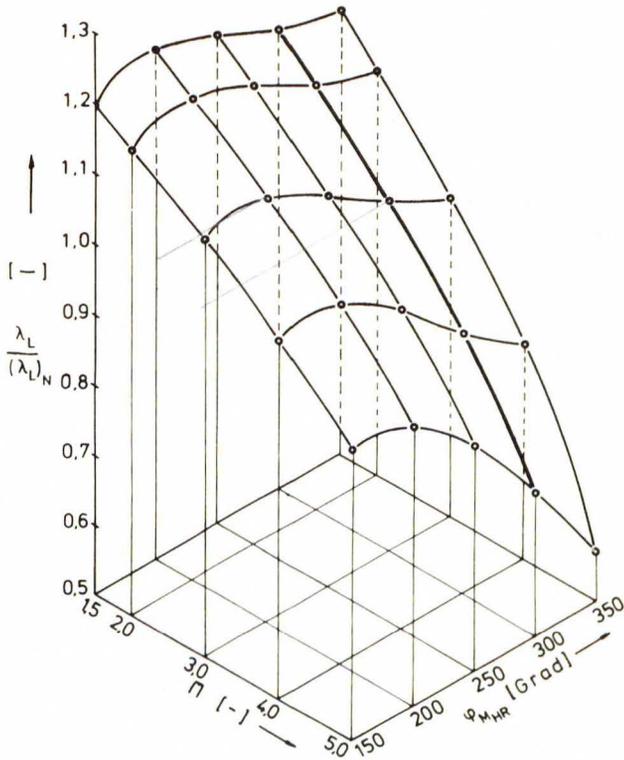


Bild 14

Bezogener Liefergrad  $\lambda_L / (\lambda_L)_N$  in Abhängigkeit vom Druckverhältnis  $\pi$  und dem Hauptrotorumschlingungswinkel  $\phi_{M,HR}$  für Luft bei konstantem Volumenverhältnis  $v_i$

$$v_i = 2$$

$$n_{HR} = 11500 \text{ min}^{-1}$$

$$T_E = 20^\circ\text{C}$$

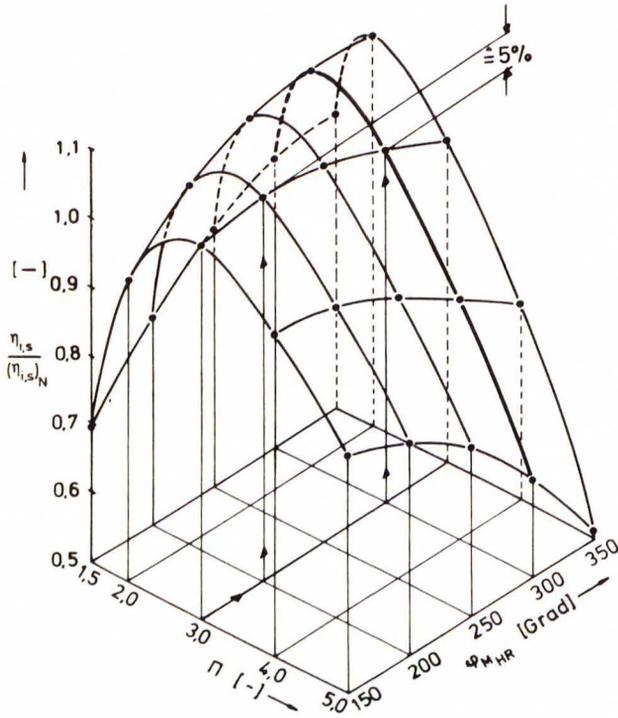


Bild 15

Bezogenen isentroper, indizierter Gütegrad  $\eta_{i,s}/(\eta_{i,s})_N$  in Abhängigkeit vom Druckverhältnis  $\pi$  und dem Hauptrotorumschlingungswinkel  $\phi_{M,HR}$  für Luft bei konstantem Volumenverhältnis  $v_i$

$$v_i = 2$$

$$n_{HR} = 11500 \text{ min}^{-1}$$

$$T_E = 20^\circ\text{C}$$

schlingungswinkels  $\phi_{M,HR} = 200^\circ$  werden durch entsprechend kürzere Verdichtungszeiten und der teilweise gegenläufigen Tendenz der Spaltlängen- bzw. Spaltflächenänderung als Funktion des Hauptrotorumschlingungswinkels bestimmt. Der prinzipielle Verlauf des Gütegrades, Bild 15, in Abhängigkeit von Druckverhältnis für konstante Hauptrotorumschlingungswinkel wird im wesentlichen durch das konstant gehaltene Volumenverhältnis und den Liefergradverlauf bestimmt (analog Bild 5). Der geringere Anstieg des Gütegradverlaufs für kleine Druckverhältnisse und der geringere Abfall der Gütegradkennlinie für große Druckverhältnisse bei kleinen Hauptrotorumschlingungswinkeln wird durch eine relativ größere Dichte der Maschine hervorgerufen und durch die Liefergradverläufe bestätigt. Bei konstant gehaltenem Volumenverhältnis handelt es sich hier nicht um optimierte Funktionsflächen. Hierfür wären Volumenverhältnisvariationen nötig und analog zu den Bildern 5 und 6 die Einhüllenden der rotorumschlingungswinkel von  $\phi_{M,HR} = 300^\circ$  ist zu erkennen, daß ein Schraubenverdichter mit  $\phi_{M,HR} = 300^\circ$  und  $v_i = 2$  bei einem Druckverhältnis von ungefähr  $\Pi = 3$  im Sinne der Gütegradeinhüllenden eingesetzt würde. Aus Bild 15 ist ersichtlich, daß bei einem Druckverhältnis von  $\Pi = 3$  und einer alleinigen Hauptrotorumschlingungswinkelanpassung ohne eine Volumenverhältnisoptimierung bereits eine relative Verbesserung des Gütegrades von etwa 5% zu erwarten ist.